

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Ивановский государственный энергетический  
университет им. В.И. Ленина»

**В. А. Горбунов**

**Использование нейросетевых технологий  
для повышения энергетической эффективности  
теплотехнологических установок**

Научное издание

**Иваново 2011**

УДК 536.24: 621.771

Г 67

**Горбунов В.А.** Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011.– 476 с.

ISBN 978-5-89482-793-3

В монографии приводятся примеры использования нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности технологических и энергетических установок на стадии принятия решения по их проектированию и их эксплуатации.

Предназначена для студентов специальности 140105 «Энергетика теплотехнологий» по выполнению работ по курсам: «Тепломассообмен», «Высокотемпературные теплотехнологические установки», «Электротермические установки в теплотехнологии», «Инновационные теплогенерирующие технологии», «Энергосбережение в теплотехнологиях» и может быть полезно инженерам и научным работникам, работающим в области теплотехники и занимающихся теплотехнологиями.

Табл. 37. Ил. 101. Библиогр.: 134 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

Рецензент

кафедра теплофизики и энергетики высокотемпературных процессов ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

ISBN

© В. А. Горбунов, 2011

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| Введение .....   | 7  |
| 1. Нейросетевые технологии .....   | 8  |
| 1.1. Нейронные сети. Виды нейронов .....   | 10 |
| 1.2. Архитектура сетей.....  | 32 |
| 1.3. Нейросетевые модели сложных инженерных систем.....  | 35 |
| 1.4. Применение нейросетевого программного обеспечения<br>и его возможности.....   | 46 |
| 1.5. Профессиональное нейросетевое программное<br>обеспечение.....   | 59 |
| 2. Использование нейросетевых технологий для<br>эффективности использования многоцелевых<br>вычислительных комплексов при решении задач<br>теплообмена .....                                     | 64 |
| 2.1. Принципы разработки нейроимитаторов .....   | 64 |
| 2.2. Повышение эффективности использования<br>многоцелевых вычислительных комплексов при решении<br>задач теплообмена на основе определения точности<br>решения на стадии постановки задачи..... | 67 |
| 2.3. Решение задачи нагрева металла при граничных<br>условиях первого рода и определение точности этого<br>решения с помощью нейросети.....  | 75 |
| 2.4. Решение задачи нагрева металла при ГУ второго рода<br>и определение точности этого решения с помощью<br>нейросети.....  | 82 |
| 2.5. Решение задачи нагрева металла с переменными<br>теплофизическими свойствами при граничных условиях<br>первого рода и определение точности этого решения с<br>помощью нейросети.....         | 86 |
| 3. Использование нейросетевых технологий при выборе<br>технического решения реконструкции<br>теплотехнологических установок для повышения их<br>эффективности .....                              | 90 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.1. Решение задачи расчета печи, молота и оптимизации режима работы установки .....  | 90  |
| 3.2. Применение нейросетевой технологии для моделирования установки <i>печь–молот</i> .....   | 134 |
| 3.3. Решение задачи расчета печи, молота, рекуператора и оптимизации режима работы установки <i>печь–молот–рекуператор</i> .....                                  | 144 |
| 3.4. Применение нейросетевой технологии для обоснования целесообразности применения в установке <i>печь–молот</i> теплообменника для подогрева воздуха .....      | 152 |
| 4. Использование нейросетевых технологий для повышения эффективности тепловых и энергетических установок.....   | 167 |
| 4.1. Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности газовой утилизационной бескомпрессорной турбины (ГУБТ).....                 | 167 |
| 4.2. Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности камерных кузнечных печей .....  | 207 |
| 5. Применение нейросетевой технологии при прогнозировании точности вычисления параметров качества нагрева металла в камерных печах в пакете <i>Phoenics</i> ..... | 254 |
| 5.1. Математическая модель камерной кузнечной печи № 2 в многоцелевом вычислительном комплексе .....  | 254 |
| 5.2. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными .....   | 272 |
| 5.3. Математическая модель камерной нагревательной печи №5 с учетом переменных теплофизических свойств .  | 275 |
| 5.4. Создание базы данных .....   | 280 |
| 5.5. Обработка результатов с помощью нейронных сетей ..   | 281 |
| 5.6. Проверка адекватности нейросети на печи №3 .....   | 285 |
| 6. Обучение нейросетей с помощью сложных математических моделей и на этой основе более  |     |

|   |     |
|---|-----|
| совершенная организация работы теплотехнологических установок.....  | 290 |
| 6.1. Влияние на энергетическую эффективность переходных процессов в теплотехнологических установках.....  | 290 |
| 6.2. Определение производительности нагревательных печей для проектирования нового кузнечного цеха при известной номенклатуре изделий, выпускаемых цехом..... | 300 |
| 6.3. Использование параметра стабилизации для улучшения организации работы производства действующего кузнечно-штамповочного цеха .....                        | 315 |
| 6.4. Оптимизация организации и прогнозирование работы теплотехнологических установок при работе производства с полной загрузкой.....                          | 320 |
| 6.5. Математическая модель кузнечно-штамповочного производства на основании решения задачи двухуровневой оптимизации.....                                     | 332 |
| 6.6. Тренажёры менеджеров и теплотехнологов машиностроительного производства .....  | 351 |
| 6.7. Использование нейросетей для определения технически - обоснованных режимов работы установок ....   | 362 |
| 7. Использование природных алгоритмов для решения оптимизационных задач по режимам работы теплотехнологических установок.....                                 | 365 |
| 7.1. Оптимальный нагрев металла с минимальным расходом топлива в камерной термической печи на основе генетического алгоритма.....                             | 365 |
| Заключение.....   | 385 |
| Библиографический список.....   | 389 |
| Приложение 1.....   | 405 |
| Приложение 2.....   | 406 |
| Приложение 3.....   | 407 |
| Приложение 4.....   | 408 |
| Приложение 5.....   | 409 |
| Приложение 6.....   | 410 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| Приложение 7 .....  | 411 |
| Приложение 9 .....  | 413 |
| Приложение 10 ..... | 414 |
| Приложение 11 ..... | 415 |
| Приложение 12 ..... | 416 |
| Приложение 13 ..... | 417 |
| Приложение 14 ..... | 418 |
| Приложение 15 ..... | 419 |
| Приложение 16 ..... | 420 |
| Приложение 17 ..... | 421 |
| Приложение 18 ..... | 422 |
| Приложение 19 ..... | 423 |
| Приложение 20 ..... | 424 |
| Приложение 21 ..... | 425 |
| Приложение 23 ..... | 427 |
| Приложение 24 ..... | 428 |
| Приложение 25 ..... | 429 |
| Приложение 26 ..... | 430 |
| Приложение 27 ..... | 431 |
| Приложение 28 ..... | 435 |
| Приложение 29 ..... | 439 |
| Приложение 30 ..... | 443 |
| Приложение 31 ..... | 447 |
| Приложение 32 ..... | 451 |
| Приложение 33 ..... | 455 |
| Приложение 34 ..... | 459 |
| Приложение 35 ..... | 463 |
| Приложение 36 ..... | 464 |
| Приложение 37 ..... | 467 |
| Приложение 38 ..... | 471 |

## Введение

При решении технических задач инженеру приходится сталкиваться с рядом проблем, связанных с проектированием новых и эксплуатацией действующих теплотехнологических установок. При проектировании новых теплотехнологических установок специалист опирается, в первую очередь, на свой опыт, который приобретается им во время практической работы при проектировании. Качество принимаемых им решений во многом зависит от того инструментария, которым он пользуется. В качестве инструментария используется техническая литература, патенты, результаты научных исследований и опыт использования предлагаемых технических решений в этой области. Во время эксплуатации теплотехнологических и энергетических установок возникают проблемы, связанные с качеством производимой продукции и эффективным использованием оборудования. Эксплуатация оборудования также зависит от качества проектных решений и их реализации в полном объёме. Актуальными являются и вопросы эффективной энергетической эксплуатации оборудования. Эти вопросы в основном решаются за счёт накопленного эксплуатационным персоналом опыта. В последнее время для этих целей стало активно использоваться математическое моделирование процессов, происходящих в энергетических установках.

Математические модели процессов строятся на основе решения систем дифференциальных уравнений, иногда систем интегро-дифференциальных уравнений, описывающих процессы в теплотехнологических и энергетических установках. Для моделирования в основном используются численные методы.

Качество принимаемых решений в проектировании и эксплуатации теплотехнологического оборудования во

многим зависит от понимания физических процессов, происходящих внутри этого оборудования, также от сложности разработанных математических моделей. Математические модели часто упрощают, ограничивают их действия определёнными допущениями. Это делается по разным причинам. В основном это связано с уровнем развития вычислительной техники (скоростью выполнения задач, возможностями памяти процессоров и так далее). Иногда время выполнения задачи является ограничением, например, для АСУ.

Данное исследование посвящено решению конкретных прикладных задач в области повышения энергетической эффективности теплотехнологического и энергетического оборудования на основе алгоритмов искусственного интеллекта – нейронных сетей.

## **1. Нейросетевые технологии**

Нейросетевые технологии появились на основе нейронных сетей, т.е. программ, имеющих структуру, схожую с работой мозга. Это направление принадлежит к одному из направлений в развитии искусственного интеллекта.

Под искусственным интеллектом в настоящее время понимают процесс создания машин, которые способны действовать таким образом, что будут восприниматься человеком как разумные. Это может быть повторение поведения человека или выполнение более простых задач, например, выживание в динамически меняющейся обстановке [1].

В настоящее время искусственный интеллект по-разному понимается людьми и поэтому его делят на сильный и слабый искусственный интеллект. Под сильным понимают программное обеспечение, благодаря которому компьютеры могут думать так же, как люди, и приобретать

сознание как разумные существа, под слабым искусственным интеллектом понимают широкий диапазон технологий искусственного интеллекта в виде программного обеспечения, которое может добавляться в существующие системы и придавать им различные “разумные” свойства [1].

К слабому искусственному интеллекту относятся нейросетевые технологии. Нейронные сети представляют собой упрощенную модель человеческого мозга (рис.1.1). Мозг состоит из нейронов, которые можно представить как индивидуальные процессоры. Нейроны соединяются друг с другом с помощью нервных окончаний двух типов: синапсов, через которые в нейрон поступают сигналы, и аксонов, через которые нейрон передаёт сигнал далее.

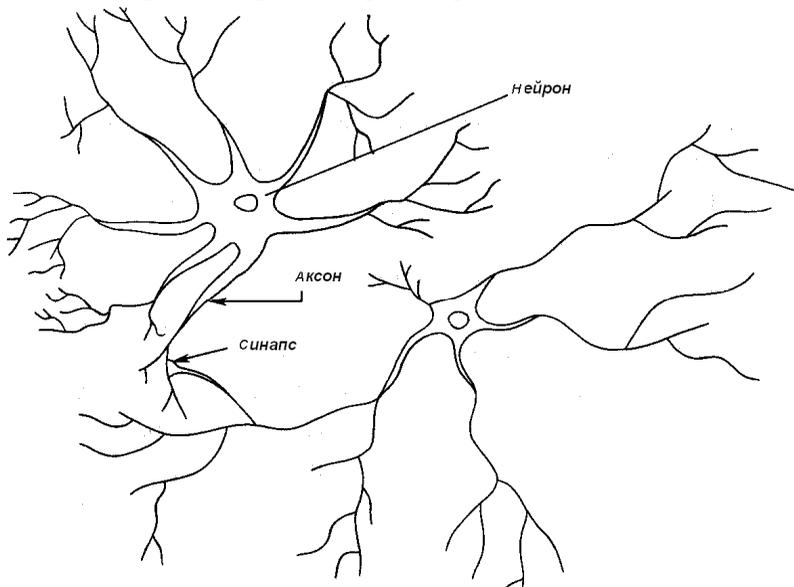


Рис. 1.1. Упрощенная модель человеческого мозга

Человеческий мозг состоит примерно из  $10^{11}$  нейронов, каждый из которых связан с другими нервными

окончаниями синапсами и аксонами. Количество таких связей у каждого нейрона примерно 1000, в коре головного мозга их намного больше.

Структура мозга является многослойной, и имеет большое количество внутренних циклов. С большими упрощениями работу мозга можно представить схематично (рис. 1.2). Внешний слой сети передаёт импульсы из внешней среды, средний слой (кора головного мозга) обрабатывает импульсы, а затем выходной слой выдаёт результат (действие) обратно во внешнюю среду.

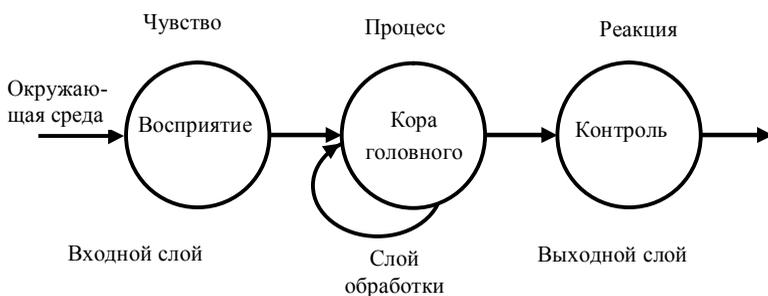


Рис. 1.2. Многослойная архитектура мозга

Искусственные нейронные сети имитируют работу мозга. Информация передаётся между нейронами, а структура и вес нервных окончаний определяют поведение нейросети.

### 1.1. Нейронные сети. Виды нейронов

Искусственная нейронная сеть – это набор нейронов, соединённых между собой. Как правило, передаточные функции всех нейронов в сети фиксированы, а вес является параметром сети и может изменяться. Некоторые входы нейронов являются внешними входами сети, а некоторые выходы – внешними выходами сети.

Подавая любые числовые значения на входы сети, можно получать набор числовых значений на выходе сети. Работа нейросети заключается в преобразовании входного вектора в выходной вектор. Результат этого преобразования будет зависеть от параметров сети – весов взаимосвязей.

Практически любую задачу можно решить, используя алгоритм нейросети. Задача обычно решается в два этапа.

На первом этапе выбирается тип сети (её архитектура).

Во время второго подбираются параметры сети – вес взаимосвязей (её обучение).

Выбор типа сети – задача сложная, но на данный момент существует несколько десятков эффективных математически доказанных нейросетевых архитектур. Наиболее популярные и изученные архитектуры [2] – многослойный персептрон, сеть каскадной корреляции Фальмана, сеть Вольтерри, сети с обратной связью между различными слоями нейронов – рекуррентные сети (сеть Хопфилда, сеть Хемминга, сеть ВАН, персептронная сеть с обратной связью, сеть Эльмана, сеть RTRN), сети с самоорганизацией на основе конкуренции (сеть Кохонена, сеть нейронного газа), сети с самоорганизацией корреляционного типа (сеть PCA, сеть ICA), нечёткие нейронные сети (сеть TSK, сеть Ванга–Менделя).

До выбора нейросетевой архитектуры необходимо определить, какие модели нейронов будут использоваться. В настоящий момент используются следующие модели нейронов.

### **Простой персептрон**

Структурная схема простого персептрона представлена на рис. 1.3.

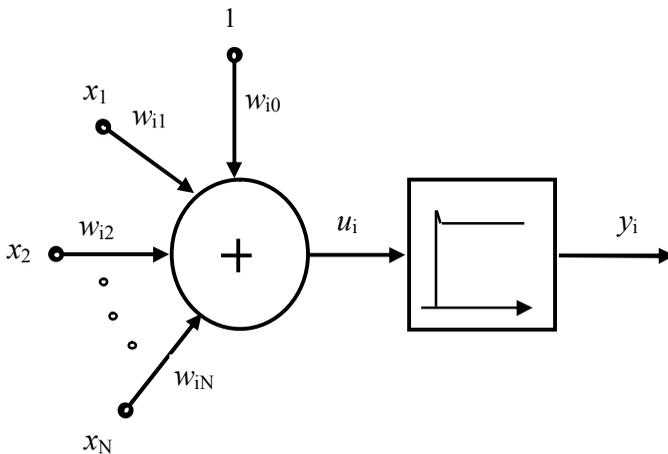


Рис. 1.3. Модель простого перцептрона

Весовые коэффициенты входов сумматора, на которые поступают входные сигналы  $x_j$  ( $j=1,2,\dots,N$ ), суммируются с учётом соответствующих весов  $w_{ij}$  (сигнал поступает в направлении от узла  $j$  к узлу  $i$ ) в сумматоре, после чего результат сравнивается с пороговым значением  $w_{i0}$ . Выходной сигнал нейрона  $y_i$  определится при этом зависимостью

$$y_i = f\left(\sum_{j=1}^N w_{ij} x_j(t) + w_{i0}\right). \quad (1.1)$$

Аргументом функции выступает суммарный сигнал  $u_i = \sum_{j=1}^N w_{ij} x_j(t) + w_{i0}$ . Функция  $f(u_i)$  называется функцией активации. Нелинейная функция активации перцептрона представляет собой дискретную функцию ступенчатого типа, вследствие чего выходной сигнал

нейрона может принимать только два значения – 0 или 1 в соответствии с правилом

$$y_i(u_i) = \begin{cases} 1 & \text{для } u \geq 0 \\ 0 & \text{для } u < 0, \end{cases} \quad (1.2)$$

где  $u_i$  обозначен выходной сигнал сумматора

$$u_i = \sum_{j=0}^N w_{ij} x_j. \quad (1.3)$$

В приведённой формуле подразумевается, что имеющий длину  $N$  вектор  $x$  дополнен нулевым членом  $x_0=1$ , формирующим сигнал поляризации,  $x = [x_0, x_1, \dots, x_N]$ . Обучение персептрона требует наличия учителя и состоит в таком подборе весов  $w_{ij}$ , чтобы выходной сигнал  $y_i$  был наиболее близок к заданному значению  $d_i$ . Это обучение гетероассоциативного типа, при котором каждой обучающей выборке, представляемой вектором  $x$ , априори поставлено в соответствие ожидаемое значение  $d_i$  на выходе  $i$ -го нейрона.

Обучение персептрона состоит в подборе весов и состоит из следующих шагов:

1. В качестве первоначального выбора значений весов  $w_{ij}$  используются случайные значения. На вход нейрона подаётся обучающий вектор  $x$  и рассчитывается значение выходного сигнала  $y_i$ . По результатам сравнения

фактически полученного значения  $y_i$  с заданным значением  $d_i$  уточняются значения весов.

2. Если значение  $y_i$  совпадает с ожидаемым значением  $d_i$ , то весовые коэффициенты  $w_{ij}$  не изменяются.

3. Если  $y_i=0$ , а соответствующее значение  $d_i=1$ , то значения весов уточняются в соответствии с формулой  $w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + x_j$ , где  $t$  обозначает номер предыдущего цикла, а  $(t+1)$  – номер текущего цикла.

4. Если  $y_i=1$ , а соответствующее значение  $d_i=0$ , то значения весов уточняются в соответствии с формулой  $w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) - x_j$ .

По завершении уточнения весовых коэффициентов подставляется очередной обучающий вектор  $x$  и связанное с ним ожидаемое значение  $d_i$  и значения весов уточняются заново. Этот процесс многократно повторяется на всех обучающих выборках, пока не будут минимизированы различия между всеми значениями  $y_i$  и соответствующими им ожидаемыми значениями  $d_i$ .

Минимизация различий между фактическими реакциями нейрона  $y_i$  и ожидаемыми значениями  $d_i$  может быть представлена как минимизация конкретной функции погрешности целевой функции  $E$ , чаще всего определяемой как

$$E = \sum_{k=1}^p \left( y_i^{(k)} - d_i^{(k)} \right)^2, \quad (1.4)$$

где  $p$  означает количество предъявленных обучающих выборок.

Такая минимизация при использовании правила персептрона проводится по методу безградиентной оптимизации. Эффективность метода при большом количестве обучающих выборок относительно невелика, а количество циклов обучения и его длительность возрастают очень быстро, причём нет гарантии достижения минимума целевой функции.

### **Сигмоидальный нейрон**

Сигмоидальный нейрон имеет структуру, подобную модели простого персептрона. Разница заключается в функции активации, которая у сигмоидального нейрона является непрерывной и выражается в виде сигмоидальной униполярной или биполярной функцией. Униполярная функция, как правило, представляется формулой (рис. 1.4)

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\beta x}}; \quad (1.5)$$

биполярная функция записывается в виде (рис. 1.5)

$$f(x) = \tanh(\beta x). \quad (1.6)$$

В этих формулах параметр  $\beta$  подбирается пользователем. Его значение влияет на форму функции активации. При  $\beta \rightarrow \infty$  сигмоидальная функция превращается в функцию ступенчатого типа, идентичную функции активации персептрона. При малых значениях функции график получается достаточно пологий.

Поэтому на практике чаще всего для упрощения используют значение  $\beta = 1$ .

Одним из важных свойств сигмоидальной функции является её дифференцируемость. Для униполярной функции имеем

$$\frac{df(x)}{dx} = \beta \exp(\beta x) / (\exp(\beta x) + 1)^2, \quad (1.7)$$

тогда как для биполярной функции

$$\frac{df(x)}{dx} = \beta(1 + f^2(x)). \quad (1.8)$$

И в первом и во втором случаях график изменения отношения производной к параметру  $\beta$  относительно переменной  $x$  имеет форму с явным максимумом, который соответствует значению  $x = 0$  (рис.1.6).

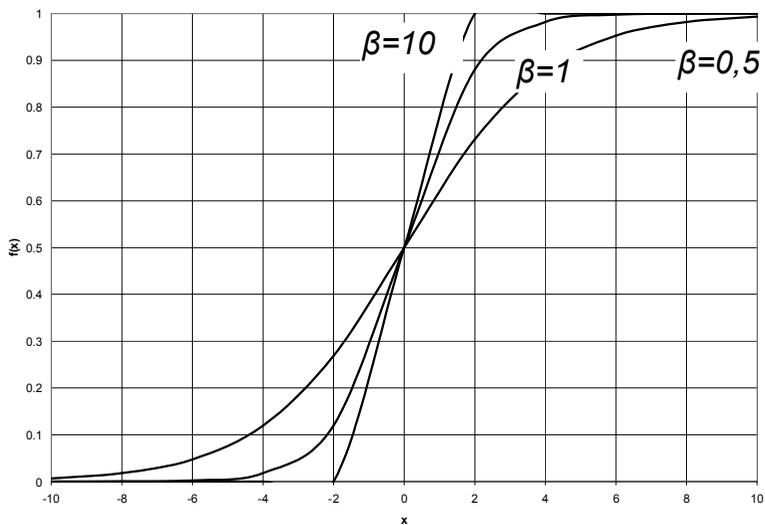


Рис. 1.4. График сигмоидальной униполярной функции при различных значениях  $\beta$

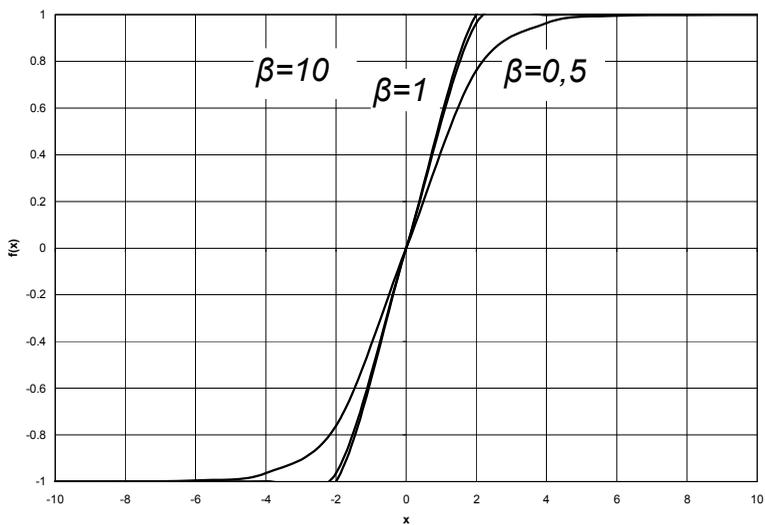


Рис. 1.5. График сигмоидальной биполярной функции при различных значениях  $\beta$

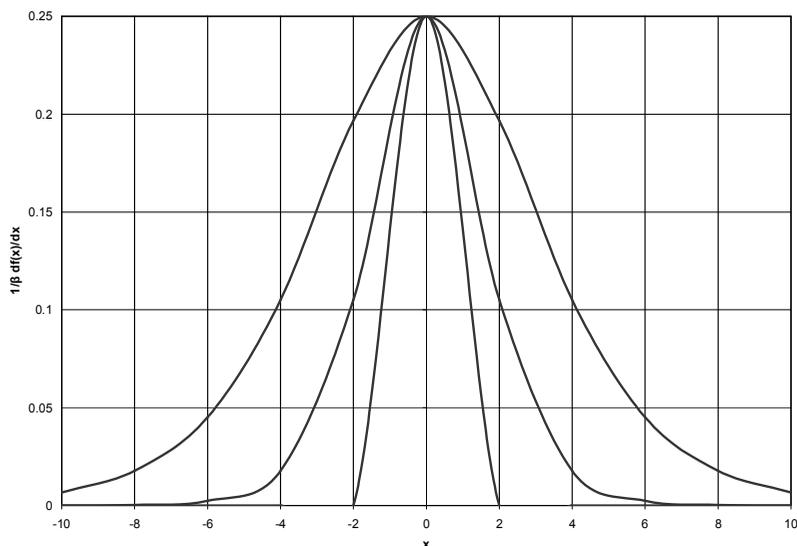


Рис. 1.6. График отношения производной от сигмоидальной функции к коэффициенту  $\beta$  от переменной  $x$  при различных значениях коэффициента  $\beta$

### Нейрон типа *адалайн*

Нейрон типа *адалайн* (англ. ADActive Linear Neuron) – адаптивный линейный нейрон с адаптивным способом подбора весовых коэффициентов (рис. 1.7). По методу весового суммирования сигналов нейрон типа *адалайн* аналогичен представленным ранее моделям нейронов. Функция активации имеет типа *sign*, т.е.

$$y_i(u_i) = \begin{cases} 1 & \text{для } u \geq 0, \\ -1 & \text{для } u < 0. \end{cases} \quad (1.9)$$

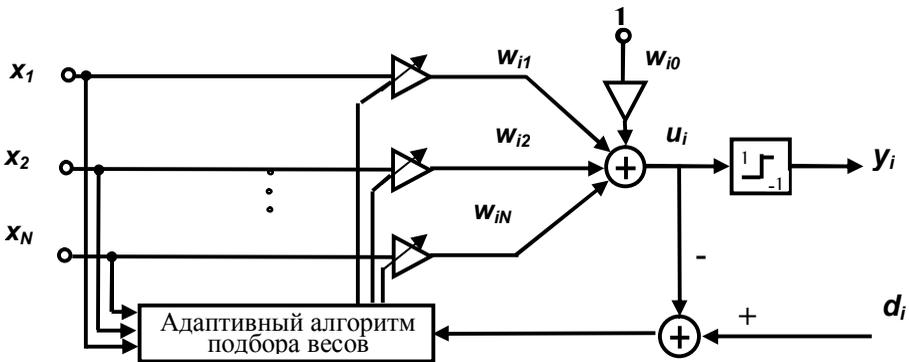


Рис. 1.7. Структурная схема нейрона типа “адалайн”

Адаптивный подбор весовых коэффициентов осуществляется в процессе минимизации квадратичной ошибки, определяемой как

$$E(w) = \frac{1}{2} e_i^2 = \frac{1}{2} \left[ d_i - \left( \sum_{j=0}^N w_{ij} \cdot x_j \right) \right]^2. \quad (1.10)$$

Несмотря на нелинейный характер модели, в целевой функции присутствуют только линейные члены, представляющие собой сумму взвешенных входных сигналов. В связи с выполнением условия непрерывности целевой функции стало возможным применение алгоритма градиентного обучения. Как и в ситуации с сигмоидальным нейроном, в алгоритме для минимизации целевой функции применяется метод наискорейшего спуска. Значения весовых коэффициентов могут уточняться либо дискретным способом

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) - \eta e_i x_j, \quad (1.11)$$

либо аналоговым способом – путём решения разностных уравнений вида

$$\frac{dw_{ij}}{dx} = \mu e_i x_j, \quad (1.12)$$

в которых в соответствии с зависимостью (1.10)

$$e_i = d_i - \left( \sum_{j=0}^N w_{ij} x_j \right).$$

Несмотря на то, что *адалайн* имеет

на выходе нелинейный блок, он всё же считается линейным элементом, поскольку в определении целевой функции нелинейности отсутствуют. А подбор весов происходит так, как будто никакой нелинейности не существует.

В практических приложениях нейроны типа “адалайн” всегда используются группами, образуя слои, называемые модалайн (англ. many adaline – много адалайн). Каждый входящий в слой нейрон обучается по правилу адалайн. Выходные сигналы отдельных нейронов такого слоя могут формироваться различными способами. В настоящее время предложено три базовых типа межнейронных соединений: OR, AND и мажоритарное. На рис. 1.8 *а*, *б* и *в* показаны схемы таких соединений.

Конкретные сигналы  $y_i$  суммируются с учётом порогового значения, устанавливаемого отдельно для каждого типа связи. Для схемы OR порог имеет значение  $(n-1)$ , для схемы AND – значение  $(1-n)$ , а для мажоритарной схемы – нулевое значение. Благодаря применению функции активации выходной сигнал  $y$  принимает значение +1, когда хотя бы один из входных сигналов имеет значение +1 (OR), когда все входные сигналы  $y_i$  имеют значения +1 (AND)

либо когда большинство сигналов  $y_i$  имеет значение +1 (мажоритарное соединение).

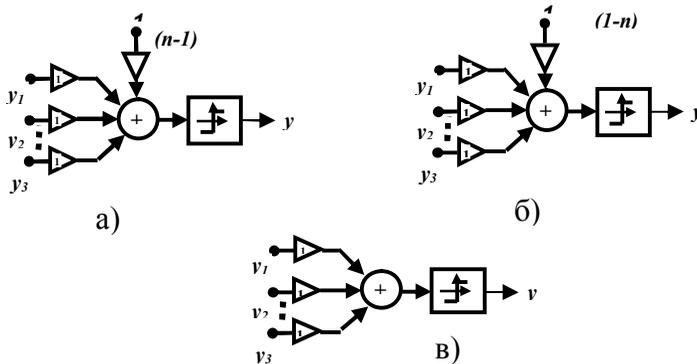


Рис. 1.8. Сеть мадалайн с выходами типа: а – OR; б – AND; в – мажоритарный

### Нейрон типа инстар и оутстар

Нейроны типа инстар и оутстар – это взаимодополняющие элементы. Инстар адаптирует вес сигналов, поступающих на сумматор нейрона, к своим входным сигналам, а оутстар согласовывает вес выходящих из нейрона связей с узлами, в которых формируются значения выходных сигналов. На рис. 1.9 представлена структурная схема инстара.

Сигналы  $x_j$ , подаваемые с весовыми коэффициентами  $w_{ij}$  на вход  $i$ -го инстара, суммируются в соответствии с выражением

$$u_i = \sum_{j=0}^N w_{ij} x_j. \quad (1.13)$$

В соответствии с функцией активации на выходе нейрона вырабатывается выходной сигнал  $y_i = f(u_i)$ .

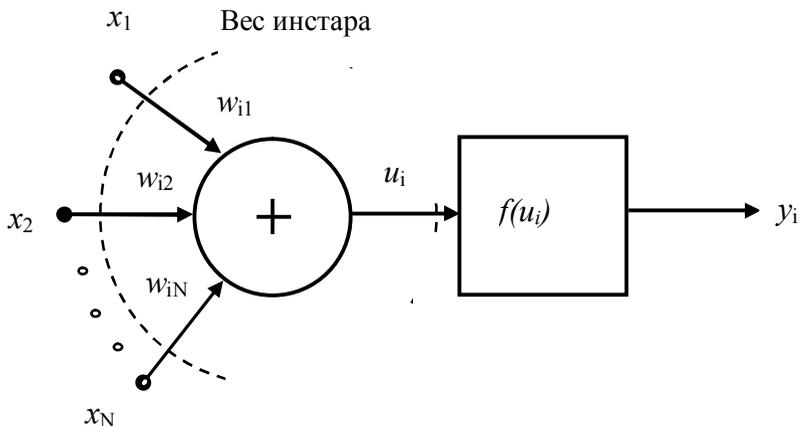


Рис. 1.9. Структурная схема инстара

Часто в инстаре применяется линейная форма функции активации, и тогда  $y_i = u_i$ . Обучение инстара (подбор весов  $w_{ij}$ ) производится по правилу, в соответствии с которым

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta y_i [x_j - w_{ij}(t)], \quad (1.14)$$

где  $\eta$  – это коэффициент обучения, значение которого, как правило, выбирается из интервала  $(0...1)$ . Входные данные, представляемые в виде вектора  $x$ , выражены чаще всего в нормализованной форме, в которой  $\|x\|=1$ . Нормализация вектора выполняется по формуле

$$x_j \leftarrow \frac{x_j}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}}. \quad (1.15)$$

Результаты обучения по этому методу в значительной степени зависят от коэффициента обучения  $\eta$ . При выборе  $\eta=1$  веса  $w_{ij}$  становятся равными значениям  $x_j$  уже после первой итерации. Ввод очередного входного вектора  $x$  вызовет адаптацию веса к новому вектору и абсолютное “забывание” предыдущих значений. Выбор  $\eta < 1$  приводит к тому, что в результате обучения весовые коэффициенты  $w_{ij}$  принимают усреднённые значения обучающих векторов  $x$ .

Инстар может обучаться как с учителем, так и без учителя. Во втором случае в качестве значения  $y_j$  принимается фактическое значение выходного сигнала инстара. При обучении с учителем значение  $y_j$  заменяется ожидаемым значением  $d_i$ , т.е.  $y_j = d_i$ .

Нейрон типа оутстар представляет собой комплементарное дополнение инстара. Если инстар обучается с целью распознавать вектор, подаваемый на его вход, то оутстар должен генерировать вектор, необходимый связанным с ним нейронам (рис. 1.10).  $i$ -й нейрон-источник высылает свой выходной сигнал  $y_j$  взаимодействующим с ним нейронам, выходные сигналы которых обозначены  $y_j (j=1, 2, \dots, M)$ .

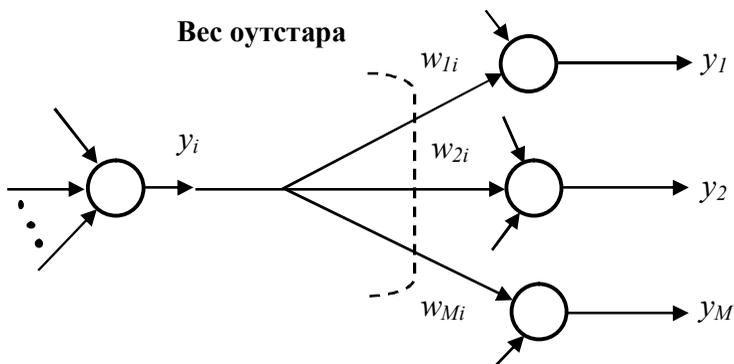


Рис. 1.10. Структурная схема оутстара

Оутстар, как правило, является линейным нейроном. Обучение состоит в таком подборе его веса  $w_{ij}$ , чтобы выходные сигналы оутстара были равны ожидаемым значениям  $y_j$  взаимодействующих с ним нейронов. Обучение оутстара проводится в соответствии с выражением

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta y_i [y_j - w_{ij}(t)], \quad (1.16)$$

в котором  $\eta$  – это коэффициент обучения, а  $y_j$  – выходной сигнал  $i$ -го нейрона, выступающего в роли источника. Зависимость (1.16) для оутстара аналогична выражению (1.14), по которому обучается инстар. В режиме распознавания в момент активации нейрона источника оутстар будет генерировать сигналы, соответствующие ожидаемым значениям  $y_j$ .

Нейроны типа инстар и оутстар существенным образом отличаются от нейронов персептрона, сигмоидальный нейрона и нейрона типа “адалайн”, основу обучения которых составляет пара обучающих векторов ( $x$ ,  $d$ ). Они могут обучаться только с учителем. При обучении инстара и оутстара весовые коэффициенты подстраиваются под входные или выходные векторы, и обучение может производиться как с учителем, так и без него.

### Нейрон типа WTA

Нейроны типа WTA (Winner Takes All – победитель получает всё) имеют входной модуль в виде стандартного сумматора, рассчитывающего сумму входных сигналов с соответствующими  $w_{ij}$ . Выходной сигнал  $i$ -го сумматора определяется согласно формуле (1.13).

Группа конкурирующих между собой нейронов (рис. 1.11) получает одни и те же входные сигналы  $x_j$ . В зависимости от фактических значений весовых коэффициентов суммарные сигналы  $u_i$  отдельных нейронов могут различаться. По результатам сравнения этих сигналов победителем признаётся нейрон, значение  $u_i$  у которого оказалось наибольшим. Нейрон-победитель вырабатывает на своём выходе состояние 1, а остальные (проигравшие) нейроны переходят в состояние 0.

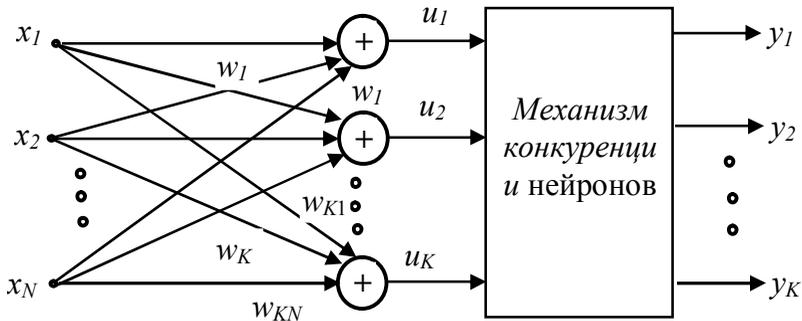


Рис. 1.11. Схема соединения нейронов типа WTA

Для обучения нейронов типа WTA не требуется учитель, оно протекает аналогично обучению инстара, с использованием нормализованных входных векторов  $\mathcal{X}$ . На начальном этапе случайным образом выбираются коэффициенты веса каждого нейрона, нормализуются относительно 1. После подачи первого входного вектора  $x$  определяется победитель этапа. Победивший в этом соревновании нейрон переходит в состояние 1, что позволяет ему провести уточнение весов его входных линий  $w_{ij}$ .

Проигравшие нейроны формируют на своих выходах состояние 0, что блокирует процесс уточнения их весовых коэффициентов. Вследствие бинарности значений выходных сигналов конкурирующих нейронов (0 или 1) правило (1.16) может быть несколько упрощено:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta[x_j - w_{ij}(t)]. \quad (1.17)$$

На функционирование нейронов типа WTA существенное влияние оказывает нормализация входных

векторов и весовых коэффициентов. Выходной сигнал  $u_i$   $i$ -го нейрона может быть описан векторным отношением

$$u_i = w^T x = |w||x| \cos \varphi_i. \quad (1.18)$$

Поскольку  $|w| = |x| = 1$ , значение  $u_i$  определяется углом между векторами  $x$  и  $w$ ,  $u_i = \cos \varphi_i$ . Поэтому победителем оказывается нейрон, вектор веса которого оказывается наиболее близким текущему обучающему вектору  $x$ . В результате победы нейрона уточняются его коэффициенты веса, значения которых приближаются к значениям текущего обучающего вектора  $x$ . Если на вход сети будет подаваться множество близких по значению векторов, побеждать будет один и тот же нейрон. Поэтому его вес станет равным усреднённым значениям тех входных векторов, благодаря которым данный нейрон оказался победителем. Проигравшие не изменяют свой вес. Только победа при очередном представлении входного вектора позволит им произвести уточнение весовых коэффициентов и продолжить процесс обучения в случае ещё одной победы.

Следствием такой конкуренции становится самоорганизация процесса обучения. Нейроны уточняют свой вес таким образом, что при предъявлении группы близких по значениям входных векторов победителем всегда оказывается один и тот же нейрон. В процессе функционирования именно этот нейрон благодаря соперничеству распознает свою категорию входных данных. Системы такого типа чаще всего применяются для классификации векторов.

Проблемой при обучении WTA остаётся проблема мёртвых нейронов, которые после инициализации ни

одного раза в конкурентной борьбе не победили. Они остались в стадии сформированной в начальный момент. Каждый мёртвый нейрон уменьшает эффективное количество элементов, прошедших обучение, и увеличивает погрешность распознавания данных. Для устранения этой проблемы используют модифицированное обучение, основанное на учёте прошлых побед каждого нейрона и штрафах (временной дисквалификации) тех из них, которые побеждали чаще всего. Дисквалификация слишком активных нейронов может осуществляться либо назначением порогового числа побед, по достижении которого наступает обязательная пауза, либо уменьшением фактического значения  $u_i$  при нарастании количества побед  $i$ -го нейрона.

### Нейрон типа Хебба

В процессе исследования нервных клеток Д. Хебб [3] заметил, что связь между двумя клетками усиливается, если обе клетки пробуждаются (становятся активными) в один и тот же момент. Если  $j$ -я клетка с выходным сигналом  $y_j$  связана с  $i$ -й клеткой, имеющей выходной сигнал  $y_i$ , связью с весом  $w_{ij}$ , то на силу связи этих клеток влияют значения выходных сигналов  $y_i$  и  $y_j$ .

Д. Хебб предложил формальное правило, в котором отразились результаты его наблюдений. В соответствии с этим правилом вес  $w_{ij}$  нейрона изменяется пропорционально произведению его входного и выходного сигналов.

$$\Delta w_{ij} = \eta \cdot y_j \cdot y_i, \quad (1.19)$$

где  $\eta$  – это коэффициент обучения, значение которого выбирается в интервале (0,1). Правило Хебба может применяться для нейронных сетей различных типов с разнообразными функциями активации моделей отдельных нейронов.

Структурная схема нейрона Хебба (рис. 1.12) соответствует стандартной форме модели нейрона. Связь с весом  $w_{ij}$ , способ подбора значения которого задаётся отношением (1.19), соединяет входной сигнал  $y_j$  с сумматором  $i$ -го нейрона, вырабатывающего выходной сигнал  $y_i$ . Обучение нейрона по правилу Хебба может проводиться как с учителем, так и без него. Во втором случае в правиле Хебба используется фактическое значение  $y_i$  выходного сигнала нейрона. При обучении с учителем вместо значения выходного сигнала  $y_i$  используется ожидаемая от этого нейрона реакция  $d_i$ . В этом случае выражение (1.19) запишется в виде

$$\Delta w_{ij} = \eta \cdot y_j \cdot d_i. \quad (1.20)$$

Правило Хебба характеризуется тем, что в результате его применения вес может принимать произвольно большие значения, поскольку в каждом цикле обучения происходит суммирование текущего значения веса и его приращения  $\Delta w_{ij}$ :

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}. \quad (1.21)$$

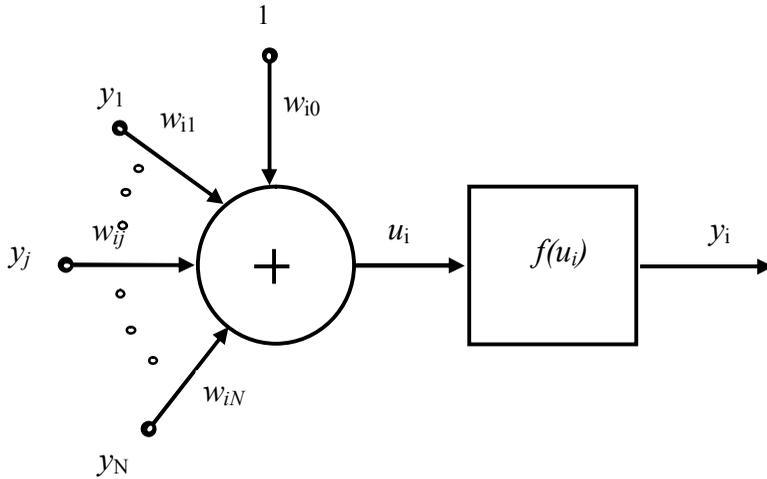


Рис. 1.12. Структурная схема нейрона Хебба

Один из способов стабилизации обучения по правилу Хебба состоит в учёте для уточнения веса последнего значения  $w_{ij}$ , уменьшенного на коэффициент забывания  $\gamma$ . При этом правило Хебба представляется в виде

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t)(1-\gamma) + \Delta w_{ij} . \quad (1.22)$$

Значение коэффициента забывания выбирается из интервала  $(0..1)$  и чаще всего составляет некоторый процент от коэффициента обучения  $\eta$ . Применение больших значений  $\gamma$  приводит к тому, что нейрон забывает значительную часть того, чему он обучился в прошлом. Рекомендуемые значения коэффициента забывания -  $\gamma < 0,1$ , при которых нейрон сохраняет большую часть информации, накопленной в процессе обучения.

## Стохастический нейрон

В отличие от всех детерминированных моделей, в стохастической модели выходное состояние нейрона зависит не только от взвешенной суммы входных сигналов, но и от некоторой случайной переменной, значения которой выбираются при каждой реализации из интервала  $(0...1)$ .

В стохастической модели нейрона выходной сигнал  $y_i$  принимает значения  $\pm 1$  с вероятностью  $P(y_i = \pm 1) = 1 / (1 + \exp(\mp 2 \cdot \beta \cdot u_i))$ , где  $u_i$  обозначена взвешенная сумма входных сигналов  $i$ -го нейрона, а  $\beta$  – это положительная константа, чаще всего равная 1. Процесс обучения нейрона в стохастической модели нейрона состоит из следующих этапов.

1. Расчёт взвешенной суммы  $u_i = \sum_{j=0}^N w_{ij} \cdot x_j$  для

каждого нейрона сети.

2. Расчёт вероятности того, что  $y_i$  примет значение  $\pm 1$  в соответствии с формулой

$$P(y_i = \pm 1) = \frac{1}{(1 + \exp(\mp 2 \cdot \beta \cdot u_i))}. \quad (1.23)$$

3. Генерация значений случайной переменной  $R \in 0...1$  и формирование выходного сигнала  $y_i = \pm 1$ , если  $R < P(y_i = \pm 1)$  или  $y_i = \mp 1$ .

4. Определённый таким образом процесс осуществляется на случайно выбранной группе нейронов, вследствие чего их состояние модифицируется в соответствии с предложенным правилом.

5. После фиксации отображённых нейронов их весовые коэффициенты модифицируются по применяемому правилу уточнения веса. При обучении с учителем адаптация весов производится по формуле

$$\Delta w_{ij} = \eta \cdot x_j \cdot (d_i - y_i). \quad (1.24)$$

Такой способ подбора весов приводит в результате к минимизации целевой функции, определяемой как среднеквадратичная погрешность, рассчитываемая по всем  $n$  нейронам и  $p$  обучающим выборкам.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n (d_i^{(k)} - y_i^{(k)})^2. \quad (1.25)$$

## 1.2. Архитектура сетей

Модели нейронных сетей различаются по строению отдельных нейронов, по топологии связей между ними и по алгоритмам обучения. Для моделей, построенных подобно человеческому мозгу, характерна не слишком большая выразительность, легкое распараллеливание алгоритмов и связанная с этим высокая производительность параллельно реализованных нейронных сетей. Также для таких сетей характерно одно свойство, которое очень сближает их с человеческим мозгом – нейронные сети работают даже при условии неполной информации об окружающей среде, то есть, как и человек, они на вопросы могут отвечать не только "да" и "нет", но и "не знаю точно, но, скорее, да".

Архитектура сетей может быть любая по топологии связей между нейронами, лишь бы входы получали какие-нибудь сигналы, но в этом случае разобраться с архитектурой нейронных сетей практически невозможно.

Поэтому в настоящее время используют несколько стандартных архитектур, из которых путем вырезания лишнего или (реже) добавления строят большинство используемых сетей.

Сначала определяется, как будет согласована работа различных нейронов во времени. Как только в системе возникает более одного элемента, встают вопросы о синхронности функционирования. Для привычных нейросетевых программ, реализуемых на ЭВМ, такого вопроса обычно не стоит из-за свойств компьютера, на котором реализуются нейронные сети. Для других способов реализации такой вопрос весьма важен. Для нейронных сетей, синхронно функционирующих в дискретные моменты, где все нейроны срабатывают одновременно, для нейронных сетей можно выделить две базовых архитектуры – *слоистые и полносвязные сети*.

### **Слоистые сети**

Нейроны расположены в несколько слоев (рис. 1.13). Нейроны первого слоя получают входные сигналы, преобразуют их и через точки ветвления передают нейронам второго слоя. Далее работает второй слой и т.д. до  $k$ -го слоя, который выдает выходные сигналы. Если не оговорено противное, то каждый выходной сигнал  $i$ -го слоя подается на вход всех нейронов  $i+1$ -го. Число нейронов в каждом слое может быть любым и никак заранее не связано с количеством нейронов в других слоях. Стандартный способ подачи входных сигналов: все нейроны первого слоя получают каждый входной сигнал. Особое распространение получили трехслойные сети, в которых каждый слой имеет свое наименование: первый – входной, второй – скрытый, третий – выходной.

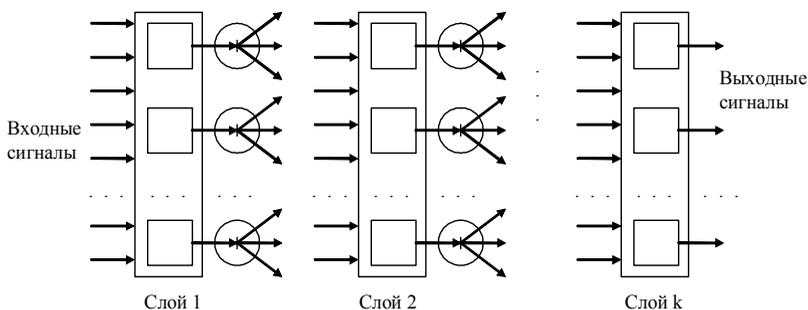


Рис. 1.13. Архитектура слоистой сети

### Полносвязные сети

Каждый нейрон передает свой выходной сигнал остальным нейронам, включая самого себя. Выходными сигналами сети могут быть все или некоторые выходные сигналы нейронов после нескольких тактов функционирования сети. Все входные сигналы подаются всем нейронам.

Элементы слоистых и полносвязных сетей могут выбираться по-разному. Существует, впрочем, стандартный выбор – нейрон с адаптивным неоднородным линейным сумматором на входе (рис. 1.3).

Для полносвязной сети входной сумматор нейрона фактически распадается на два: первый вычисляет линейную функцию от входных сигналов сети, второй – линейную функцию от выходных сигналов других нейронов, полученных на предыдущем шаге.

*Функция активации нейронов (характеристическая функция)*  $\varphi$  – нелинейный преобразователь, преобразующий выходной сигнал сумматора (рис. 1.3) – может быть одной и той же для всех нейронов сети. В этом случае сеть называют *однородной (гомогенной)*. Если же  $\varphi$  зависит еще от одного или нескольких параметров, значения которых меняются от нейрона к нейрону, то сеть называют *неоднородной (гетерогенной)*.

Составление сети из нейронов стандартного вида (рис. 1.3) не является обязательным. Слоистая или полносвязная архитектура не налагает существенных ограничений на участвующие в них элементы. Единственное жесткое требование, предъявляемое архитектурой к элементам сети, – это соответствие размерности вектора входных сигналов элемента (она определяется архитектурой) числу его входов.

Если полносвязная сеть функционирует до получения ответа заданного числа тактов  $k$ , то ее можно представить как частный случай  $k$ -слоистой сети, все слои которой одинаковы, и каждый из них соответствует такту функционирования полносвязной сети.

Существенное различие между полносвязной и слоистой сетями возникает тогда, когда число тактов функционирования заранее не ограничено – слоистая сеть так работать не может.

### **1.3. Нейросетевые модели сложных инженерных систем**

К сложным инженерным системам относятся системы, состоящие из некоторого числа компонент. К таким системам относятся, например, терминал крупного океанского порта, обслуживающий разгрузку судов портовыми кранами и отправку грузов автомобильным и железнодорожным транспортом [4], оценка риска по эксплуатации контейнера для перевозки или хранения промышленных отходов (например, делящихся материалов в отработанных твэлах атомных электростанций или токсичных химических веществ) [4]. Для таких сложных производственных систем нейросетевые модели используются для получения эксплуатационных характеристик работы оборудования.

Модель сложной системы, описывающая её поведение, обладает предсказательными свойствами.

Модель способна во многих приложениях заменить собой исследуемую систему. Компоненты системы имеют свои свойства, и характер их поведения зависит от собственного состояния и внешних условий. Система является простой, даже если количество компонент велико, и при этом все возможные проявления системы сводятся к сумме проявлений её компонент. Для описания такой системы традиционно используются методы анализа с разбиванием системы на элементарные элементы и построения для них моделей на основе математического моделирования. Поэтому моделирование такой системы основывается на основе решения уравнений.

Современные технические системы (крупные производства, инженерные сооружения, приборные комплексы, транспортные сети и т.д.) приближаются к такому уровню сложности, когда их свойства не сводятся к простой сумме свойств отдельных компонент. При объединении компонент в систему могут возникать качественно новые свойства, которые не могут быть установлены на основе анализа средством анализа свойств компонент.

Согласно [4] системы, в которых при вычлениии компонент могут быть потеряны принципиальные свойства, а при добавлении компонент возникают качественно новые свойства, называются сложными. Модель сложной системы, основанная на принципах анализа, будет неустранимо неадекватной изучаемой системе, поскольку при разбиении системы на составляющие ее компоненты теряются ее качественные особенности.

При построении модели на основе синтеза компонент можно найти выход для построения адекватной модели [4]. Синтетические модели являются практически единственной альтернативой в социологии, долгосрочных

прогнозах погоды, в макроэкономике, медицине. В последнее время синтетические информационные модели широко используются и при изучении технических и инженерных систем. В ряде приложений информационные и математические компоненты могут составлять единую модель (например, внешние условия описываются решениями уравнений математической физики, а отклик системы – информационной моделью).

Основным принципом информационного моделирования является принцип "*черного ящика*". В синтетическом методе "*черного ящика*" моделируется внешнее *функционирование* системы. С точки зрения пользователя модели структура системы спрятана в черном ящике, который имитирует поведенческие особенности системы.

Кибернетический принцип "*черного ящика*" в теории идентификации систем был предложен в [5], при которой для построения модели системы предлагается широкий параметрический класс базисных функций или уравнений, а сама модель *синтезируется* путем выбора параметров из условия наилучшего соответствия решений уравнений поведению системы. При этом структура системы никак не отражается в структуре уравнений модели.

На основе данных экспериментов или наблюдений над реальной системой в рамках синтетической модели функционирование системы описывается чисто *информационно*. Как правило, информационные модели проигрывают формальным математическим моделям и экспертным системам степенью "*объяснимости*" выдаваемых результатов, но отсутствие ограничений на сложность моделируемых систем определяет их важную практическую значимость.

Типы информационных моделей отличаются по характеру запросов к ним:

- моделирование отклика системы на внешнее воздействие;
- классификация внутренних состояний системы;
- прогноз динамики изменения системы;
- оценка полноты описания системы и сравнительная информационная значимость параметров системы;
- оптимизация параметров системы по отношению к заданной функции ценности;
- адаптивное управление системой.

Искусственные нейронные сети (ИНС) являются удобным и естественным базисом для представления информационных моделей. Нейросеть может быть достаточно формально определена [6] совокупностью простых элементов (нейронов), которые объединены однонаправленными связями (синапсами). Сеть воспринимает сигнал из внешнего мира как входной сигнал, который проходит через сеть с преобразованием в каждом элементе, т. е., проходя по связям сети, происходит его обработка и результатом является выходной сигнал. ИНС выполняет функциональное соответствие между входными сигналами и выходными, поэтому может служить информационной моделью для технической системы.

Определяемая нейросетью функция может быть *произвольной* с легко выполняемыми требованиями к структурной сложности сети с наличием нелинейностей в переходных функциях нейронов [7]. Возможность представления любой системной функции  $F$  с наперед заданной точностью определяет нейросеть. Эта нейросеть имеет принципиально другой способ организации вычислительного процесса по сравнению с программой разработанной, на основе математического описания физических процессов в технической системе. В этом

способе нет программирования с использованием явных правил и кодов в соответствии с заданным алгоритмом. Здесь происходит обучение посредством целевой адаптации синаптических связей (и реже их структурной модификации и изменения переходных функций нейронов) для представления требуемой функции.

В ситуации, когда функция системы  $F$  известна или известен алгоритм ее вычисления при произвольных значениях аргументов, тогда необходимость в информационных моделях отпадает.

При моделировании реальных сложных технических систем значения системной функции  $F$  получаются на основе экспериментов или наблюдений, которые проводятся лишь для конечного числа параметров  $X$ . При этом значения параметров  $X$  измеряются приближенно и подвержены ошибкам различной природы. Целью моделирования является получение значений системных откликов при произвольном изменении  $X$ . В этой ситуации может быть успешно применена информационная (статистическая) модель  $G$  исследуемой системы  $F$ .

Информационные модели могут строиться на основе традиционных методов непараметрической статистики. Эти методы позволяют строить обоснованные модели систем в случае большого набора экспериментальных данных (достаточного для доказательства статистических гипотез о характере распределения) и при относительно равномерном их распределении в пространстве параметров. Однако при высокой стоимости экспериментальных данных или невозможности получения достаточного их количества (как, например, при построении моделей сложных технических систем, тяжелых производственных аварий, пожаров и т.п.), их высокой зашумленности, неполноте и противоречивости нейронные модели оказываются более

предпочтительными. Нейронная сеть оказывается избирательно чувствительной в областях скопления данных и дает гладкую интерполяцию в остальных областях.

Особенность нейросетевых моделей основывается на более общем принципе – адаптивной кластеризации данных. Одной из первых сетей, обладающих свойствами адаптивной кластеризации, обладают карты самоорганизации Т. Кохонена [8,9].

Задачей нейросети Кохонена является автоматизированное построение отображения набора входных векторов высокой размерности в карте кластеров меньшей размерности, причем таким образом, что близким кластерам на карте отвечают близкие друг к другу входные векторы в исходном пространстве. Таким образом, при значительном уменьшении размерности пространства сохраняется топологический порядок расположения данных. При этом достигается высокая степень сжатия информации при сохранении ее структуры в целом.

Карты Кохонена применяются для наглядного упорядочивания многопараметрической информации. Одним из новых эффективных применений сети Кохонена является построение тематической карты электронных сообщений в глобальных компьютерных сетях.

При помощи такой карты пользователь получает возможность свободной навигации в бесконечном потоке сообщений в соответствии с индивидуальным кругом интересов. В применении к моделированию технических систем карты Кохонена могут использоваться для выявления различий в режимах поведения системы, при этом могут выявляться аномальные режимы. Важно, что при этом могут быть обнаружены неожиданные скопления близких данных, последующая интерпретация которых

пользователем может привести к получению *нового знания* об исследуемой системе.

Вторая группа технических применений связана с предобработкой данных. Карта Кохонена группирует близкие входные сигналы  $X$ , а требуемая функция  $Y=G(X)$  строится на основе применения обычной нейросети прямого распространения (например, многослойного персептрона или линейной звезды Гроссберга) к выходам нейронов Кохонена. Такая гибридная архитектура была предложена Р. Хехт-Нильсеном [10,11], она получила название сети *встречного распространения*. Нейроны слоя Кохонена обучаются без учителя, на основе самоорганизации, а нейроны распознающих слоев адаптируются с учителем итерационными методами.

Сеть встречного распространения дает кусочно-постоянное представление модели  $Y=G(X)$ , поскольку при вариации вектора  $X$  в пределах одного кластера на слое соревнующихся нейронов Кохонена возбуждается один и тот же нейрон-победитель. В случае сильно зашумленных данных такое представление обладает хорошими регуляризирующими свойствами. При этом процедура обучения сети встречного распространения заметно быстрее, чем, например, обучение многослойного персептрона стандартным методом обратного распространения ошибок [12].

Другой альтернативой традиционным многослойным моделям является переход к нейросетям простой структуры, но с усложненными процессорными элементами. Важным достоинством нейронов высокого порядка является возможность строить нейросетевые модели без скрытых слоев, воспроизводящие широкий класс функций.

Такие нейроархитектуры не требуют длительного итерационного обучения, оптимальный вес даётся

решением уравнений регрессии. Другой отличительной чертой является возможность эффективной аппаратной (электронной или оптической) реализации корреляций высокого порядка.

Класс нейросетей без скрытых слоев не является полным в смысле возможности приближения к произвольной функции. Так, для представления решающих правил для двух переменных все многообразие функций сводится лишь к приближениям к гиперболе.

Специфичность информационных моделей проявляется не только в способах их синтеза, но и характере приближений (и связанных с этим ошибок). Отличия в поведении системы и ее информационной модели могут возникать вследствие свойств экспериментальных данных.

1. Информационные модели являются неполными. Пространства входных и выходных переменных не могут в общем случае, содержать все параметры, существенные для описания поведения системы. Это связано как с техническими ограничениями, так и с ограниченностью наших представлений о моделируемой системе. Кроме того, при увеличении числа переменных ужесточаются требования на объем необходимых экспериментальных данных для построения модели. Эффект опущенных (скрытых) входных параметров может нарушать однозначность моделируемой системной функции  $F$ .

2. База экспериментальных данных, на которых основывается модель  $G$ , рассматривается как внешняя данность. При этом в данных всегда могут присутствовать ошибки разной природы, шум, а также противоречия отдельных измерений друг другу. За исключением простых случаев, искажения в данных не могут быть устранены полностью.

3. Экспериментальные данные, как правило, имеют произвольное распределение в пространстве переменных задач. Как следствие, получаемые модели будут обладать неодинаковой достоверностью и точностью в различных областях изменения параметров.

4. Экспериментальные данные могут содержать пропущенные значения (например, вследствие потери информации, отказа измеряющих датчиков, невозможности проведения полного набора анализов и т.п.). Произвольность в интерпретации этих значений опять-таки ухудшает свойства модели. Такие особенности в данных и в постановке задач требуют особого отношения к ошибкам информационных моделей.

При обучении модели может также возникать ошибка её обучения и ошибка обобщения данных. При информационном подходе требуемая модель  $G$  системы  $F$  не может быть полностью основана на явных правилах и формальных законах. Процесс получения  $G$  из имеющихся отрывочных экспериментальных сведений о системе  $F$  может рассматриваться как обучение модели  $G$  поведению  $F$  в соответствии с заданным критерием настолько близко, насколько возможно. Алгоритмически обучение означает подстройку внутренних параметров модели (весов синаптических связей в случае нейронной сети) в целях минимизации ошибки модели  $E = \|G - F\|$ . Прямое измерение указанной ошибки модели на практике не достижимо, поскольку системная функция  $F$  при произвольных значениях аргумента не известна. Однако возможно получение ее оценки по формуле:  $E_t = \sum_{X \in X} \|G(X) - Y\|$ , где суммирование по  $X$  проводится по некоторому конечному набору параметров  $X$ , называемому обучающим множеством. При использовании базы данных наблюдений за системой, для обучения может отводиться

некоторая ее часть, называемая в этом случае обучающей выборкой. Для обучающих примеров  $X$  отклики системы  $Y$  известны.

Норма невязки модельной функции  $G$  и системной функции  $Y$  на множестве  $X$  играет важную роль в информационном моделировании и называется ошибкой обучения модели. Нарушение однозначности системной функции в присутствии экспериментальных ошибок и неполноты признаков пространств приводит в общем случае к ненулевым ошибкам обучения. В этом случае предельная достижимая ошибка обучения может служить мерой корректности постановки задачи и качества класса моделей  $G$ .

В приложениях пользователя обычно интересуют предсказательные свойства модели. При этом главным является вопрос, каковым будет отклик системы на новое воздействие, пример которого отсутствует в базе данных наблюдений.

Наиболее общий ответ на этот вопрос дает (по-прежнему недоступная) ошибка модели  $E$ . Неизвестная ошибка, допускаемая моделью  $G$  на данных, не использовавшихся при обучении, называется ошибкой обобщения модели  $EG$ .

Основной целью при построении информационной модели является уменьшение именно ошибки обобщения, поскольку малая ошибка обучения гарантирует адекватность модели лишь в заранее выбранных точках, а в них значения отклика системы и так известны. Проводя аналогии с обучением в биологии, можно сказать, что малая ошибка обучения соответствует прямому запоминанию обучающей информации, а малая ошибка обобщения – формированию понятий и навыков, позволяющих распространить ограниченный опыт обучения на новые условия. Последнее значительно более

ценно при проектировании нейросетевых систем, так как для непосредственного запоминания информации лучше приспособлены не нейронные устройства, а память компьютера.

Небольшое значение ошибки обучения не гарантирует то, что при использовании сети ошибки обобщения будут незначительны. Классическим примером является построение модели функции (аппроксимация функции) по нескольким заданным точкам полиномом высокого порядка. Значения полинома (модели) при достаточно высокой его степени являются точными в обучающих точках, т.е. ошибка обучения равна нулю. Однако значения в промежуточных точках могут значительно отличаться от аппроксимируемой функции, следовательно, ошибка обобщения такой модели может быть неприемлемо большой. Поскольку истинное значение ошибки обобщения не доступно, в практике используется ее оценка. Для ее получения анализируется часть примеров из имеющейся базы данных, для которых известны отклики системы, но которые не использовались при обучении. Эта выборка примеров называется тестовой выборкой. Ошибка обобщения оценивается как норма уклонения модели на множестве примеров из тестовой выборки. Оценка ошибки обобщения является принципиальным моментом при построении информационной модели. На первый взгляд может показаться, что сознательное неиспользование части примеров при обучении может только ухудшить итоговую модель. Однако без этапа тестирования единственной оценкой качества модели будет лишь ошибка обучения, которая, как уже отмечалось, мало связана с предсказательными способностями модели. В профессиональных исследованиях могут использоваться несколько независимых тестовых выборок, этапы обучения

и тестирования повторяются многократно с вариацией начального распределения весов нейросети, ее топологии и параметров обучения. Окончательный выбор "наилучшей" нейросети выполняется с учетом имеющегося объема и качества данных, специфики задачи в целях минимизации риска большой ошибки обобщения при эксплуатации модели.

#### **1.4. Применение нейросетевого программного обеспечения и его возможности**

Существует два разных направления к практическому воплощению идеи искусственных нейронных сетей. Первое направление – микропроцессорные устройства из искусственных нейронов, так называемые нейрочипы, а второе – компьютерные программы-имитаторы.

Нейросетевое программное обеспечение активно используется в различных отраслях знаний и всё больше расширяются области их применения, где человеческий интеллект малоэффективен, а традиционные вычисления трудоемки или физически неадекватны (т.е. плохо отражают реальные физические процессы и объекты). Основные направления использования нейросетей предложены в [13].

*Основные области применения нейронных сетей в промышленности:*

1. Управление технологическими процессами.
2. Идентификация химических компонент.
3. Контроль качества артезианских вод.
4. Оценка экологической обстановки.
5. Прогнозирование свойств синтезируемых полимеров.
6. Управление водными ресурсами.
7. Оптимальное планирование.
8. Разработка нефти и газа.

9. Управление работой прессы.
10. Идентификация вида полимеров.
11. Управление ценами и производством.
12. Оптимизация работы моторов.
13. Обнаружение повреждений.
14. Оптимизация закупок сырья.
15. Контроль качества изделий.
16. Приложения аналитической химии.
17. Анализ проблем функционирования заводов и магазинов.
18. Прогнозирование потребления энергии.

*В высоких технологиях:*

1. Проектирование и оптимизация сетей связи.
2. Анализ и сжатие изображений.
3. Распознавание печатных и рукописных символов.
4. Фальсификации в пищевой и парфюмерной промышленности.
5. Обслуживание кредитных карт.
6. Идентификация и верификация говорящего субъекта.
7. Видеонаблюдение.
8. Автоматизированное распознавание речевых команд.
9. Распознавание слитной речи с (и без) настройкой на говорящего субъекта.
10. Речевой ввод текста в компьютер.

*Для обороны:*

1. Анализ визуальной аэрокосмической информации.
2. Отбор целей.
3. Обнаружение наркотиков и взрывчатых веществ.
4. Сличение изображений с криминальной базой данных.
5. Предсказание целесообразности условного освобождения.

*Для науки и техники:*

1. Поиск неисправностей в научных приборах.
2. Диагностика печатных плат.

3. Идентификация продуктов.
4. Синтез новых видов стекла.
5. Автоматизированное проектирование.
6. Оптимизация биологических экспериментов.
7. Геофизические и сейсмологические исследования.
8. Распознавание ингредиентов.
9. Спектральный анализ и интерпретация спектров.
10. Интерпретация показаний сенсоров.
11. Моделирование физических систем.
12. Анализ данных в ботанике.
13. Планирование химических экспериментов.
14. Отбор сенсоров для контроля химических процессов.
15. Прогноз температурного режима технологических процессов.
16. Диагностика сбоев сигнализации.

*Для здравоохранения:*

1. Идентификация микробов и бактерий.
2. Диагностика заболеваний.
3. Интерпретация ЭКГ.
4. Анализ качества лекарств.
5. Обработка и анализ медицинских тестов.
6. Прогнозирование результатов применения методов лечения.
7. Оптимизация атлетической подготовки.
8. Диагностика слуха.

*Для бизнеса и финансов:*

1. Выбор сбытовой политики.
2. Принятие административных решений.
3. Предсказания на фондовой бирже.
4. Анализ финансового рынка.
5. Исследование фактора спроса.
6. Моделирование бизнес – стратегии.
7. Предсказание наступления финансовых кризисов.
8. Прогноз прибыли (Cash - flow).

9. Предсказание и расшивка «узких мест».
10. Прогноз эффективности кредитования.
11. Прогнозирование валютного курса.
12. Прогнозирование и анализ цен.
13. Построение макро- и микроэкономических моделей.
14. Предсказание необходимых трудодней для реализации проекта.
15. Прогнозирование продаж.
16. Анализ целей маркетинговой политики.
17. Прогнозирование экономических индикаторов.
18. Анализ страховых исков.
19. Отбор перспективных кадров.
20. Стратегии в области юриспруденции.
21. Оценка и прогнозирование стоимости недвижимости.

С помощью нейронных сетей успешно решается важная задача в области телекоммуникаций – нахождение оптимального пути трафика между узлами. Распознавание речи – одна из наиболее популярных областей применений нейронных сетей.

Часто недооцениваются потери от неоптимального планирования производства. В связи с тем, что спрос и условия реализации продукции зависят от времени, сезона, курсов валют и многих других факторов, то и объем производства должен гибко варьироваться в целях оптимального использования ресурсов.

Нейросетевая система Falcon (компания HNC), разработанная для отслеживания операций с краденными кредитными картами и поддельными чеками, позволяет по частоте сделок и характеру покупок выделить подозрительные сделки и сигнализировать об этом в контролирующие службы. Благодаря данной системе, отслеживающей более 260 миллионов счетов 16 крупнейших эмитентов кредитных карт, потери банков от таких операций заметно уменьшились.

Система объективной диагностики слуха у грудных детей (Российская компания НейроПроект) обрабатывает зарегистрированные "вызванные потенциалы" (отклики мозга), проявляющиеся в виде всплесков на электроэнцефалограмме, в ответ на звуковой раздражитель, синтезируемый в процессе обследования.

Нейросети в медицине используются для диагностики заболеваний. Врач правильно диагностирует инфаркт миокарда у 88% больных и ошибочно ставит этот диагноз в 29% случаев. Сеть продемонстрировала точность 92% при обнаружении инфаркта миокарда и дала только 4% случаев сигналов ложной тревоги, ошибочно подтверждая направление пациентов без инфаркта в кардиологическое отделение.

Подсчитано, что потери бюджета США от мошенничеств и фальсификаций в области здравоохранения составляют около 730 млн дол. в год. Тестирование системы обнаружения (стоимость – 2,5 млн дол., компания ИТС) показало, что нейронная сеть позволяет обнаруживать 38,0% мошеннических случаев, в то время как существовавшая ранее экспертная система – только 14,0 %.

Стоимость квартиры или дома зависит от большого числа факторов, таких как общая площадь, удаленность от центра, экологическая обстановка, престижность, тип дома и т.д. Так как вид этих зависимостей неизвестен, то стандартные методы анализа неэффективны в задаче оценки стоимости. Как правило, эта задача решается экспертами-оценщиками, работающими в агентстве по недвижимости. Недостатком такого подхода является субъективность оценщика, а также возможные разногласия между различными экспертами.

Распознавания букв и символов, с одной стороны – одна из наиболее разработанных и освещенных в

специальной литературе проблем, а с другой – несмотря на кажущуюся простоту, чрезвычайно трудно реализуемая на практике задача.

Среди пяти чувств, чувство запаха наиболее загадочное. Человеческий нос стал объектом исследования ученых и инженеров, специализирующихся в области высоких технологий и пытающихся понять, как нос функционирует. Такой повышенный интерес к обонятельной системе человека возник в связи с последними достижениями в области проектирования электронного (искусственного) носа.

Прогнозирование – важнейший элемент современных информационных технологий принятия решений в управлении. Эффективность того или иного управленческого решения оценивается по событиям, возникающим уже после его принятия. Поэтому прогноз неуправляемых аспектов таких событий перед принятием решения позволяет сделать наилучший выбор, который без прогнозирования мог бы быть не таким удачным.

Задачей автоматизированной системы прогнозирования краткосрочных и долгосрочных тенденций финансовых рынков является анализ некоторого набора влияющих факторов с последующим выводом о дальнейшем краткосрочном или долгосрочном поведении прогнозируемой величины.

О нейронных сетях как профессиональном инструменте для финансовых операций серьезно заговорили в конце 80-х годов. Характерный пример успешного применения нейронных сетей в финансовой сфере – управление кредитными рисками. Перед выдачей кредита для оценки вероятности собственных убытков от несвоевременного возврата финансовых средств крупные банки, как правило, предпринимают сложные

статистические расчеты по определению финансовой надежности заемщика.

Важная область применения нейронных сетей в сфере финансов – прогнозирование ситуации на фондовом рынке. Стандартный подход к решению этой задачи (не использующий нейронные сети) базируется на жестко фиксированном наборе «правил игры», который со временем теряет свою актуальность из-за изменения условий торгов на фондовой бирже. Помимо того, системы, построенные на основе такого стандартного подхода, оказываются слишком медленными для ситуаций, требующих от трейдера (участника торгов) мгновенного принятия решений. Например, финансовая корпорация Citicorp применяет крупный специализированный нейрокомпьютер для анализа и краткосрочного предсказания колебаний курсов валют на основе выполнения огромных объемов рутинной, но весьма ответственной работы по ежедневной, ежечасной, а зачастую и ежеминутной коррекции валютных котировок на ведущих мировых биржах. Консультативная фирма George Pugh специализируется на оценке финансового состояния различных фирм по заказам банков и кредитных компаний. После установки и настройки нейропакета стоимостью \$1500, фирма добилась практически 100% совпадения своих предварительных оценок с результатами последующих детальных аудиторских проверок.

В металлургической промышленности весьма привлекательна задача по внедрению новых информационных технологий, способных ускорить исследования в направлении получения новых перспективных сплавов, повысить качество и безопасность способов получения выплавляемого металла, понизить его стоимость.

Традиционные методы поиска состава новых сплавов с требуемыми свойствами весьма трудоемки и включают многократные выплавки опытных образцов (на основе методов планирования эксперимента) с последующим испытанием их на механические свойства и математической обработкой результатов. Однако с ростом числа компонентов сплава растет и число необходимых экспериментов. Из-за сложного характера изменения свойств материала в зависимости от химического состава, режимов термической обработки и условий испытаний с ростом данных экспериментов возможность подобрать точную математическую зависимость между составом и свойствами быстро понижается и может становиться невыполнимой. Благодаря этому наиболее перспективные сплавы могут оказаться за пределами исследовательских возможностей. Создание нейросетевых экспертных систем для решения прямой задачи – прогнозирование свойств сплавов металлов по их химическому составу. И для решения обратной задачи – выдачи рекомендаций по химическому составу в зависимости от комплекса требуемых параметров (с учетом стоимости) – позволяет резко упростить научный поиск и выйти на создание новых сложных материалов, необходимых для развития технологий XXI века [14].

Дальнейшее продвижение возможно на пути решения задач управления крупными плавильными агрегатами (доменными печами, кислородными конвертерами и др.), включающих сложные многопараметрические процессы. Сейчас подобные задачи решаются коллективами специалистов высокой квалификации. Введение автоматизированных нейросетевых систем управления процессами плавки позволит поднять качество выплавляемого металла,

понизить его стоимость и повысить безопасность технологического процесса.

Если создание экспертных систем может выполняться как на базе самоадаптирующихся сетей, так и с использованием классических нейросетевых алгоритмов, то задачи управления плавильными агрегатами находятся целиком в компетенции сетей с самостоятельной адаптацией.

В.А. Вехник рассмотрел вопросы создания, обучения и проверки искусственной нейронной сети, моделирующей тепловую работу проходной печи [15]. Применение созданной нейронной сети позволяет в среднем на три порядка быстрее определять показатели тепловой работы моделируемой печи, чем при использовании математической модели. Созданная нейронная сеть может быть применена как при решении задач оптимизации, так и в системах автоматического управления.

Реализована технология прогнозирования свойств материалов в химических полимерных производствах с помощью нейронных сетей (компания Aspen Technology и NeuralWare Inc., 1997 г.). Данный подход оказался более эффективным и дешевым, чем разработка теоретической модели полимеров. Так, с помощью нейросимулятора NeuroShell разработан новый сорт безопасного стекла (компания DuPont).

В последнее время активно применяются нейрокомпьютеры в энергетических системах. Начиная с 1990 – 1991 гг. активно нейросетевой подход внедряется в задачи прогнозирования нагрузки потребления электроэнергии и газа [16]. Эти задачи активно развиваются вплоть до настоящего времени [17]. Значительное количество работ посвящено прогнозированию нагрузок с помощью нейрокомпьютеров на короткое время [18 – 22]. Отдельно рассматриваются

нейросетевые подходы, связанные с почасовым прогнозированием потребления энергии. В работе [23] рассмотрены факторы и исходные данные, используемые в прогнозировании нагрузок на энергетические системы. Описано применение нейронных сетей для такого прогнозирования. Ведется совершенствование нейронной сети для прогнозирования нагрузки с 3-месячным упреждением. Подобные результаты получены в исследованиях Т.М. Peng, N.F. Hubele, G.G. Karady [24]. Кроме этого, нейросети используются для прогнозирования пикового потребления электроэнергии [25, 26].

Задача оптимального потокораспределения энергии в электрических сетях является важной при управлении современными энергосистемами. Частной задачей при этом является определение оптимальной мощности, производимой каждым узлом сети в текущий момент. В нейросетевом логическом базисе эта задача решается как классическая задача нелинейной оптимизации. Mastuda Satoshi, Akimoto Yoshiakira разработали метод представления чисел в нейронных сетях хопфилдовского типа [27]. В качестве примера использования предлагаемой методики приведена нейронная сеть для оптимизации распределения нагрузки при передаче электроэнергии. Проблема построения системы управления распределенной энергетической системой на основе нейросети исследуется N. Iwan Santoso, T. Tan Owen, ими предлагается построить экспертную систему для управления [28]. Достоинством предложенного решения является высокая оперативность формирования управляющего воздействия по сравнению с традиционными системами управления, в которых осуществляется принцип построения экспертной системы управления и результаты ее экспериментального

использования. Y.Zhang и др. разработали приближенные методы оценки потокораспределения в сложноразветвленной сети электроэнергетической системы, на основе которых получены ускоренные алгоритмы оценки потокораспределения при выполнении массовых проектных и эксплуатационных инженерных расчетов при наличии переменной исходной информации [29]. Задача автоматизированного управления потреблением энергии исследована учёным Marzio Leonardo [30]. Разработана методика решения этой задачи и построения систем автоматизированного распределения энергии. В. Caudana, F. Conti, G. Helcke, R. Pagani разработали пакет программ, реализующий экспертную систему BEAMES для управления большим потоком энергии в зданиях [31]. Исследователь Т. Hiyama представил описание нейросетевого алгоритма обеспечения максимальной нагрузки в электрических сетях [32].

Оценка состояния системы является весьма важной компонентой диспетчерского наблюдения и контроля таких гигантских систем, как системы генерации и передачи электроэнергии и промышленные системы. К. Nishimura предложил два метода построения нейронных сетей для оценки переменных состояния системы [33]. М. Aggoune и др. приводят результаты исследований по использованию техники искусственных нейронных сетей для оценки качества работы технических систем, в частности - динамической устойчивости электроэнергетических систем [34]. Метод нейронных сетей может быть полезен в качестве вспомогательного средства для персонала электроэнергетических систем в их оперативной работе, а также при проектировании и анализе электроэнергетических систем. R. J. Thomas, E. Sakk, K. Hashemi, В. Y. Ку, Н. D. Chiang разработали нейронную сеть для осуществления оперативного

управления и слежения за неопределенными ситуациями в ходе работы электростанций [35]. Н.Р. Chan Edward рассмотрел проблему интерпретации большого количества одновременных сигналов тревоги в центре управления электрическими сетями в условиях стресса [36]. Отмечено, что традиционные методы принятия решений в данной ситуации оказываются малопригодными, поскольку сильно зависят от конкретной конфигурации электрической сети. Предложено использовать для анализа множественных сигналов тревоги и выделения исходной причины нейронную сеть. E. Aggoune Mohamed, V. Vadari Subramanian представили предварительные результаты исследования возможностей нейронно-сетевых систем как средства обучения и оперативной помощи диспетчеру, следящему за безопасностью на энергетических станциях [37]. Нейронные сети являются эффективным аппаратом диагностики энергетических систем [38 – 41].

Стабилизация напряжения в энергосистемах с использованием нейронных сетей рассмотрена в работах А.А.El-Keib, X.Ma. и M.La Scala, M.Trovato, F.Torelli. [42,43].

Mori Hiroyuki, Iida Seiji предложили методику использования генетических алгоритмов для поиска оптимального решения в задаче о размещении измерительных датчиков на электростанциях, предназначенных для контроля безопасности. Испытания проведены в реальных задачах. Показано, что генетический алгоритм дает вполне удовлетворительные решения при числе измерений порядка  $10^{11}$ , относительная ошибка составляет 0,102% [44].

Защита силовых трансформаторов с использованием аппарата нейронных сетей представлена в работе S.R.Kolla [45]. Для синхронных генераторов аппарат нейронных сетей применяется в основном для решения задач: анализа

устойчивости; диагностики; оценки динамического состояния синхронных генераторов. Н. Assadi, А. Tan, М. Amoli-Etezadi, D. Egbert, М. S. Fadali предложили методику нового варианта нейронной сети, основанной на адаптивном резонансе, – нечеткой системы ARTMAP – для исследования устойчивости стабильных состояний синхронного генератора [46]. Grazyna Michalik-Mielczarska, Wladyslaw Mielczarski указали недостатки некоторых известных методов разработки нелинейных управляющих систем для синхронных генераторов [47]. Ими рассмотрена задача выбора и определения параметров генератора и линии соединения его с энергосистемой, а также разработан нелинейный контроллер, основанный на трехслойной нейронной сети. Установлено, что даже при больших отклонениях параметров обеспечивается надежная оценка динамического состояния наблюдаемого генератора, при этом погрешности уменьшаются в 4 – 5 раз. Исследователи Chow Moo-yuon и Yee Sui Oi предложили метод применения искусственных нейронных сетей для обнаружения внутренних неисправностей индукционных машин, обеспечивающий работу в режиме реального времени и использующий результаты непосредственных измерений режима работы мотора без сложных математических моделей [48]. S. I. Sudharsanan, I. Muhsin, М. К. Sundareshan предложили нейронную сеть для идентификации нелинейных систем со многими входами и многими выходами и управлением с самонастройкой, разработали эффективную стратегию управления в режиме реального времени, описали правила модификации параметров нейронной сети в ходе обучения с учителем, привели пример использования системы для управления синхронизированным энергетическим генератором при наличии отклонений от нормального режима работы, представили сводку результатов,

полученных в ходе проведения экспериментальных исследований работы системы [49]. Различные аспекты управления работой синхронных генераторов представлены в работах Mang-Hui Wang, Hong Chan Chang, R.-H. Liang, Y.-Y. Hsu и др. [50 – 54].

Использование нейронных сетей для управления сетью синхронных генераторов приведено в работах [55 – 57]. Управлению турбогенераторами с помощью нейронных сетей посвящены работы М. А. El-Sharkawi, F. Narashima, L. H. Jeng и др. [58 – 60].

В работах F. Narashima, T. Niyuama и др. [61 – 64] описывается стратегия управления мощными переключательными инверторами, основанная на применении нейронных сетей, рассматривается построение нейронной сети и техника ее обучения, приводятся результаты имитационного моделирования инверторов с нейронными сетями.

Система анализа данных о потреблении электроэнергии (компания ZSolutions) использует данные, полученные в результате обработки показаний счетчиков частных и корпоративных клиентов. Измерения проводятся каждые 15 минут, причем известно, что некоторые из них – неверные. С помощью нейронных сетей был построен алгоритм выявления неверных измерений, а также алгоритм прогнозирования потребления энергии в зимний период. Использование данного прогноза позволило энергетической компании применить гибкую тарифную политику и сократить риск возникновения энергетического кризиса в регионе.

## **1.5. Профессиональное нейросетевое программное обеспечение**

Насчитываются уже десятки универсальных нейросетевых пакетов, и любой пользователь может у себя

на компьютере построить модель нейронной сети и попытаться ее чему-нибудь научить. Существует и промышленное нейросетевое программное обеспечение, эксклюзивное по своей сути и назначению, взаимосвязанное со специализированным аппаратным обеспечением. Последнее осуществляет предварительную обработку поступаемых извне сигналов, передает полученные данные (образы) на вход нейросети, ускоряет функционирование самой нейросети и выводит готовую информацию в требуемом виде.

К нейросетевому программному обеспечению для персональных компьютеров в настоящее время относятся следующие наиболее интересные нейросетевые пакеты программ.

В пакете **NeuralWorks Pro II/Plus** (Aspen Technology, Inc., [www.neuralware.com](http://www.neuralware.com)) основной упор сделан на применение стандартных нейронных парадигм и алгоритмов обучения, и в этом данный пакет превосходит все остальные. В нем реализованы 28 стандартных нейронных парадигм, используемых при решении прикладных задач. Нейропакет содержит также большое число алгоритмов обучения нейронной сети. Дополнительно поставляемый модуль UDND (User Define Neural Dynamics) позволяет пользователю создавать свои собственные нейронные структуры и работать с ними средствами нейропакета.

Универсальный нейропакет **NeuroSolutions** (NeuroDimension, Inc., [www.nd.com](http://www.nd.com)) предназначен для моделирования широкого круга искусственных нейронных сетей. Основное достоинство описываемого нейропакета состоит в его гибкости: помимо традиционно используемых нейросетевых парадигм (типа полносвязных многослойных нейронных сетей или самоорганизующихся полей Кохонена) нейропакет включает в себя мощнейший

редактор визуального проектирования нейронной сети, позволяющий создавать практически любые собственные нейронные структуры и, что немаловажно, собственные алгоритмы их обучения. Нейропакет позволяет пользователю вводить собственные критерии обучения нейронной сети, не ограничивая его только широко распространенным, но далеко не самым оптимальным критерием минимума квадрата ошибки.

**MatLab + Neural Network Toolbox** (MathWorks, Inc., [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)). Основные преимущества универсальность пакета и возможность подключения к нему из программного комплекса MatLab. Данное программное обеспечение имеет тяжелое наследство, доставшееся от предыдущих версий: командно-строковый интерфейс. Большое количество функций и их параметров усложняет работу с сетью. Набор типов нейросетей стандартен. В версии 3.0 появилась возможность гибкого конструирования нейросети, а также были добавлены вероятностные и регрессионные нейросети. Предусмотрен демонстрационный режим, воспользовавшись которым можно оценить, как работает нейросеть с обратными связями.

**BrainMaker** (California Scientific Software, Inc., [www.calsci.com](http://www.calsci.com)) является достаточно простым при моделировании многослойных нейронных сетей, обучаемых с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Основным достоинством этого нейропакета можно считать большое число параметров настройки алгоритма обучения нейронных сетей, в том числе возможность обучения с ограничениями на весовые коэффициенты. В остальном он имеет невысокий уровень, что хорошо видно при сравнении его с нейропакетами NeuroSolutions или NeuralWorks. Особенно это касается

наглядности представляемой информации и простоты и понятности интерфейса.

**NeuralBench** (NeuralBench Development - ВНИИГАЗ) "Нейро-верстак" сделана продуманно, есть несколько примеров. Справка помощи изложена кратко. Есть помощник по созданию нейросети. В качестве недостатка можно работать только с данными в ASCII формате.

Нейропакет **NeuroShell 2** (Ward System Group) является одной из трех программ, входящих в состав пакета The AI Trilogy. Он представляет собой универсальный нейропакет, предназначенный для моделирования нескольких наиболее известных нейронных парадигм многослойных нейронных сетей, сети Кохонена и прочих.

По данным фирмы Нейрософт (табл.1.1), которая производила сравнение профессионального нейросетевого программного обеспечения по нескольким критериям, явное преимущество имеет профессиональный пакет **NeuroSolutions**.

**Таблица 1.1.** Сравнение профессионального нейросетевого программного обеспечения

| Название нейросетевого пакета программ  | Neural Works Professional II/Plus | Neuro Solutions | Brain Maker | Neuro Shell 2 |
|---|-----------------------------------|-----------------|-------------|---------------|
| Простота использования                  | 9                                 | 9               | 6           | 10            |
| Простота формирования обучающей выборки | 9                                 | 9               | 7           | 8             |
| Наглядность представления информации    | 9                                 | 10              | 4           | 6             |

Окончание табл. 1.1

| Название нейросетевого пакета программ                                    | Neural Works Professional II/Plus | Neuro Solutions | Brain Maker | Neuro Shell 2 |
|---|-----------------------------------|-----------------|-------------|---------------|
| Реализация различных стандартных нейронных парадигм и алгоритмов обучения | 10                                | 8               | 6           | 8             |
| Возможность создания собственных нейронных структур                       | 8                                 | 10              | 5           | 5             |
| Возможность использования собственных критериев обучения                  | 7                                 | 8               | 0           | 0             |
| Возможность использования собственных алгоритмов обучения                 | 7                                 | 10              | 4           | 0             |
| Обмен информацией между нейропакетом и операционной системой              | 8                                 | 10              | 5           | 8             |
| Открытость нейропакета  | 10                                | 10              | 0           | 2             |
| Генератор исходного кода  | 10                                | 10              | 0           | 10            |
| Наличие макроязыка  | 0                                 | 10              | 0           | 0             |
| Всего баллов  | 87                                | 104             | 37          | 57            |

## **2. Использование нейросетевых технологий для эффективности использования многоцелевых вычислительных комплексов при решении задач теплообмена**

### **2.1. Принципы разработки нейроимитаторов**

Нейроимитатор представляет собой компьютерную программу (или пакет программ), которая выполняет следующие функции:

- Описание и формирование архитектуры нейронной сети
- Сбор данных для обучающей выборки
- Обучение выбранной нейросети на обучающей выборке или загрузка уже обученной сети
- Тестирование обученной нейросети
- Визуализация процесса обучения и тестирования
- Решение задач обученной сетью
- Запись результатов обучения и полученных решений.

Решение задачи с применением нейронной сети может состоять из следующих этапов (не обязательно всех и не обязательно выполняемых в указанном порядке).

1. Поставить задачу для нейронной сети, которая имеет определённую специфику. Прежде всего, необходимо решить, относится ли решаемая задача к одному из стандартных типов нейросетевых постановок: задачи классификации (категоризации), задачи построения функциональной модели (идентификации систем), задачи прогноза, задачи оптимизации и нейроматематики, задачи управления и, наконец, задачи распознавания образов и обработки сигналов. Нестандартная постановка задачи для нейроЭВМ обычно требует проведения специальных исследований и большого опыта решения других задач. На этом этапе обязательно нужно ответить на вопрос: а нужна ли вообще для решения данной задачи нейронная сеть?

Вполне возможно (и часто бывает так), что решение может быть получено алгоритмическим способом. В этом случае применение нейроимитатора обычно оказывается не эффективным.

2. Следует определить используемые в задаче признаковые пространства, в которые включаются параметры, играющие важную роль в данной задаче. При построении признаков пространств следует учесть наличие и доступность соответствующих данных, в противном случае не будет информации для обучения нейросети.

3. Очень полезно представить ожидаемый результат работы нейросети и способ его дальнейшего использования. Во многих случаях это приводит к упрощению постановки, и, как следствие, к более эффективному решению. Если же полученные результаты не будут соответствовать ожиданиям, то это важная причина для более фундаментального подхода к задаче.

4. Необходимо выбрать тип используемой нейросети, который во многом диктуется поставленной задачей. Так, для задачи классификации удобными могут оказаться многослойный персептрон и сеть Липпмана-Хемминга. Персептрон также применим и для задач идентификации систем и прогноза. При решении задач категоризации потребуются карта Кохонена, архитектура встречного распространения или сеть с адаптивным резонансом. Задачи нейроматематики обычно решаются с использованием различных модификаций модели Хопфилда.

Лучше использовать те архитектуры, свойства которых наиболее знакомы, так как это упростит интерпретацию результатов. На выбор также может повлиять наличие или отсутствие в распоряжении соответствующих программ.

5. Отобрать данные для формирования обучающей выборки. Идеальной является ситуация, когда можно получить произвольно много различных данных для задачи. Следует позаботиться об отсутствии систематических ошибок и уклонений в данных (если только именно это не является предметом исследований). Целесообразно включение в обучающую выборку, прежде всего тех данных, которые описывают условия, близкие к условиям дальнейшего использования нейросистемы. Для практических целей следует часть обучающей выборки не использовать при обучении, а применить для последующего тестирования работы нейросети. Очень большая выборка обучающих данных сильно замедлит процесс обучения без существенного улучшения результата.

Если в распоряжении имеется весьма ограниченный объем данных, то потребуется анализ его достаточности для решения задачи. Обычно это оказывается непростым вопросом. Одним из решений может быть уменьшение размерности признаков пространств задачи. В любом случае, обучающих данных должно быть больше, чем обучаемых параметров нейросети.

6. Решить вопрос об использовании существующих нейроимитаторов или разрабатывать собственную программу. Для практических целей лучше предпочесть использование существующих нейроимитаторов. Это обеспечит выполнение стандартов и доказательность полученных вами результатов. Исключения составляют нестандартные задачи и специализированные архитектуры нейросетей, в этом случае необходимо разрабатывать новую программу. При выборе технической среды для проекта полезно учитывать имеющиеся инструментальные средства для написания нейропрограмм и обработки баз данных.

7. Проанализировать результаты. Это одна из самых важных фаз решения задачи. Для полноты анализа следует позаботиться о наглядности результатов, используя представление их в графическом виде. Если результаты будут использоваться в дальнейших вычислениях с применением ЭВМ, целесообразно сразу представить их в формате, понимаемом другими программами. Для обмена между программами небольшими таблицами данных можно использовать текстовое представление. Для больших объемов лучше применить стандартные форматы, например, формат dbf-файлов системы dBASE разработки фирмы Ashton-Tate. Это автоматически позволит использовать вам средства этой (и многих других) системы для представления, хранения и редактирования данных.

Если полученные результаты существенно отличаются от ожидаемых значений, придется вернуться к постановке задачи.

## **2.2. Повышение эффективности использования многоцелевых вычислительных комплексов при решении задач теплообмена на основе определения точности решения на стадии постановки задачи**

Инженерные методики расчета нагрева материала в теплотехнологических установках основаны на решении одномерных задач. В последнее время с развитием компьютерных технологий появилось много вычислительных комплексов для решения задач теплообмена в трехмерном пространстве. Они дают возможность моделировать процессы, связанные с движением газов, жидкостей и их смесей при сложных физико-химических взаимодействиях. С их помощью можно определять параметры процессов, такие как поля температур, давлений, векторов скоростей, концентраций.

Таким образом, это хороший инструмент для конструирования и оптимизации оборудования.

При использовании любого вычислительного комплекса необходимо знать точность решения поставленной задачи. Для этого можно сравнивать результаты, полученные на модели, с результатами физического эксперимента. Который является сложным и дорогим и его не всегда удается провести. Вследствие этого, если возможно, для некоторых задач сравнение можно осуществить, используя результаты аналитических решений.

Полученные в ходе сравнения величины можно обработать с помощью нейросетей. В данной работе предлагается методика определения точности численных математических моделей, созданных в многоцелевых вычислительных комплексах на основе нейросетевой технологии. Применение нейросетей позволяет достичь значительно более хороших результатов, чем применение традиционных методов, поскольку нейросеть строит неформальную модель. Предложенная методика может использоваться для определения точности результатов математического моделирования как для простейших задач нагрева, так и для сложных технологических установок.

Методика предполагает использование нейросетей для определения точности результатов, полученных при решении задач теплообмена с использованием многоцелевых вычислительных комплексов.

Многие задачи, связанные с повышением энергетической эффективности сжигания топлива в печах, обуславливают необходимость детального анализа теплообмена в рабочем пространстве. Анализ теплообмена проводится при различных режимах для выбора рациональных тепловых условий, обеспечивающих как интенсификацию теплообмена, так и увеличение стойкости

футеровки, надёжности работы, повышение равномерности нагрева материала, экономное использование энергоносителей. Решение этих задач путём экспериментальных исследований на действующих печах довольно сложно и обычно связано с затратами значительных средств и времени. В связи с этим необходима разработка совершенных математических моделей теплообмена в рабочем пространстве печей, которые смогли бы, с одной стороны, по возможности наиболее полно учесть закономерности основных процессов, протекающих в печи, а с другой – дать детальное представление о картине теплообмена в рабочем пространстве при различных тепловых режимах.

Доминирующим видом теплообмена в рабочем пространстве высокотемпературных печей является радиационный теплообмен. Точное решение даже для сравнительно простых излучающих систем представляет собой трудную задачу, которая в значительной мере усложняется для условий промышленных тепловых агрегатов. Наряду с процессами излучения в рабочем пространстве печей протекают другие физико-химические процессы: явления конвективного теплообмена, горения топлива, аэродинамики газов, диффузии, теплопроводности и так далее. В связи с этим большое значение приобретает разработка и использование приближённых методов решения задач сложного теплообмена применительно к условиям пламенных печей.

Характеристики процессов теплообмена и течения жидкости можно определить экспериментально и теоретически.

Часто наиболее надёжную информацию о физическом процессе можно получить путем непосредственных измерений. С помощью экспериментального исследования на полномасштабной

установке определяется поведение объекта в реальных условиях. В большинстве случаев такие полномасштабные опыты чрезмерно дороги и часто невозможны. Альтернативой является проведение экспериментов на маломасштабных моделях. Однако полученную информацию необходимо экстраполировать на реальный объект, а общие правила для этого нередко отсутствуют. Кроме того, на маломасштабных моделях не всегда можно воспроизвести все свойства полномасштабного объекта. Это также снижает ценность полученных результатов. Наконец, надо помнить, что во многих случаях измерения затруднены, и измерительное оборудование может давать погрешности.

При теоретическом исследовании определяются обычно результаты решения задачи согласно используемой математической модели, а не характеристики действительного физического процесса. Для интересующих нас физических процессов математическая модель состоит, главным образом, из системы дифференциальных уравнений. Если бы для решения этих уравнений использовались только методы классической математики, то вряд ли удалось бы рассчитать многие имеющие практический интерес явления. На основании классических работ по теплообмену или гидромеханике можно прийти к выводу, что в аналитическом виде можно получить решения только небольшой части задач, имеющих практический интерес. Кроме того, эти решения часто содержат бесконечные ряды, специальные функции, трансцендентные уравнения для собственных значений и т. д., и их числовая оценка может представлять весьма трудную задачу.

Но уровень развития численных методов и наличие мощных ЭВМ позволяют полагать, что почти для любой практической задачи можно составить математическую

модель и провести ее численное исследование. Именно упрощение, связанное с использованием алгебраических, а не дифференциальных уравнений, делает численные методы широко применимыми. Нет лучшего способа проверки точности численного метода, чем сравнение с точным аналитическим решением. Численное решение дает количественное выражение закономерностей, присущих математической модели. Напротив, с помощью экспериментального исследования наблюдается сама действительность. Таким образом, полезность расчета ограничена обоснованностью математической модели. Результат численного решения зависит как от численного метода, так и от математической модели. Если используемая математическая модель не соответствует изучаемому явлению, то с помощью даже очень хорошей численной методики можно получить ошибочные результаты.

Эксперимент, несомненно, является единственным методом исследования новых фундаментальных явлений. В этом смысле расчет следует за экспериментом. Однако расчет более эффективен для изучения проблемы, включающей несколько взаимодействующих известных явлений. Но и в этом случае необходимо обосновать результаты расчета путем сравнения их с экспериментальными данными.

Таким образом, оптимальное исследование должно разумно сочетать расчет и эксперимент. Пропорция, в которую должны входить каждый из ингредиентов, будет зависеть от существа проблемы, от целей исследования и от имеющихся экономических и других ограничений.

Существуют различные подходы к определению точности математических моделей.

1. Л.А.Коздоба предложил использовать электрические модели-аналоги, которые применяются для решения как

линейных, так и нелинейных задач [65]. Он показывает, что, имея математическое описание, математик может исследовать математическую модель явления не чисто математическими средствами, а с помощью экспериментального метода – метода электротепловых аналогий. Модели-аналоги решают задачи методом аналогий в их физической постановке. Они позволяют решать уравнения в частных производных. Также в своей работе Коздоба приводит ряд критериев, с помощью которых можно более или менее объективно провести выбор метода решения математических задач.

2. С.А. Карпушкина проводит анализ точности численных решений краевых задач на основе аналитических решений [66]. Целью является сравнение аналитического решения краевой задачи с ее численным решением в программном комплексе ELCUT 5.1. Производится анализ метода конечных элементов, применяемого в данном пакете. Точность решения, получаемого этим методом, во многом зависит от качества разбиения исходной области на конечные элементы, числа узлов КЭ-сетки, степени аппроксимирующего полинома.

А.В.Иванов и Б.С.Мастрюков описывают достоверность использования вычислительного комплекса PHOENICS в расчетах рассеяния вещества в возмущенном потоке [67]. Они сопоставляют результаты численного моделирования с имеющимися в литературе экспериментальными данными. В качестве объекта моделирования было выбрано одиночное, плохо обтекаемое препятствие, моделирующее здание. Сравнение результатов производилось с использованием различных моделей турбулентности. Наиболее целесообразной в данном случае признана  $k-l$  модель.

3. При проверке математических моделей и программ, рассчитывающих температурное поле твердых тел,

довольно сложно получить ожидаемые результаты. Обычно для них используют аналогичные расчеты с помощью других средств: аналитических решений, программ для ЭВМ. А.К. Соколов предлагает тесты, для которых ожидаемый результат очевиден или может быть получен путем простейших вычислений [68]. Им были составлены тесты для программ, рассчитывающих одномерные температурные поля при граничных условиях второго, третьего рода, для тестирования трехмерных температурных полей и температурных полей тел с источниками тепловой энергии, а также тестирование расчета температурных полей в многослойных (составных) телах.

4. В.В. Бухмировым предложено использование метода сеток [69]. Для численного решения дифференциальных уравнений в частных производных данным методом можно построить большое количество работоспособных разностных схем, отличающихся друг от друга по своей точности и эффективности. Под эффективностью разностной схемы понимается величина, обратная вычислительным затратам, необходимым для ее практической реализации и зависящим от объема вычислений, требуемого для достижения заданной точности расчета, времени работы процессора и трудоемкости реализации.

Расчет температурного поля с заданной точностью можно выполнить в сетках с разным соотношением шагов по пространству и времени. Заданную точность разностного решения можно достичь, применяя различные по своей структуре и скорости сходимости разностные схемы, построенные на пространственно-временных сетках разных размеров. При этом разностные схемы, имеющие более высокую скорость сходимости, обеспечивают заданную точность расчета на более грубых

сетях, однако их реализация может потребовать больших вычислительных затрат. Таким образом, при численной реализации математической модели необходимо обеспечить заданную точность расчета при минимальном объеме вычислений, то есть построить эффективную разностную схему.

Для количественной оценки эффективности разностных схем предложено использовать величину, обратную количеству элементарных арифметических операций, выполнение которых необходимо для реализации данного алгоритма. Эта величина названа критерием эффективности разностных схем (КЭРС):

$$K_{эрс} = [\varphi_{рс} (\Omega_{i,j,k,m} + S)]^{-1}, \quad (2.1)$$

где  $\varphi_{рс}$  – коэффициент, характеризующий удельные вычислительные затраты, т.е. количество элементарных операций, приходящихся на один узел пространственной сетки при расчете одного шага по времени;  $\Omega_{i,j,k,m}$  – сеточная область для решения краевой задачи;  $i, j, k$  – номера узлов сетки по трем пространственным координатам;  $m$  – номер временного слоя;  $S$  – суммарное количество итераций за время расчета (для итерационных разностных схем). Значения  $\Omega_{i,j,k,m}$  и  $S$  можно найти по очевидным формулам:

$$\Omega_{i,j,k,m} = (N_x + 1)(N_y + 1)(N_z + 1)M; \quad (2.2)$$

$$S = (N_x + 1)(N_y + 1)(N_z + 1) \sum_{m=1}^M (S_m - 1), \quad (2.3)$$

где  $N_x, N_y, N_z$  – число разностных слоев по координатам  $x, y$  и  $z$ ;  $M$  – число слоев по времени  $t$ ;  $S_m$  – число итераций на  $m$  – м временном слое.

При уменьшении критерия эффективности разностной схемы погрешность решения стремится к нулю.

Таким образом, существует множество методик определения точности математических моделей. Но при этом нет универсальных методов. Некоторые из них описывают качественный выбор использования одно-, двух- или трехмерных моделей. Другие позволяют сравнивать по точности только внутренние задачи теплообмена. Кроме того, сопоставление с экспериментальными данными требует больших затрат. Поэтому развитие в последнее время нейросетевой технологии может позволить создать универсальную методику по оценке точности математических моделей.

В данной работе предложено сравнить результаты, полученные численным методом, с результатами аналитического решения или хорошо изученного метода линий, который основан на дискретизации для пространственной координаты, но для временной переменной имеет непрерывное представление на примере различных граничных условий, и также использовать результаты сравнения для обучения нейронных сетей, а обученную нейросеть использовать для оценки точности моделей нагрева на стадии постановки задачи.

### **2.3. Решение задачи нагрева металла при граничных условиях первого рода и определение точности этого решения с помощью нейросети**

Дана неограниченная металлическая пластина толщиной  $0,1$  м с начальной, постоянной по объему температурой  $273$  К. К поверхности пластины приложен источник с постоянной температурой  $1273$  К. Необходимо найти распределение температуры по толщине пластины в любой момент. Время нагрева составляет  $1000$  с.

Отсюда формулировка задачи имеет вид:

- для металла прирост теплосодержания будет происходить только за счет теплопроводности:

$$c_m \frac{\partial T_m(x_m, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_m \frac{\partial^2 T_m(x_m, \tau)}{\partial x_m^2} \text{ при } \tau > 0 \text{ и } 0 < x_m < R_m, \quad (2.4)$$

где  $T_m(x_m, \tau)$  – температура металла,  $K$ ;  $x_m$  – текущая пространственная координата по толщине металла,  $m$ ;  $\tau$  – время,  $s$ ;  $c_m$  – удельная объёмная теплоёмкость металла,  $Дж/(m^3 \cdot K)$ ;  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности материала металла,  $Вт/(m \cdot K)$ ;  $R_m$  – толщина пластины металла,  $m$ ;

- начальные условия:

$$T_m(x_m, 0) = 273 \text{ K}, \quad 0 < x_m < R_m; \quad (2.5)$$

- граничные условия:

для поверхности пластины металла при граничных условиях 1-го рода в пространственной координате  $R_m$

$$T_m(R_m, \tau) = 1273 \text{ K}; \quad (2.6)$$

для теплового центра пластины металла при граничных условиях 2-го рода в пространственной координате 0

$$\lambda_m \frac{\partial T_m(0, \tau)}{\partial x_m} = 0. \quad (2.7)$$

## Решение задачи аналитическим методом

Аналитическая зависимость изменения температуры и количества переданного тепла во времени для любой точки тела получена на основании решения основного дифференциального уравнения теплопроводности.

Решение задачи аналитическим методом осуществляется по формуле [70]:

$$T = T_n - (T_n - T_0) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n} \cdot \cos\left(\frac{x}{R} \cdot \mu_n\right) \cdot \exp\left(-(\mu_n)^2 \cdot Fo\right), \quad (2.8)$$

где  $\mu_n$  – корни характеристического уравнения:

$$\mu_n = \frac{\pi \cdot (2 \cdot n - 1)}{2}; \quad T - \text{температура пластины в конце}$$

нагрева,  $K$ ;  $T_n$  – температура поверхности пластины,  $K$ ;

$T_0$  – начальная температура пластины,  $K$ ;

$R$  – определяющий размер, равный толщине пластины,  $m$ ;

$Fo$  – безразмерное время, которое определяется по формуле:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2}, \quad (2.9)$$

где  $\tau$  – время нагрева,  $s$ ;  $a$  – коэффициент теплопроводности,  $m^2/s$ , равный

$$a = \frac{\lambda_m}{c_m \cdot \rho_m}, \quad (2.10)$$

где  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности,  $Вт/(м \cdot К)$ .

Для стали ст.20 средний для диапазона температур 50 – 800  $^{\circ}C$  коэффициент теплопроводности  $\lambda_m = 38,7$  [71];  $c$  –

удельная массовая теплоемкость стали,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Для стали ст.20 удельная среднemasсовая теплоемкость для диапазона температур  $50 - 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $c = 612,8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  [71];  $\rho$  – плотность стали,  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Для стали ст.20,  $\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$  [71].

Тогда

$$a = \frac{38,7}{612,8 \cdot 7800} = 8,09 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

На основании этих формул была составлена программа в пакете MathCAD, текст которой приведен (прил. 1). Ряд считался с точностью до 20 члена, чтобы обеспечить погрешность расчета менее  $1^{\circ}$  ( $0,1 \%$ ) (прил. 2 – 5, 8 – 23).

### **Решение задачи в многоцелевом вычислительном комплексе PHOENICS**

В программе PHOENICS существует среда визуального редактора. В окне визуального редактора устанавливаются исходные данные для решения задачи. Сначала задаются размеры области изучения потока (в данном случае размеры пластины). В многоцелевом вычислительном комплексе PHOENICS рассматривается решение только трехмерных задач. Поэтому для сопоставления с аналитическим решением была выбрана пластина с размерами  $3 \times 3 \times 0,1 \text{ м}$ .

Исследователю, который раньше не решал подобные задачи в пакете PHOENICS, очень трудно определиться с выбором шага по пространству и по времени для обеспечения необходимой точности. С этой целью было проведено численное исследование влияния данных параметров на погрешность вычисления температуры центра в конце нагрева и время выполнения задачи. В ходе исследования толщина пластины металла принималась  $0,08$ ;  $0,1$ ;  $0,2$  и  $0,25 \text{ м}$ . Точность решения в пакете сравнивалась с аналитическим решением

(прил. 2 – 5). Результаты исследования были оформлены в виде номограмм для времени нагрева 1000 секунд, по которым можно определить для заданной толщины пластины и требуемой точности размер шага по времени  $\Delta\tau$  и по пространству  $\Delta x$ . Полученные номограммы представлены в прил. 6 – 7. Однако этими номограммами не всегда удобно пользоваться. Поэтому было предложено обработать полученные результаты с помощью нейросети.

### **Обработка результатов с помощью нейронных сетей**

Нейронная сеть используется тогда, когда не известен точный вид связей между входами и выходами. В данном случае нет четкой зависимости между заданной толщиной пластины, требуемой точностью и шагом по пространству и по времени. Поэтому в качестве метода обработки результатов исследования был выбран метод моделирования на основе нейронных сетей с использованием нейропакета NeuroSolutions.

Относительная погрешность результатов нейросети в данном случае составила 0,03 – 0,04%. Некоторые результаты использования нейронных сетей для определения шага по времени и по пространству представлены в табл. 2.1.

**Таблица 2.1.** Результаты тестирования, обученной нейросети

| Толщина пластины, м | Точность расчета, % | Шаг по времени (теор.) | Шаг по пространству (теор.) | Шаг по времени (нейросеть) | Шаг по пространству (нейросеть) |
|---------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 0,08                | 0,74                | 24                     | 30                          | 24                         | 30                              |
| 0,1                 | 3,9                 | 15                     | 30                          | 15                         | 30                              |
| 0,2                 | 1,4                 | 30                     | 33                          | 31                         | 35                              |
| 0,25                | 0,9                 | 33                     | 36                          | 34                         | 37                              |

## **Решение задач нагрева пластины металла в расширенном диапазоне параметров и определение его точности с помощью нейросети**

На точность решения задач в многоцелевом вычислительном комплексе влияют не только величина шага по пространству и по времени, но и размеры нагреваемого тела, теплофизические свойства материала, общее время нагрева и температура на поверхности металла. Для исследования действия этих факторов диапазон варьируемых параметров был расширен. Это связано с появлением нового изменяющегося фактора и с невозможностью нахождения решения в узком диапазоне. Общее время нагрева принимало следующие значения: 250, 500, 1000, 1500 с. Аналитическое решение задачи также находилось с помощью программы, составленной в пакете MathCAD (прил. 1). Численным методом задача решалась в пакете PHOENICS. Результаты проведенного исследования представлены в прил. 8 – 23. Полученные номограммы для соответствующих толщин пластины металла и общего времени нагрева в крайних точках исследования приведены в прил. 24, 25.

Результаты данного исследования были также обработаны с помощью нейронной сети. Которая в дальнейшем использовалась не только для определения размера шага по пространству и по времени, но и времени выполнения задачи для заданной точности определения температуры центра в конце нагрева. Строки полученной таблицы базы данных были дважды перемешаны (прил. 8 – 23). Это связано с тем, что средняя погрешность нейросети в случаях без перемешивания и с одним перемешиванием оказалась больше. Таким образом, дважды рандомизированные данные дают более корректное описание процессов. Входными величинами в этом случае являются: для шага по пространству и шага по времени – толщина

пластины, время нагрева и погрешность расчета, а для времени выполнения задачи – еще и полученные ранее размеры шага по пространству и по времени. Нейросеть для каждого случая состояла из одного слоя, 10000 периодов и обучалась по три раза. Диапазон погрешности в данном случае составил 0,12 – 4,9%. Некоторые результаты использования нейронных сетей для определения шага по времени, по пространству и времени выполнения задачи представлены в табл. 2.2.

Влияние на точность решения задач в пакетах теплофизических свойств материала и температуры на поверхности металла требует дополнительного исследования.

На основании табл. 2.2 видно, что предложенная методика оценки точности современных вычислительных пакетов на основе нейросетевой технологии, проверена на задачах нагрева пластины металла при граничных условиях первого рода и может использоваться.

**Таблица 2.2.** Результаты тестирования, обученной нейросети

| Толщина пластины, м | Время нагрева, с | Точность расчета, % | Шаг по времени (теор.) | Шаг по пространству (теор.) | Шаг по времени (нейросеть) | Шаг по пространству (нейросеть) | Время выполнения, с (теор.) | Время выполнения, с (нейросеть) |
|---------------------|------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 0,08                | 250              | 0,1                 | 220                    | 320                         | 217                        | 328                             | 1450                        | 1469                            |
| 0,08                | 500              | 2,2                 | 320                    | 20                          | 328                        | 26                              | 14                          | 16                              |
| 0,08                | 1000             | 0                   | 320                    | 220                         | 316                        | 226                             | 1531                        | 1554                            |
| 0,08                | 1500             | 0,2                 | 170                    | 120                         | 164                        | 115                             | 440                         | 416                             |
| 0,1                 | 250              | 1,2                 | 270                    | 70                          | 275                        | 74                              | 34                          | 10                              |
| 0,1                 | 500              | 0,05                | 220                    | 320                         | 211                        | 326                             | 1494                        | 1510                            |
| 0,1                 | 1000             | 0,09                | 270                    | 270                         | 274                        | 256                             | 1542                        | 1582                            |
| 0,1                 | 1500             | 0,2                 | 170                    | 170                         | 171                        | 173                             | 619                         | 611                             |
| 0,2                 | 250              | 0,04                | 320                    | 270                         | 307                        | 265                             | 1597                        | 1616                            |

Окончание табл. 2.2

| Толщина пластины, м | Время нагрева, с | Точность расчета, % | Шаг по времени (теор.) | Шаг по пространству (теор.) | Шаг по времени (нейросеть) | Шаг по пространству (нейросеть) | Время выполнения, с (теор.) | Время выполнения, с (нейросеть) |
|---------------------|------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 0,2                 | 500              | 1,4                 | 20                     | 170                         | 27                         | 67                              | 71                          | 125                             |
| 0,2                 | 1000             | 2,9                 | 20                     | 70                          | 16                         | 73                              | 30                          | 38                              |
| 0,2                 | 1500             | 1                   | 270                    | 70                          | 273                        | 70                              | 128                         | 100                             |
| 0,25                | 250              | 0,04                | 220                    | 220                         | 238                        | 214                             | 109                         | 154                             |
| 0,25                | 500              | 0,6                 | 70                     | 170                         | 67                         | 165                             | 143                         | 187                             |
| 0,25                | 1000             | 2                   | 20                     | 170                         | 28                         | 186                             | 72                          | 116                             |
| 0,25                | 1500             | 9,5                 | 20                     | 120                         | 23                         | 118                             | 52                          | 98                              |

#### 2.4. Решение задачи нагрева металла при ГУ второго рода и определение точности этого решения с помощью нейросети

Дана неограниченная металлическая пластина с постоянными теплофизическими свойствами толщиной 0,1 м с начальной температурой 273 К. На поверхности пластины находится источник с постоянным удельным тепловым потоком  $146 \text{ кВт/м}^2$ , а на нижней границе заданы адиабатические условия нагрева. Необходимо найти распределение температуры по толщине пластины в любой момент времени. Время нагрева составляет 1000 с.

При этом формулировка задачи имеет вид:

- для металла прирост теплосодержания будет происходить только за счёт теплопроводности:

$$c_m \frac{\partial T_m(x_m, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_m \frac{\partial^2 (T_m(x_m, \tau))}{\partial x_m^2} \text{ при } \tau > 0 \text{ и } 0 < x_m < R_m, \quad (2.11)$$

где  $T_m(x_m, \tau)$  – температура металла,  $K$ ;  $x_m$  – текущая пространственная координата по толщине металла,  $m$ ;  $\tau$  – время,  $s$ ;  $c_m$  – удельная теплоёмкость металла,  $Джс/(м^3 \cdot K)$ ;  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности металла,  $Вт/(м \cdot K)$ ;  $R_m$  – толщина пластины металла,  $m$ .

*Начальные условия:*

$$T_m(x_m, 0) = 273 \text{ K} . \quad (2.12)$$

*Граничные условия:*

для поверхности пластины металла при граничных условиях 2-го рода в пространственной координате  $R_m$

$$q(R_m, \tau) = 146 \text{ кВт}/м^2; \quad (2.13)$$

для теплового центра пластины металла при граничных условиях 2-го рода в пространственной координате 0

$$\lambda_m \frac{\partial T_m(0, \tau)}{\partial x_m} = 0. \quad (2.14)$$

### **Решение задачи аналитическим методом**

Аналитическая зависимость изменения температуры и количества переданного тепла во времени для любой точки тела получена на основании решения основного дифференциального уравнения теплопроводности.

Решение задачи аналитическим методом осуществляется по формуле [70]:

$$T = T_0 + \left\{ \frac{q \cdot R}{2 \cdot \lambda} \cdot \left[ 2 \cdot Fo + \left( \frac{x}{R} \right)^2 - \frac{1}{3} + 1 \times \sum_{n=1}^{20} \left[ \frac{4 \cdot (-1)^{n+1}}{(\mu_n)^2} \cdot \cos \left( \frac{x}{R} \cdot \mu_n \right) \cdot \exp \left( -(\mu_n)^2 \cdot Fo \right) \right] \right] \right\}, \quad (2.15)$$

где  $T$  – температура пластины в конце нагрева,  $K$ ;  $T_0$  – начальная температура пластины,  $K$ ;  $R$  – определяющий размер, равный толщине пластины,  $m$ ;  $Fo$  – безразмерное время  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $Вт/(м \cdot K)$ ;  $x$  – текущая координата,  $m$ ;  $\mu_n = \pi \cdot n$  – корни характеристического уравнения.

Теплофизические коэффициенты для решения задачи принимались для ст.20, как для задачи с граничными условиями первого рода.

На основании формулы аналитического решения определения температур была составлена программа в пакете MathCAD (прил. 26). Ряд считался с точностью до 20 члена, чтобы обеспечить погрешность расчета менее 1°.

### **Решение задачи в многоцелевом вычислительном комплексе PHOENICS**

Результаты решения задачи нагрева металлической пластины с постоянными теплофизическими свойствами в многоцелевом вычислительном комплексе PHOENICS приведены в прил. 27 – 30.

Исследователю, который раньше не решал подобные задачи в пакете PHOENICS, очень трудно определиться с выбором шага по пространству и по времени для обеспечения необходимой точности. С этой целью было проведено численное исследование влияния данных параметров на погрешность вычисления температуры поверхности и температурного перепада по сечению пластины в конце нагрева и время выполнения задачи. В ходе исследования менялись

толщина пластины металла 0,08 – 0,25 м и время нагрева 250 – 1000 с. Точность решения в пакете сравнивалась с аналитическим решением (прил. 31 – 35). Результаты исследования были оформлены в виде номограмм для времени нагрева 1000 с, по которым можно определить для заданной толщины пластины и требуемой точности размер шага по времени  $\Delta t$  и по пространству  $\Delta x$ . Полученные номограммы представлены в прил. 36. Однако этими номограммами не всегда удобно пользоваться. Поэтому было предложено обработать полученные результаты с помощью нейросети.

### Обработка результатов с помощью нейронных сетей

Перед началом моделирования необходимо создать базу данных в виде таблицы Microsoft Excel из полученных в результате численного исследования величин, представленных в прил. 27 – 35.

Итоговую модель, обученную и протестированную, можно использовать для определения размера шага по пространству и по времени.

Относительная погрешность результатов нейросети в данном случае составила менее 3%. Некоторые результаты использования нейронных сетей для определения шага по времени и по пространству представлены в табл. 2.3.

**Таблица 2.3.** Результаты тестирования, обученной нейросети

| Толщина пластины, м | Точность расчета $T_{пов}$ , % | Точность расчета $\Delta T$ , % | Шаг по времени (теор.) | Шаг по пространству (теор.) | Шаг по времени (нейросеть) | Шаг по пространству (нейросеть) |
|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 0,1                 | 0,77                           | 4,24                            | 36                     | 21                          | 35,52                      | 21,1                            |
| 0,2                 | 3,12                           | 4,58                            | 18                     | 48                          | 17,99                      | 47,62                           |
| 0,1                 | 0,83                           | 3,71                            | 33                     | 24                          | 33,3                       | 24,44                           |
| 0,25                | 3,31                           | 6,19                            | 24                     | 21                          | 23,81                      | 20,92                           |

Окончание табл. 2.3

| Толщина пластины, $m$ | Точность расчета $T_{пов}$ , % | Точность расчета $\Delta T$ , % | Шаг по времени (теор.) | Шаг по пространству (теор.) | Шаг по времени (нейросеть) | Шаг по пространству (нейросеть) |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 0,08                  | 1,62                           | 2,85                            | 24                     | 30                          | 24,1                       | 30,84                           |
| 0,08                  | 0,34                           | 4,83                            | 42                     | 18                          | 42,72                      | 18,24                           |
| 0,25                  | 2,26                           | 4,54                            | 36                     | 24                          | 36,42                      | 23,96                           |
| 0,2                   | 1,9                            | 4,58                            | 48                     | 21                          | 47,59                      | 21,33                           |

Влияние на точность решения задач нагрева в многофункциональных численных пакетах теплофизических свойств материала представлено в следующем разделе.

### **2.5. Решение задачи нагрева металла с переменными теплофизическими свойствами при граничных условиях первого рода и определение точности этого решения с помощью нейросети**

Дана неограниченная металлическая пластина с теплофизическими свойствами, зависимиыми от температуры толщиной  $0,1 m$  с начальной, постоянной по объему температурой  $273 K$ . К поверхности пластины приложен источник с постоянной температурой  $1273 K$ , а на нижней границе заданы адиабатические условия нагрева.

Необходимо найти распределение температуры по толщине пластины в любой момент времени. Время нагрева составляет  $1000 c$ .

При этом формулировка задачи имеет вид:

- для металла прирост теплосодержания будет происходить только за счёт теплопроводности:

$$c_m(T) \frac{\partial T_m(x_m, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial \lambda_m(T) \partial (T_m(x_m, \tau))}{\partial x_m^2} \text{ при } \tau > 0 \text{ и } 0 < x_m < R_m, (2.16)$$

где  $T_m(x_m, \tau)$  – температура металла,  $K$ ;  $x_m$  – текущая пространственная координата по толщине металла,  $m$ ;  $\tau$  – время,  $s$ ;  $c_m(T)$  – удельная теплоёмкость металла,  $Дж/(m^3 \cdot K)$ ;  $\lambda_m(T)$  – коэффициент теплопроводности металла,  $Вт/(m \cdot K)$ ;  $R_m$  – толщина пластины металла,  $m$ .

*Начальные условия:*

$$T_m(x_m, 0) = 273 \text{ K}. (2.17)$$

*Граничные условия:*

для поверхности пластины металла при граничных условиях 2-го рода в пространственной координате  $R_m$

$$T_m(R_m, \tau) = 1273 \text{ K}; (2.18)$$

для теплового центра пластины металла при граничных условиях 2-го рода в пространственной координате 0

$$\lambda_m \frac{\partial T_m(0, \tau)}{\partial x_m} = 0. (2.19)$$

### Решение задачи

Аналитическая зависимость изменения температуры и количества переданного тепла во времени для любой точки тела получить на основании решения основного дифференциального уравнения теплопроводности с переменными теплофизическими свойствами весьма сложная задача.

В математическом пакете Mathcad появилась возможность решать одномерные нестационарные

уравнения в частных производных посредством новой встроенной функции: pdsolve [72].

Pdsolve базируется на численном *методе линий* (MOL), который применяется для гиперболических и параболических уравнений в частных производных.

Идея численного метода линий (MOL), реализованного в Pdsolve. Заключается в дискретизации по пространственной координате  $x$ , но остаётся исходное непрерывное представление для временной переменной  $\tau$ . В результате если оставить теплофизические свойства постоянными, то используется следующее уравнение

$$\frac{\partial T_m(x_m, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_m}{c_m \cdot \Delta x^2} (T_{i+1} - 2 \cdot T_i + T_{i-1}). \quad (2.20)$$

Иногда это называют семидискретизацией (буквально, «полудискретизацией»). Уравнения вида (2.20) можно записать для всех узлов сетки, с некоторыми модификациями для поверхностных узлов. Тогда вместо уравнения в частных производных получается система обыкновенных дифференциальных уравнений, порядок которой равен числу узлов сетки. Решение этой редуцированной задачи, т.е. интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений, является хорошо изученной проблемой.

Для стали ст.20 в программе Excel были получены законы изменения теплофизических свойств (коэффициент теплопроводности, удельная массовая теплоемкость стали, плотность стали) от температуры [71].

С учётом этих зависимостей была составлена программа в пакете MathCAD.

## **Решение задачи в многоцелевом вычислительном комплексе PHOENICS**

В окне визуального редактора PHOENICS устанавливаются исходные данные для выполнения программы. Задаются размеры пластины с помощью пульта управления в главном меню. Они устанавливаются так же, как и для предыдущих задач.

Аналогично было проведено численное исследование влияния шага по пространству и по времени на погрешность вычисления температуры поверхности и температурного перепада по сечению пластины в конце нагрева и время выполнения задачи. В ходе исследования менялись толщина пластины металла 0,08 – 0,25 м и время нагрева 250 – 1000 с. Точность решения в пакете сравнивалась с аналитическим решением. Результаты исследования были оформлены в виде номограмм для времени нагрева 1000 с, по которым можно определить для заданной толщины пластины из стали 20 и требуемой точности размер шага по времени  $\Delta t$  и по пространству  $\Delta x$ . По результатам исследования получены номограммы. Полученные результаты численного исследования обработаны с помощью нейросети.

### **Обработка результатов с помощью нейронных сетей**

Перед началом обработки была создана база данных в виде таблицы Microsoft Excel из полученных в результате численного исследования величин.

Относительная погрешность результатов нейросети в данном случае составила менее 5%.

Таким образом, предложенная методика оценки точности современных вычислительных пакетов на основе нейросетевой технологии, проверена на задачах нагрева пластины из металла при граничных условиях первого и второго рода и может быть рекомендована к применению.

### **3. Использование нейросетевых технологий при выборе технического решения реконструкции теплотехнологических установок для повышения их эффективности**

Для обоснованного выбора утилизационной установки необходимо применение математических моделей отражающих работу теплотехнологической установки и сопряжённого с ней оборудования.

Этот подход избавляет от проведения дорогостоящих промышленных экспериментов или физического моделирования, однако и он имеет ряд своих недостатков. Если используемые для этих целей математические модели в виде компьютерных программ достаточно точно отражают работу реальных (моделируемых) объектов, то, как правило, они имеют сложную структуру, большие объёмы и занимают значительное время для расчётов.

#### **3.1. Решение задачи расчета печи, молота и оптимизации режима работы установки**

Анализ состояния теплотехнологий кузнечного производства на машиностроительных предприятиях позволяет сформулировать задачу, направленную на повышение энергоэффективности работы кузнечных производств, на основе разработанных методов и алгоритмов расчета теплотехнологического оборудования кузнечно-штамповочного производства.

В задачу математической модели входит оптимизация режимов работы установки *печь–молот* и определение для оптимального режима технически обоснованных норм расхода топлива на печь, электрической энергии на молот, а также разработка режимно-технологических карт нагрева металла.

Для определения связей режимов работы печи и молота в задачу входит также определение закономерности влияния изменения обобщенного размера заготовок  $R_v$  и параметров качества нагрева на времяковки, определение факторов, влияющих на затраты энергииковки.

При решении задачи необходимо обосновать технологические ограничения, исследовать изменение целевой функции от варьируемых параметров.

### **3.1.1. Математическая модель нагревательной печи с непрерывным процессом загрузки выгрузки металла**

*Описание математической модели печи*

Модель предназначена для печи, работающей в стационарном режиме.

Стационарный тепловой поток в кладку можно считать равным количеству теплоты, передаваемому от газов кладке конвекцией. При этих допущениях кладку с точки зрения радиационного теплообмена можно считать идеальной обмуровкой. Примем, что газовый объём в рабочем пространстве печи изотермичен.

Поскольку процесс загрузки и выгрузки металла непрерывен, температура по всей обогреваемой поверхности металла в данный момент постоянна [73]. Математическая модель строится на основании решения сопряженной задачи теплообмена в системе газ–кладка–металл. В качестве математического метода моделирования принят метод дискретного удовлетворения краевых условий (ДУКУ) [74–77].

Алгоритм решения задачи включает в себя:

1. Расчёт процесса горения топлива.
2. Определение количества заготовок, одновременно находящихся в печи.
3. Расчет параметров внешнего теплообмена.

4. Определение времениковки заготовок в зависимости от параметров качества нагрева металла и параметров молота.
5. Решение сопряжённой задачи теплообмена.
6. Тепловой баланс рабочего пространства.
7. Расчет допустимого перепада температур в момент максимального температурного напряжения.
8. Уточнение параметров внешнего теплообмена.
9. Определение себестоимости цехового передела и оптимизация режима работы установки *печь–молот*.

*Алгоритм расчета процесса горения топлива*

Расчётом определяются удельный расход воздуха, поступающего на горение, низшая теплота сгорания топлива, удельный выход и процентный состав продуктов горения. Для расчета процесса горения используется комплекс программ [78, 79].

*Алгоритм расчета геометрических характеристик заготовок.*

К параметрам, связанным с размещением нагреваемых заготовок на подине печи относятся: площадь открытой поверхности заготовки  $F_{ОТКР}$ , площадь затененной поверхности заготовки  $F_{ЗАТ}$ , эффективный угловой коэффициент затененных участков металла в печь  $\Psi_{ЗАТ-ПЕЧЬ}$ . Для расчета  $F_{ОТКР}$ ,  $F_{ЗАТ}$ ,  $\Psi_{ЗАТ-ПЕЧЬ}$  использованы формулы, известные в литературе [80–83].

*Определение количества заготовок, одновременно находящихся в печи*

Количество заготовок, одновременно находящихся в печи, можно определить по формуле:

$$n = \frac{F_{акт}}{f_i}, \quad (3.1)$$

где  $F_{акт}$  – активная площадь пода (площадь без учета зазоров между металлом и стенкой печи),  $m^2$ ;  $f_i$  – площадь пода, занятая одной заготовкой с относящимися к ней зазорами,  $m^2$ .

#### *Алгоритм расчета параметров внешнего теплообмена*

К параметрам внешнего теплообмена относятся приведенный коэффициент излучения газа с учетом кладки на металл  $C_{г-к-м}$  и коэффициент конвективной теплоотдачи от газа к обогреваемой поверхности металла  $\alpha_k$ .

Коэффициент  $C_{г-к-м}$ ,  $Вт/(m^2 \cdot K^4)$  с учётом допущений принятых в описании модели, определяется по формуле В.Н. Тимофеева [81]. В нулевом приближении температура газа принимается и затем уточняется после решения сопряженной задачи теплообмена:

$$C_{г-к-м} = C_o \cdot \varepsilon_m^{\varepsilon\phi} \frac{1 + \omega^{\varepsilon\phi} - \varepsilon_g}{\frac{1 - \varepsilon_g}{\varepsilon_g} [\varepsilon_m^{\varepsilon\phi} + (1 - \varepsilon_m^{\varepsilon\phi}) \varepsilon_g] + \omega^{\varepsilon\phi}}, \quad (3.2)$$

где  $C_o$  – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела,  $Вт/(m^2 \cdot K^4)$ ;  $\omega^{\varepsilon\phi}$  – эффективная степень развития обмуровки.

Эффективная степень черноты металла определяется по формуле

$$\varepsilon_m^{\varepsilon\phi} = \frac{\varepsilon_{откр} \cdot F_{откр} + \varepsilon_{зат} \cdot F_{зат} \cdot \Psi_{зат-печь}}{F_{откр} + F_{зат} \cdot \Psi_{зат-печь}}, \quad (3.3)$$

где  $\varepsilon_{ОТКР}$ ,  $\varepsilon_{ЗАТ}$  – степень черноты открытых и затенённых участков металла (принимается  $\varepsilon_{ОТКР}=0,8$ );  $F_{ОТКР}$ ,  $F_{ЗАТ}$  – соответственно площадь поверхности открытых и закрытых участков,  $м^2$ ;  $\Psi_{ЗАТ-ПЕЧЬ}$  – эффективный угловой коэффициент затенённых участков металла в печь.

$$\varepsilon_{ЗАТ} = \frac{\varepsilon_{ОТКР}}{\varepsilon_{ОТКР} + (1 - \varepsilon_{ОТКР}) \cdot \Psi_{ЗАТ-ПЕЧЬ}}. \quad (3.4)$$

Степень черноты газа  $\varepsilon_g$  определяется [84]:

$$\varepsilon_g = 1 - \exp(-K_g \cdot P_g \cdot S_{эф}), \quad (3.5)$$

где  $K_g$  – коэффициент ослабления лучей в смесях  $CO_2 - H_2O$ ,

$$K_g = \frac{0,8 + 1,6 \cdot P_{H_2O}}{\sqrt{P_g \cdot S_{эф}}} (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot T_g). \quad (3.6)$$

Здесь  $P_g = P_{CO_2} + P_{H_2O}$  – суммарное парциальное давление углекислого газа и водяного пара;  $T_g$  – температура газа,  $K$ ;  $S_{эф}$  – эффективная длина луча в газовом слое,  $м$ , определяется по формуле:

$$S_{эф} = \frac{3,6 \cdot V_{g,n}}{F_{кл}^{изл} + F_M^{изл}}, \quad (3.7)$$

где  $F_{кл}^{изл}$ ,  $F_M^{изл}$  – соответственно поверхности кладки и металла, омываемые газом;  $м^2$ ;  $V_{g,n}$  – объем рабочего пространства печи, заполненный газом,  $м^3$ .

Эффективная степень развития обмуровки рассчитывается по формуле

$$\omega^{\text{эф}} = F_{\text{кл}}^{\text{изл}} / F_{\text{м}}^{\text{эфф}}, \quad (3.8)$$

где  $F_{\text{м}}^{\text{эфф}}$ ,  $F_{\text{кл}}^{\text{изл}}$  — соответственно эффективная поверхность металла и излучающая поверхность кладки,  $\text{м}^2$ .

$$F_{\text{м}}^{\text{эфф}} = F_{\text{ОТКР}} + F_{\text{ЗАТ}} \cdot \Psi_{\text{ЗАТ-ПЕЧЬ}}. \quad (3.9)$$

Расчет степени черноты газа осуществляется подпрограммой [85]. Температура газа для определения приведенного коэффициента излучения газа с учетом кладки на металл в нулевом приближении задается. Для определения коэффициента конвективной теплоотдачи может быть использована формула Л.А. Бровкина и Б.Г. Коптева, где коэффициент теплоотдачи является функцией расхода топлива на печь. Так как расход топлива определяется расчетом теплового баланса, коэффициент в нулевом приближении задается и уточняется затем после решения сопряженной задачи теплообмена и расчета теплового баланса.

#### *Решение сопряженной задачи теплообмена*

Для стационарно работающей печи сопряженная задача теплообмена в печи предусматривает одновременное определение температурного поля металла и температуры газа.

Сопряженный теплообмен в системе газ–кладка–металл описывается уравнением

$$q = C_{\text{г-к-м}} \cdot [T_{\text{г}}^4 - T^4(I, Fo)] + \alpha_{\text{м}} \cdot [T_{\text{г}} - T(I, Fo)], \quad (3.10)$$

где  $q$  – результирующий тепловой поток на обогреваемую поверхность металла,  $Bm/m^2$ ;  $T(1, Fo)$  – температура обогреваемой поверхности металла,  $K$ ;  $Fo = (\alpha \cdot \tau) / R_{v,m}$  – безразмерное время;  $\tau$  – время нагрева,  $c$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности металла,  $m^2/c$ ;  $R_{v,m}$  – расчётный размер нагреваемого тела,  $m$ .

Так как заготовки располагаются на поду с зазорами, расчётный размер  $R_{v,m}$  определяется как

$$R_{v,m} = V_m / F_m^{\text{эф}} \quad (3.11)$$

Уравнение справедливо при условии, что в плоскости контакта металла с подом приняты адиабатические условия теплообмена. Условие сложного теплообмена (3.10) на поверхности металла приведены к условному конвективному виду:

$$q = \alpha_{\Sigma} \cdot [T_{\Gamma} - T(1, Fo)]; \quad (3.12)$$

$$\alpha_{\Sigma} = C_{\Gamma-KЛ-M} [T_{\Gamma}^4 - T^4(1, Fo)] / [T_{\Gamma} - T(1, Fo)] + \alpha_m. \quad (3.13)$$

В соответствии с методом ДУКУ тепловой поток на обогреваемой поверхности металла запишется [76, 77, 86, 87, 88] в виде

$$\alpha_{\Sigma,i} \cdot \left[ T_{\Gamma} - T(1,0) - \sum_{n=1}^g A_n \cdot Fo_i^{n/2} \right] = \frac{\lambda_M [T_{\text{сп}}(Fo_i)]}{R_{v,m}} \times \\ \times \left[ \sum_{n=1}^g A_n \cdot \nabla \Phi_{1,n}(Fo_i) + \sum_{n=1}^m b_n \cdot \nabla f_{1,n}(Fo_i) \right] \quad i \in \{ \overline{1, g} \} \quad (3.14)$$

где  $T(1,0)$  – температура поверхности заготовки в начальный момент времени,  $K$ ;  $A_n$  – неизвестные коэффициенты в аппроксимации температуры на обогреваемой поверхности металла, определяемые дискретным удовлетворением граничных условий в выражении (3.12);  $\lambda_M [T_{cp}(Fo_i)]$  – теплопроводность материала в зависимости от среднemasсовой температуры материала в  $i$ -й момент времени в процессе вычисления уточняется методом итераций;  $Bm/(m \cdot K)$ ;  $\nabla \Phi_{l,n}(Fo_i)$  – вспомогательная функция для вычисления теплового потока в  $i$  момент времени;  $b_n$  – коэффициенты аппроксимации начального температурного поля металла;  $\nabla f_{l,n}(Fo_i)$  – вспомогательная функция для вычисления начального температурного поля.

Система (3.12) включает  $g$  уравнений, где  $g$  – число моментов, в которых удовлетворяются краевые условия.

Заданное качество нагрева металла определяется температурой на поверхности металла в конце нагрева, поэтому в качестве обязательного условия к системе (3.12) записывается уравнение

$$T(1, Fo_K) = T(1, 0) - \sum_{n=1}^g A_n \cdot Fo_K^{n/2}, \quad (3.15)$$

где  $T(1, Fo_K)$  – конечная температура на поверхности металла,  $K$ ;  $Fo_K$  – безразмерное время достижения этой температуры.

Система (3.14), (3.15) включает  $(g + 1)$  уравнений с неизвестными  $A_n$  и  $T_\Gamma$ . Из решения системы (3.14, 3.15) определяются [88] неизвестные коэффициенты  $A_n$  и

температура газа  $T_G$ , которую необходимо поддерживать постоянной в рабочем пространстве печи, чтобы обеспечить заданное качество нагрева металла.

Второй характеристикой качества нагрева является перепад температур по сечению металла в конце нагрева, который определяется по формуле

$$\Delta T_{1-0}(Fo_K) = \sum_{n=1}^g A_n \cdot \nabla \Phi_{1-0,n}(Fo_K) + \sum_{n=1}^m b_n \cdot \nabla f_{0-1,n}(Fo_i) \quad (3.16)$$

Таким образом, время  $Fo_K$  должно удовлетворять двум заданным условиям температуре на поверхности металла  $T(1, Fo_K)$  и перепаду температур по сечению металла в конце нагрева  $\Delta T_{1-0}(Fo_K)$ . Для нахождения  $Fo_K$  необходимо решить нелинейную систему из уравнений (3.14 – 3.16). Для решения системы при фиксированной температуре на поверхности в конце нагрева металла  $T(1, Fo_K)$ , которая задана условиями задачи, изменяется допустимый перепад температур по сечению. Зависимость изменения  $\Delta T_{1-0}(Fo_K)$  от  $Fo_K$  близка к гиперболе. Поэтому для аппроксимации  $\Delta T_{1-0}(Fo_K)$  принята зависимость

$$\Delta T_{1-0}(Fo_K) = f(1/Fo_K). \quad (3.17)$$

Система (3.14 – 3.16) решается для трёх значений  $Fo_K$  в пределах возможного интервала изменения этого параметра. Имея три значения  $\Delta T_{1-0}(Fo_K) = f(1/Fo_K)$ , квадратичной интерполяцией по схеме Эйткена [89] определяется в первом приближении время нагрева  $Fo_K^{(1)}$ , соответствующее заданному перепаду  $\Delta T_{1-0}(Fo_K)$ . Во

втором приближении опять решается система (3.14 – 3.16) для значений  $Fo_K^{(1)}$  и двух значений, расположенных с шагом  $\pm \Delta Fo$ . Повторной интерполяцией по схеме Эйткена получаем второе приближение  $Fo_K^{(2)}$ . Система (3.12 – 3.14) решается при  $Fo_K = Fo_K^{(2)}$ . Полученный перепад температур по сечению металла в конце нагрева сравнивается с допустимым. Итерационный процесс продолжается до достижения условия

$$|\Delta T_{l-0}(Fo_K) - \Delta T| < \varepsilon_l, \quad (3.18)$$

где  $\Delta T$  – заданный перепад температур в конце нагрева,  $K$ .

Вспомогательные функции для вычисления теплового потока в момент  $\nabla \Phi_{1,n}(Fo_i)$  в [88] определены только до  $Fo = 11$ . Для кузнечно-прессовых цехов характерно большое количество сравнительно мелких заготовок. При этом возможны режимы с  $Fo > 11$ . В этом случае решение задачи сопряженного теплообмена для первого интервала нагрева при  $Fo_K^{(1)} = 11$ . Решением определяется температурное поле металла и температура газа  $T_g^{(1)}$ . Поле металла в конце нагрева аппроксимируется полиномом

$$T(x,0) = T(0,0) + \sum_{n=1}^m b_n \cdot x^n \quad (3.19)$$

и является начальным условием для решения сопряженной задачи во втором интервале. Время второго интервала определяется из разности

$$Fo_K^{(2)} = Fo_K - 11. \quad (3.20)$$

Решением сопряжённой задачи, таким образом, для второго интервала рассчитывается поле металла и температура газа  $T_{\Gamma}^{(2)}$  при несовпадении значений  $T_{\Gamma}^{(1)}$  и  $T_{\Gamma}^{(2)}$  принимается для 1-го интервала температура газа  $T_{\Gamma}^{(1)} = T_{\Gamma}^{(2)}$  и повторяется решение задачи до тех пор, пока не выполнится условие

$$|T_{\Gamma}^{(1)} - T_{\Gamma}^{(2)}| \leq \varepsilon_2. \quad (3.21)$$

При выполнении условия (3.21) осуществляется корректировка  $\alpha_{\Sigma}$  по формуле (3.13) и решение задачи сопряжённого теплообмена повторяется. Итерационный цикл заканчивается при выполнении условия

$$|\alpha_{\Sigma}^* - \alpha_{\Sigma}| \leq \varepsilon_3, \quad (3.22)$$

где  $\alpha_{\Sigma}^*$  и  $\alpha_{\Sigma}$  – значение суммарного коэффициента теплообмена на предыдущем и последующих итерационных шагах. Средняя по сечению металла температура определяется по формуле [88]:

$$T_{cp}(Fo_i) = T(1,0) + \sum_{n=1}^g A_n \cdot \Phi_{0-1,n}(Fo_i) + \sum_{n=1}^m b_n \cdot f_{0-1,n}(Fo_i). \quad (3.23)$$

Затем осуществляется корректировка коэффициентов теплопроводности  $\lambda_m [T_{cp}(Fo_i)]$  в соответствии с полученной средней по сечению металла температурой  $T_{cp}(Fo_i)$ . Решение задачи сопряжённого теплообмена повторяется. Итерационный процесс считается завершённым при выполнении условия

$$|\lambda_M^* [T_{cp}(Fo_i)] - \lambda_M [T_{cp}(Fo_i)]| \leq \varepsilon_4, \quad (3.24)$$

где  $\lambda_M^* [T_{cp}(Fo_i)]$ ;  $\lambda_M [T_{cp}(Fo_i)]$  – значения коэффициентов теплопроводности на предыдущем и последующем итерационных шагах.

При выполнении условия (3.24) расчет сопряженной задачи теплообмена можно считать законченным при принятом в нулевом приближении коэффициенте конвективной теплоотдачи.

#### *Тепловой баланс рабочего пространства*

Расчет теплового баланса необходим для определения расхода топлива на печь. Расход топлива на печь определится из уравнения

$$\begin{aligned} B_m (Q_n^p + Q_{возд} + Q_{топл} + Q_{дон} + Q_{x,co} - Q_{yx} - Q_g) = \\ = Q_m - Q_{экз} + Q_{кл} + Q_{изл} + Q_{охл}, \end{aligned} \quad (3.25)$$

где  $B_m$  – расход топлива на печь,  $m^3(n)/c$ ;  $Q_n^p$  – низшая теплотворная способность топлива,  $кДж/m^3(n)$  газа;  $Q_{возд}$  – физическая теплота воздуха,  $кДж/m^3(n)$  газа, при этом

$$Q_{возд} = L_g \cdot c_g \cdot T_g, \quad (3.26)$$

здесь  $L_g$  – удельный расход воздуха, поступающего на горение,  $m^3(n)/m^3(n)$  газа;  $c_g$  – удельная теплоемкость воздуха,  $кДж/(m^3(n) \cdot K)$ ;  $T_g$  – температура воздуха,  $K$ .

$Q_{топл}$  – физическая теплота топлива,  $кДж/m^3(n)$  газа:

$$Q_{топл} = c_m \cdot T_m, \quad (3.27)$$

где  $c_m$  – удельная теплоемкость топлива,  $\text{кДж}/(\text{м}^3(\text{н})\cdot\text{К})$ ;  
 $T_m$  – температура топлива,  $\text{К}$ .

$Q_{\text{доп}}$  – поступление теплоты в рабочее пространство с дополнительным теплоносителем (например, для учёта поступающей энергии при рециркуляции продуктов сгорания),  $\text{кДж}/\text{м}^3(\text{н})$  газа:

$$Q_{\text{доп}} = D_{\text{д}} \cdot I_{\text{доп}}, \quad (3.28)$$

где  $D_{\text{д}}$  – удельный расход дополнительного теплоносителя,  $\text{кг}/\text{м}^3(\text{н})$  газа;  $I_{\text{доп}}$  – энтальпия дополнительного теплоносителя,  $\text{кДж}/\text{кг}$ .

$Q_{x, \text{co}}$  – потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания,  $\text{кДж}/\text{м}^3(\text{н})$  газа, определяются следующим образом:

$$Q_{x, \text{co}} = Q_{n, \text{co}}^p \cdot V_{yx} \cdot P_{\text{co}}, \quad (3.29)$$

где  $Q_{n, \text{co}}^p$  – низшая теплота сгорания CO ( $Q_{n, \text{co}}^p = 12,636$ )  $\text{кДж}/\text{м}^3(\text{н})$ ;  $V_{yx}$  – удельный выход продуктов горения, выводящихся через системы дымоудаления,  $\text{м}^3(\text{н})/(\text{м}^3(\text{н})$  газа);  $P_{\text{co}}$  – содержание CO в продуктах сгорания в долях.

$Q_{yx}$  – потери теплоты с уходящими газами,  $\text{кДж}/\text{м}^3(\text{н})$  газа:

$$Q_{yx} = V_{yx} \cdot c_{yx} \cdot T_{yx}, \quad (3.30)$$

где  $c_{yx}$  – удельная теплоемкость продуктов сгорания,  $\text{кДж}/(\text{м}^3(\text{н})\cdot\text{К})$ ;  $T_{yx}$  – температура уходящих продуктов сгорания,  $\text{К}$ .

$Q_6$  – потери теплоты с выбивающимися газами,  $\kappa Bm$ :

$$Q_6 = V_{yx}^6 \cdot I_{yx} \cdot \Delta\tau, \quad (3.31)$$

где  $V_{yx}^6$  – удельный выход выбивающихся продуктов сгорания,  $m^3(n)/(m^3(n) \text{ газа})$ ;  $I_{yx}$  – теплосодержание выбивающихся продуктов сгорания,  $\kappa Дж/м^3(n)$ ;  $\Delta\tau$  – время действия условий,  $c$ .

$Q_m$  – затраты теплоты на нагрев металла,  $\kappa Bm$ :

$$Q_m = n \cdot G \cdot \sum_{i=1}^g [c_i (T_i - T_{i-1}) / \tau_i], \quad (3.32)$$

где  $n$  – количество заготовок,  $шт$ ;  $G$  – масса заготовки,  $кг$ ;  $g$  – число моментов времени;  $c_i$  – удельная теплоемкость стали для среднемассовой температуры металла на  $i$  интервале времени,  $\kappa Дж/(кг \cdot K)$ ;  $T_i$  – среднемассовая температура металла в  $i$ -й момент времени,  $K$ ;  $T_{i-1}$  в  $(\tau_i - i)$ -й интервал времени нагрева металла,  $c$ .

$Q_{\text{экз}}$  – теплота экзотермических реакций,  $\kappa Bm$ :

$$Q_{\text{экз}} = 5652 \cdot U_{cp} \cdot F_M, \quad (3.33)$$

здесь 5652 – тепловой эффект реакции окисления железа,  $\kappa Дж/кг$ ;  $F_M$  – обогреваемая поверхность металла,  $m^2$ ;  $U_{cp}$  – среднее значение величины угара в процессе нагрева,  $кг/(m^2 \cdot c)$ .

Величина  $U_{cp}$  определяется по известному закону изменения температуры поверхности металла  $T(1, Fo)$ .

При этом время нагрева металла делится на  $g$  интервалов, и зависимость  $T(1, Fo)$  заменяется ступенчатой ломаной линией. Среднее значение температуры на интервале,

$$T_{cp,i} = 0,5 \cdot (T_{i-1} + T_i). \quad (3.34)$$

Значение величины угара за первый час нагрева [90],  $кг/(м^2 \cdot ч)$ ,

$$U_{0,i} = C_1 \cdot \exp(C_2 \cdot T_{cp,i}(Fo_i)). \quad (3.35)$$

Квадрат угара на отрезке времени  $(\tau_i - \tau_{i-1})$ ,  $(кг/(м^2 \cdot ч))^2$ ,

$$\Delta U_i^2 = \Delta U_{0,i}^2 (\tau_i - \tau_{i-1}). \quad (3.36)$$

Квадрат угара за весь период нагрева,  $(кг/(м^2 \cdot ч))^2$ ,

$$\Delta U^2 = \sum_{i=1}^g \Delta U_i^2, \quad (3.37)$$

где  $g$  – число моментов времени.

Значение величины угара за период нагрева,  $кг/(м^2 \cdot ч)$

$$U = \sqrt{\Delta U^2}. \quad (3.38)$$

Среднее значение величины угара в процессе нагрева,  $кг/(м^2 \cdot ч)$ ,

$$U_{cp} = U/\tau. \quad (3.39)$$

$Q_{кл}$  – потери теплопроводностью через кладку,  $кВт$ ;

$$Q_{кл} = 10^{-3} \sum_{i=1}^k \frac{(T_{кл, вн} - T_{о.с.}) F_{вн, i}}{\sum_{j=1}^3 \frac{R_j \cdot F_{вн, i}}{\lambda_j(T_{ср, j}) F_{ср, i, j}} + \frac{F_{вн, i}}{\alpha_{н, i}(T_n) F_{н, i}}} . \quad (3.40)$$

Здесь  $k$  – количество ограждений печи;  $T_{кл, вн}$ ,  $T_{о.с.}$  – температуры внутренней обогреваемой поверхности кладки и окружающей среды,  $K$ ;  $R_j$  – толщина  $j$  слоя кладки,  $m$ ;  $\lambda_j(T_{ср, j})$  – коэффициент теплопроводности  $j$  слоя ограждения в зависимости от средней температуры слоя,  $кВт/(м \cdot K)$ , запишется в виде:

$$\lambda(T_{ср, i}) = a_\lambda + b_\lambda \cdot T_{ср, i}; \quad (3.41)$$

$F_{вн, i}$ ,  $F_{н, i}$  – площади внутренней и наружной поверхности  $i$ -го ограждения печи,  $m^2$ ;  $F_{ср, i, j}$  – средняя площадь  $j$ -го слоя,  $i$ -го ограждения  $m^2$ ;  $\alpha_{н, i}$  – приведённый коэффициент теплоотдачи,  $кВт/(m^2 \cdot K)$ , от наружных поверхностей, определяемый по формулам [91]:

$$\text{для вертикальной стены} \quad \alpha_n = -9,81 + 0,0652 \cdot T_H; \quad (3.42)$$

$$\text{для свода} \quad \alpha_n = -10,2 + 0,0672 \cdot T_H; \quad (3.43)$$

$$\text{для пода} \quad \alpha_n = -9,69 + 0,0640 \cdot T_H; \quad (3.44)$$

где  $T_H$  – температура наружной поверхности кладки,  $K$ .

$Q_{изл}$  – потери излучением через окно загрузки,  $кВт$ :

$$Q_{изл} = C_0 \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 F_{ок} \cdot \Psi \cdot \Phi, \quad (3.45)$$

где  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела ( $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-3}$ ),  $кВт/(м^2 \cdot К^4)$ ;  $F_{ок}$  – открытая площадь загрузочного окна,  $м^2$ ;  $\Phi$  – коэффициент диафрагмирования, определяемый в зависимости от размеров окна и толщины кладки;  $\Psi$  – доля времени, в течение, которого окно открыто;  $T_n$  – температура печи,  $К$ .

$Q_{охл}$  – потери теплоты с охлаждающей водой,  $кВт$ :

$$Q_{охл} = c_e \cdot G_e \cdot \Delta t, \quad (3.46)$$

где  $c_e$  – удельная теплоемкость воды,  $кДж/(м^3 \cdot К)$ ;  $G_e$  – расход воды,  $м^3/с$ ;  $\Delta t$  – разность температур воды на выходе и входе водоохлаждаемых элементов,  $К$ .

Из расчета теплового баланса определяется расход топлива на печь.

#### *Расчет допустимого перепада температур по сечению металла*

Математическая модель должна иметь ограничения на скорость нагрева, которая определяется допустимым перепадом температур в металле.

Для определения допустимого перепада температур по сечению металла могут быть использованы формулы [73]:

$$\Delta T_{дон,1} = \frac{2 + \kappa}{3,6 \cdot \kappa} \sigma_{дон,1}(T_{cp}) ; \quad (3.47)$$

$$\Delta T_{дон,2} = \frac{2 + \kappa}{7,2 \cdot \kappa} \sigma_{дон,2}(T_{cp}), \quad (3.48)$$

где  $\kappa$  – коэффициент формы;  $\sigma_{дон,1}(T_{cp})$ ,  $\sigma_{дон,2}(T_{cp})$  – функция допустимого термического напряжения

соответственно на растяжение и сжатие данной марки металла. Под  $\sigma_{\text{дон}}$  понимается предел текучести.

При температуре выше  $773 \text{ K}$  все марки стали достаточно пластичны. Поэтому, используя уравнение (3.16), рассчитывается для ряда моментов времени с шагом  $\Delta Fo$  перепад температур  $\Delta T_{l-0}(Fo_i)$ . Расчёт продолжается, пока в тепловом центре не установится температура, равная  $T(0, Fo_i) = 773 \text{ K}$ . Аппроксимируем полученную зависимость  $\Delta T_{l-0}(Fo_i)$  параболой. Точка, где производная по времени равна нулю, соответствует моменту времени, при котором перепад температур по сечению максимален. Из уравнения (3.16) определяем перепад, соответствующий этому моменту времени и сравниваем его с максимально допустимым перепадом.

$$\Delta T_{\text{дон},1} > \Delta T_{\text{макс}} \quad (3.49)$$

$$\Delta T_{\text{дон},2} > \Delta T_{\text{макс}} \quad (3.50)$$

Если условия (3.49), (3.50) не выполняются, выдаётся сообщение о том, что данный режим неработоспособен.

#### *Уточнение параметров внешнего теплообмена*

Коэффициент конвективной теплоотдачи  $\alpha_m$  от газа к поверхности металла был принят в первом приближении постоянным, равным  $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , так как не был известен расход газа на печь. Для уточнения коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha_m$  от газов к поверхности металла воспользуемся формулой Л.А. Бровкина и Б.Г. Коптева [92].

$$\frac{\alpha_m \cdot R_{V, \Pi}}{\lambda_{n_2}} = 0,0588 \sqrt{\frac{B_m V_{n_2} \rho_{n_2} W (T_o / 273) R_{V, \Pi}^3}{\eta_c \nu_c V_{n_2}}}, \quad (3.51)$$

здесь  $V_{n_2}$  – удельный выход продуктов горения при температуре продуктов горения, выходящих из туннеля горелки,  $m^3 / m^3(n)$  газа;  $B_m$  – расход газа,  $m^3(n)/c$ ;  $\rho_{n_2}$  – плотность продуктов горения,  $кг/m^3(n)$ ;  $W$  – скорость продуктов горения на выходе из отверстия горелочного камня,  $m/c$ ;  $T_o$  – действительная температура горения,  $K$ ;  $R_{V, \Pi}$  – обобщенный размер рабочего пространства печи,  $m$ , который определяется по формуле

$$R_{V, \Pi} = V_{zn} / (F_{кл} + F_m), \quad (3.52)$$

где  $V_{zn}$  – объем газового пространства печи,  $m^3$ ;  $F_{кл}$  – площадь внутренней поверхности кладки, омываемой газами,  $m^2$ ;  $F_m$  – площадь поверхности металла, которая омывается газами,  $m^2$ ;  $\nu_c$  – кинематическая вязкость продуктов горения в пограничном слое у поверхности металла при температуре пограничного слоя  $T_c = 0,5 \cdot (T(1, F_o) + T_z)$  ( $T_z$  – температура газов в рабочем пространстве печи),  $m^2/c$ ;  $\eta_c$  – динамическая вязкость продуктов горения на выходе из туннеля горелки при действительной температуре горения,  $кг/(m \cdot c)$ ;  $V_{n_2}$  – объем газового пространства,  $m^3$ ;  $\lambda_{n_2}$  – теплопроводность продуктов горения,  $Вт/(m \cdot K)$ .

Теплопроводность продуктов горения принята величиной постоянной, но при исследовании на модели процессов связанна с широким диапазоном изменения компонентов газовой атмосферы в печи, использование

постоянной усредненной величины  $\lambda_m$  не совсем корректно. Теплопроводность газовой смеси обычно не является линейной функцией состава. Для расчета теплопроводности газовой смеси используется уравнение А. Васильевой [93]:

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \cdot \lambda_i}{\sum_{j=1}^n y_j \cdot A_{i,j}}, \quad (3.53)$$

где  $n$  – количество компонентов в газовой смеси;  $\lambda_i$  – теплопроводность чистого  $i$  компонента;  $y_i, y_j$  – мольные доли компонентов  $i$  и  $j$ ;  $A_{i,j}$  – параметр (по предложению Линдея и Бромли [93])

$$A_{i,j} = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[ \frac{\eta_i}{\eta_j} \left( \frac{M_j}{M_i} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{T_\Gamma + S_{i,j}}{T_\Gamma + S_j} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \frac{T_\Gamma + S_{i,j}}{T_\Gamma + S_i} \quad (3.54)$$

где  $\eta_i$  – вязкость чистого газа  $i$  – го газового компонента,  $H\cdot c/M^2$ ;  $M_i$  – молекулярная масса  $i$  – го газового компонента;  $T_\Gamma$  – температура газовой смеси,  $K$ ;  $S_i$  – постоянная Сюзерленда для чистого  $i$ -го компонента.

$$S_i = 1,5 \cdot T_{к,i}, \quad (3.55)$$

где  $T_{к,i}$  – нормальная температура кипения  $i$ -го компонента газовой смеси,  $K$ .

Постоянная величина взаимодействия газов Сюзерленда определяется из выражения

$$S_{i,j} = S_{j,i} = C_S (S_i \cdot S_j)^{\frac{1}{2}} . \quad (3.55)$$

$C_S$  близко к единице, если только один из газов не очень полярен, для неполярных газов  $C_S$  изменяется в широких пределах. Погрешность этого метода обычно не превышает 5%, что для расчётов приемлемо. Также необходимо определять и вязкость для многокомпонентных смесей с широким диапазоном изменения. Для этих целей используются формулы [94]:

$$\eta_m = \sum_{i=1}^Z \frac{\eta_i}{1 + \frac{1}{\eta_i} \sum_{j=1}^Z \eta_i \cdot \varphi_{i,j}} ; \quad (3.56)$$

$$\varphi_{i,j} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{\eta_i}{\eta_j} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{M_j}{M_i} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2}{\frac{4}{\sqrt{2}} \left( 1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{2}}} , \quad (3.57)$$

где  $Z$  – количество компонентов газовой смеси,  $M$  – молекулярная масса  $i$  и  $j$  - го компонента газа.

Уравнение (3.57) рассматривается как сумма парциальных вязкостей компонентов. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{m,p}$ , вычисленный по формуле (3.51), сравниваем с величиной  $\alpha_m$ , принятой в нулевом приближении. Если условие

$$|\alpha_{m,p} - \alpha_m| \leq \varepsilon_5 \quad (3.59)$$

не выполняется, осуществляется корректировка  $\alpha_m$  и повторяется решение сопряжённой задачи теплообмена и расчёт теплового баланса.

Во всех случаях для улучшения сходимости итерационных циклов используется метод Эйткена.

### **3.1.2. Математическая модель приводного пневматического молота для свободнойковки**

#### *Описание математической модели молота*

В условиях единичного и мелкосерийного производства основным видом пластической обработки металла является свободнаяковка, поскольку горячая штамповка в этом случае экономически нецелесообразна из-за высокой стоимости оснастки.

#### *Зависимость времениковки от изменения степени деформации заготовки*

На практике часто возникает необходимость в предварительном определении времениковки заготовки при операциях свободнойковки в тех случаях, когда не известны параметры молота и не известна температура нагрева заготовки.

На времяковки заготовок значительное влияние оказывает степень деформации во время операции свободнойковки, которую предложено определять через изменение обобщенного размера заготовки,  $\Delta R_v$ , м:

$$\Delta R_v = \frac{V_o}{F_{m,o}} - \frac{V_k}{F_{m,k}}, \quad (3.60)$$

где  $V_o$  – начальный объем нагреваемой заготовки, м<sup>3</sup>;  $V_k$  – конечный объем нагреваемой заготовки после операции

ковки  $m^3$ ;  $F_{m,o}$ ,  $F_{m,k}$  – площади поверхности заготовки соответственно до и после операции ковки,  $m^2$ .

При положительных значениях  $\Delta R_v$  считаем, что деформация направлена на увеличение площади поковки, т.е. преобладает операция «растяжение». При отрицательных значениях  $\Delta R_v$  преобладают операции «осадки» в поковке, т.е. первоначальная площадь уменьшается. При преобладании операции «осадки» степень деформации влияет меньше на время ковки, чем при операциях «растяжения».

Экспериментальная зависимость  $\tau_k = f(\Delta R_v)$ , с, получена в виде

$$\tau_k = \epsilon_0 + \epsilon_1 \Delta R_v. \quad (3.61)$$

Коэффициенты аппроксимации  $\epsilon_0$  и  $\epsilon_1$  определялись методом наименьших квадратов. Для диапазона изменения  $0,000011 < \Delta R_v < 0,018$ , м, коэффициенты в зависимости (3.61)  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_1$  равны соответственно 67; 7800, а для диапазона  $-0,00006 > \Delta R_v > -0,025$ , м;  $\epsilon_0 = 67$ ;  $\epsilon_1 = -8900$ .

Погрешность зависимости (3.61) составляет соответственно 17 и 22%.

Погрешность зависимости обусловлена рядом субъективных факторов, которые не удастся учесть при обработке эксперимента.

Приведенные формулы могут быть использованы:

- а) для ориентировочного определения времени свободной ковки по степени деформации заготовок при нормировании расценок;

- b) для оптимизации распределения заготовок между печами в целях снижения расхода топлива на группу печей;
- c) для разработки режимных карт работы печей и карт нагрева металла.

*Определение времениковки и затрат энергии на ковку*

На основании обработки экспериментальных данных предложены аппроксимирующие зависимости для определения времениковки и затрат времени на ковку от степени деформации заготовок, среднemasсовой температуры заготовки в конце нагрева и параметров молота [95].

Предлагается времяковки для заготовок определять по уточненной степенной зависимости, если известны параметры молота и  $\Delta R_v < 0,01$  (м) и  $V_o < 0,001$  (м<sup>3</sup>):

$$\tau_k = \frac{|\Delta R_v|}{g_k} \cdot \epsilon_o \cdot \eta_m^{e_1} \cdot E_\tau^{e_2} \cdot E_\partial^{e_3}, \quad (3.62)$$

где  $g_k$  – скорость падающих частей молота (из паспортных характеристики молота), м/с;  $\eta_m$  – соотношение ударных масс (для приводных пневматических молотов  $\eta_m = 0,923$ );  $E_\tau$  – отношение внутренней энергии деформации к эффективной кинетической энергии падающих частей молота;  $E_\partial$  – отношение абсолютной величины изменения обобщенного размера к начальному обобщенному размеру.

Для определения затрат энергии на процесс свободнойковки предлагается зависимость вида:

$$E_k = \epsilon_o \cdot \varphi_{R_v}^{e_1} \cdot \eta_m^{e_2} \cdot v_{отн}^{e_3} \cdot S^{e_4}, \quad (3.63)$$

где  $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$  – коэффициенты аппроксимации.

Коэффициенты аппроксимации определены методом наименьших квадратов по экспериментальным данным, полученным в результате пассивного промышленного эксперимента. С учетом полученных коэффициентов регрессии и с учетом того, что в эксперименте использовался один тип молота (приводные пневматические молоты с  $\eta=0,923$ ), формулы (3.62) и (3.63) запишутся следующим образом:

$$\tau_{\kappa} = 34900 \cdot \frac{|\Delta R_v|}{g_{\kappa}} \left( \frac{\mathcal{E}_{кин}}{\sigma(t_{cp}) \cdot V_o} \right)^{0,054} \cdot \left| \frac{R_{v,o}}{\Delta R_v} \right|^{0,74}, \quad (3.64)$$

$$\mathcal{E}_{\kappa} = 207 \cdot 10^4 \cdot \sigma(t_{cp}) \cdot V_o \cdot \left( \ln \frac{R_{v,max}}{R_{v,min}} \right)^{0,27} \cdot \tau_{омн}^{0,73} \cdot \left( \frac{F_B}{F_{M,o}} \right)^{1,6}, \quad (3.65)$$

где  $\Delta R_v$  – изменение обобщенного размера заготовки,  $m$ ;  $g_{\kappa}$  – скорость падающих частей молота (из паспортных характеристики молота),  $m/c$ ;  $\mathcal{E}_{кин}$  – эффективная кинетическая энергия падающих частей молота при ударе,  $Dж$ ;  $\sigma(t_{cp})$  – предел прочности при среднемассовой температуре началаковки,  $H/m^2$ ;  $t_{cp}$  – среднемассовая температура металла,  $^{\circ}C$ ;  $V_o$  – начальный объём нагреваемой заготовки,  $m^3$ ;  $R_{v,o}$  – начальный обобщенный размер заготовки,  $m$ ;  $R_{v,max}$  – конечный обобщенный размер заготовки, если в процессековки он увеличивается или начальный, если уменьшается,  $m$ ;  $R_{v,min}$  – начальный обобщенный размер заготовки, если в процессековки он

увеличивается или конечный, если уменьшается,  $m$ ;  $\tau_{отн}$  – относительное время, которое определяется по формуле:

$$\tau_{отн} = \tau_{yд} \cdot K_{yд}, \quad (3.66)$$

где  $\tau_{yд}$  – время падения подвижных частей молота,  $c$ ;  $K_{yд}$  – количество ударов за секунду,  $1/c$ ;  $F_B$  – площадь зеркала бойка молота,  $m^2$  (паспортные характеристики молота);  $F_{м,о}$  – площадь поверхности заготовки соответственно до операцийковки,  $m^2$ .

Предложенные формулы получены в диапазоне входящих в них параметров:

$$\begin{aligned} 15 \leq \tau_{\kappa} \leq 390, c; & \quad 5,8 \leq v_{\kappa} \leq 7,5, m/c; \\ -0,01 \leq \Delta R_v \leq 0,0147, m; & \quad 2,5 \leq \mathcal{E}_{кин} \leq 27,0, \kappa Дж; \\ 940 \leq t_{cp} \leq 1280, ^\circ C; & \quad 0,000186 \leq V_o \leq 0,013, m^3; \\ 0,01 \leq R_{v,o} \leq 0,04, m; & \quad 0,008 \leq R_{v,\kappa} \leq 0,035, m; \\ 0,016 \leq \tau_{отн} \leq 0,02; & \quad 0,00017 \leq F_B \leq 0,00059, m^2; \\ 10,4 \leq \mathcal{E}_{\kappa} \leq 1450, \kappa Дж; & \quad 0,018 \leq F_{м,о} \leq 0,31, m^2. \end{aligned}$$

Относительная погрешность по формуле (3.64) составляет 15 %, по формуле (3.65) – около 25 %.

Эти формулы используются в математической модели для определения времени процесса свободнойковки и затрат энергии на операцию свободнойковки на приводных пневматических молотах.

### 3.1.3. Описание модели, оптимизации режима работы установки *печь–молот*

#### *Выбор целевой функции и параметров варьирования*

Для оптимизации режима работы установки более всего подходит в качестве целевой функции универсальный экономический параметр.

Цеховая себестоимость состоит из двух видов затрат: прямых и косвенных. Прямые затраты делятся на основные материалы и полуфабрикаты, на основную и дополнительную заработную плату. Косвенные затраты делятся на условно-переменные (пропорциональные) и на условно-постоянные.

Изменение прямых затрат не зависит от режимов нагрева и рационализации схем оборудования, поэтому при дальнейшем рассмотрении их можно исключить.

Косвенные затраты также делятся на цеховые затраты и затраты на содержание и эксплуатацию оборудования и рабочих мест.

Цеховые затраты  $S_z$ , руб/г, задаются на год и относятся в основном к условно-постоянным затратам и определяются по формуле

$$S_z = S_y + S_{np} + S_{аз} + S_{зод} + S_{мп.з} + S_{u.o} + S_{o.мп} + S_{изм} \quad (3.67)$$

Здесь  $S_y$  – затраты на содержание аппарата управления цехом (участком), руб/г;  $S_{np}$  – затраты на содержание прочего цехового персонала, не относящегося к управленческому персоналу, руб/г;  $S_{аз}$  – затраты на амортизацию зданий, сооружений, инвентаря (кроме затрат на эксплуатацию), руб/г;  $S_{зод}$  – затраты на содержание зданий, сооружений, руб/г;

$$S_{зд} = S_{оз} + S_{св} + S_{вз} + S_{осв} , \quad (3.68)$$

где  $S_{оз}$  – затраты на отопление, руб/г;  $S_{св}$  – затраты на горячее водоснабжение здания, руб/г;  $S_{вз}$  – затраты на вентиляцию здания, руб/г;  $S_{осв}$  – затраты на освещение здания, руб/г;  $S_{тр.з}$  – затраты на текущий ремонт зданий и сооружений, руб/г;  $S_{и.о}$  – затраты на испытания, опыты, исследования, рационализацию и изобретательскую деятельность в цехе, руб/г;  $S_{о.тр}$  – затраты на охрану труда, средства, идущие на мероприятия по технике безопасности, санитарную гигиену, спец. одежду и др., руб/г;  $S_{изм}$  – затраты на износ малоценного и быстроизнашивающегося хозяйственного инвентаря цеха, руб/г;  $S_{пр}$  – прочие расходы цеха, руб/г.

Затраты на содержание и эксплуатацию оборудования, относящиеся к условно-переменным затратам, определяются по формуле, руб/г:

$$S_{сз} = S_{ам} + S_{всп} + S_{эн} + S_{з.пл,всп} + S_{т.р.} + S_{гр} + S_{и.м} + S_{пр.о} . \quad (3.69)$$

Здесь  $S_{ам}$  – затраты на амортизацию оборудования, транспортных средств, ценного инвентаря (определяются по смете на установку оборудования), руб/г;  $S_{всп}$  – затраты на вспомогательные материалы, масла, эмульсии, обтирочные материалы, руб/г;  $S_{эн}$  – затраты на энергоносители, расходуемые на работу оборудования, руб/г;

$$S_{эн} = (S_{пара} + S_{св} + S_{хв} + S_{эл} + S_{сж.г} + S_{к} + S_{ок} + S_{эк}) \cdot n \cdot 3600, \quad (3.70)$$

где  $S_{пара}$  – затраты на пар, идущий на технологический процесс, руб/г;  $S_{гв}$  – затраты на горячую воду, идущую на технологию, руб/г;  $S_{хв}$  – затраты на холодную воду, т.е. ее пополнение при оборотной системе охлаждения, руб/г;  $S_{эл}$  – затраты на электроэнергию (вентилятор, дымосос, молот), руб/г;  $S_m$  – затраты на топливо, руб/г;  $S_{сж.в}$  – затраты на сжатый воздух, руб/г;  $S_k$  – затраты на кислород для технологического процесса, руб/г;  $S_{ок}$  – затраты на металл, превратившийся в окалину, руб/г;  $S_{эк}$  – затраты на возмещение экологического ущерба окружающей среде от вредных выбросов, руб/г;  $n$  – количество часов работы оборудования в году, ч;  $S_{з.пл,всп}$  – заработная плата (с доплатами и вычислениями) вспомогательных рабочих, обслуживающих оборудование, руб/г;  $S_{м.р}$  – затраты на текущий ремонт и техническое оборудование, транспортные средства, ценные инструменты, руб/г;  $S_{сп}$  – затраты на внутризаводские и цеховые перемещения грузов, руб/г;  $S_{и.м}$  – затраты на износ быстроизнашивающегося инвентаря и малоценных инструментов, руб/г;  $S_{пр.о}$  – прочие расходы, связанные с эксплуатацией и содержанием оборудования, руб/г.

Для расчета затрат на электроэнергию для работы молота используется формула:

$$\mathcal{E}_k = \mathcal{E} - \mathcal{E}_{xx}, \quad (3.71)$$

где  $\mathcal{E}_k$  – энергияковки, подведенная к молоту, кДж;  $\mathcal{E}$  – затраты энергии на ковку, кДж;  $\mathcal{E}_{xx}$  – энергия холостого хода молота, кДж.

Мощности вентилятора и дымососа рассчитываются по формуле:

$$N = \frac{Q \cdot H_p}{\eta_s \cdot \eta_n}, \quad (3.72)$$

где  $Q$  – расход перекачиваемого газа,  $m^3(n)/c$ ;  $H_p$  – напор вентилятора,  $H/m^2$ ;  $\eta_s$  – кпд вентилятора, принимаемый по аэродинамическим характеристикам;  $\eta_n$  – кпд передачи энергии от электродвигателя к вентилятору.

В соответствии с действительными расходами газов определяется суммарная электрическая мощность для проведения технологического процесса и по двухставочному тарифу вычисляются затраты на электроэнергию.

Для определения экологического ущерба от выбросов окислов азота используется формула, предложенная в [96]:

$$[C_{NO_x}] = A \cdot D_3^{0,8} \cdot q_m^{0,5} \cdot \alpha_m^{3,0}. \quad (3.73)$$

Здесь  $[C_{NO_x}]$  – суммарная концентрация окислов азота в пересчете на двуокись азота,  $mg/m^3$ ;  $A$  – коэффициент пропорциональности (0,147);  $D_3$  – эквивалентный диаметр топочной камеры,  $m$ :

$$D_3 = \frac{4 \cdot F_{кл.вн}}{\Pi_m}, \quad (3.74)$$

где  $F_{кл.вн}$  – внутренняя площадь топки,  $m^2$ ;  $\Pi_m$  – периметр топки,  $m$ ;  $q_m$  – тепловое напряжение топочного объема,

$MВm/m^3$ ;  $\alpha_m$  – коэффициент избытка воздуха в топке (горелке), причем  $1,03 \leq \alpha_m \leq 1,16$ .

Для определения стоимости экологического ущерба используются методики, согласно которым стоимость экологического ущерба окружающей среде определится как

$$S_{\text{эк}} = C_{NO_x} \cdot [C_{NO_x}] \cdot V_{n_2}^{y_0} \cdot B_m \cdot 10^{-9} + C_{CO} \cdot V_{n_2}^{y_0} \cdot \rho_{CO_2} \cdot P_{CO_2} \cdot B_m \cdot 10^{-3}, \quad (3.75)$$

где  $C_{NO_x}, C_{CO}$  – стоимость экологического ущерба от тонны выбросов, соответственно  $NO_x, CO$ , руб/г;  $\rho_{CO_2}$  – плотность угарного газа, кг/м<sup>3</sup>(н);  $V_{n_2}^{y_0}$  – удельный выход продуктов горения, м<sup>3</sup>(н)/газа.

Себестоимость косвенных затрат цехового передела одного килограмма продукции:

$$S_{\text{к.ц.п}} = S_z / P_{\text{пл}} + (S_{\text{ам}} + S_{\text{всп}} + S_{\text{э.пл.всп}} + S_{\text{м.р}} + S_{\text{эп}} + S_{\text{и.м}} + S_{\text{пр.с}}) / (P_y \cdot 3600 \cdot n) + S_{\text{пара}} + S_{\text{св}} + S_{\text{хв}} + S_{\text{эл}} + S_{\text{м}} + S_{\text{сж.в}} + (S_{\text{к}} + S_{\text{ок}} + S_{\text{эк}}) / P_y, \quad (3.76)$$

где  $P_{\text{пл}}$  – плановое задание выпуска продукции кузнечным цехом, кг/г;  $P_y$  – производительность теплотехнологической установки (ТТУ), кг/с.

Себестоимость цехового передела:

$$S_{\text{ц.п}} = S_{\text{к.ц.п}} + S_{\text{з,и}} \quad (3.77)$$

где  $S_{\text{з,и}}$  – заработная плата основных рабочих за обработку 1 кг  $i$ -го вида продукции, руб/кг.

Таким образом, параметром, который необходимо оптимизировать, подбирая режим работы установки

*печь–молот*, является минимум себестоимости цехового передела.

В качестве варьируемых параметров в модели приняты режимные параметры (параметры качества нагрева): температура на поверхности  $T(1, Fo_K)$  и температурный перепад по сечению металла в конце нагрева  $\Delta T_{1-0}(Fo_K)$ , а также параметр, связанный с размещением заготовок на подине печи (отношение расстояния между заготовками к их высоте  $R_m$ ).

Для определения  $R_m$  цилиндрических заготовок, они заменяются параллелепипедами, у которых торцевая поверхность представляет собой квадрат со стороной  $b_m$

$$b_m = \sqrt{\pi \cdot d^2 / 4} . \quad (3.78)$$

Расстояние между боковыми гранями  $H$  определится по формуле

$$H = S - b_m , \quad (3.79)$$

где  $S$  – расстояние между центрами заготовок, м. Тогда отношение расстояния между заготовками к их высоте  $R_m$  определится как

$$R_m = H / b_m . \quad (3.80)$$

#### *Выбор ограничений работы математической модели и постановка вычислительного эксперимента*

Использовать вышеприведенный алгоритм для определения оптимальных режимных параметров на основе перебора вариантов сложно, велик объем вычислений. Поэтому используется алгоритм, сущность

которого заключается в постановке вычислительного эксперимента. Необходимо знать, как будет изменяться целевая функция от изменения режимных параметров. Для определения такой зависимости требуется разумно задать интервалы изменения варьируемых параметров.

Границы интервалов варьирования определяются исходя из следующих условий.

Для конечной температуры нагрева металла на поверхности диапазон варьирования находится в пределах от температуры, при которой нельзя производить ковку (металл теряет свою пластичность), до температуры плавления металла (металл переходит в жидкое состояние).

Для допустимого перепада температур в конце нагрева металла диапазон варьирования находится в пределах от перепада температур, близкого к нулю ( $5 - 10$  °С), до перепада температур между точкой плавления металла и температурой началаковки. На практике этот диапазон целесообразно несколько уменьшить, установив в пределах от  $15$  до  $150$  °С.

Для отношения расстояния между заготовками к высоте заготовок диапазон варьирования лежит от нуля (зазор между нагреваемыми заготовками равен нулю) до бесконечности (в печи находится одна заготовка).

Искомая зависимость  $y = f(x_1, x_2, x_3)$  находится в виде

$$y = b_1 + b_2 \cdot x_1 + b_3 \cdot x_2 + b_4 \cdot x_3 + b_5 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_6 \cdot x_1 \cdot x_3 + b_7 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_8 \cdot x_1^2 + b_9 \cdot x_2^2 + b_{10} \cdot x_3^2, \quad (3.81)$$

где  $y$  – оптимизационный параметр;  $x_1, x_2, x_3$  – варьируемые параметры.

Для нахождения коэффициентов  $b_i$  строится матрица ортогонального планирования вычислительного эксперимента второго порядка для трёх факторов  $x_1, x_2, x_3$ .

На основании вычислительного эксперимента по матрице планирования отыскиваются для зависимости коэффициенты  $b_i$ .

Область варьирования режимных параметров можно представить в виде трехмерного пространства, в котором необходимо найти минимальную себестоимость цехового передела.

Оптимизационная задача решается с учетом 8 ограничений.

В качестве первого ограничения принята температура газов в рабочем пространстве печи, которая не может превышать действительную температуру горения топлива.

В качестве второго ограничения используется темп выдачи заготовок из печи, который не должен быть меньше времениковки.

Третьим ограничением является допустимый температурный перепад во время начального периода нагрева, определяемый допустимыми температурными напряжениями.

Четвертым, пятым и шестым ограничениями являются максимальные температуры применения огнеупорных и изоляционных материалов, из которых выполнена трехслойная кладка печи.

Седьмым ограничением является максимально возможный расход газа на печь.

Восьмым – производительность печи.

Для учета ограничений необходимо знать, как действуют принятые ограничения на работоспособность установки. Для этого во время постановки вычислительного эксперимента кроме целевой функции

(себестоимости цехового передела) определяются также значения температуры газа, действительной температуры горения, времениковки, времени нагрева, допустимого температурного перепада между температурами поверхности и центра металла в начальной стадии нагрева, максимальные расчётные температуры применения огнеупорных и изоляционных слоев кладки печи, расход газа на печь, производительность установки.

Далее определяются разницы между допустимыми и существующими значениями, которые аналогично методике определения зависимости целевой функции от варьируемых параметров определяются в виде зависимостей степени воздействия каждого ограничения от температуры на поверхности, температурного перепада по сечению металла в конце нагрева и отношения расстояния между заготовками к их высоте

$$\Delta y_i = b_{1,i} + b_{2,i} \cdot x_1 + b_{3,i} \cdot x_2 + b_{4,i} \cdot x_3 + b_{5,i} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{6,i} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{7,i} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{8,i} \cdot x_1^2 + b_{9,i} \cdot x_2^2 + b_{10,i} \cdot x_3^2, \quad (3.82)$$

где  $i$  – текущий номер ограничения;  $\Delta y_i$  – разница между допустимым и расчётным значениями  $i$  ограничения;  $x_1, x_2, x_3$  – варьируемые параметры.

По результатам вычислительного эксперимента по плану получаем восемь зависимостей вида (3.82).

Зависимости дают возможность качественной оценки действия любого из ограничений на целевую функцию. Если значение функции  $i$  ограничения в диапазоне варьируемых параметров получается положительным, то ограничение на целевую функцию не оказывает влияния. При отрицательном значении система не работоспособна. Возможна ситуация, когда значение функции  $i$  ограничения в диапазоне варьируемых параметров имеет и положительные, и отрицательные значения, то в области положительных значений система

работоспособна, а в области отрицательных значений нет. Граница между работоспособностью и неработоспособностью системы определяется значениями функций, равными 0.

В качестве метода оптимизации себестоимости цехового передела используется метод перебора вариантов на основе зависимостей (3.81 – 3.82). Этот метод наиболее надежен, т.к. при воздействии на область оптимизации большого количества ограничений, она может разделиться на несколько областей, не связанных друг с другом.

Время выбора целевой функции находится в зависимости от принятого шага изменения варьируемых параметров. С уменьшением шага время вычислений уменьшается, а точность увеличивается.

В математической модели оптимизации используется прием, позволяющий оценить точность получения целевой функции при принятом шаге изменения варьируемых параметров.

Вся область изменения варьируемых параметров делится на 1000 объемов или 10 шагов. Находится объем с минимальной себестоимостью. Затем расчет повторяется, но уже с делением на 3375 объемов или 15 шагов. Если результаты совпадают с заданной точностью, то расчет прекращается. В противном случае идет уточнение значения себестоимости цехового передела для варьируемых параметров с минимальной целевой функцией. Полученное с использованием модели значение оптимальной себестоимости цехового передела подставляется в исходные данные в вычислительный эксперимент, который заново повторяется. Производится уточнение зависимостей (3.81, 3.82). Далее расчёт оптимизации целевой функции повторяется. Уточнения повторяются до тех пор, пока не будет получена заданная точность. После этого расчет

можно считать завершенным. Так как дополнительные вычислительные эксперименты находятся в области искомых значений целевой функции, точность результатов оптимизации значительно увеличивается при небольших затратах машинного времени.

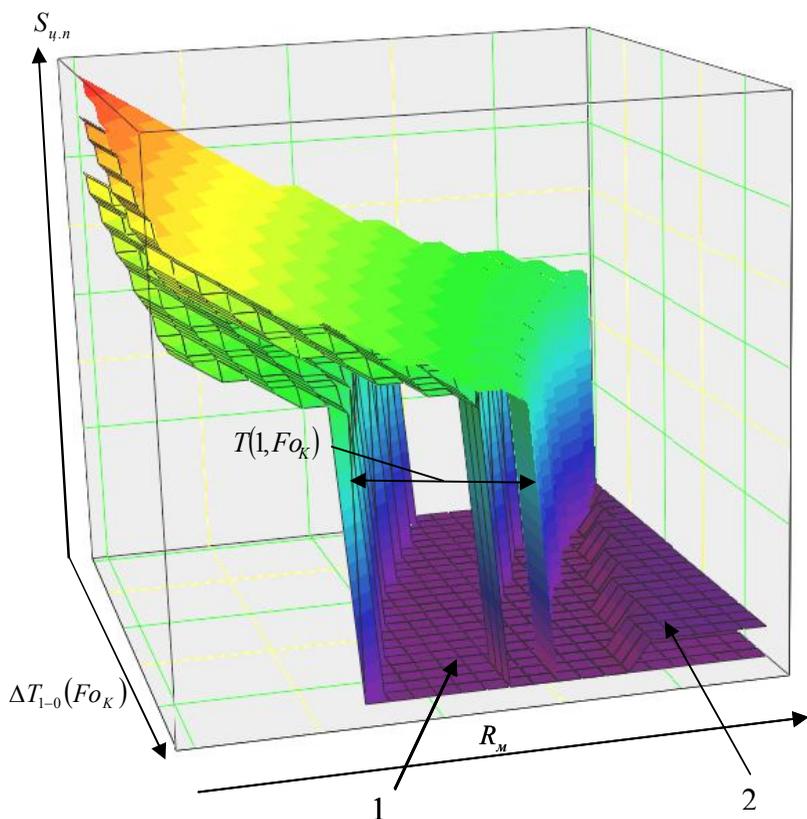


Рис. 3.1. Область нахождения оптимального значения себестоимости цехового передела в зависимости от варьируемых параметров и от действия ограничений: 1 – ограничение по производительности печи; 2 – ограничение по температуре ограждений печи

Все полученные в результате расчета параметры выводятся в виде технологической карты нагрева заданного типоразмера заготовки.

### **3.1.5. Структура математической модели установки *печь–молот*, входные данные модели**

Модель установки предназначена для оптимизации режима работы системы *печь–молот*, расчета норм расхода энергии на установку по минимуму себестоимости цехового передела и разработки режимно-технологических карт нагрева металла.

На рис.3.2 показано взаимодействие составных частей модели установки *печь–молот*.

#### *Формирование входных данных модели*

Входные данные для работы математической модели включают следующее.

Параметры, связанные с конструкцией печи (размеры рабочего пространства, размеры и теплофизические характеристики материалов ограждений и др.).

Параметры молота (скорость падающих частей, эффективная кинематическая энергия удара, мощность холостого хода, установочная мощность, коэффициент загрузки).

Параметры вспомогательного оборудования в частности дымососов и вентиляторов (расходные характеристики, коэффициент загрузки и др.).

Параметры нагреваемых заготовок (размеры заготовок, зазоров между ними, размеры готовой поковки, теплофизические характеристики нагреваемого металла).

Параметры нагрева заготовок (среднеинтегральная конечная и начальная температуры, допустимый перепад температур по сечению заготовки в конце нагрева).

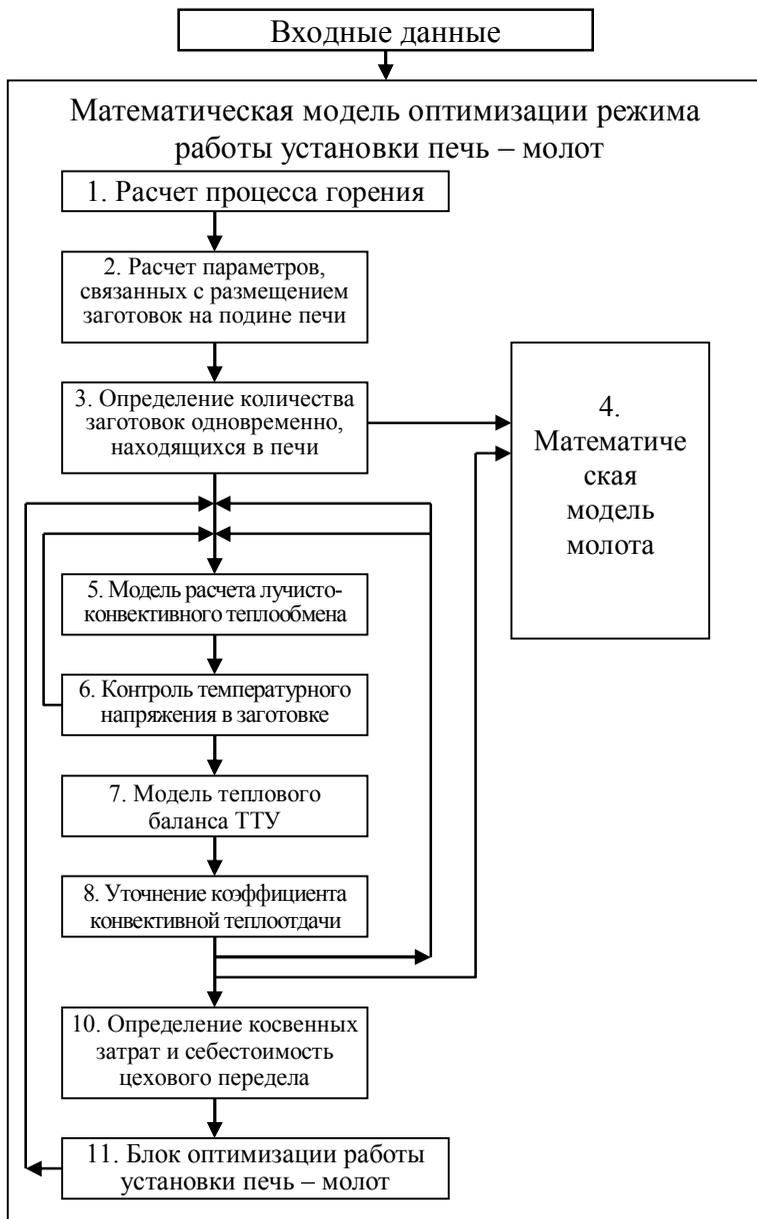


Рис. 3.2. Структурная схема модели *печь–молот*

Параметры теплоносителей и топлива (состав топлива, низшая теплота сгорания топлива, теплофизические показатели дополнительного теплоносителя, воздуха и топлива, идущих на процесс горения, теплофизические показатели продуктов сгорания, теплоносителей в системах охлаждения и др.).

Общехозяйственные и экономические параметры, связанные с характеристиками цеха (площадь цеха, занятая кузнечно-штамповочным оборудованием, план выпуска продукции, цеховые затраты, затраты на содержание и эксплуатацию оборудования и рабочих мест, затраты на сырье и основные материалы, полуфабрикаты и покупные изделия, заработная плата основных производственных рабочих).

### **3.1.6. Результаты работы математической модели установки печь–молот**

Результаты работы программы для кузнечного участка камерных нагревательных печей ОАО завода имени Дегтярёва “ЗиД” (г. Ковров), где установлены три однотипные камерные нагревательные печи для нагрева металла под ковку с площадью пода  $0,82 \times 0,58 = 0,47 \text{ м}^2$ , представлены ниже.

Печь представляет собой футерованную огнеупорным кирпичом камеру, заключенную в металлический каркас. Каркас печи сварной. Кожух из листовой стали покрыт снаружи алюминиевой краской. Кладка печи выполнена из шамотных материалов класса А, Б, шамота-легковеса, диатомитового кирпича, мулитокремнезистового кирпича.

Загрузка и выгрузка печи осуществляется вручную через рабочее окно, обрамленное водоохлаждаемой рамой и закрывающееся водоохлаждаемой стальной заслонкой,

футерованной шамотом-легковесом. Заслонка имеет пневматический привод.

Сжигание газа производится при помощи горелки ГНП-3АП, установленной на боковой стенке печи. Сопло имеет 6 отверстий диаметром 4,8 мм каждое.

Регулирование расходов газа и воздуха на горение осуществляется вручную с помощью кранов на подвод газа и воздуха к горелке в соответствии с регулировочной характеристикой.

Печь оснащена блоком рекуперации, стены и свод, которого выполнены из огнеупорного кирпича. Внутри блока рекуперации расположен термоблок и трубчатый рекуператор. Воздух, забираемый из цеха вентилятором по кирпичным боровам, подводится к печи и подается сначала в трубчатый рекуператор, затем через термоблок поступает в горелку. В нижней части блока рекуперации расположен шибер для регулирования разряжения в дымовой системе печи. Система дымоудаления предусматривает естественную тягу с помощью трубы высотой 60 м. Уходящие газы через приемные окна из камеры печи по вертикальным дымовым каналам поступают в боров, расположенный под подом печи, откуда направляются по вертикальному каналу в верхнюю часть блока рекуперации. Опускаясь в блоке рекуперации, дымовые газы проходят сначала через термоблок, затем через трубчатый рекуператор и далее поступают в канал, расположенный под полом цеха. Каналы от щелевых и камерных печей объединяются в общий боров, идущий к дымовой трубе.

Технические характеристики камерной печи, трубчатого рекуператора и термоблока приведены в табл. 3.1 – 3.3. Пример результатов расчёта оптимальных режимов для установки *печь–молот* для “Зид” приведён в табл. 3.4.

**Таблица 3.1.** Технические характеристики камерной печи  
(проектные данные)

| Наименование показателей  | Величина                         |
|---|----------------------------------|
| Размеры и площадь пода, $m^2$   | 0,58×0,812=0,471                 |
| Производительность печи, $кг/ч$   | 121                              |
| Температура нагрева металла, $^{\circ}C$                                      | 1200                             |
| Топливо и его теплотворная способность, $МДж/м^3$                             | Природный газ<br>$Q_n^p=33,45$   |
| Расход топлива, $м^3/ч$ :<br>с подогревом воздуха                             | 20                               |
| без подогрева воздуха   | 25                               |
| Количество установленных приборов сжигания, <i>шт</i>                         | 1                                |
| Давление газа перед горелкой, $кПа$   | 3,92                             |
| Давление воздуха перед горелкой, $кПа$  | 3,43                             |
| Часовой расход воздуха при $\alpha=1,1$ :<br>с подогревом воздуха, $(н)м^3/ч$ | 195                              |
| без подогрева воздуха, $(н)м^3/ч$   | 245                              |
| Расход воды, $м^3/ч$  | 1                                |
| Температура подогрева воздуха, $^{\circ}C$                                    | 170                              |
| Тип рекуператора  | Термоблок ТБ-3<br>Трубчатый РТ-3 |
| Поверхность нагрева блока рекуперации, $м^2$                                  | 2,2                              |

**Таблица 3.2.** Техническая характеристика трубчатого  
рекуператора

| Наименование показателей           | Величина |
|------------------------------------|----------|
| Число трубок, <i>шт</i>            | 6×6      |
| Поверхность нагрева, $м^2$         | 1,47     |
| Сечение для прохода воздуха, $м^2$ | 0,0072   |
| Сечение для прохода дыма, $м^2$    | 0,074    |

**Таблица 3.3.** Техническая характеристика термоблока

| Наименование показателей                     | Величина |
|--|----------|
| Поверхность нагрева, $m^2$                   | 0,922    |
| Сечение для прохода воздуха, $m^2$           | 0,0063   |
| Число воздушных трубок:                      |          |
| по ширине, <i>шт</i>                         | 2        |
| по высоте, <i>шт</i>                         | 9        |
| Диаметр воздушной трубки (нар.), <i>мм</i>   | 48       |
| Длина рабочей части воздушных труб, <i>м</i> | 12,24    |
| Диаметр дымовой трубы (нар.), <i>мм</i>      | 26,75    |
| Число дымовых труб:                          |          |
| по ширине, <i>шт</i>                         | 3        |
| по высоте, <i>шт</i>                         | 12       |
| Сечение для прохода дыма, $m^2$              | 0,0474   |

**Таблица 3.4.** Оптимальные режимные параметры нагрева металла при непрерывном процессе загрузки выгрузки заготовок

| 1 | № детали   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|---|--|------|------|------|------|------|------|------|
| 2 | Температура печи, $^{\circ}C$                      | 1279 | 1271 | 1122 | 1274 | 1172 | 1117 | 1021 |
| 3 | Число заготовок, находящихся в печи, <i>шт</i>     | 5    | 8    | 6    | 16   | 7    | 12   | 17   |
| 4 | Расстояние между заготовками, <i>мм</i>            | 40,5 | 15   | 60   | 8,5  | 54   | 18,4 | 18,8 |
| 5 | Время нагрева заготовки, <i>с</i>                  | 2570 | 3236 | 2273 | 2574 | 1676 | 2151 | 1534 |
| 6 | Температура поверхности металла, $^{\circ}C$       | 1245 | 1245 | 1067 | 1245 | 1126 | 1067 | 1149 |
| 7 | Температурный перепад в конце нагрева, $^{\circ}C$ | 89   | 78   | 88   | 57   | 61   | 65   | 69   |

Продолжение табл. 3.4

| 1  | № детали   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|----|--|------|------|------|------|------|------|------|
| 8  | Производительность печи, кг/ч                              | 203  | 221  | 179  | 172  | 172  | 183  | 223  |
| 9  | Расход газа, м <sup>3</sup> /ч                             | 17   | 18   | 14   | 17   | 15   | 14   | 16   |
| 10 | Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч                          | 199  | 203  | 162  | 191  | 171  | 163  | 187  |
| 11 | Единовременная загрузка, т                                 | 0,15 | 0,20 | 0,11 | 0,12 | 0,08 | 0,11 | 0,09 |
| 12 | Время нагрева металла, с                                   | 1212 | 1216 | 1035 | 1225 | 1104 | 1042 | 1124 |
| 13 | Напряжение пода, кВт/м <sup>2</sup>                        | 341  | 347  | 277  | 327  | 293  | 279  | 321  |
| 14 | Удельный расход теплоты, кДж/кг                            | 2843 | 2658 | 2630 | 3230 | 2878 | 2582 | 2440 |
| 15 | Удельный расход топлива, кг у.т./кг                        | 0,10 | 0,09 | 0,09 | 0,11 | 0,10 | 0,09 | 0,08 |
| 16 | КПД печи, %  | 24,0 | 25,8 | 21,9 | 21,4 | 22,2 | 22,4 | 25,8 |
| 17 | КИТ печи, %  | 94,0 | 94,0 | 94,8 | 94,0 | 94,6 | 94,8 | 94,4 |
| 18 | Удельный расход энергии, кВт·ч/кг                          | 0,28 | 0,23 | 0,33 | 0,17 | 0,3  | 0,22 | 0,11 |
| 19 | Ограничение по температуре газов в печи, %                 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 20 | Ограничение по темпу выдачи заготовок, %                   | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,46 | 0,00 | 0,00 |
| 21 | Ограничение по температурному перепаду в начале нагрева, % | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,57 | 0,00 | 0,08 | 0,00 |

Окончание табл. 3.4

| 1  | № детали   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|----|--|------|------|------|------|------|------|------|
| 22 | Ограничение по температуре применения первого огнеупорного слоя, % | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 23 | Ограничение по температуре применения второго огнеупорного слоя, % | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 24 | Ограничение по температуре применения изоляционного слоя, %        | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 25 | Ограничение по производительности горелок, %                       | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 26 | Ограничение по производительности установки, %                     | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 27 | Себестоимость цехового передела, руб/кг                            | 37,2 | 38,3 | 46,9 | 52,5 | 50,2 | 48,3 | 44,0 |

### **3.2. Применение нейросетевой технологии для моделирования установки *печь–молот***

Математическая модель оптимизации режима работы установки: камерной нагревательной печи и пневматического молота для свободнойковки является достаточно сложной и тяжёлой программой, включающей в себя несколько десятков расчётных модулей.

Выполнение расчёта в программе и получение карты технологического процессаковки и горячейштамповки иногда требует достаточно больших затрат

времени, а иногда решение нужно принимать незамедлительно, мгновенно. В этом случае программу математической модели оптимизации режима работы установки: камерной нагревательной печи и пневматического молота для свободнойковки – можно заменить нейронной сетью, предварительно осуществив процесс так называемого обучения сети на основе результатов расчётов на математической модели.

Нейронная сеть способна обобщить полученную информацию в виде функциональных связей внутри себя и заменить в некоторых случаях для принятия решений математическую модель установки *печь–молот*.

#### *Формирование входных и выходных данных для нейросетевой модели работы установки*

При решении задачи с помощью нейронной сети необходимо собрать данные для обучения. Обучающий набор данных представляет собой набор наблюдений, для которых указаны значения входных и выходных переменных. Выбор переменных (на первоначальной стадии) осуществляется интуитивно. Обычно при обучении нейронной сети для начала включают все переменные, которые могут влиять на результат, а на последующих этапах сокращают их множество. Такой подход к нейросетевой программе предполагает возможность гибкой и удобной работы с набором данных (редактирование, создание нескольких множеств для проверки результатов выполнения и др.).

В качестве входных переменных, влияющих на число заготовок, находящихся в печи, время нагрева заготовок, температуру поверхности металла, использовались:

- диаметр заготовки;
- длина заготовки;

- расчётный размер заготовки после операцииковки;
- группа нагреваемой стали;
- допустимый перепад температур в конце нагрева;
- начальная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева;
- конечная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева;

Обучающее множество представляет собой базу данных в виде таблицы Microsoft Excel. Каждая строка таблицы это одно наблюдение, включающее в себя различные значения семи варьируемых входных переменных и выходной величины.

*Обучение нейросети с помощью программы оптимизации режима работы установки: камерной нагревательной печи и пневматического молота для свободнойковки.*

При создании нейронной сети необходимо решить вопрос выбора конкретной архитектуры сети (числа "слоев" и количества "нейронов" в каждом из них). Размер и структура сети должны соответствовать (например, в смысле формальной вычислительной сложности) существу исследуемого явления. Поскольку на начальном этапе анализа природа явления обычно не бывает хорошо известна, выбор архитектуры является непростой задачей и часто связан с длительным процессом "проб и ошибок".

Обучение нейронной сети для определения числа заготовок, находящихся в печи:

1. Выбирается нейронная модель – (многослойный персептрон).
2. Число входных элементов принимается равное 7 и выходных 1.
3. Определяется число скрытых слоев. Нет строго определенной процедуры для выбора количества нейронов и количества слоев в сети. Чем больше количество

нейронов и слоев, тем шире возможности сети, тем медленнее она обучается и работает и тем более нелинейной может быть зависимость вход – выход.

Количество нейронов и слоев связано со следующими обстоятельствами:

- со сложностью задачи;
- количеством данных для обучения;
- требуемым количеством входов и выходов сети;
- имеющимися ресурсами: памятью и быстродействием машины, на которой моделируется сеть.

Если в сети слишком мало нейронов или слоев, сеть не обучится, и ошибка при работе сети останется большой, на выходе сети не будут передаваться резкие колебания аппроксимируемой функции.

Превышение требуемого количества нейронов тоже мешает работе сети. Если нейронов или слоев слишком много, то произойдет следующее:

- быстродействие будет низким, а памяти потребуется много;
- сеть переобучится: выходной вектор будет передавать незначительные и несущественные детали в изучаемой зависимости;
- зависимость выхода от входа окажется резко нелинейной: выходной вектор будет существенно и непредсказуемо меняться при малом изменении входного вектора;
- сеть будет неспособна к обобщению: в области, где нет или мало известных точек функции, выходной вектор будет случаен и непредсказуем, не будет адекватен решаемой задаче.

Выбирается один скрытый слой.

4. Определяются параметры скрытого слоя:

- число обрабатываемых элементов: 7;
- вид передаточной функции: TanhAxon- функция, которая

используется для преобразования уровня активации нейрона в выходной сигнал;

- алгоритм обучения: Momentum;

- задается максимальное число эпох: 2000;

5. Выбирается один из четырёх методов обучения: Train N Times. Данный метод обучает активный макет сети N раз с различными случайными начальными условиями и создаёт сообщение результатов. Задается число обучения: 3 раза.

Обучение нейронных сетей для определения времени нагрева заготовок и температуры поверхности металла в конце нагрева строится аналогично предыдущему примеру.

#### *Верификация результатов нейросетевого моделирования*

После обучения на данных, полученных из расчёта в программе оптимизации режима работы установки *печь–молот*, сеть готова к работе и может использоваться для построения прогнозов и принятия мгновенных решений.

Наиболее лучшими результатами обучения нейронных сетей являются:

1. Для определения числа заготовок, находящихся в печи, получилось обучение, конечная среднеквадратичная ошибка которого составила: MSE (среднеквадратичная ошибка) = 0,0128. Суммарное число заготовок, находящихся в печи, полученное из расчёта в программе по оптимизации режима работы установки *печь–молот* составило 1955, суммарное число заготовок, полученное в результате обучения нейронной сети, – 1943.

Сравнение количества заготовок, находящихся в печи, полученных в результате расчёта математической

модели, с количеством заготовок, полученных после обучения нейронной сети, представлено на рис. 3.3.

2. Для определения времени нагрева заготовок получилось обучение, конечная среднеквадратичная ошибка которого составила:  $MSE = 0,0109$ .

Сумма чисел времени нагрева заготовок для всех экспериментов, полученная расчётом в программе оптимизации режима работы установки *печь–молот*, составила: 232844, а сумма чисел, полученная после обучения нейронной сети: 232347.

3. Для определения температуры поверхности металла в конце нагрева, получилось обучение, конечная среднеквадратичная ошибка которого составила  $MSE = 0,011311147$ .

Суммарное число по температуре поверхности металла в конце нагрева, полученное из расчёта в программе оптимизации режима работы установки *печь–молот*, составило 109115, суммарное число по температуре поверхности металла в конце нагрева, полученное в результате обучения нейронной сети, – 109090.

Часть результатов обучения нейросети представлены в табл. 3.5 – 3.7.

В результате использования обученной нейросети расхождение между результатами, рассчитанными в программе по оптимизации установки *печь–молот* по количеству заготовок, находящихся в печи, составило: минимальное равно 1 шт., среднее расхождение равно 12 шт., максимальное расхождение составило 16 шт. Максимальное расхождение по времени нагрева заготовок равно 682 с, среднее расхождение равно 497 с, минимальное расхождение составило 8 с. Максимальное расхождение по температуре поверхности металла в конце

нагрева равно  $37^{\circ}\text{C}$ , среднее расхождение равно  $25^{\circ}\text{C}$ , минимальное расхождение составило  $1^{\circ}\text{C}$ .

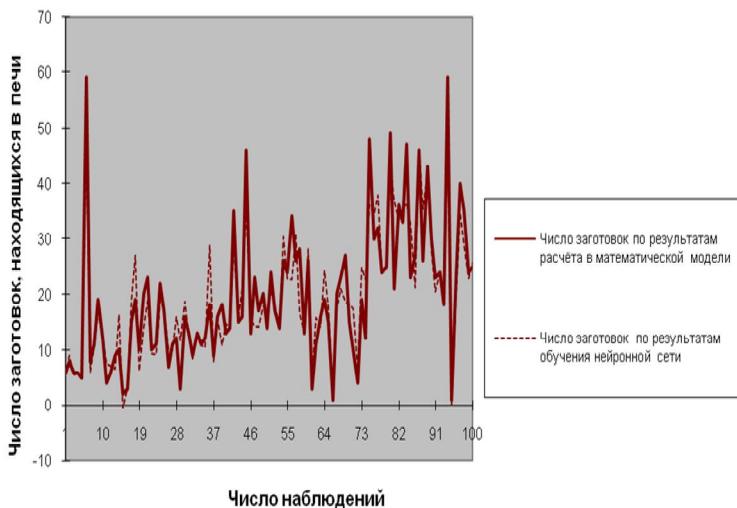


Рис. 3.3. Сравнение числа заготовок, находящихся в печи, полученных в результате расчёта и числа заготовок, полученных после обучения нейронной сети

Таблица 3.5. Результаты верификации нейросети по числу заготовок

| Диаметр заготовки, м | Длина заготовки, м | Расчётный размер заготовки после операцииковки, м | Группа нагреваемой стали | Допустимый перепад температур в конце нагрева, $^{\circ}\text{C}$ | Начальная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева, $^{\circ}\text{C}$ | Конечная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева, $^{\circ}\text{C}$ | Число заготовок по результатам расчёта в программе <i>печь-молот</i> | Число заготовок по результатам, полученным нейронной сетью |
|----------------------|--------------------|---|--------------------------|---|--|---|--|--|
| 0,2                  | 0,305              | 0,0376  | 1                        | 70  | 15   | 105   | 6  | 6  |
| 0,15                 | 0,44               | 0,0316  | 1                        | 70  | 5  | 205   | 8  | 9  |
| 0,2                  | 0,323              | 0,0339  | 1                        | 70  | 15   | 105   | 6  | 6  |

Окончание табл. 3.5

| Диаметр заготовки, м | Длина заготовки, м | Расчётный размер заготовки после операцииковки, м | Группа нагреваемой стали | Допустимый перепад температур в конце нагрева, °С | Начальная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева, °С | Конечная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева, °С | Число заготовок по результатам расчёта в программе <i>печь-молот</i> | Число заготовок по результатам, полученным нейронной сетью |
|----------------------|--------------------|---|--------------------------|---|--|---|--|--|
| 0,2                  | 0,3                | 0,0428  | 1                        | 70  | 15   | 105   | 6  | 6  |
| 0,2                  | 0,165              | 0,0301  | 2                        | 70  | 5  | 205   | 5  | 5  |
| 0,07                 | 0,175              | 0,01215   | 1                        | 70  | 15   | 105   | 59   | 49   |
| 0,2                  | 0,255              | 0,0299  | 1                        | 70  | 15   | 105   | 8  | 6  |
| 0,2                  | 0,13               | 0,02715   | 1                        | 70  | 15   | 105   | 11   | 11   |
| 0,085                | 0,87               | 0,0146  | 2                        | 70  | 15   | 105   | 19   | 17   |
| 0,2                  | 0,112              | 0,0277  | 1                        | 70  | 15   | 105   | 12   | 12   |
| 0,15                 | 0,235              | 0,0286  | 2                        | 70  | 15   | 105   | 4  | 8  |
| 0,25                 | 0,21               | 0,02196   | 1                        | 70  | 15   | 105   | 6  | 7  |
| 0,2                  | 0,228              | 0,0271  | 1                        | 70  | 15   | 105   | 9  | 7  |
| 0,085                | 0,71               | 0,01448   | 2                        | 70  | 15   | 105   | 10   | 16   |
| 0,2                  | 0,203              | 0,0279  | 2                        | 70  | 15   | 105   | 2  | 0  |
| 0,2                  | 0,09               | 0,0221  | 2                        | 70  | 15   | 105   | 3  | 3  |
| 0,075                | 0,56               | 0,01734   | 3                        | 70  | 15   | 105   | 15   | 19   |
| 0,105                | 0,136              | 0,01277   | 1                        | 70  | 15   | 105   | 19   | 27   |
| 0,15                 | 0,33               | 0,0229  | 1                        | 70  | 15   | 105   | 10   | 6  |
| 0,12                 | 0,3                | 0,02406   | 1                        | 70  | 15   | 105   | 20   | 14   |
| 0,085                | 0,74               | 0,0128  | 2                        | 70  | 15   | 105   | 23   | 19   |
| 0,2                  | 0,16               | 0,0223  | 1                        | 70  | 15   | 105   | 10   | 9  |
| 0,15                 | 0,21               | 0,0252  | 1                        | 70  | 15   | 105   | 11   | 9  |
| 0,2                  | 0,076              | 0,0183  | 1                        | 70  | 15   | 105   | 22   | 19   |
| 0,2                  | 0,085              | 0,0188  | 1                        | 70  | 15   | 105   | 17   | 17   |
| 0,15                 | 0,173              | 0,02574   | 2                        | 70  | 15   | 105   | 7  | 10   |
| 0,2                  | 0,16               | 0,0201  | 1                        | 70  | 15   | 105   | 11   | 10   |
| 0,2                  | 0,095              | 0,0185  | 1                        | 70  | 15   | 105   | 12   | 16   |

**Таблица 3.6. Результаты верификации нейросети по времени  
нагрева заготовок**

| Диаметр заготовки, м | Длина заготовки, м | Расчётный размер заготовки после операцииковки, м | Группа нагреваемой стали | Допустимый перепад температуры в конце нагрева, °С | Начальная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева, °С | Конечная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева, °С | Время нагрева заготовок по результатам расчёта в программе <i>лечь-молот</i> , с | Время нагрева заготовок по результатам, полученным нейронной сетью, с |
|----------------------|--------------------|---|--------------------------|--|--|---|--|---|
| 0,2                  | 0,305              | 0,0376  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 3954   | 3964  |
| 0,15                 | 0,44               | 0,0316  | 1                        | 70   | 5  | 205   | 3775   | 3894  |
| 0,2                  | 0,323              | 0,0339  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 4060   | 4237  |
| 0,2                  | 0,3                | 0,0428  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 3974   | 3866  |
| 0,2                  | 0,165              | 0,0301  | 2                        | 70   | 5  | 205   | 1355   | 1300  |
| 0,07                 | 0,175              | 0,01215   | 1                        | 70   | 15   | 105   | 2715   | 2033  |
| 0,2                  | 0,255              | 0,0299  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 3700   | 3648  |
| 0,2                  | 0,13               | 0,02715   | 1                        | 70   | 15   | 105   | 2491   | 2351  |
| 0,085                | 0,87               | 0,0146  | 2                        | 70   | 15   | 105   | 7131   | 6966  |
| 0,2                  | 0,112              | 0,0277  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 2416   | 2148  |
| 0,15                 | 0,235              | 0,0286  | 2                        | 70   | 15   | 105   | 2563   | 2520  |
| 0,25                 | 0,21               | 0,02196   | 1                        | 70   | 15   | 105   | 4128   | 4073  |
| 0,2                  | 0,228              | 0,0271  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 3596   | 3498  |
| 0,085                | 0,71               | 0,01448   | 2                        | 70   | 15   | 105   | 2673   | 3836  |
| 0,2                  | 0,203              | 0,0279  | 2                        | 70   | 15   | 105   | 3065   | 2568  |
| 0,2                  | 0,09               | 0,0221  | 2                        | 70   | 15   | 105   | 1513   | 1704  |
| 0,075                | 0,56               | 0,01734   | 3                        | 70   | 15   | 105   | 2149   | 2031  |
| 0,105                | 0,136              | 0,01277   | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1286   | 1863  |
| 0,15                 | 0,33               | 0,0229  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 3319   | 3311  |
| 0,12                 | 0,3                | 0,02406   | 1                        | 70   | 15   | 105   | 4314   | 3035  |
| 0,085                | 0,74               | 0,0128  | 2                        | 70   | 15   | 105   | 5836   | 4745  |
| 0,2                  | 0,16               | 0,0223  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 2796   | 2998  |
| 0,15                 | 0,21               | 0,0252  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 2217   | 2646  |
| 0,2                  | 0,076              | 0,0183  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 3017   | 2333  |
| 0,2                  | 0,085              | 0,0188  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 2455   | 2393  |

| Диаметр заготовки, м | Длина заготовки, м | Расчётный размер заготовки после операцииковки, м | Группа нагреваемой стали | Допустимый перепад температуры в конце нагрева, °С | Начальная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева, °С | Конечная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева, °С | Время нагрева заготовок по результатам расчёта в программе <i>лечь-молот</i> , с | Время нагрева заготовок по результатам, полученным нейронной сетью, с |
|----------------------|--------------------|---|--------------------------|--|--|---|--|---|
| 0,15                 | 0,173              | 0,02574   | 2                        | 70   | 15   | 105   | 1350   | 2094  |
| 0,2                  | 0,16               | 0,0201  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 3058   | 3116  |
| 0,2                  | 0,095              | 0,0185  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 2023   | 2499  |

**Таблица 3.7. Результаты верификации нейросети по температуре поверхности в конце нагрева заготовок**

| Диаметр заготовки, м | Длина заготовки, м | Расчётный размер заготовки после операцииковки, м | Группа нагреваемой стали | Допустимый перепад температуры в конце нагрева, °С | Начальная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева, °С | Конечная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева, °С | Температуре поверхности нагрева заготовок по результатам расчёта в программе <i>лечь-молот</i> , °С | Температуре поверхности нагрева по результатам, полученным нейронной сетью, °С |
|----------------------|--------------------|---|--------------------------|--|--|---|---|--|
| 0,2                  | 0,305              | 0,0376  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1091   |
| 0,15                 | 0,44               | 0,0316  | 1                        | 70   | 5  | 205   | 1090  | 1087   |
| 0,2                  | 0,323              | 0,0339  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1089   |
| 0,2                  | 0,3                | 0,0428  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1095   |
| 0,2                  | 0,165              | 0,0301  | 2                        | 70   | 5  | 205   | 1090  | 1092   |
| 0,07                 | 0,175              | 0,01215   | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1090   |
| 0,2                  | 0,255              | 0,0299  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1088   |
| 0,2                  | 0,13               | 0,02715   | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1088   |
| 0,085                | 0,87               | 0,0146  | 2                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1093   |
| 0,2                  | 0,112              | 0,0277  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1089   |
| 0,15                 | 0,235              | 0,0286  | 2                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1088   |
| 0,25                 | 0,21               | 0,02196   | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1089   |
| 0,2                  | 0,228              | 0,0271  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1088   |

Окончание табл. 3.7

| Диаметр заготовки, м | Длина заготовки, м | Расчётный размер заготовки после операцииковки, м | Группа нагреваемой стали | Допустимый перепад температуры в конце нагрева, °С | Начальная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева, °С | Конечная точка варьирования допустимого перепада температур в конце нагрева, °С | Температуре поверхности нагрева заготовок по результатам расчёта в программе <i>лечь-молот</i> , °С | Температуре поверхности нагрева по результатам, полученным нейронной сетью, °С |
|----------------------|--------------------|---|--------------------------|--|--|---|---|--|
| 0,085                | 0,71               | 0,01448   | 2                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1092   |
| 0,2                  | 0,203              | 0,0279  | 2                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1101   |
| 0,2                  | 0,09               | 0,0221  | 2                        | 70   | 15   | 105   | 1154  | 1117   |
| 0,075                | 0,56               | 0,01734   | 3                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1090   |
| 0,105                | 0,136              | 0,01277   | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1090   |
| 0,15                 | 0,33               | 0,0229  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1089   |
| 0,12                 | 0,3                | 0,02406   | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1089   |
| 0,085                | 0,74               | 0,0128  | 2                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1092   |
| 0,2                  | 0,16               | 0,0223  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1087   |
| 0,15                 | 0,21               | 0,0252  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1088   |
| 0,2                  | 0,076              | 0,0183  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1088   |
| 0,2                  | 0,085              | 0,0188  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1088   |
| 0,15                 | 0,173              | 0,02574   | 2                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1089   |
| 0,2                  | 0,16               | 0,0201  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1096  | 1088   |
| 0,2                  | 0,095              | 0,0185  | 1                        | 70   | 15   | 105   | 1090  | 1088   |

Погрешность сети по числу заготовок, находящихся в печи, составила от 11% до 43%. Погрешность сети по времени нагрева заготовки составила от 0,2% до 29%. Погрешность сети по температуре поверхности металла составила от 0,09% до 3%.

### 3.3. Решение задачи расчета печи, молота, рекуператора и оптимизации режима работы установки *печь-молот-рекуператор*

Одной из наиболее важных мер, направленных на повышение энергоэффективности ТТУ, является как можно более полная утилизация вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Примером наиболее часто

встречающегося решения является использование физической теплоты уходящих газов для предварительного подогрева компонентов горения. С этой целью успешно применяются различные типы теплообменных аппаратов.

При реконструкции ТТУ возникает вопрос (в первую очередь, экономический) о необходимости установки теплообменника для нагрева воздуха, идущего на горение за счёт тепла отходящих газов, также обоснованном выборе типа конструктивных характеристик теплообменника. Такой обоснованный выбор не возможен без применения моделирования работы исследуемого теплообменника и ТТУ (*печь–молот*). Источник ВЭР и сопряженное оборудование (теплообменник) должны рассматриваться в единой системе.

Для этого была решена задача расширения существующей оптимизационной математической модели установки *печь–молот* путем интеграции в неё блока моделирующего работу утилизационного теплообменника-рекуператора для подогрева воздуха, идущего на горение.

Используя оба варианта моделей (с рекуператором и без) для одних и тех же условий, можно сравнить удельные себестоимости цехового передела и получить вывод об экономической эффективности или нецелесообразности использования теплообменника данного типа и данной конструкции.

Несмотря на то, что в работе внимание уделяется щелевому радиационному рекуператору, представленный алгоритм и структура модели *печь–молот–рекуператор* предполагают возможность относительно простой замены блока, моделирующего работу щелевого радиационного рекуператора, на рекуператор другого типа и конструкции в целях сравнения стоимости цехового передела как показателя экономической эффективности.

Модель предназначена для оптимизации режима работы установки *печь–молот–рекуператор*, расчета норм расхода энергии на установку по минимуму себестоимости цехового передела, разработки режимно - технологических карт нагрева металла.

На рис. 3.4 показано взаимодействие составных частей модели системы *печь–молот–рекуператор*.

Входные данные математической модели включают:

1. Входные данные для модели *печь–молот*.
2. Входные данные для блока моделирования работы целевого радиационного рекуператора.

#### *Описание подпрограммы расчета целевого радиационного рекуператора*

В качестве блока, отвечающего за моделирование работы рекуператора, применяется подпрограмма, оформленная в виде вызываемой процедуры, которая основывается на программе расчета целевого радиационного рекуператора.

#### *Формирование входных данных*

Входными данными для подпрограммы являются:

1. Параметры, связанные с конструкцией рекуператора (размеры внутреннего и наружного цилиндров, толщина металла, размеры и количество ребер жесткости).
2. Параметры теплоносителя и топлива (состав топлива, удельный расход воздуха, выход продуктов горения из ТТУ, расход топлива на печь).
3. Теплофизические показатели теплоносителя (температура воздуха на входе в рекуператор).
4. Теплофизические показатели отходящих газов (температура продуктов сгорания на выходе из ТТУ).

*Алгоритм и составные части  
математической модели рекуператора*

Алгоритм математической модели целевого радиационного рекуператора приведён в [97].

На рис. 3.5 показано взаимодействие составных частей модели рекуператора.

*Взаимодействие и обмен информацией между  
компонентами в модели печь–молот–рекуператор*

Математическая модель оптимизации режима работы и определения норм расхода энергии для установки *печь–молот*, написанная на языке Fortran, включает в себя 6 подпрограмм-функций и 58 различных вызываемых процедур, связанных друг с другом обменом информацией через списки параметров и общие блоки. Несмотря на всю четкость и корректность построения этой программы, довольно сложно обеспечить “глубокое”, продуманное с точки зрения взаимодействия и обмена внедрения части, отвечающей за работу рекуператора. Кроме того, такая тесная интеграция непосредственно в составляющие программы установки *печь–молот* затруднит замену модели рекуператора.

Для обеспечения возможности простой замены математических моделей исследуемых рекуператоров в управляющую программу модели *печь–молот* были внесены следующие изменения:

- организовано считывание всех входных данных (в том числе данных о рекуператоре) с одного текстового файла в пределах управляющей программы;

- корректировка данных, отражающих влияние установки рекуператора (например, отчисления на амортизацию оборудования), происходит также в пределах управляющей программы;

- обмен данными между блоком рекуператора и моделью *печь–молот* в тексте управляющей программы



Рис. 3.4. Структурная схема модели печь–молот–рекуператор

организован с помощью списка параметров, что решает проблемы описания и идентификации переменных, участвующих в обмене.

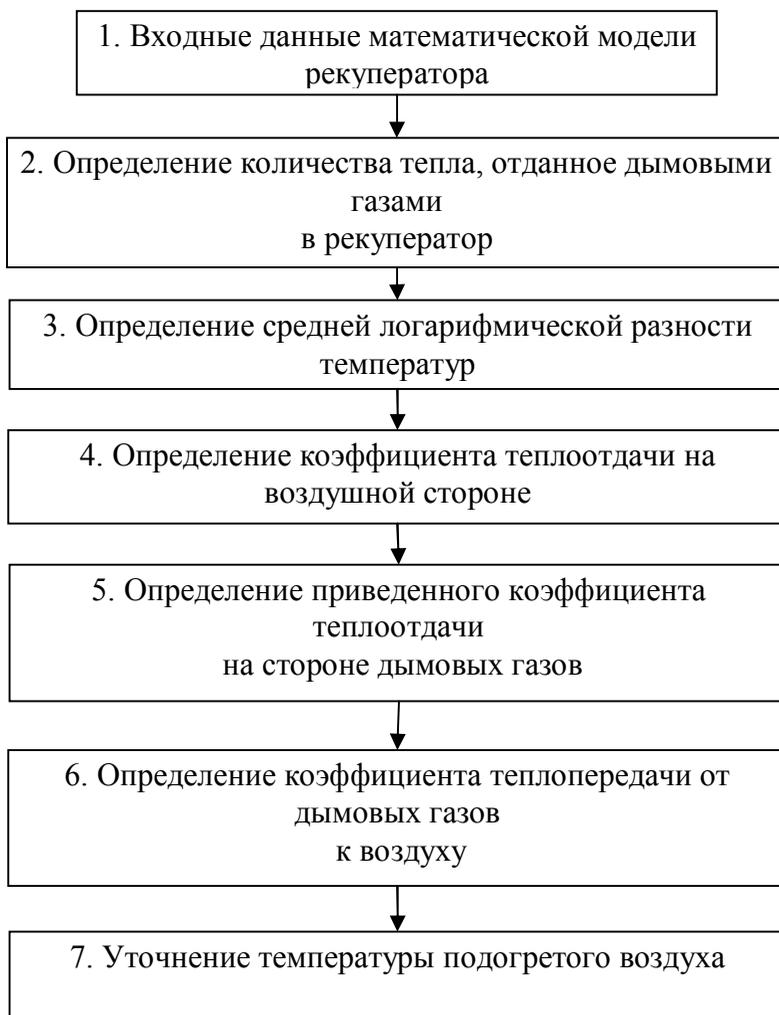


Рис. 3.5. Составные части математической модели рекуператора

Кроме того, за исключением управляющей программы, ни одна программная единица модели *печь–молот–рекуператор* не связана с моделью рекуператора.

Таким образом, чтобы исследовать другой тип рекуператора, необходимо лишь преобразовать исходную программу в вызываемую подпрограмму-процедуру. Если же модель рекуператора написана не на языке Fortran, необходимо в управляющей программе модели *печь–молот–рекуператор* вызвать исполняемый файл программы рекуператора \*.exe, а обмен необходимыми данными организовать через файлы.

На рис. 3.6 представлена принципиальная схема организации модели *печь–молот–рекуператор*.

В данной модели принята представленная последовательность операций.

1. Считываются необходимые входные данные (в том числе и температура подогретого воздуха в нулевом приближении), корректируются амортизационные отчисления, связанные с установкой рекуператора, которые суммируются с общими отчислениями на оборудование, транспортные средства, ценный инвентарь.

2. Просчитывается математическая модель *печь–молот*, результаты расчета которой (температура газа на выходе из печи) через список параметров передаются в качестве входных данных в блок расчета рекуператора.

3. В результате обращения к подпрограмме – модели рекуператора получается значение температуры подогретого воздуха, которое сравнивается с предыдущим значением. Если разница этих двух температур не превышает заданной точности  $\Delta T$ , то в технологическую карту нагрева заносятся данные последнего расчета. В противном случае на вход модели *печь–молот* подается



Рис. 3.6. Принципиальная схема организации модели *печь-котел-рекуператор*, где  $B_2, T_6'$  – расход газа и температура воздуха, идущего на горение, соответственно;  $T_2^{*''}, T_6''$  – температура газа и воздуха на выходе из рекуператора;  $T_2''$  – температура газа на выходе из печи

последнее значение температуры подогретого воздуха, и расчет повторяется с начала.

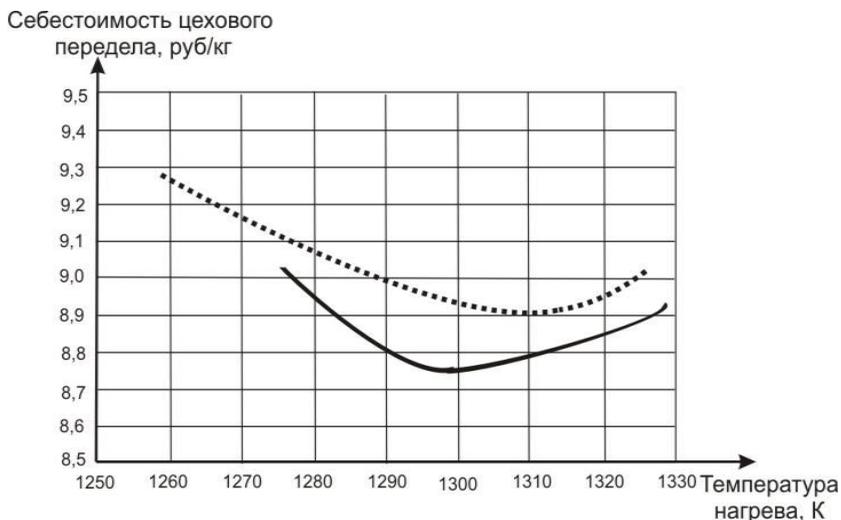
Опытным путем установлено, что при  $\Delta T = 3^\circ\text{C}$  условие 3 выполняется за 2 – 4 цикла в зависимости от близости нулевого приближения к истинному значению температуры подогретого воздуха.

Кроме представленного алгоритма нахождения искомой температуры, который представляет собой метод простой итерации (метод касательных), был опробован метод деления отрезка пополам, который, как считается, обеспечивает абсолютную сходимость. Однако метод половинного деления для нахождения искомой температуры при прочих равных условиях требует на 2-3 итерации больше, что существенно сказывается на времени расчета. Кроме того, применительно к данной задаче метод половинного деления не гарантирует абсолютную сходимость процесса поиска. Это связано с особенностями метода оптимизации, применяемыми в модели *печь–молот*.

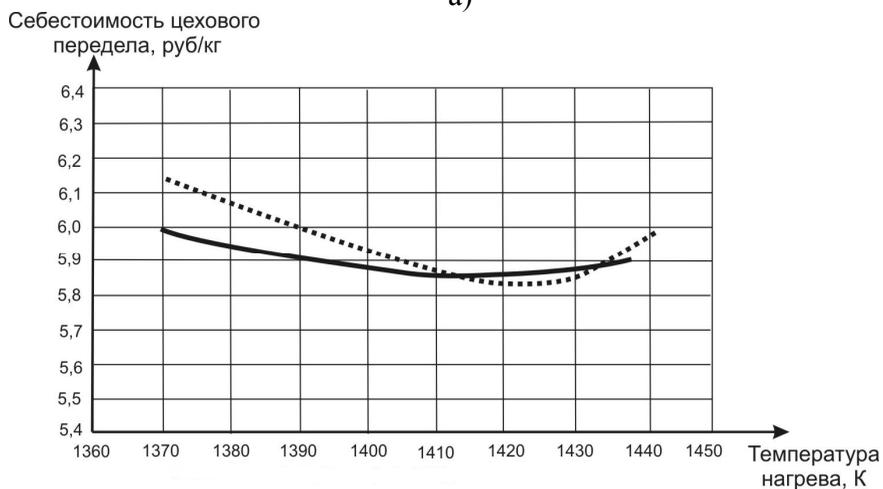
Для наглядности на рис.3.7 представлены зависимости цеховой себестоимости от температуры поверхности металла в конце нагрева, полученные на модели установки: *печь–молот* и *печь–молот–рекуператор* для двух различных типоразмеров.

### **3.4. Применение нейросетевой технологии для обоснования целесообразности применения в установке *печь–молот* теплообменника для подогрева воздуха**

Установка рекуператора не всегда экономически выгодна (рис.3.7), поскольку себестоимость цехового передела в некоторых случаях оказывается выше, чем себестоимость без применения рекуператора.



а)



б)

Рис.3.7. Зависимости цеховой себестоимости от температуры поверхности металла в конце нагрева, полученные на модели установки *печь-молот* и *печь-молот-рекуператор*: а – для установки производительностью 75 кг/ч; б – для установки производительностью 200 кг/ч; — – установка *печь-молот*; ..... – установка *печь-молот-рекуператор*

### 3.4.1. Применение программы Neuro Pro в решении задачи классификации

Под решением задачи классификации здесь подразумевается ответ на вопрос: выгодна установка щелевого радиационного рекуператора при данных условиях или нет. Установка рекуператора выгодна, если позволяет добиться уменьшения себестоимости цехового передела.

#### *Построение обучающего множества*

Обучающий набор данных представляет собой ряд наблюдений, для которых указаны значения входных и выходных переменных.

Выбор переменных (по крайней мере, первоначальный) осуществляется интуитивно. Обычно при обучении нейронной сети для начала включают все переменные, которые, по мнению исследователя, могут влиять на результат, а на последующих этапах сокращают это множество. Такой подход предполагает наличие у нейросетевой программы возможности гибкой и удобной работы с набором данных (редактирование, создание контрольных множеств, которые используются для проверки сети и др.). Такие возможности не реализованы в программе Neuro Pro 0.25, на которую не требуется лицензии.

Среди входных переменных математических моделей оптимизации режимов работы системы *печь–молот* и системы *печь–молот–рекуператор* наиболее значимыми для принятия решения об установке рекуператора были выбраны следующие:

А. Параметры печи:

1. Площадь пода;
2. Расчетная производительность печи;

3. Отношение объема кладки к внутренней поверхности кладки;
- Б. Параметры молота:
4. Установочная мощность молота;
- В. Параметры заготовки, определяющие режим нагрева:
5. Объем нагреваемой заготовки;
6. Изменение обобщенного размера (до и после операцииковки);
7. Конечная температура нагрева металла;
- Г. Параметры рекуператора:
8. Поверхность нагрева рекуператора;
- Д. Стоимостные показатели:
9. Отношение стоимостей 1 кг металла к  $1000 \text{ м}^3$  природного газа;
10. Стоимость 1 кг жаропрочной стали для изготовления рекуператора.

Вопрос о том, сколько наблюдений нужно иметь для обучения сети, оказывается непростым. Известен ряд эвристических правил, связывающих число необходимых наблюдений с размерами сети (простейшее из них гласит, что число наблюдений должно быть в десять раз больше числа связей в сети). На самом деле это число зависит также от (заранее неизвестной) сложности того отображения, которое нейронная сеть стремится воспроизвести. С ростом количества переменных количество требуемых наблюдений растет нелинейно. Для большинства задач, как правило, достаточно нескольких сотен или тысяч наблюдений. Для особо сложных задач может потребоваться еще большее количество наблюдений, однако очень редко может встретиться (даже тривиальная) задача, где хватило бы менее сотни наблюдений.

В представленной работе нейронная сеть обученная на 221 примере, и, как показала проверка, этого множества оказалось вполне достаточно.

Обучающее множество (задачник) представляет собой базу данных в формате \*.pdf в виде таблицы. Таблица данных заполнялась в программе Statistica 6.0, а затем конвертировалась в необходимый формат. Каждая строка таблицы представляет собой одно наблюдение, включающее в себя различные значения десяти варьируемых входных переменных и выходной величины, представленной двумя значениями: 0 – установка рекуператора не выгодна, 1 – установка рекуператора выгодна.

Область варьирования входных переменных представлена в табл. 3.8.

**Таблица 3.8.** Область варьирования входных переменных

| Параметр  | Название переменной | Область изменения                  |
|---|---------------------|------------------------------------|
| Площадь пода  | p1_1                | 0,538 – 1,967 м <sup>2</sup>       |
| Расчетная производительность печи                         | p1_2                | 75 – 500 кг/ч                      |
| Установочная мощность молота                              | p2_1                | 10 – 75 кВт                        |
| Отношение объема кладки к внутренней поверхности кладки   | p1_3                | 0,713 – 1,072 м                    |
| Объем нагреваемой заготовки                               | p3_1                | 0,000221 – 0,004555 м <sup>3</sup> |
| Изменение обобщенного размера (до и после операции ковки) | p3_2                | 0,00021 – 0,06542 м                |

Окончание табл. 3.8

| Параметр   | Название переменной | Область изменения        |
|--|---------------------|--------------------------|
| Конечная температура нагрева металла                                     | p3_3                | 1350 – 1420 K            |
| Отношение стоимостей 1кг металла и 1000 м <sup>3</sup> природного газа * | p4_1                | 0,0283 – 0,0075          |
| Стоимость 1кг жаропрочной стали для изготовления рекуператора            | p5_1                | 30 – 120 руб/кг          |
| Поверхность нагрева рекуператора   | p5_2                | 0,5 – 2,5 м <sup>2</sup> |

Примечание: стоимость 1кг металла = 15 руб./кг; стоимость 1000 м<sup>3</sup> газа = 530±2000 руб./тыс. м<sup>3</sup> газа.

Часть обучающего множества в формате \*.pdf представлена на рис. 3.8.

| 1_1  | 1_2  | 2_1 | 1_3 | 3_1  | 3_2  | 3_3  | 4_1  | 5_1  | 5_2  | 6 |
|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|---|
| 1962 | 5000 | 750 | 831 | 3927 | 725  | 1400 | 2830 | 1200 | 2248 | 0 |
| 1962 | 5000 | 750 | 831 | 1824 | 590  | 1350 | 2830 | 1200 | 2248 | 1 |
| 1962 | 5000 | 750 | 831 | 1996 | 684  | 1350 | 2830 | 1200 | 2248 | 1 |
| 1962 | 5000 | 750 | 831 | 4555 | 1006 | 1390 | 2830 | 1200 | 2248 | 1 |
| 1962 | 5000 | 750 | 831 | 2851 | 54   | 1350 | 2830 | 1200 | 2248 | 1 |
| 1962 | 5000 | 750 | 831 | 2073 | 664  | 1420 | 2830 | 1200 | 2248 | 0 |
| 1962 | 5000 | 750 | 831 | 1979 | 752  | 1430 | 2830 | 1200 | 2248 | 1 |
| 1962 | 5000 | 750 | 831 | 2827 | 656  | 1400 | 2830 | 1200 | 2248 | 1 |
| 1962 | 5000 | 750 | 831 | 1017 | 33   | 1400 | 2830 | 1200 | 2248 | 1 |
| 1962 | 5000 | 750 | 831 | 530  | 21   | 1350 | 2830 | 1200 | 2248 | 0 |
| 1962 | 5000 | 750 | 831 | 578  | 233  | 1400 | 2830 | 1200 | 2248 | 1 |

Рис.3.8. Часть обучающего множества

Затем обучающий набор данных проанализирован средствами программы Neugo Pro на наличие конфликтных примеров (рис.3.9).

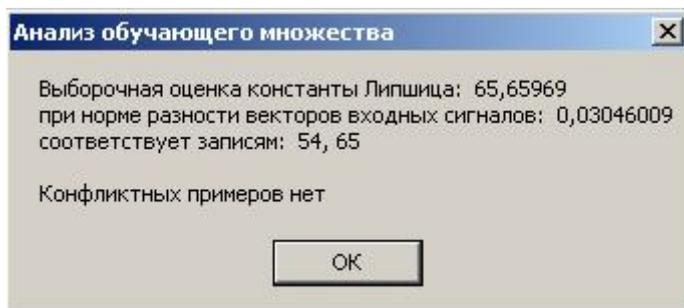


Рис.3.9. Анализ обучающего множества

### *Создание и обучение нейронных сетей. Тестирование*

Используя подготовленный задачник, было опробовано около 50 вариантов нейронных сетей с различным количеством слоев и нейронов.

По умолчанию программа предлагает нейронную сеть, состоящую из 3 слоев по 10 нейронов в каждом слое, при этом точность прогноза составляла 0,1 (10%). Несмотря на то, что данная нейронная сеть успешно обучалась, такая точность не позволяла упростить сеть в целях получения более простой архитектуры с меньшим количеством нейронов. В целях упрощения сети точность прогноза была снижена до (20%).

В результате многократных экспериментов с нейронными сетями различной структуры были получены две успешно обученные нейронные сети с минимально возможным количеством нейронов: Network 16, Network 18. Каждая из них включает 24 нейрона и состоит из 3 слоев, различие лишь в количестве нейронов в каждом слое (рис.3.10).

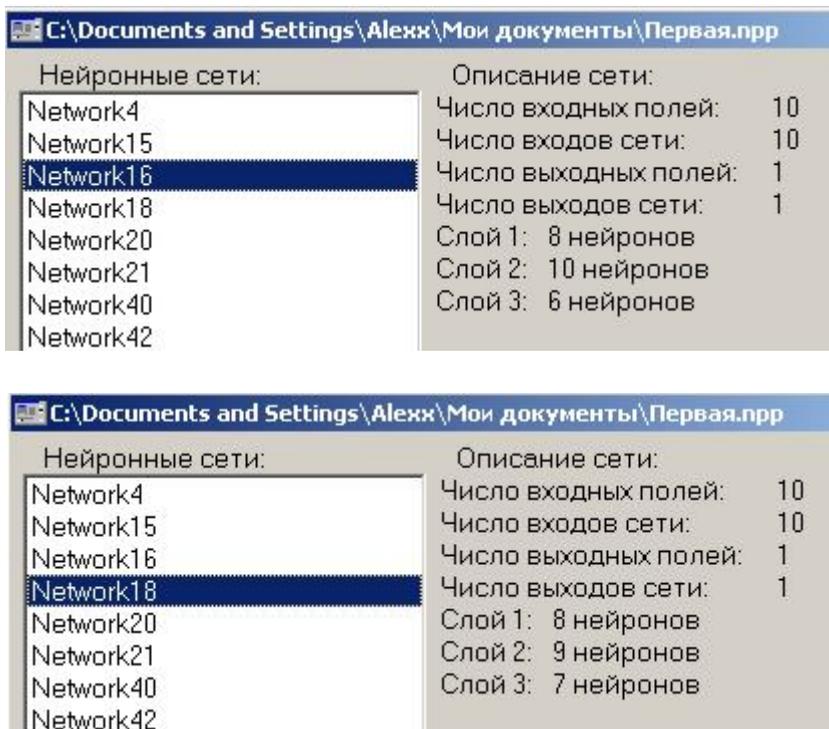


Рис. 3.10. Описание сетей

Значимость входных переменных для принятия сетью решения представлена на рис. 3.11. Из графиков видно, что наибольшее влияние на решение нашей задачи классификации имеет изменение обобщенного размера заготовки ( $p3\_2$ ) и стоимость природного газа ( $p4\_1$ ).

Из двух представленных сетей для дальнейшей работы выбрана сеть Network 18, поскольку обладает меньшей средней ошибкой (рис. 3.12).

### *Вербализация нейронной сети*

В программе Neuro Pro 0.25 не реализована возможность использования обученной сети, способной моделировать неизвестную функцию для прогнозирования

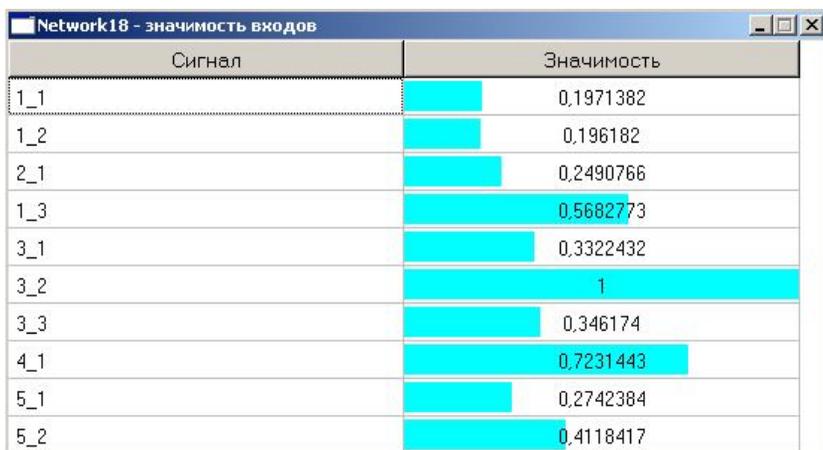


Рис. 3.11. Значимость входных переменных для сетей Network 16 и Network 18

ситуации, когда выходные значения неизвестны, что в конечном итоге и является целью обучения. Однако взамен предусмотрена возможность вербального описания текущей нейронной сети. На основе вербального описания можно восстановить набор правил, используемых сетью для правильного решения задачи. Текст описания сети

Network 18 представлен в прил. 38. Представленное вербальное описание есть совокупность математических уравнений, отражающих зависимость выходной величины от набора входных переменных.

| № | б | Прогноз сети | Ошибка     |
|---|---|--------------|------------|
|   |   | Правильно:   | 221 (100%) |
|   |   | Неправильно: | 0 (0%)     |
|   |   | Всего:       | 221        |
|   |   | Ср.ошибка:   | 0,122516   |
|   |   | Макс.ошибка: | 0,1997119  |

| № | б | Прогноз сети | Ошибка     |
|---|---|--------------|------------|
|   |   | Правильно:   | 221 (100%) |
|   |   | Неправильно: | 0 (0%)     |
|   |   | Всего:       | 221        |
|   |   | Ср.ошибка:   | 0,1173469  |
|   |   | Макс.ошибка: | 0,1999897  |

Рис. 3.12. Результаты тестирования сетей Network 16 и Network 18

Таким образом, чтобы иметь возможность получать ответ на вопрос о целесообразности установки рекуператора при различных значениях входных переменных, необходимо лишь перенести уравнения вербального описания сети в программный вид, т.е. в некотором смысле смоделировать саму нейронную сеть. Кроме того, это позволит проверить достоверность моделирования сетью неизвестной функции (решение об установке рекуператора).

### 3.4.2. Разработка моделирующей программы по вербальному описанию сети после её обучения в Neuro Pro

Программа, моделирующая нейронную сеть на основе вербального описания, написана на языке Fortran. Листинг программы мало отличается от текста вербального описания сети. Исходный код программы представлен в прил. 39. Входные данные заносятся в текстовый файл, откуда и считываются управляющей

программой. В результате работы программа создает текстовый файл с решением вопроса об экономической эффективности установки рекуператора.

### **3.4.3. Верификация программы по принятию решения об установке рекуператора для нагрева воздуха**

Полученную нейронную сеть необходимо проверить на качество работы, т.е. получить некоторое множество выходных значений сети при входных переменных, отличных от задачника – обучающего набора. Затем сравнить выход сети с известными нам значениями выходных переменных. Обычно для этой цели используют контрольные множества, которые являются частью подготовленного обучающего множества, однако используются не для обучения, а для проверки сети.

В нашем случае для подобной проверки необходимо провести тестирование программы вербального описания сети, поскольку возможностей проверки в самой нейросетевой программе Neuro Pro нет.

Для целей проверки использованы четыре набора переменных по типу задачника. Два примера имеют значения входных переменных, лежащих близко к обучающему множеству, два других – за пределами обучающей выборки. Значения переменных, а также результаты тестирования представлены в табл. 3.9.

Как следует из представленной табл. 3.9, программа по вербальному описанию сети предоставляет те же ответы, что и результаты работы математических моделей установок: *печь–молот* и *печь–молот–рекуператор*.

Проверка показала возможность использования составленной программы не только для входных переменных, значения которых лежат в пределах обучающего множества, но и для значений, лежащих за пределами этого множества. Однако для получения от сети

**Таблица 3.9.** Результаты тестирования нейронной сети

| Входные переменные   | Значения входных переменных |                   |                   |                   |
|--|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Площадь пода, $m^2$  | 1,008                       | 1,962             | 0,538             | 0,616             |
| Расчетная производительность печи, $кг/ч$                                  | 200                         | 500               | 75                | 100               |
| Установочная мощность молота, $кг/ч$                                       | 30                          | 75                | 10                | 15                |
| Отношение объема кладки к внутренней поверхности кладки, $m$               | 0,713                       | 0,831             | 1,072             | 1,02              |
| Объем нагреваемой заготовки, $m^3$   | 2,98<br>$10^{-3}$           | 4,56<br>$10^{-3}$ | 1,85<br>$10^{-3}$ | 1,85<br>$10^{-3}$ |
| Изменение обобщенного размера (до и после операцииковки), $m$              | 4,09<br>$10^{-3}$           | 1,01<br>$10^{-3}$ | 6,85<br>$10^{-3}$ | 6,85<br>$10^{-3}$ |
| Конечная температура нагрева металла                                       | 1400                        | 1350              | 1300              | 1300              |
| Отношение стоимостей $1кг$ металла и $1000 m^3$ природного газа            | 0,015                       | 0,01              | 0,006             | 0,01              |
| Стоимость $1 кг$ жаропрочной стали для изготовления рекуператора, $руб/кг$ | 70                          | 50                | 30                | 35                |
| Поверхность нагрева рекуператора, $m^2$                                    | 1,4                         | 1,2               | 0,7               | 1,2               |

Окончание табл. 3.9

| Входные переменные   | Значения входных переменных |      |      |      |
|--|-----------------------------|------|------|------|
| Себестоимость цехового передела без рекуператора, руб/кг           | 5,84                        | 3,94 | 9,54 | 8,91 |
| Себестоимость цехового передела при установке рекуператора, руб/кг | 5,86                        | 3,92 | 9,33 | 8,76 |
| Ожидаемый ответ сети *   | 0                           | 1    | 1    | 1    |
| Результаты работы нейросети *                                      | 0                           | 1    | 1    | 1    |

Примечание: 0 – установка рекуператора не выгодна; 1 – установка рекуператора выгодна.

(а значит и от программы вербального описания) достоверных ответов, необходимо как минимум, чтобы входные данные были того же порядка что и входные данные задачника.

#### **3.4.4. Применение программы по принятию решения об установке рекуператора для нагрева воздуха**

Полученная программа является удобным инструментом для различных исследовательских целей, связанных с оценкой влияния на принятие решения об установке рекуператора, значений входных переменных (производительность печи, площадь нагрева рекуператора, экономические показатели и др.). Поскольку программа достаточно простая и не содержит циклов, а время ее выполнения незначительно, целесообразно представить ее в виде многократно вызываемой процедуры.

В качестве одного из примеров с помощью программы построена область экономически

эффективного использования радиационного щелевого рекуператора в зависимости от различных значений производительности печи и площади поверхности рекуператора при постоянных значениях остальных входных переменных.

В рамках этого небольшого исследования было просчитано 189 различных комбинаций производительности печи и площади поверхности рекуператора, при этом производительность печи была равной 75, 100, 150, 200, 250, 400, 500 кг/ч; поверхность рекуператора менялась в пределах  $0,5 \div 2,5 \text{ м}^2$  с шагом  $0,1 \text{ м}^2$ .

Результаты расчета представлены в виде графика на рис 3.13.

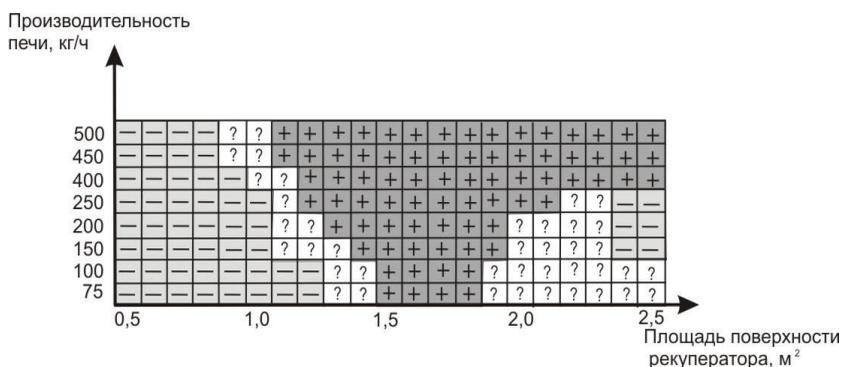


Рис.3.13. Зависимость экономической эффективности установки рекуператора для печей различной производительности от площади поверхности рекуператора;  
 + - установка рекуператора выгодна; - - установка рекуператора не выгодна; ? – точность прогноза сети превышает заданную погрешность, решение не может быть принято

Как следует из рис. 3.13, область эффективного применения рекуператора тем меньше, чем меньше производительность печи. Кроме того, для печей с низкой

производительностью установка рекуператора, возможно, вообще не выгодна при низкой стоимости природного газа.

Это следствие легко объяснимо. Применение рекуператора с небольшой поверхностью нагрева позволяет добиться невысокого нагрева воздуха и небольшого процента экономии топлива. Для печей большой производительности и, следовательно, с большим расходом топлива эта экономия ощутима и покрывает затраты на рекуператор. Для печей малой производительности затраты на рекуператор оказываются выше полученной экономии топлива. Использование рекуператора с большой поверхностью нагрева для печей малой производительности оказывается нецелесообразным по тем же причинам.

Область экономически эффективного использования рекуператора сильно зависит от цен на топливо и может сильно изменяться – увеличиваться с ростом стоимости природного газа. Определение эффективности установки рекуператора на кузнечную печь с учетом изменения стоимости природного газа – одна из задач, которую можно решить, применяя представленную обученную нейронную сеть.

## **4. Использование нейросетевых технологий для повышения эффективности тепловых и энергетических установок**

### **4.1. Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности газовой утилизационной бескомпрессорной турбины (ГУБТ)**

#### **4.1.1. Краткая характеристика объекта исследования**

В качестве объекта исследования является газовая утилизационная турбина (ГУБТ-25), установленная на газовой турбинной расширительной станции газового цеха ОАО “Северсталь” г. Череповец (табл. 4.1). Турбина одноцилиндровая, двухпоточная изготовлена АОО “Невский завод ” г. Санкт-Петербург. Турбина пущена в эксплуатацию летом 2002 года.

Статор турбины сварно-литой конструкции. В средней литой части корпуса турбины установлены неподвижные и поворотные направляющие лопатки.

Регулирование осуществляется поворотными направляющими лопатками, имеющими гидравлический привод, позволяющими поддерживать постоянное давление газа перед входным патрубком турбины. Турбина управляется поворотными направляющими лопатками двух 1-х ступеней. В каждом потоке турбины имеются по 26 поворотных лопаток. Поворотные направляющие лопатки, установленные в правом и левом потоках по ходу доменного газа, предназначены для изменения пропускной способности проточной части турбины в зависимости от расхода доменного газа проходящего через турбину. Они управляются через поворотные кольца гидроцилиндрами, которые, в свою очередь, управляются

либо в режиме дистанционного управления, либо в автоматическом режиме электронно-гидравлической системой регулирования турбины, осуществляющей поддержание на заданном уровне давления газа под колошником доменной печи. Положение каждой поворотной лопатки может быть скорректировано за счет изменения длины управляющей тяги.

**Таблица 4.1.** Основные параметры установки ГУБТ-25 при составе доменного газа (нормативном)  $\text{CO}=21\%$ ;  $\text{CO}_2=21\%$ ;  $\text{H}_2=2\%$ ;  $\text{N}_2=56\%$

| Наименование параметра   | Значение     |       |        |
|--|--------------|-------|--------|
| Объёмный расход газа при давлении 0,101 МПа и температуре 0°C, $\text{м}^3(\text{н})/\text{ч}$ | 65000        | 90000 | 100000 |
| Избыточное давление газа во входном патрубке, МПа  | 0,29         | 0,304 | 0,306  |
| Температура газа во входном патрубке, °C   | 40 (макс.60) |       |        |
| Избыточное давление газа в выходных патрубках, МПа   | 0,108        |       |        |
| Относительная влажность, %   | 100          |       |        |
| Свободная влага, не более, $\text{г}/\text{м}^3(\text{н})$                                     | 15           |       |        |
| Содержание пыли, не более, $\text{мг}/\text{м}^3(\text{н})$                                    | 30           |       |        |
| Частота вращения, об/мин   | 1500         |       |        |
| Мощность на муфте турбины, МВт   | 14,05        | 22,5  | 24,2   |
| КПД на муфте турбины, %  | 77,0         | 87,0  | 85,0   |
| КПД генератора (ТУ 3383-055-05757908-96), %  | 97,5         |       |        |
| Мощность на клеммах генератора, МВт  | 13,7         | 21,94 | 23,5   |

*Ротор сборной конструкции.* Рабочие лопатки установлены на двух барабанах, насаженных на вал. Концевые уплотнения лабиринтовые, 3-х секционные с подводом уплотняющего газа – азота. Мощность, вырабатываемая турбиной, передаётся на вал генератора при помощи жёсткой муфты. Ротор вращается в цилиндрических опорных подшипниках.

#### **4.1.2. Оценка режимных параметров, влияющих на энергетическую эффективность работы турбины**

Для оценки режимных параметров, которые влияют на энергетическую эффективность работы ГУБТ-25, статистические данные собирались в период с 2.06.03 по 1.09.04: по мощности турбины в зависимости от расхода доменного газа через турбину, давлений и температур доменного газа до и после турбины, а также степени открытия поворотных лопаток и перепускного клапана. Была произведена оценка загрязнённости конденсата после турбины в зависимости от расхода воды на скруббер по результатам промышленного эксперимента. Полученные данные были обработаны.

На основании анализа предварительных статистических данных была установлена зависимость мощности турбины от расхода доменного газа, его давления, температуры и угла открытия поворотных направляющих лопаток, установленных в турбине для поддержания давления во входном патрубке.

Для определения зависимости мощности турбины от температуры доменного газа была разработана программа промышленного эксперимента на турбине ГУБТ-25.

Сбор статистических данных, влияющих на работу ГУБТ-25, с 1 июля 2004 года производился непрерывно. Анализ результатов статистики показал, что на выработку электроэнергии ГУБТ-25 влияют следующие параметры: расход доменного газа, проходящего через турбину,

давление и температура доменного газа до и после турбины, степень открытия поворотных направляющих лопаток, температура окружающей среды и степень открытия перепускного клапана перед дроссельной группой.

Результаты замеров давления на основе статистических данных показывают, что колебания абсолютного давления газа перед турбиной за время сбора статистических данных несколько отличались от проектных и находились в диапазоне от 0,28 до 0,308 МПа (проектные от 0,29 до 0,306). По результатам замеров влияние изменения давления на электрическую мощность турбины при прочих усреднённых показателях составило 0,4-0,5 МВт.

Вторым параметром, который влияет на выработку мощности турбиной и зависит от работы доменной печи, является расход доменного газа, проходящий через турбину. Диапазон изменения расхода доменного газа поступающего в турбину за время сбора статистических данных составлял от 678 000 до 988 000 м<sup>3</sup>(н)/ч. Этот диапазон несколько меньше проектного 650000 – 1000000 м<sup>3</sup>(н)/ч. Влияние расхода доменного газа на изменение мощности сложное. При увеличении расхода доменного газа выше пропускной способности ГУБТ приоткрывается перепускной клапан перед дроссельной группой. При этом должны быть открыты полностью поворотные направляющие лопатки ГУБТ. Перепускной клапан настроен на открытие при повышении давления газа под колошником доменной печи сверх задания (0,29 МПа по анализу результатов статистики) на 1,5%. Изменение мощности при изменении расхода доменного газа через турбину по результатам статистических замеров с учётом влияния других параметров лежало в диапазоне от 0,02 до 0,75 МВт.

По результатам статистических замеров степень открытия лопаток правого потока газа на турбину больше, чем у левого на 0,5 - 1,5 %, и влияние на приращение мощности турбины от степени открытия лопаток правого потока больше. Степень открытия лопаток левого потока изменялась от 26,7% до 92,9%, а правого – от 27,3% до 94,0%. При максимальном  $988000 \text{ м}^3(\text{н})/\text{ч}$  расходе доменного газа через проточную часть турбины при изменении степени открытия лопаток от минимального до максимального процента мощность турбины для левого потока изменялась на 3,47 *MВт*, а для правого – на 4,68 *MВт* мощности. При минимальном  $678 000 \text{ м}^3(\text{н})/\text{ч}$  расходе доменного газа изменялась для левого потока – на 1,01 *MВт*, а для правого – на 3,08 *MВт* соответственно.

Расчётной (паспортной) температурой доменного газа на входе в турбину принята температура 40°C. Если температура доменного газа перед турбиной будет выше, то объёмный расход доменного газа возрастает. Также увеличивается количество пара, содержащегося в доменном газе, а всё это влияет на увеличение мощности турбины. И поэтому мощность турбины зависит от давления, температуры газа после газоочистки доменной печи и величины температуры газа при выходе его из доменной печи. Доменный газ после газоочистки шёл с влажностью 100%, и температура его зависела от режимов её работы и оборотной системы подачи воды. Обратная вода поступала с градирен на скруббер в количестве  $2600 \text{ м}^3/\text{ч}$ , который предназначен для очистки доменного газа от пыли и для охлаждения доменного газа перед дроссельной группой и турбиной. Обратная вода проступала также на три трубы Вентури и частично на циклоны каплеуловители, работающие параллельно, в количестве  $110 \text{ м}^3/\text{ч}$  на каждую. Они предназначены для тонкой очистки доменного газа. Доменный газ выходил из

доменной печи с температурой 170 – 260 °С и, проходя через аппараты газовой очистки, охлаждался до температуры от 41,7 до 61,6 °С (по результатам статистических замеров). Проходя через проточную часть турбины ГУБТ-25, доменный газ отдавал энергию давления и охлаждался. При охлаждении газа пар, находящийся в газе, частично конденсировался и выделялся в виде капелек влаги, которая частично удалялась через конденсатоотводчики, остальная часть в виде взвешенной влаги пролетала в трубопровод и затем уже удалась через конденсатоотводчик и т.д. Температура доменного газа перед турбиной влияет на вырабатываемую ею электроэнергию. Так, при максимальном  $988000 \text{ м}^3(\text{н})/\text{ч}$  расходе газа мощность турбины повышается при подъёме на 15 °С от расчётной температуры на 0,1 *MВт*, а при минимальном  $678000 \text{ м}^3(\text{н})/\text{ч}$  на 0,2 *MВт*.

На выработку энергии турбиной кроме давления до турбины влияет и давление доменного газа за турбиной, которое, согласно техническому заданию, на проектирование турбины должно быть 0,008 *МПа* избыточного давления [98]. Диапазон изменения этого давления во время сбора статистических данных составил от 0,0048 до 0,01344 *МПа*. Изменение давления доменного газа в этом диапазоне влияет на изменение мощности на клеммах генератора турбины до 1 *MВт*.

Влияние температуры окружающего воздуха также заметно сказывается на эффективность работы турбины. Разница выработанной мощности зимой при средней температуре воздуха –12 °С больше, чем при средней температуре воздуха летом 25 °С для максимального расхода газа на 0,34 *MВт*, а для минимального – на 0,56 *MВт*.

### **4.1.3. Оценка технологических ограничений, влияющих на работу турбоустановки**

Целью сбора статистических данных кроме определения режимных параметров, влияющих на энергетическую эффективность работы ГУБТ-25, было выявление технологических ограничений, влияющих на работу турбины.

Работа турбоустановки, работающей на энергии давления доменного газа, по многим параметрам связана с работой доменной печи. Система регулирования и защиты построена на поддержание постоянным давления доменного газа под колошником доменной печи и установлена в системе управления печи.

Срабатывание перепускного клапана перед дроссельной группой происходит при полностью открытых лопатках и при увеличении пропускной способности ГУБТ выше расчётной, а также повышении давления газа под колошником печи сверх задания на 1,5 %. Открытие клапана на 15 % снижает мощность турбины на 0,3 *MВт*.

Кроме технологических ограничений по расходу и давлению доменного газа перед турбиной, которые связаны с работой доменной печи, ограничения по работе турбины связаны также с работой газовой очистки. Согласно правилам безопасности в газовом хозяйстве металлургических и коксохимических предприятий и производств [99] содержание пыли не должно превышать в доменном газе после газовой очистки 4  $мг/м^3$  газа. Следовательно, все мероприятия на газовой очистке, которые косвенно влияют на повышение энергетической эффективности турбины, не должны ухудшить степень очистки доменного газа больше указанной цифры. На выходе после доменной печи температура доменного газа составляет от 170 – 240 °С. Газ, выходящий после

доменной печи, кроме того, что является вторичным топливом, обладает потенциальной энергией давления и внутренней энергией. После газовой очистки мокрого типа температура доменного газа понижается до 41,7 – 61,6 °С. Доменный газ охлаждается водой, которая поступает из градирни в аппараты газовой очистки. Газ на выходе из аппаратов газовой очистки имеет относительную влажность  $\varphi=100$  %. Во время газовой очистки вода частично испаряется в доменный газ, снижая за счёт этого его температуру. На снижение температуры газа оказывает влияние и температура воды, поступающая в газовую очистку. Повысить температуру доменного газа перед газовой турбиной можно за счёт уменьшения расхода воды на газовую очистку и повышения её температуры за счёт отключения градирни.

Повышение температуры доменного газа перед турбиной обеспечит дополнительную выработку электрической энергии, но при этом влажность доменного газа после газовой очистки в любом случае будет равна 100 %, возрастёт забаластированность доменного газа водяными парами после турбины и снизится его теплотворная способность. При этом появится необходимость снижать температуру доменного газа при транспортировке его к потребителю. Дополнительная влага отводится через конденсатоотводчики. Они расположены на газовой сети по ходу доменного газа.

Уменьшение давления доменного газа за турбиной может позволить получить дополнительную мощность. В газовую сеть в доменный газ поступал от четырёх доменных печей. Из сети он поступает к разным потребителям. При доставке доменного газа должно обеспечиваться паспортное давление газа у потребителей. За счёт оптимизации режимов работы газовой сети можно оптимизировать давление за турбиной. Для этого

необходима регулировка работы газовой сети с оптимизацией давления газа за ГУБТ-25.

#### **4.1.4. Сбор информации и исходных данных для составления статистической математической модели по работе турбоустановки**

Математическая модель по работе турбоустановки должна позволять оценивать зависимость мощности турбины от параметров, влияющих на неё. Модель также должна определять удельные показатели эффективности использования энергоносителя на газотурбинную расширительную станцию ГТРС и позволять производить оценку организационно технических мероприятий по эффективному использованию энергии доменного газа.

Согласно методическим указаниям по прогнозированию удельных расходов топлива [100], при обосновании тарифов определение объемов топлива (энергоносителя), расходуемого электростанциями на технологические цели, должно производиться на основании норм удельных расходов топлива (энергоносителя) при производстве электрической энергии. Они рассчитываются на базе утвержденных в установленном порядке нормативных характеристик энергетического оборудования и планируемых режимов и условий его эксплуатации.

Удельные расходы топлива (энергоносителя) на отпускаемую электроэнергию и тепло при тарифном прогнозировании должны соответствовать исправному техническому состоянию энергетического оборудования, высокому уровню его эксплуатационного и ремонтного обслуживания, оптимальному составу и режимам работы агрегатов. Не допускается учитывать при тарифном прогнозировании перерасходы топлива из-за упущений в эксплуатационном и ремонтном обслуживании

оборудования. Вместе с тем прогнозируемые удельные расходы топлива (энергоносителя) должны быть реально достижимыми. Они рассчитываются в последовательности, регламентированной макетом расчета номинальных и нормативных показателей, входящих в состав утвержденной нормативно-технической документации по топливу использованию (энергоиспользованию).

Расчеты выполняются по каждому турбоагрегату.

Макеты расчета номинальных и нормативных удельных расходов, экономии топлива (энергоносителя) регламентируют порядок расчета номинальных и нормативных значений показателей, содержащихся в отчете газотурбинных расширительных станций и об энергетической экономичности оборудования, содержат расчетные формулы и ссылки на источники первичной информации.

В зависимости от состава оборудования, особенностей его схем, режимов работы, вида энергоносителя разработан макет.

Макет отражает:

- исходно-номинальные значения основных и промежуточных показателей, определенные по энергетическим характеристикам при фактических средних нагрузках;
- фактические значения внешних факторов и их отличия от значений, принятых при построении энергетических характеристик;
- номинальные значения основных и промежуточных показателей агрегатов для фактических режимов работы и значений внешних факторов;
- номинальные значения удельных расходов энергоносителей;
- значения коэффициентов резерва энергетической экономичности оборудования;

- нормативные значения удельных расходов энергоносителей;
- показатели экономии (или перерасхода) энергоносителей.

При расчетах в качестве исходных материалов используются энергетические характеристики турбины, полученные на основании статистических замеров в течение двух лет (табл. 4.2).

На основе собранной информации и исходных данных по газовому цеху составляется статистическая математическая модель по работе ГУБТ-25, а на основе модели разрабатываются режимы работы турбины.

Целью моделирования режимов работы ГУБТ-25 является определение нормативных значений расходов энергоносителей на выработку электрической энергии.

Для нормирования показателей использования энергоносителя после доменной печи необходимо определять технически обоснованные значения параметров и показателей работы группы оборудования. Которое утилизирует энергию доменного газа при транспортировке его от доменной печи до потребителя, удельные расходы топлива (энергоносителей) на отпускаемую энергию в зависимости от вида и типа оборудования, режима работы и условий его эксплуатации.

**Таблица 4.2.** Частичные результаты замеров режимных параметров, используемых для разработки статистической математической модели работы турбины

| Мощность турбины, <i>MВт</i> | Расход доменного газа через турбину, <i>м<sup>3</sup>(н)/ч</i> | Избыточное давление доменного газа перед турбиной, <i>бар</i> | Избыточное давление доменного газа за турбиной, <i>бар</i> | Температура доменного газа перед турбиной, <i>°C</i> | Температура доменного газа после турбины, <i>°C</i> | Степень открытия лопаток слева по ходу доменного газа, % | Степень открытия лопаток справа по ходу доменного газа, % | Степень открытия быстрооткрывающегося клапана SOK, % | Температура окружающей среды, <i>°C</i> |
|------------------------------|--|---|--|--|---|--|---|--|---|
| 19,425                       | 940800   | 1,89  | 0,0878   | 54,4   | 27,0  | 80,8   | 81,3  | 0  | 15                                      |
| 18,908                       | 917000   | 1,90  | 0,1011   | 53,9   | 26,8  | 74,5   | 75,2  | 0  | 18                                      |
| 18,99                        | 882800   | 1,92  | 0,0968   | 55,0   | 28,5  | 66,4   | 67,1  | 0  | 17                                      |
| 17,67                        | 820300   | 1,95  | 0,0869   | 54,2   | 27,1  | 53,2   | 53,8  | 0  | 18                                      |
| 18,33                        | 946300   | 1,88  | 0,0878   | 53,6   | 26,7  | 64,6   | 65,2  | 0  | 17                                      |
| 17,76                        | 768000   | 1,93  | 0,0816   | 58,4   | 33,2  | 53,2   | 53,6  | 1,6  | 18                                      |
| 18,12                        | 960000   | 1,81  | 0,1104   | 56,0   | 30,2  | 92,8   | 93,2  | 9,2  | 17                                      |
| 17,805                       | 914800   | 1,90  | 0,1132   | 48,8   | 20,4  | 64,8   | 65,4  | 0  | 16                                      |
| 17,16                        | 888000   | 1,81  | 0,1056   | 54,4   | 27,2  | 91,8   | 92,8  | 19,2   | 18                                      |
| 18,96                        | 972000   | 1,92  | 0,08   | 57,6   | 32,2  | 92,8   | 94,0  | 0  | 18                                      |
| 16,32                        | 832000   | 1,93  | 0,0992   | 53,2   | 26,0  | 49,2   | 50,0  | 0  | 15                                      |
| 11,76                        | 792000   | 1,99  | 0,1024   | 51,2   | 23,2  | 32,8   | 33,2  | 0  | 15                                      |
| 18                           | 960000   | 1,85  | 0,1104   | 51,6   | 24,4  | 73,2   | 74,4  | 0  | 15                                      |
| 15,84                        | 704000   | 1,94  | 0,112  | 51,2   | 23,0  | 46,0   | 46,0  | 2,0  | 15                                      |
| 18,105                       | 880300   | 1,88  | 0,1257   | 50,3   | 22,2  | 68,8   | 69,5  | 0  | -12                                     |
| 18,435                       | 909000   | 1,87  | 0,1217   | 50,1   | 22,2  | 73,4   | 74,1  | 0  | -12                                     |
| 17,153                       | 896500   | 1,84  | 0,0998   | 50,3   | 22,0  | 55,9   | 56,6  | 0  | -12                                     |

Окончание табл. 4.2

| Мощность турбины, <i>MВт</i> | Расход доменного газа через турбину, <i>м<sup>3</sup>(н)/ч</i> | Избыточное давление доменного газа перед турбиной, <i>бар</i> | Избыточное давление доменного газа за турбиной, <i>бар</i> | Температура доменного газа перед турбиной, <i>°С</i> | Температура доменного газа после турбины, <i>°С</i> | Степень открытия лопаток слева по ходу доменного газа, % | Степень открытия лопаток справа по ходу доменного газа, % | Степень открытия быстрооткрывающегося клапана SOK, % | Температура окружающей среды, <i>°С</i> |
|------------------------------|--|---|--|--|---|--|---|--|---|
| 17,805                       | 847000   | 1,88  | 0,1011   | 50,2   | 21,8  | 56,8   | 57,8  | 0  | -12                                     |
| 18,428                       | 858800   | 1,87  | 0,1114   | 50,7   | 22,4  | 65,2   | 65,9  | 0  | -14                                     |
| 14,97                        | 832500   | 1,85  | 0,1001   | 57,9   | 32,5  | 44,2   | 44,8  | 0  | 14                                      |
| 16,88                        | 869500   | 1,8   | 0,1055   | 57,7   | 32,5  | 64,0   | 64,7  | 0  | 14                                      |
| 15,45                        | 783000   | 1,87  | 0,1081   | 58,7   | 33,4  | 46,2   | 47,0  | 0  | 14                                      |
| 17,468                       | 829800   | 1,9   | 0,0974   | 58,7   | 32,5  | 54,0   | 54,6  | 0  | 14                                      |
| 18,548                       | 853800   | 1,91  | 0,1161   | 57,3   | 30,8  | 62,8   | 63,5  | 0  | 19                                      |
| 17,445                       | 897000   | 1,91  | 0,1132   | 49,5   | 21,9  | 59,5   | 60,1  | 0  | 19                                      |
| 18,12                        | 984000   | 1,85  | 0,1104   | 45,6   | 16,8  | 83,2   | 84,0  | 0  | 16                                      |
| 18,12                        | 960000   | 1,85  | 0,1152   | 46,4   | 17,2  | 86,0   | 87,2  | 0  | 17                                      |
| 13,80                        | 848000   | 1,98  | 0,0912   | 49,2   | 21,6  | 39,2   | 40,4  | 0  | 19                                      |
| 17,64                        | 772000   | 1,92  | 0,1104   | 50,0   | 21,0  | 58,8   | 59,2  | 2,0  | 18                                      |
| 18,368                       | 908000   | 1,92  | 0,1133   | 48,5   | 20,0  | 71,4   | 72,1  | 0  | 19                                      |
| 18,00                        | 976000   | 1,85  | 0,1104   | 47,6   | 18,8  | 84,0   | 84,4  | 0  | 19                                      |
| 17,415                       | 901000   | 1,93  | 0,1091   | 46,9   | 18,1  | 60,1   | 60,7  | 0  | 19                                      |
| 18,173                       | 927000   | 1,91  | 0,1035   | 46,5   | 17,1  | 67,3   | 68,0  | 0  | 19                                      |
| 15,968                       | 850300   | 1,95  | 0,0873   | 49,6   | 20,9  | 46,6   | 47,3  | 0  | 19                                      |

Основной задачей нормирования энергии является выявление причин нерационального использования энергоносителя и осуществление режима ее экономии. Технической базой для нормирования затрат энергоносителя являются [101 (п. 1.4), 102, 103, 104] энергетические характеристики турбины.

Нормирование расходов энергоносителя на газотурбинной расширительной станции осуществляется на основе НТД по использованию энергоносителя.

НТД по использованию энергоносителя содержит:

- энергетические характеристики источника произведённого энергоносителя для каждой газотурбинной расширительной станции;
- энергетические характеристики газового утилизационного бескомпрессорного турбоагрегата:
- зависимость технологических потерь энергии, связанных с режимом работы турбоагрегата;
- зависимость абсолютных или удельных затрат электроэнергии на собственные нужды на газотурбинной расширительной электростанции;
- графики исходно-номинальных удельных расходов энергоносителя на отпускаемую электроэнергию.

Расчеты при тарифном прогнозировании должны выполняться для каждого месяца периода регулирования. Показатели в целом за период регулирования, превышающий месячный интервал (квартал, год) рассчитываются по результатам их определения за каждый период.

Для определения резерва экономии необходимо определять средний за месяц удельный расход энергоносителя брутто на выработку электрической энергии от средних за месяц параметров энергоносителя:

- давления энергоносителя перед турбиной (параметр зависит от работы доменной печи);

- давления энергоносителя за турбиной (параметр зависит от работы потребителей доменного газа и работы газового цеха);
- температуры энергоносителя перед турбиной (параметр зависит от работы доменной печи, работы цеха водоснабжения и работы участка газовой очистки газового цеха);
- температуры энергоносителя за турбиной (параметр зависит от работы доменной печи, работы цеха водоснабжения и работы участка газовой очистки газового цеха);
- неплановых пусков и остановов турбоустановки (параметр зависит от работы газового цеха);
- расхода электроэнергии на собственные нужды (параметр зависит от работы газового цеха).

Для котельных установок основным показателем эффективности является КПД брутто. По аналогии в качестве показателя эффективности использования энергоносителя после доменной печи вводится коэффициент полезного действия брутто, когда необходимо оценить эффективность утилизации энергии доменного газа для производства электрической энергии в процессе доставки его от доменных печей до потребителя. Он равен отношению электрической энергии, полученной на клеммах генератора газовой утилизационной бескомпрессорной турбины, к сумме потерь энергий (потенциальной, внутренней и химической) при прохождении доменного газа от доменной печи через газоочистку и турбину к потребителю.

$$\eta^{бр} = \frac{N_{эл}}{Q_n + Q_{вн} + Q_x} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

где  $N_{эл}$  – мощность электрической энергии, полученная на клеммах генератора газовой утилизационной бескомпрессорной турбины ГУБТ-25, *МВт*;  $Q_n$  – потери потенциальной энергией давления доменного газа, *МВт*;

$$Q_n = 2,778 \cdot 10^{-7} \cdot \left[ G'_{\text{дог}} \cdot \frac{P'_{\text{дог}(ГО)} \cdot (273 + t'_{\text{дог}(ГО)})}{273} - G''_{\text{дог}} \cdot \frac{P''_{\text{дог}(Т)} \cdot (273 + t''_{\text{дог}(Т)})}{273} \right], \quad (4.2)$$

здесь  $G'_{\text{дог}}$  – расход доменного газа перед газоочисткой с учетом водяных паров,  $\text{м}^3(\text{н})/\text{ч}$ ;  $P'_{\text{дог}(ГО)}$  – давление доменного газа перед газоочисткой, *кПа*;  $t'_{\text{дог}(ГО)}$  – температура доменного газа перед газоочисткой,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $G''_{\text{дог}}$  – расход влажного доменного газа после турбины,  $\text{м}^3(\text{н})/\text{ч}$ ;  $P''_{\text{дог}(Т)}$  – давление доменного газа за турбиной, *кПа*;  $t''_{\text{дог}(Т)}$  – температура доменного газа на выходе из турбины,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $Q_{\text{вн}}$  – потери с внутренней энергией доменного газа, *МВт*.

$$Q_{\text{вн}} = 2,778 \cdot 10^{-7} \cdot [G'_{\text{дог}} \cdot c_{\text{дог}} \cdot t'_{\text{дог}(ГО)} \cdot \rho'_{\text{дог}(ГО)} - G''_{\text{дог}} \cdot c_{\text{дог}} \cdot t''_{\text{дог}(Т)} \cdot \rho''_{\text{дог}(Т)}], \quad (4.3)$$

где  $c_{\text{дог}}$  – удельная теплоёмкость доменного газа, *кДж/(кг· $^{\circ}\text{C}$ )*;  $\rho'_{\text{дог}(ГО)}$  – плотность доменного газа на входе в газоочистку с учетом водяных паров, *кг/м $^3$* ;  $\rho''_{\text{дог}(Т)}$  – плотность влажного доменного газа на выходе из турбины, *кг/м $^3$* ;  $Q_x$  – потери с химической энергией доменного газа, *МВт*;

$$Q_x = \frac{1}{3600} \cdot (Q_n^p' \cdot G'_{\text{ог}} - Q_n^p'' \cdot G''_{\text{ог}}), \quad (4.4)$$

здесь  $Q_n^p'$  и  $Q_n^p''$  – теплотворная способность доменного газа до газоочистки и после турбины соответственно,  $\text{МДж/м(н)}^3$ .

Для различных режимов работы турбины коэффициент полезного действия брутто равен от 1,2 до 1,6%. Существует возможность его повышения за счет оптимизации режимов работы ГУБТ-25. По этому показателю можно оценивать эффективность тепловых схем по утилизации доменного газа.

Для нормирования энергетических характеристик турбины (аналогия с гидравлическими турбинами [105]) необходимо контролировать количество доменного газа, которое затрачивается на выработку одного киловатт-часа электроэнергии.

Удельный расход энергоносителя на производство электрической энергии в математической модели определяется по следующей формуле:

$$q_{\text{уд}}^{\text{э}} = \frac{G_{\text{дг}} \cdot \rho_{\text{дг}}^{\text{нУ}}}{N_{\text{эл}}}, \quad (4.5)$$

где  $G_{\text{дг}}$  – расход сухого доменного газа перед турбиной  $\text{м}^3(\text{н})/\text{с}$ ;  $\rho_{\text{дг}}^{\text{нУ}}$  – плотность доменного газа без учета водяных паров при нормальных физических условиях,  $\text{кг/м}^3$ .

Таким образом, при тарифном прогнозировании макет работы турбины должен определять следующие показатели эффективности работы ГУБТ-25: мощность электрической энергии  $N_{\text{эл}}$ , полученной на клеммах генератора турбины для эффективности использования

энергоносителя после доменной печи КПД брутто  $\eta^{бр}$ , удельный расход энергоносителя на производство электрической энергии  $q_{уд}^э$ .

#### **4.1.5. Выбор математического метода по моделированию режимных параметров работы турбины и составление алгоритма и программы моделирования режимов её работы**

##### *Выбор математического метода моделирования*

По моделированию режимов работы турбины существуют два подхода: теоретический и эмпирический (на основе статистических данных по работе турбины). Одной из целей составления алгоритма и программы по моделированию режимов работы ГУБТ-25 являлось нормирование технически обоснованных нормативных значений расходов энергоносителей на выработку электрической энергии.

Необходимость создания программы по моделированию режимов работы ГУБТ-25 заключалась не только в нормировании расхода энергии доменного газа на выработку электрической, но и в прогнозировании работы турбины в реальных условиях для определения значимости параметров доменного газа на выработку электрической энергии.

Для выбора математического метода по моделированию режимных параметров была исследована информация (табл. 4.2) большого количества данных в целях выявления определенных закономерностей и взаимосвязей между переменными, которые затем можно применить к новым совокупностям данных. Этот процесс включал три основных этапа: исследование, построение модели и ее проверку.

В итоге решалась задача получения конкретного вида зависимостей между переменными. Выяснение

природы участвующих здесь функций или конкретной формы интерактивных многомерных зависимостей между переменными не являлось главной целью этой процедуры. Основное внимание уделялось поиску решений, на основе которых можно было бы строить достоверные прогнозы. Таким образом, в области обработки данных принят такой подход к анализу данных и извлечению знаний, который иногда характеризуют словами "черный ящик". При этом используются не только классические приемы разведочного анализа данных, но и такие методы, как нейронные сети, которые позволяют в данном исследовании строить достоверные прогнозы, не уточняя конкретный вид тех зависимостей, на которых такой прогноз основан.

Вычислительные методы разведочного анализа данных включают основные статистические методы, а также более сложные, специально разработанные методы многомерного анализа, предназначенные для отыскания закономерностей в многомерных данных.

Методы многомерного разведочного анализа специально разработаны для поиска закономерностей в многомерных данных. К этим методам относится кластерный анализ.

#### *Кластерный анализ полученных экспериментальных данных*

Термин *кластерный анализ* в действительности включает в себя набор различных алгоритмов классификации. Общий вопрос, который позволяет решить этот анализ, связан с тем, как *организовать* наблюдаемые данные в наглядные структуры.

Проверка статистической значимости при кластерном анализе не осуществляется, так как этот анализ определяет "наиболее возможно значимое решение".

Для полученных данных используется древовидная классификация. Назначение этого алгоритма состоит в объединении параметров в достаточно большие кластеры с использованием некоторой меры сходства или расстояния между параметрами. Типичным результатом такой кластеризации является иерархическое дерево.

Рассмотрим *горизонтальную древовидную диаграмму*, полученную при обработке экспериментальных данных (рис. 4.1). Диаграмма начинается с каждого параметра в классе (в левой части диаграммы). Теперь представим себе, что постепенно (очень малыми шагами) мы "ослабляем" критерий о том, какие параметры являются уникальными, а какие нет. Другими словами, мы понижаем порог, относящийся к решению об объединении двух или более параметров в один кластер.

В результате *связываем* вместе всё большее и большее число параметров и *объединяем* все больше и больше кластеров, состоящих из все сильнее различающихся элементов. Окончательно, на последнем шаге, все объекты объединяются вместе.

На этих диаграммах горизонтальные оси представляют расстояние объединения. Так, для каждого узла в графе (там, где формируется новый кластер) мы можем видеть величину расстояния, для которого соответствующие элементы связываются в новый единственный кластер. Когда данные имеют ясную "структуру" в терминах кластеров параметров, сходных между собой, тогда эта структура, скорее всего, должна быть отражена в иерархическом дереве различными ветвями. В результате успешного анализа методом объединения появляется возможность обнаружить кластеры (ветви) и интерпретировать их.

Объединение или метод древовидной кластеризации используется при формировании кластеров несходства или расстояния между параметрами. Эти расстояния могут определяться в одномерном или многомерном пространстве. Наиболее прямой путь вычисления расстояний между параметрами в многомерном пространстве состоит в вычислении евклидовых расстояний. Если имеется двух- или трёхмерное пространство, то эта мера является реальным геометрическим расстоянием между параметрами в пространстве (как будто расстояния между параметрами измерены рулеткой). Однако алгоритм объединения не "заботится" о том, являются ли "предоставленные" для этого расстояния настоящими или некоторыми другими производными мерами расстояния, что более значимо для исследователя. Задачей исследователей является подбор правильного метода для специфических применений.

Евклидово расстояние – наиболее общий тип расстояния. Оно попросту является геометрическим расстоянием  $A(x,y)$  в многомерном пространстве и вычисляется следующим образом:

$$A(x, y) = \left[ \sum_i (x_i - y_i)^2 \right]^{1/2}. \quad (4.6)$$

Кластерный анализ статистических данных, влияющих на мощность турбины, позволил получить следующую древовидную диаграмму (рис. 4.1).

По оси ординат расположены параметры, влияющие на мощность турбины. Ось абсцисс обозначает расстояние соединения переменных в единый объект. Таким образом, для каждого узла в графе (где сформирована новая группа) можно определить расстояние критерия, в котором

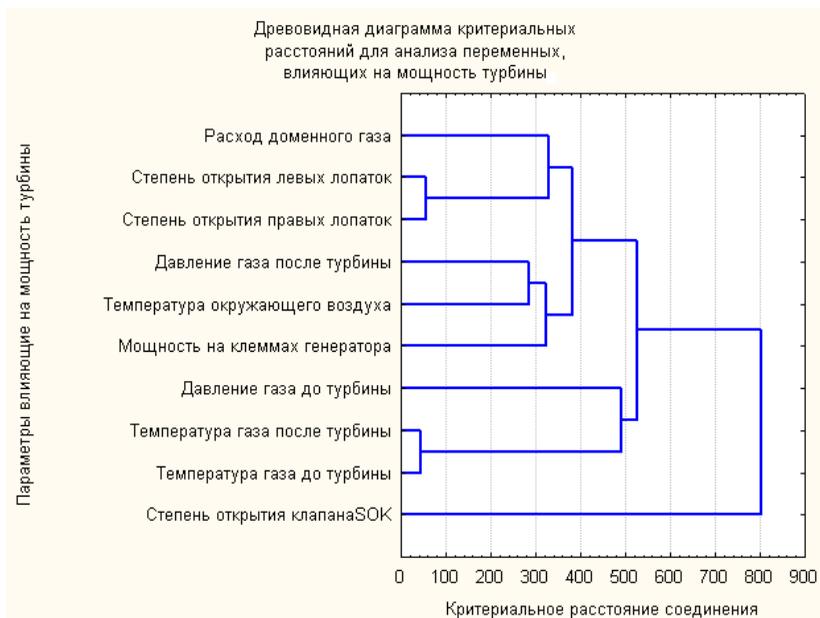


Рис.4.1. Диаграмма для анализа переменных, влияющих на мощность турбины

соответствующие переменные связываются вместе в новую единственную группу.

Кластерный анализ показывает, что наиболее связаны между собой параметры: степени открытия левых и правых направляющих лопаток и температуры доменного газа до и после турбины. Это говорит о том, что при сокращении в модели входных параметров их в первую очередь можно объединить. Затем в единый кластер можно объединить давление доменного газа за турбиной и температуру окружающей среды, которые действуют на мощность турбины непосредственно, не задействуя другие параметры. В единый кластер можно связать расход доменного газа, проходящий через турбину, и степени открытия левых и правых направляющих лопаток, что говорит о взаимосвязи этих параметров. Всех дальше по расстоянию, по влиянию на мощность турбины

стоит параметр степени открытия перепускного клапана. В действительности на мощность турбины он оказывает косвенное влияние, только при нарушении расчетных значений пропускной способности турбины.

*Использование нейронных сетей для моделирования режимных параметров работы ГУБТ-25*

При применении нейронных сетей прежде необходимо решить вопрос выбора конкретной архитектуры сети (числа "слоев" и количества "нейронов" в каждом из них). Размер и структура сети должны соответствовать (например, в смысле формальной вычислительной сложности) существу исследуемого явления. Поскольку на начальном этапе анализа природа явления обычно не бывает хорошо известна, выбор архитектуры является непростой задачей и часто связан с длительным процессом "проб и ошибок".

Затем построенная сеть подвергается процессу так называемого "обучения". На этом этапе нейроны сети итеративно обрабатываются входными данными и корректируют свои веса таким образом, чтобы сеть наилучшим образом прогнозировала (в традиционных терминах следовало бы сказать "осуществляла подгонку") данных, на которых выполняется "обучение". После "обучения" на имеющихся данных сеть готова к работе и может использоваться для построения прогнозов.

Целью создания математической программы по моделированию режимов работы ГУБТ-25 является выявление резервов экономии энергоресурсов на основе их нормирования для выработки электроэнергии на ГУБТ-25, а также прогнозирования выработки электроэнергии при изменении различных параметров, влияющих на мощность турбины, в данных условиях её работы применительно к условиям газового цеха ОАО «Северсталь».

В качестве метода моделирования работы турбины был выбран метод моделирования с помощью нейронных сетей.

### *Описание программы моделирования режимов работы ГУБТ-25*

Программа моделирования режимов работы ГУБТ-25 состоит из нескольких частей: «Расчет основных показателей работы ГУБТ-25», «Моделирование режимов работы ГУБТ-25».

Программа «Расчет основных показателей работы ГУБТ-25» позволяет определить мощность турбины, удельный расход сухого энергоносителя на выработку 1 кВт·ч, а также КПД брутто эффективности использования энергоносителя после доменной печи по входным параметрам:

- ✓ расходу доменного газа на стандартные условия,  $m^3(n)/ч$ ;
- ✓ избыточному давлению доменного газа до турбины,  $бар (кгс/см^2)$ ;
- ✓ избыточному давлению доменного газа после турбины  $бар (кгс/см^2)$ ;
- ✓ температуре доменного газа до турбины, °C;
- ✓ температуре доменного газа после турбины, °C;
- ✓ степени открытия левых лопаток по ходу доменного газа к турбине, %;
- ✓ степени открытия правых лопаток по ходу доменного газа к турбине, %;
- ✓ температура окружающего воздуха, °C;
- ✓ составу доменного газа перед газоочисткой;
- ✓ избыточному давлению доменного газа перед газоочисткой,  $бар (кгс/см^2)$ ;
- ✓ температуре доменного газа перед газоочисткой, °C.

Общий вид программы моделирования представлен на рис. 4.2.

Файлы, необходимые для работы программы:  
GUBT-25.exe – основной исполняющий файл программы;  
GUBT-25.dll – динамически подключаемая библиотека, описывающая режимы работы ГУБТ-25.

Для корректной работы программы файлы располагаются в одной директории.

Программа моделирования режимов работы ГУБТ-25

Файл Работа ГУБТ-25 Справка

| Газоочистка  |     |
|--|-----|
| Температура доменного газа перед газоочисткой, гр.С                  | 200 |
| Избыточное давление доменного газа перед газоочисткой, кгс/см2 (бар) | 2.3 |

| Турбина   |        |
|---|--------|
| Расход доменного газа на стандартные условия, м3(н)/ч           | 800000 |
| Избыточное давление доменного газа до турбины, кгс/см2 (бар)    | 1.96   |
| Избыточное давление доменного газа после турбины, кгс/см2 (бар) | 0.09   |
| Температура доменного газа до турбины, гр.С                     | 45     |
| Температура доменного газа после турбины, гр.С                  | 21     |
| Степень открытия левых лопаток по ходу турбины, %               | 40     |
| Степень открытия правых лопаток по ходу турбины, %              | 36     |
| Температура окружающего воздуха, гр.С                           | 19.2   |
| Затраты энергии на собственные нужды, МВт                       | 1      |

| Состав доменного газа |    |
|-----------------------|----|
| CO, %                 | 20 |
| CO2, %                | 19 |
| H2, %                 | 2  |
| N2, %                 | 56 |
| H2O, %                | 3  |

Расчет

Сохранить результаты

| Результаты расчета   |         |
|--|---------|
| Мощность турбины, МВт  | 12.9191 |
| Чудельный расход энергоносителя, рассчитанный на сухую массу, кг/кВт*ч | 82.0597 |
| Коэффициент полезного действия брутто использования энергоносителя, %  | 1.04099 |

Рис. 4.2. Интерфейс программы

### *Пример работы программы*

Пользователь запускает исполняемый файл GUBT-25.exe, на экране монитора появляется интерфейс программы (рис. 4.3) и заполняет поля «Данные для расчета».

После введения данных пользователь нажимает кнопку «Расчет». В полях «Результаты расчета» (рис.4.4) выводятся мощность турбины, удельный расход энергоносителя и КПД брутто эффективности использования энергоносителя после доменной печи.

| Газоочистка  |        |
|--|--------|
| Температура доменного газа перед газоочисткой, гр.С                  | 200    |
| Избыточное давление доменного газа перед газоочисткой, кгс/см2 (бар) | 2.3    |
| Турбина  |        |
| Расход доменного газа на стандартные условия, м3(н)/ч                | 800000 |
| Избыточное давление доменного газа до турбины, кгс/см2 (бар)         | 1.96   |
| Избыточное давление доменного газа после турбины, кгс/см2 (бар)      | 0.09   |
| Температура доменного газа до турбины, гр.С                          | 45     |
| Температура доменного газа после турбины, гр.С                       | 21     |
| Степень открытия левых лопаток по ходу турбины, %                    | 40     |
| Степень открытия правых лопаток по ходу турбины, %                   | 36     |
| Температура окружающего воздуха, гр.С                                | 19.2   |
| Затраты энергии на собственные нужды, МВт                            | 1      |
| Состав доменного газа  |        |
| CO, %  | 20     |
| CO2, %   | 19     |
| H2, %  | 2      |
| N2, %  | 56     |
| H2O, %   | 3      |

Рис. 4.3. Часть интерфейса программы для ввода исходных данных

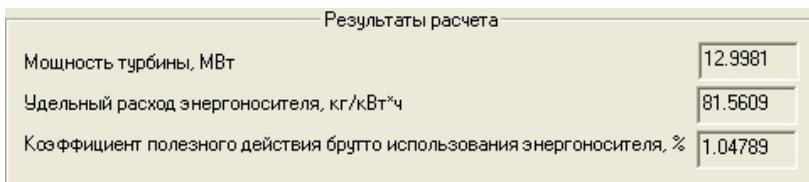


Рис. 4.4. Часть интерфейса программы для вывода результатов расчёта

По желанию пользователя можно сохранить результаты расчета в текстовый файл с расширением «.txt», который в дальнейшем можно просмотреть любым текстовым редактором («Блокнот», «Microsoft Word»). Сохранение результатов произойдет после нажатия на кнопку «Сохранить результаты».

В программе предусмотрено меню (рис. 4.5), которое включает в себя следующие пункты: «Файл», «Работа ГУБТ-25», «Справка».

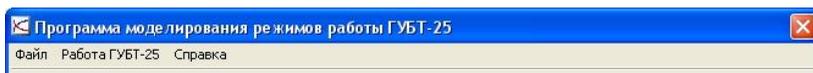


Рис. 4.5 Меню программы для удобства просмотра результатов расчёта

Меню «Файл» содержит следующие компоненты (рис. 4.6):

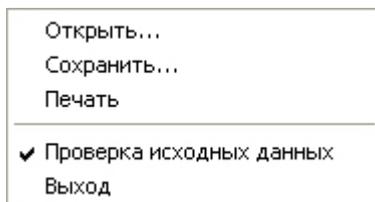


Рис. 4.6. Часть меню программы «Файл»

«Открыть...» – загрузка данных для расчета из файла; «Сохранить...» – сохранение входных данных для расчета в файл; «Печать» – распечатка результатов расчета в виде

сводной таблицы; «Проверка исходных данных» – в активном состоянии проверяет правильность ввода данных для адекватной работы модели; «Выход» – выход из программы.

Примерный вид распечатки результатов представлен на рис. 4.7. Пример вывода графиков представлен на рис. 4.8. Пользователю предоставлена возможность перемещать бегунок в области графиков. Это осуществляется перемещением положения мыши в зафиксированном состоянии в области построения кривых. При перемещении бегунка автоматически изменяются текущие значения показателей работы ГУБТ-25.

В программе имеется возможность масштабирования зависимостей при помощи изменения минимальных и максимальных значений показателей.

Также пользователь может детально изучить поведение того или иного показателя при постоянных значениях одного или нескольких параметров. Для этого необходимо в поля минимального и максимального значений ввести одинаковые значения.

Меню «Дополнительные параметры» (рис. 4.9) – предоставляет пользователю изменить состав доменного газа перед газоочисткой, а также затраты энергии на собственные нужды. По умолчанию состав равен:  $\text{CO} = 20\%$ ,  $\text{CO}_2 = 19\%$ ,  $\text{H}_2 = 2\%$ ,  $\text{N}_2 = 56\%$ ,  $\text{H}_2\text{O} = 3\%$ , затраты энергии на собственные нужды приняты равными 0 МВт. Кнопка «Выход» означает выход из программы построения графиков. Меню "Справка" содержит: "Помощь" – переход в справочную систему и "О программе" – реквизиты разработчиков.

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГУБТ-25

ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА:

Газоочистка:

|  |      |      |
|--|------|------|
| Температура доменного газа перед газоочисткой:   | 200. | гр.С |
| Избыточное давление доменного газа перед газоочисткой:   | 2.3  | бар  |
| Состав доменного газа перед газоочисткой:  |      |      |
| CO = 20. %, CO <sub>2</sub> = 19. %, H <sub>2</sub> = 2. %, N <sub>2</sub> = 56.%, H <sub>2</sub> O = 3. % |      |      |

Турбина:

|   |         |                      |
|---|---------|----------------------|
| Расход доменного газа на стандартные условия:     | 800000. | м <sup>3</sup> (н)/ч |
| Избыточное давление доменного газа до турбины:    | 1.96    | бар                  |
| Избыточное давление доменного газа после турбины: | 9.e-002 | бар                  |
| Температура доменного газа до турбины:            | 45.     | гр.С                 |
| Температура доменного газа после турбины:         | 21.     | гр.С                 |
| Степень открытия левых лопаток по ходу турбины:   | 40.     | %                    |
| Степень открытия правых лопаток по ходу турбины:  | 36.     | %                    |
| Температура окружающего воздуха:                  | 19.2    | гр.С                 |
| Затраты энергии на собственные нужды:             | 1.      | МВт                  |

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА:

|                                       |         |          |
|---------------------------------------|---------|----------|
| Мощность турбины:                     | 12.92   | МВт      |
| Удельный расход энергоносителя:       | 82.0597 | кг/кВт*ч |
| Кoeffициент полезного действия брутто |         |          |
| использования энергоносителя:         | 1.041   | %        |

Рис. 4.7. Результаты распечатки результатов расчета программы

Предложенная программа, составленная на основе работы нейронных сетей и обученная на статистических экспериментальных данных, полученных во время испытаний турбины ГУБТ-25 в 2003 и 2004 гг., позволяет производить нормирование энергии энергоносителя на выработку электрической энергии и прогнозировать

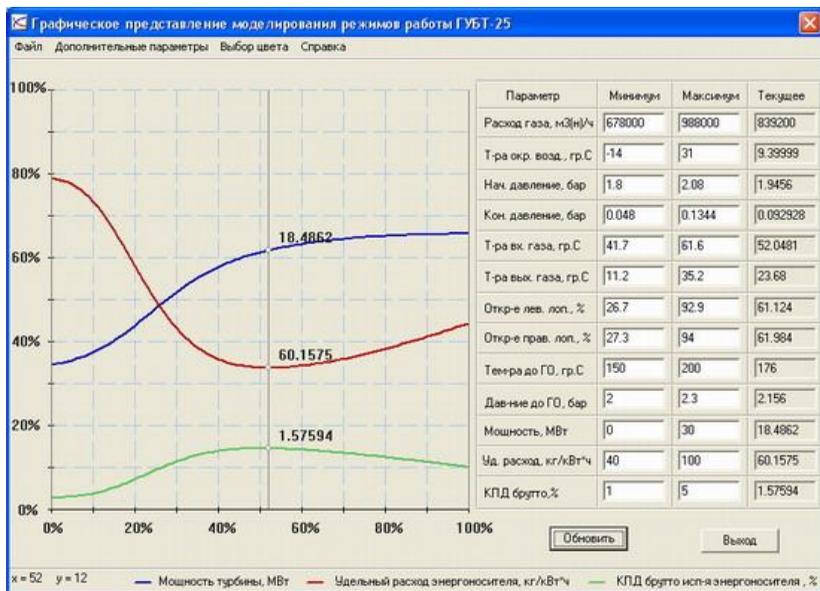


Рис. 4.8. Пример создания графиков

Состав доменного газа перед газоочисткой

Содержание CO, %

Содержание CO<sub>2</sub>, %

Содержание H<sub>2</sub>, %

Содержание N<sub>2</sub>, %

Содержание H<sub>2</sub>O, %

Затраты энергии на собственные нужды, МВт

OK

Рис. 4.9. Часть меню программы «Дополнительные параметры»

работу по выработке электрической энергии в зависимости от изменения входных параметров энергоносителя.

#### **4.1.6. Разработка режимных карт работы ГУБТ-25**

Выбор оптимальной тепловой работы ГУБТ-25 основывается на основе диаграммы режимов, приведённой в документации на турбинную установку [103, 104], которая была просчитана на основании технического задания, выданного Невскому заводу на проектирование ГУБТ-25, на основе теоретического расчета определения основных показателей работы турбины, её мощности и к.п.д. Наряду с другими показателями эффективности эксплуатации газотурбинной расширительной станции они являются основными, которые должны контролироваться и по возможности улучшаться обслуживающим персоналом. Реальное состояние и работа турбины несколько отличаются от теоретически расчётных режимов работы ГУБТ-25. На основе статистических экспериментальных данных, полученных во время выполнения работы, была получена эмпирическая математическая модель. Эта модель эмитирует работу ГУБТ-25 в существующем во время замеров диапазоне варьирования параметров, влияющих на мощность и к.п.д. турбины. Её использование позволило получить режимные карты работы на существующие условия эксплуатации ГУБТ-25.

Работа газовой утилизационной турбины во многом зависит от работы доменной печи в блоке, с которой она работает. Основные параметры: расход доменного газа, давление доменного газа перед турбиной, которые в основном влияют на увеличение выработки электрической энергии, зависят от работы доменной печи. Но часть параметров, которая влияет на эффективность работы ГУБТ-25, зависит от работы других участков газового цеха, у которых несколько другие задачи. Задачей участка очистки является эффективная очистка доменного газа от

пыли и доведения её до нормативного показателя. Задачей участка газовых сетей является доставка газа к потребителю с заданными параметрами: количеством и давлением. Назначение участка ГТРС состоит в выработке большего количества энергии при эффективной эксплуатации оборудования.

Режимная карта работы турбины позволит определить эффективность работы ГУБТ-25 при изменении режимов работы доменной печи, оборудования газовой очистки, газовых сетей доменного газа и выбрать оптимальные параметры, влияющие на эффективность работы ГУБТ-25 с учётом режимов работы газовой очистки и газовых сетей доменного газа. Режимная карта была получена в диапазоне следующих варьируемых параметров (табл. 4.3).

**Таблица 4.3.** Диапазон варьируемых параметров, влияющих на эффективность работы турбины

| Параметры   | Единицы измерения            | Диапазон варьирования |
|---|------------------------------|-----------------------|
| Мощность турбины                                  | <i>МВт</i>                   | 10,178 – 19,425       |
| Расход доменного газа через турбину               | <i>м<sup>3</sup> (н)/час</i> | 678000 – 988000       |
| Избыточное давление доменного газа перед турбиной | <i>бар</i>                   | 1,8 – 2,08            |
| Избыточное давление доменного газа за турбиной    | <i>мбар</i>                  | 48 – 134,4            |
| Температура доменного газа перед турбиной         | <i>°С</i>                    | 41,7 – 61,6           |
| Температура доменного газа после турбины          | <i>°С</i>                    | 11,2 – 35,2           |

Окончание табл. 4.3

| Параметры   | Единицы измерения | Диапазон варьирования |
|---|-------------------|-----------------------|
| Степень открытия направляющих лопаток в левой части турбины по ходу доменного газа  | %                 | 26,7 – 92,9           |
| Степень открытия направляющих лопаток в правой части турбины по ходу доменного газа | %                 | 27,3 – 94             |
| Температура окружающего воздуха   | °C                | -14 – 31              |

Единицы измерения в табл. 4.3 представлены в соответствии с единицами измерения, которые выводятся на монитор машиниста турбины.

В настоящее время для оценки эффективности работы ГУБТ-25 в газовом цехе имеется график зависимости мощности и к.п.д. турбины от давления газа перед турбиной от расхода доменного газа через турбину [106]. Этот график (рис. 4.11) был построен на основании теоретических расчётов работы турбины и не учитывает особенностей косвенных факторов, влияющих на работу турбины.

Эту теоретическую зависимость, составленную для нормальных физических условий (для температуры 0 °C и давления 101,325 кПа), для определения режима работы турбины ГУБТ-25 в качестве режимной карты работы турбины можно использовать, как показано на рис. 4.10. Расход доменного газа, проходящего через турбину, зависит от работы доменной печи и выводится на монитор

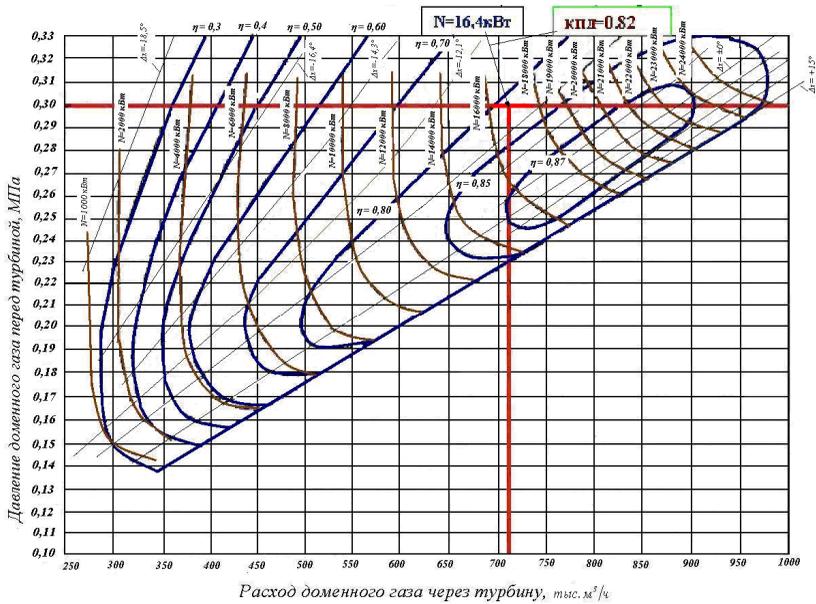


Рис. 4.10. Теоретическая зависимость мощности турбины от расхода и давления газа перед турбиной

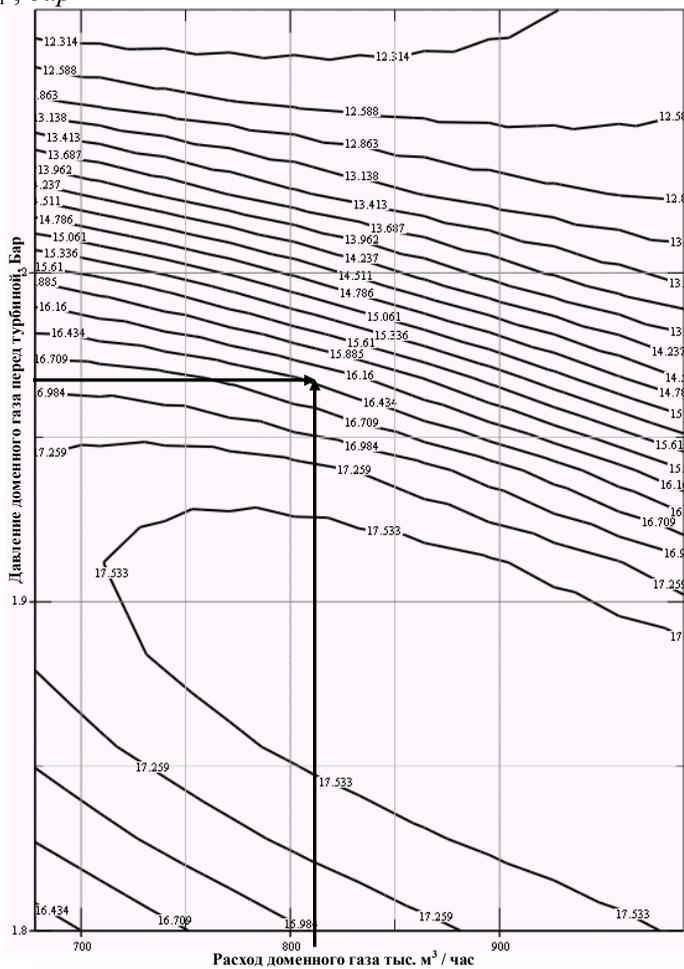
у машиниста турбины ( $тыс. м^3(н)/час$ ). В качестве примера можно привести использование этой карты для определения мощности турбины от расхода и давления газа перед турбиной. Поэтому для существующего расхода  $G_{н.ф.у} = 810 тыс. м^3(н)$  газа необходимо провести вертикальную линию. А избыточное давление доменного газа перед турбиной  $P_1=1,97 бар$  перевести в абсолютное давление в  $МПа$   $P_1=0,1 \times (1,97+1)=0,297 МПа$  и провести горизонтальную линию. Тогда из графика мощность турбины  $\Rightarrow N=16,4 МВт$  и  $к.п.д.=0,82$ . По результатам замеров мощность на эти параметры была несколько больше  $16,6 МВт$ . Это объясняется более высокой температурой доменного газа по сравнению с расчётной температурой (расчётная температура  $40\text{ }^\circ C$ , а реальная  $51,6\text{ }^\circ C$ ).

Использовать этот график в качестве режимной карты работы для эффективной эксплуатации турбины нельзя, так он не учитывает два параметра, которые влияют на эффективность работы турбины, температуру доменного газа перед турбиной и давление доменного газа за турбиной. На основании статистических замеров в ГТРС №2 с использованием нейросети была построена модель имитации работы ГУБТ-25, на основании которой построена зависимость мощности ГУБТ-25 от давления доменного газа перед турбиной и расхода доменного газа через турбину, а также при учёте температуры доменного газа перед турбиной и давления доменного газа за турбиной. Диапазон изменения входных параметров приведён в табл. 4.4, а режимные карты на рис. (4.11 – 4.14).

**Таблица 4.4.** Диапазон изменения входных параметров для построения режимных карт работы ГУБТ-25

| Диапазон изменения расхода доменного газа через турбину | Диапазон изменения избыточного давления доменного газа перед турбиной | Значение избыточного давления доменного газа за турбиной | Значение температуры доменного газа перед турбиной | Определяемый параметр | Примечание       |
|---|---|--|--|-----------------------|------------------|
| <i>тыс. м<sup>3</sup></i>                               | <i>бар</i>  | <i>мбар</i>  | <i>°С</i>  | <i>МВт</i>            | <i>№ рисунка</i> |
| 678 – 988   | 1,8 – 2,08  | 48   | 41,7   | мощность              | 4.12             |
| 678 – 988   | 1,8 – 2,08  | 134,4  | 41,7   | мощность              | 4.13             |
| 678 – 988   | 1,8 – 2,08  | 48   | 61,6   | мощность              | 4.14             |
| 678 – 988   | 1,8 – 2,08  | 134,4  | 61,6   | мощность              | 4.15             |

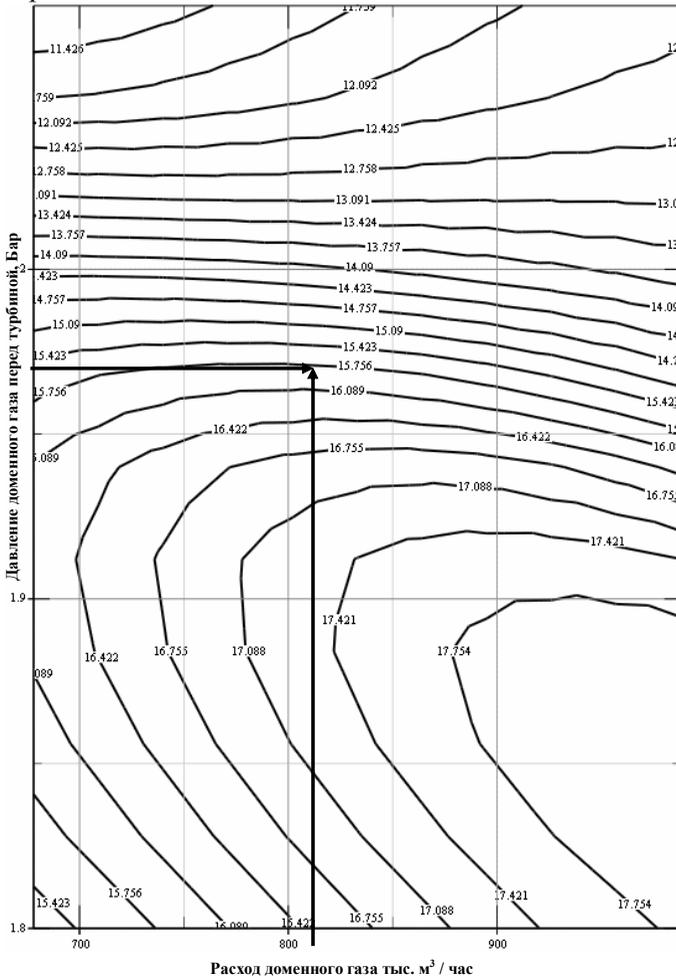
$P_1$ , бар



$G$ , тыс. м<sup>3</sup>

Рис. 4.11. Зависимость мощности на клеммах генератора турбины от расхода  $G$  и давления доменного газа перед турбиной  $P_1$  (при температуре доменного газа  $t_1=41,7^\circ\text{C}$  и избыточном давлении за турбиной  $P_2=48$  мбар)

$P_1$ , бар



$G$ , тыс.  $m^3$

Рис. 4.12. Зависимость мощности на клеммах генератора турбины от расхода  $G$  и давления доменного газа перед турбиной  $P_1$  (при температуре доменного газа  $t_1=41,7^\circ C$  и избыточном давлении за турбиной  $P_2=134,4$  мбар)

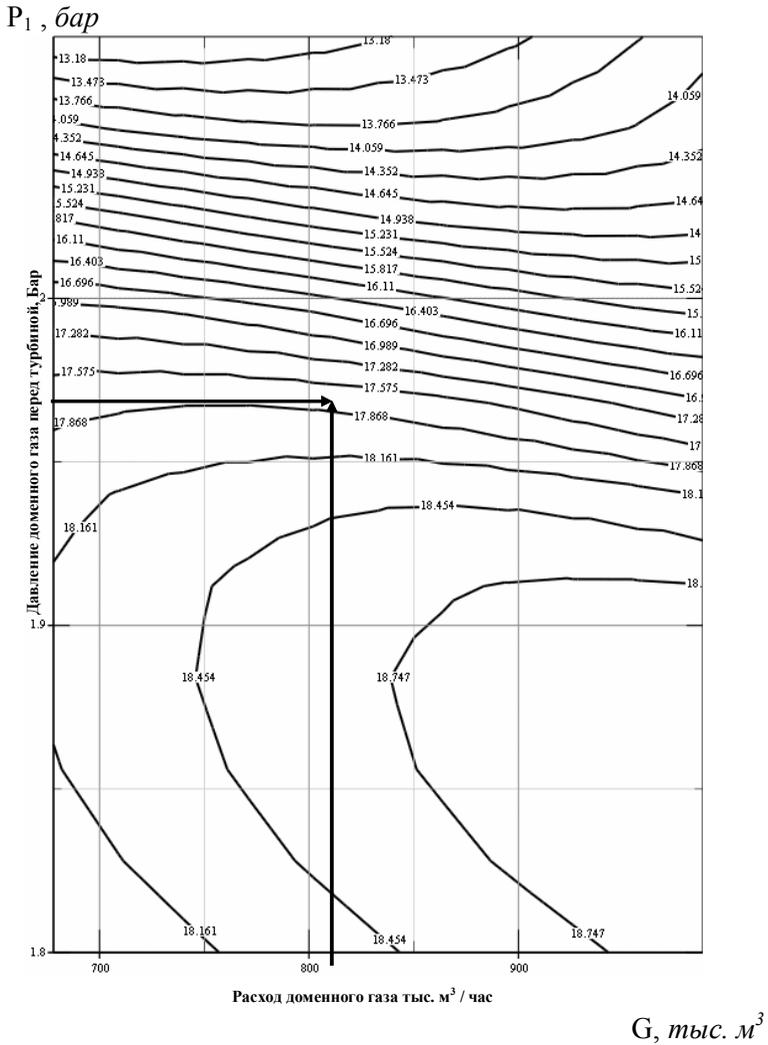


Рис. 4.13. Зависимость мощности на клеммах генератора турбины от расхода  $G$  и давления доменного газа перед турбиной  $P_1$  (при температуре доменного газа  $t_1=61,6^\circ\text{C}$  и избыточном давлении за турбиной  $P_2=48$  мбар)

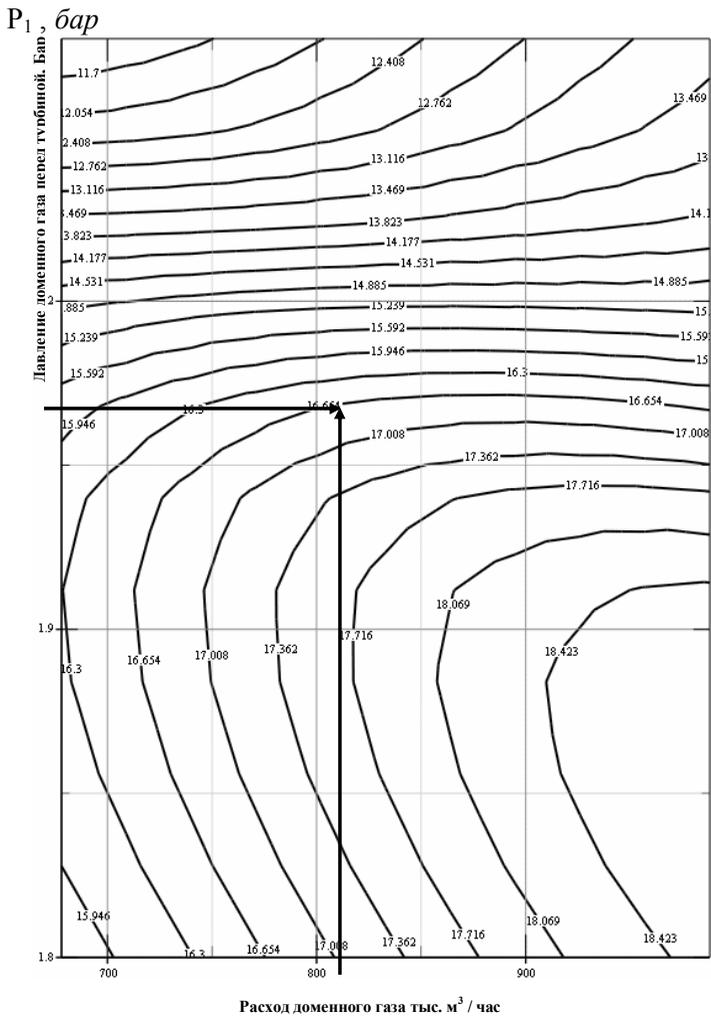


Рис 4.14. Зависимость мощности на клеммах генератора турбины от расхода  $G$  и давления доменного газа перед турбиной  $P_1$  (при температуре доменного газа  $t_1=61,1^\circ\text{C}$  и избыточном давлении за турбиной  $P_2=134,4$  мбар)

Режимные карты, приведённые на рис. (4.11 – 4.14), позволяют машинисту турбины оценить эффективность эксплуатации турбины. В качестве примера использования режимной карты можно использовать предыдущий пример с расходом доменного газа на турбину  $G = 810 \text{ тыс. м}^3(\text{ч})/\text{час}$  и избыточным давлением доменного газа перед турбиной  $P_1=1,97 \text{ бар}$ . По режимной карте машинист турбины может определить мощность на клеммах турбины при различных давлениях доменного газа за турбиной  $P_2=48 - 134,4 \text{ мбар}$  и температурах доменного газа до турбины  $t_1=41,7 - 61,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для существующего на данный период расхода и давления доменного газа перед турбиной находим из режимной карты значение мощности (табл. 4.5), как показано на рис. 4.11 – 4.14.

**Таблица 4.5.** Результаты определения мощности на клеммах генератора ГУБТ-25

| Расход доменного газа через турбину | Избыточное давление доменного газа перед турбиной | Значение избыточного давления доменного газа за турбиной | Значение температуры доменного газа перед турбиной | Определяемая мощность | Примечание       |
|-------------------------------------|---|--|--|-----------------------|------------------|
| <i>Тыс. м<sup>3</sup>(ч)</i>        | <i>бар</i>  | <i>мбар</i>  | <i>°C</i>  | <i>МВт</i>            | <i>№ рисунка</i> |
| 810                                 | 1,97  | 48   | 41,7   | <b>16,4</b>           | 4.12             |
| 810                                 | 1,97  | 134,4  | 41,7   | <b>15,8</b>           | 4.13             |
| 810                                 | 1,97  | 48   | 61,6   | <b>17,7</b>           | 4.14             |
| 810                                 | 1,97  | 134,4  | 61,6   | <b>16,6</b>           | 4.15             |

В результате можно сделать вывод: снижение давления доменного газа после турбины за счёт оптимальной эксплуатации газовой сети с 134,4 до 48 *мбар* позволит дополнительно получить при температуре доменного газа перед турбиной 41,7 °С около 0,6 *МВт*, а при температуре 61,6 °С 1,1 *МВт* дополнительной мощности.

Повышение температуры доменного газа за счёт оптимальной эксплуатации участка газовой очистки при повышении температуры с 41,7 °С до 61,6 °С при давлении доменного газа после турбины 48 *мбар* позволит получить 1,3 *МВт*, а при давлении 134,4 *мбар* 0,8 *МВт* дополнительной мощности.

Суммарный эффект от снижения давления доменного газа за турбиной с 134,4 до 48 *мбар* и повышения температуры доменного газа перед турбиной с 41,7 °С до 61,6 °С при расходе доменного газа через турбину 810 *тыс. м<sup>3</sup>(н)/час* могут привести к получению дополнительной мощности на клеммах турбины до 1,9 *МВт*.

#### **4.2. Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности камерных кузнечных печей**

Энергетическая эффективность при эксплуатации камерных кузнечных печей во многом зависит от контроля параметров, от которых зависит экономическая эффективность во время эксплуатации установок. Промышленные испытания – дорогостоящий процесс, и трудный с точки зрения проведения, требующий остановки производства. Часто бывает так, что для некоторых установок не хватает измеренных параметров, которые необходимы для эффективной эксплуатации установок. При определении необходимых знаний о работе установки,

для которой нет информации о её эксплуатационных параметрах, можно использовать нейросетевую технологию. Для кузнечного цеха, в котором установлены три установки *печь–молот*, имея данные экспериментов для самой маленькой и большой по производительностям установкам, получим обученную нейросеть. Эту нейросеть используем для прогнозирования параметров качества нагрева необходимой информации о третьей средней по производительности установке. Далее приводятся результаты промышленных испытаний, которые используются для обучения и тестирования нейросети.

#### 4.2.1. Экспериментальные данные по нагреву металла в камерных нагревательных печах

##### *Экспериментальное исследование работы печи № 2*

Испытание проводилось при нагреве в течение одной смены четырех садок металла [107]. Размеры садок и режим работы печи в день испытания приведены в табл. 4.6. Испытание было начато за два часа до розжига печи и длилось в течение цикла работы печи (в течение суток).

**Таблица 4.6.** Размеры садок и режим работы печи № 2

| № садки | Число заготовок в садке | Размеры заготовок |        | Марка стали | Режим работы, час |          |          |             |          |
|---------|-------------------------|-------------------|--------|-------------|-------------------|----------|----------|-------------|----------|
|         |                         | $d, м$            | $l, м$ |             | $\tau_x$          | $\tau_n$ | $\tau_k$ | $\tau_{np}$ | $\tau_o$ |
| 1       | 40                      | 0,05              | 0,095  | 40х         | 0,58              | 0,8      | 0,75     |             |          |
| 2       | 41                      | 0,05              | 0,095  | 40х         |                   | 0,633    | 0,668    | 0,867       |          |
| 3       | 40                      | 0,05              | 0,095  | 40х         |                   | 1,017    | 0,584    |             |          |
| 4       | 40                      | 0,05              | 0,095  | 40х         |                   | 0,8      | 0,618    |             | 16,683   |

Здесь  $\tau_x$  – время разогрева печи перед рабочей сменой;  $\tau_n$  – время нагрева садки до момента выдачи первой заготовки;

$\tau_k$  – времяковки от началаковки до момента выдачи последней заготовки;  $\tau_{np}$  – время простоя (перерыв на обед);  $\tau_o$  – время охлаждения печи в нерабочие смены.

Результаты испытания приведены в табл. 4.7. Для замера температурного поля металла в одной из заготовок было установлено три термопары. Одна из них находилась на поверхности, обращенной к подине печи (температура центра металла). Для установки второй термопары было просверлено отверстие до середины цилиндра. Третья термопара размещалась на поверхности, обращенной к рабочему пространству печи (температура поверхности металла) (табл. 4.7, колонки 3 – 5).

Температурное поле кладки замерялось в стенке печи толщиной 0,348 м, выполненной из шамота класса А. С этой целью было просверлено несквозное отверстие с наружной стороны стенки на глубину 0,34 м и установлено 4 термопары: первая отстояла от внутренней поверхности кладки на 0,008 м; вторая – на 0,073 м; третья – на 0,178 м; четвертая – на 0,34 м (табл. 4.7, колонки 6 – 9). Просасывающей термопарой измерялась температура газа в печи (табл. 4.7, колонка 2). Температура уходящих газов замерялась внутри дымоотводящих каналов на входе в боров печи (табл. 4.7, колонки 10 – 11). Также термопарами определялись температуры на наружной поверхности кладки свода и стен (табл. 4.7, колонки 12 – 13). Все замеры выполнялись термопарами ТХА с учетом компенсации холодного спая. Температура окружающего воздуха замерялась стеклянным термометром (табл. 4.7, колонка 14).

**Таблица 4.7.** Результаты испытаний печи № 2

| Время              | Температура |           |       |     |        |       |       |        |  |     |                   |                    |                     | Разрежение за печью | Давление          |                     |                        | Расход газа на печь  | Содержание в уходящих газах |                |    | Примечания |
|--------------------|-------------|-----------|-------|-----|--------|-------|-------|--------|--|-----|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------|----|------------|
|                    | печи        | заготовки |       |     | стенки |       |       |        | уходящих газов в дымоотводящих каналах |     | поверхности свода | поверхности стенки | окружающего воздуха |                     | газа в магистрали | газа перед горелкой | воздуха перед горелкой |                      | CO <sub>2</sub>             | O <sub>2</sub> | CO |            |
|                    |             | x=0       | x=0,5 | x=1 | x=1    | x=0,5 | x=0,2 | x=0,02 | °C                                     | °C  |                   |                    |                     |                     |                   |                     |                        |                      |                             |                |    |            |
| часы, мин          | °C          | °C        | °C    | °C  | °C     | °C    | °C    | °C     | °C                                     | °C  | °C                | °C                 | °C                  | мм. в. ст.          | бар               | бар                 | бар                    | м <sup>3</sup> (н)/ч | %                           | %              | %  |            |
| 11,00              | 230         | -         | -     | -   | 238    | 252   | 247   | 61     | 92                                     | 95  | 75                | 70                 | 15                  | -                   | -                 | -                   | -                      | -                    | -                           | -              | -  | -          |
| 11,30              | 225         | -         | -     | -   | 231    | 247   | 245   | 62     | 89                                     | 95  | 73                | 68                 | 15                  | -                   | -                 | -                   | -                      | -                    | -                           | -              | -  | -          |
| 12,00              | 220         | -         | -     | -   | 226    | 243   | 244   | 63     | 86                                     | 95  | 71                | 70                 | 15                  | -                   | -                 | -                   | -                      | -                    | -                           | -              | -  | -          |
| 12,30              | 210         | -         | -     | -   | 217    | 233   | 237   | 59     | 83                                     | 95  | 72                | 68                 | 17                  | -                   | -                 | -                   | -                      | -                    | -                           | -              | -  | -          |
| 13,00              | 210         | -         | -     | -   | 216    | 233   | 238   | 59     | 81                                     | 95  | 71                | 66                 | 17                  | -                   | -                 | -                   | -                      | -                    | -                           | -              | -  | -          |
| 13,30              | 200         | -         | -     | -   | 207    | 223   | 229   | 56     | 79                                     | 92  | 67                | 53                 | 17                  | -                   | -                 | -                   | -                      | -                    | -                           | -              | -  | -          |
| 14,00              | 205         | -         | -     | -   | 203    | 220   | 223   | 54     | 81                                     | 92  | 68                | 57                 | 18                  | -                   | -                 | -                   | -                      | -                    | -                           | -              | -  | -          |
| 14,15              | 790         | 20        | 19    | 18  | 212    | 224   | 228   | 62     | 424                                    | 180 | 68                | 69                 | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                 | -                           | -              | -  | -          |
| Начало работы печи |             |           |       |     |        |       |       |        |  |     |                   |                    |                     |                     |                   |                     |                        |                      |                             |                |    |            |
| 14,30              | 940         | 20        | 18    | 18  | 271    | 224   | 226   | 62     | 499                                    | 320 | 68                | 70                 | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,65                   | 18,4                 | -                           | -              | -  | -          |
| 14,45              | 1060        | 21        | 18    | 18  | 353    | 232   | 224   | 62     | 551                                    | 380 | 69                | 70                 | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,75                   | 18,4                 | -                           | -              | -  | -          |
| 14,58              | -           | 135       | 210   | 178 | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,75                   | 18,4                 | -                           | -              | -  | -          |

Продолжение табл.4.7

| Время     | Температура |           |       |      |        |       |       |        |  |     |                   |                    |                     | Разрежение за печью | Давление          |                     |                        | Расход газа на печь | Содержание в уходящих газах |                |    | Примечания |
|-----------|-------------|-----------|-------|------|--------|-------|-------|--------|--|-----|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------|----|------------|
|           | печи        | заготовки |       |      | стенки |       |       |        | уходящих газов в дымоотводящих каналах |     | поверхности свода | поверхности стенки | окружающего воздуха |                     | газа в магистрали | газа перед горелкой | воздуха перед горелкой |                     | CO <sub>2</sub>             | O <sub>2</sub> | CO |            |
|           |             | x=0       | x=0,5 | x=1  | x=1    | x=0,5 | x=0,2 | x=0,02 |  |     |                   |                    |                     |                     |                   |                     |                        |                     |                             |                |    |            |
| часы, мин | °C          | °C        | °C    | °C   | °C     | °C    | °C    | °C     | °C                                     | °C  | °C                | °C                 | мм. в. ст.          | бар                 | бар               | бар                 | м <sup>3</sup> (н)/ч   | %                   | %                           | %              |    |            |
| 15,00     | -           | 120       | 126   | 115  | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,75                   | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |
| 15,02     | 940         | 111       | 31    | 97   | 430    | 256   | 224   | 64     | 596                                    | 580 | 70                | 71                 | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |
| 15,10     | -           | 165       | 174   | 533  | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |
| 15,15     | -           | 512       | 533   | 725  | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |
| 15,20     | -           | 744       | 757   | 866  | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |
| 15,25     | -           | 854       | 874   | 959  | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |
| 15,31     | -           | 946       | 958   | 1011 | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |
| 15,37     | -           | 1008      | 1020  | 1082 | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |
| 15,40     | -           | 1021      | 1030  | 1091 | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |
| 15,45     | -           | 1036      | 1047  | 1105 | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |
| 15,51     | -           | 1052      | 1061  | 1113 | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |
| 15,57     | -           | 1069      | 1077  | 1136 | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 2                   | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |
| 16,00     | 1150        | 1076      | 1085  | 1142 | 557    | 333   | 230   | 62     | 710                                    | 620 | 70                | 70                 | 18                  | 1,7                 | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |

Продолжение табл.4.7

| Время     | Температура |           |       |      |        |       |       |        |  |     |                   |                    |                     | Разрежение за печью | Давление          |                     |                        | Расход газа на печь | Содержание в уходящих газах |                |    | Примечания |
|-----------|-------------|-----------|-------|------|--------|-------|-------|--------|--|-----|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------|----|------------|
|           | печи        | заготовки |       |      | стенки |       |       |        | уходящих газов в дымоотводящих каналах |     | поверхности свода | поверхности стенки | окружающего воздуха |                     | газа в магистрالي | газа перед горелкой | воздуха перед горелкой |                     | CO <sub>2</sub>             | O <sub>2</sub> | CO |            |
|           |             | x=0       | x=0,5 | x=1  | x=1    | x=0,5 | x=0,2 | x=0,02 |  |     |                   |                    |                     |                     |                   |                     |                        |                     |                             |                |    |            |
| часы, мин | °C          | °C        | °C    | °C   | °C     | °C    | °C    | °C     | °C                                     | °C  | °C                | °C                 | мм. в. ст.          | бар                 | бар               | бар                 | м <sup>3</sup> (н)/ч   | %                   | %                           | %              |    |            |
| 16,15     | 1180        | 1100      | 1111  | 1162 | 588    | 351   | 234   | 61     | 724                                    | 640 | 70                | 69                 | 18                  | 1,7                 | 0,38              | 0,38                | 0,7                    | 18,4                | -                           | -              | -  | -          |
| 16,30     | 1140        | -         | -     | -    | 622    | 372   | 240   | 61     | 739                                    | -   | 68                | 70                 | 18                  | 1,8                 | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  | -          |
| 16,35     | -           | 514       | 515   | 830  | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 1,8                 | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  | -          |
| 16,40     | -           | 789       | 781   | 969  | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 1,8                 | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  | -          |
| 16,45     | -           | 989       | 994   | 1055 | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 1,8                 | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  | -          |
| 16,52     | -           | 1055      | 1059  | 1096 | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 1,8                 | 0,38              | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  | -          |
| 17,00     | 1140        | 1092      | 1095  | 1125 | 651    | 430   | 269   | 63     | 758                                    | 740 | 67                | 73                 | 18                  | 1,8                 | 0,38              | 0,37                | 0,65                   | 18,2                | -                           | -              | -  | -          |
| 17,20     | -           | 1118      | 1121  | 1144 | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18                  | 1,8                 | 0,38              | 0,37                | 0,65                   | 18,2                | -                           | -              | -  | -          |
| 17,30     | 1180        | 1132      | 1135  | 1156 | 688    | 448   | 270   | 60     | 784                                    | 740 | 65                | 67                 | 18,5                | 1,7                 | 0,38              | 0,36                | 0,7                    | 18,0                | -                           | -              | -  | -          |
| 18,00     | 1020        | -         | -     | -    | 723    | 476   | 284   | 60     | 615                                    | 610 | 68                | 70                 | 18,5                | 1,75                | 0,38              | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  | -          |
| 18,07     | -           | 534       | 576   | 613  | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18,5                | 1,75                | 0,38              | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  | -          |
| 18,10     | -           | 644       | 667   | 691  | -      | -     | -     | -      | -                                      | -   | -                 | -                  | 18,5                | 1,75                | 0,38              | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  | -          |

Продолжение табл.4.7

| Время     |      | Температура |       |      |           |       |       |        |        |     |    |    |  | Разрежение за печью |      | Давление          |                    |                      | Расход газа на печь | Содержание в уходящих газах |                     |                        | Примечания |                 |                |    |
|-----------|------|-------------|-------|------|-----------|-------|-------|--------|--------|-----|----|----|--|---------------------|------|-------------------|--------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------|------------|-----------------|----------------|----|
|           |      | печи        |       |      | заготовки |       |       |        | стенки |     |    |    | уходящих газов в дымоотводящих каналах |                     |      | поверхности свода | поверхности стенки | охлаждающего воздуха |                     | газа в магистрالي           | газа перед горелкой | воздуха перед горелкой |            | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | CO |
|           |      | x=0         | x=0,5 | x=1  | x=1       | x=0,5 | x=0,2 | x=0,02 | °C     | °C  | °C | °C |  |                     |      |                   |                    |                      |                     |                             |                     |                        |            |                 |                |    |
| часы, мин | °C   | °C          | °C    | °C   | °C        | °C    | °C    | °C     | °C     | °C  | °C | °C | мм. в. ст.                             | мм. в. ст.          | бар  | бар               | бар                | м <sup>3</sup> (н)/ч | %                   | %                           | %                   |                        |            |                 |                |    |
| 18,15     | -    | 733         | 742   | 751  | -         | -     | -     | -      | -      | -   | -  | -  | 18,5                                   | 1,75                | 0,38 | -                 | -                  | -                    | -                   | -                           | -                   | -                      | -          | -               |                |    |
| 18,21     | -    | 753         | 756   | 759  | -         | -     | -     | -      | -      | -   | -  | -  | 18,5                                   | 1,75                | 0,38 | -                 | -                  | -                    | -                   | -                           | -                   | -                      | -          | -               |                |    |
| 18,30     | 840  | 760         | 760   | 759  | 675       | 401   | 300   | 60     | 504    | 440 | 68 | 70 | 18,5                                   | 1,8                 | 0,38 | -                 | -                  | -                    | -                   | -                           | -                   | -                      | -          | -               |                |    |
| 18,36     | -    | 832         | 904   | 960  | -         | -     | -     | -      | -      | -   | -  | -  | 18,5                                   | 1,8                 | 0,38 | -                 | -                  | -                    | -                   | -                           | -                   | -                      | -          | -               |                |    |
| 18,40     | -    | 936         | 981   | 1027 | -         | -     | -     | -      | -      | -   | -  | -  | 18,5                                   | 1,8                 | 0,38 | -                 | -                  | -                    | -                   | -                           | -                   | -                      | -          | -               |                |    |
| 18,46     | -    | 1009        | 1033  | 1074 | -         | -     | -     | -      | -      | -   | -  | -  | 18,5                                   | 1,8                 | 0,38 | -                 | -                  | -                    | -                   | 9,8                         | 1,41                | 1,4                    | -          | -               |                |    |
| 18,50     | -    | 1041        | 1062  | 1099 | -         | -     | -     | -      | -      | -   | -  | -  | 18,5                                   | 1,8                 | 0,38 | -                 | -                  | -                    | -                   | -                           | -                   | -                      | -          | -               |                |    |
| 18,56     | -    | 1070        | 1089  | 1132 | -         | -     | -     | -      | -      | -   | -  | -  | 18,5                                   | 1,8                 | 0,38 | -                 | -                  | -                    | -                   | -                           | -                   | -                      | -          | -               |                |    |
| 19,04     | 1160 | 1105        | 1121  | 1153 | 679       | 503   | 327   | 58     | 783    | 740 | 72 | 70 | 18,5                                   | 1,75                | 0,38 | 0,34              | 0,6                | 17,6                 | -                   | -                           | -                   | -                      | -          | -               |                |    |
| 19,20     | -    | 1119        | 1149  | 1164 | -         | -     | -     | -      | -      | -   | -  | -  | 15                                     | 1,75                | 0,38 | 0,34              | 0,6                | 17,6                 | -                   | -                           | -                   | -                      | -          | -               |                |    |
| 19,30     | 1180 | 1131        | 1158  | 1174 | 710       | 514   | 336   | 60     | 811    | 770 | 74 | 72 | 18                                     | 1,75                | 0,38 | 0,34              | 0,6                | 17,6                 | -                   | -                           | -                   | -                      | -          | -               |                |    |
| 20,00     | 1140 | -           | -     | -    | 733       | 542   | 354   | 63     | 810    | 780 | 76 | 80 | 18                                     | 1,75                | 0,38 | 0,34              | 0,65               | 17,6                 | -                   | -                           | -                   | -                      | -          | -               |                |    |
| 20,20     | 1200 | -           | -     | -    | 744       | 553   | 361   | 66     | 832    | 800 | 78 | 82 | 18                                     | 1,75                | 0,39 | 0,33              | 0,65               | 17,4                 | -                   | -                           | -                   | -                      | -          | -               |                |    |

Продолжение табл.4.7

| Время             | Температура |           |       |     |        |       |       |        |  |     |                   |                    |                     | Разрежение за печью | Давление          |                     |                        | Расход газа на печь | Содержание в уходящих газах |                |     | Примечания |
|-------------------|-------------|-----------|-------|-----|--------|-------|-------|--------|--|-----|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------|-----|------------|
|                   | печи        | заготовки |       |     | стенки |       |       |        | уходящих газов в дымоотводящих каналах |     | поверхности свода | поверхности стенки | окружающего воздуха |                     | газа в магистрали | газа перед горелкой | воздуха перед горелкой |                     | CO <sub>2</sub>             | O <sub>2</sub> | CO  |            |
|                   |             | x=0       | x=0,5 | x=1 | x=1    | x=0,5 | x=0,2 | x=0,02 | °C                                     | °C  | °C                | °C                 | °C                  |                     |                   |                     |                        |                     |                             |                |     |            |
| часы, мин         | °C          | °C        | °C    | °C  | °C     | °C    | °C    | °C     | °C                                     | °C  | °C                | °C                 | мм. в. ст.          | бар                 | бар               | бар                 | м <sup>3</sup> (н)/ч   | %                   | %                           | %              |     |            |
| 20,33             | 1210        | -         | -     | -   | 757    | 557   | 363   | 62     | -                                      | -   | 78                | 79                 | 18                  | 1,75                | 0,39              | 0,32                | 0,65                   | 17,2                | 10,3                        | 0,7            | 1,1 | -          |
| 21,20             | 1190        | -         | -     | -   | 798    | 586   | 381   | 64     | -                                      | -   | 77                | 84                 | 15                  | 1,75                | 0,39              | 0,12                | 0,15                   | 12,4                | 10,1                        | 0,9            | 0,9 | -          |
| 21,34             | 1050        | -         | -     | -   | 803    | 596   | 387   | 66     | 670                                    | 620 | 76                | 86                 | 15                  | 1,75                | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -   | -          |
| Конец работы печи |             |           |       |     |        |       |       |        |  |     |                   |                    |                     |                     |                   |                     |                        |                     |                             |                |     |            |
| 22,30             | 840         | -         | -     | -   | 746    | 600   | 405   | 67     | 507                                    | 490 | 82                | 86                 | 13,8                | 1,7                 | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -   | -          |
| 23,00             | 753         | -         | -     | -   | 706    | 593   | 417   | 70     | 416                                    | 340 | 83                | 90                 | 13,8                | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -   | -          |
| 23,30             | 695         | -         | -     | -   | 670    | 581   | 427   | 73     | 375                                    | 265 | 85                | 94                 | 13,8                | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -   | -          |
| 0,00              | 650         | -         | -     | -   | 640    | 568   | 432   | 75     | 348                                    | 240 | 87                | 97                 | 13,8                | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -   | -          |
| 0,30              | 620         | -         | -     | -   | 572    | 557   | 435   | 76     | 354                                    | 220 | 88                | 99                 | 13,8                | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -   | -          |
| 1,00              | 590         | -         | -     | -   | 594    | 530   | 437   | 79     | 313                                    | 205 | 90                | 102                | 13,8                | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -   | -          |
| 1,30              | 560         | -         | -     | -   | 570    | 531   | 437   | 80     | 298                                    | 200 | 91                | 104                | 13,8                | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -   | -          |
| 2,00              | 539         | -         | -     | -   | 545    | 518   | 435   | 82     | 286                                    | 180 | 94                | 105                | 13,8                | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -   | -          |
| 2,30              | 510         | -         | -     | -   | 531    | 506   | 433   | 84     | 275                                    | 179 | 95                | 107                | 13,8                | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -   | -          |

Продолжение табл.4.7

| Время     | Температура |           |       |     |        |       |       |        |  |     |                   |                    |                     | Разрежение за печью | Давление          |                     |                        | Расход газа на печь | Содержание в уходящих газах |                |    | Примечания |
|-----------|-------------|-----------|-------|-----|--------|-------|-------|--------|--|-----|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------|----|------------|
|           | печи        | заготовки |       |     | стенки |       |       |        | уходящих газов в дымоотводящих каналах |     | поверхности свода | поверхности стенки | окружающего воздуха |                     | газа в магистрالي | газа перед горелкой | воздуха перед горелкой |                     | CO <sub>2</sub>             | O <sub>2</sub> | CO |            |
|           |             | x=0       | x=0,5 | x=1 | x=1    | x=0,5 | x=0,2 | x=0,02 |  |     |                   |                    |                     |                     |                   |                     |                        |                     |                             |                |    |            |
| часы, мин | °C          | °C        | °C    | °C  | °C     | °C    | °C    | °C     | °C                                     | °C  | °C                | °C                 | мм. в. ст.          | бар                 | бар               | бар                 | м <sup>3</sup> (н)/ч   | %                   | %                           | %              |    |            |
| 3,00      | 500         | -         | -     | -   | 514    | 494   | 429   | 85     | 264                                    | 165 | 96                | 107                | 13,8                | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  |            |
| 3,30      | 475         | -         | -     | -   | 498    | 483   | 425   | 86     | 256                                    | 160 | 96                | 108                | 13,8                | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  |            |
| 4,00      | 460         | -         | -     | -   | 483    | 471   | 422   | 84     | 245                                    | 159 | 93                | 106                | 11,3                | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  |            |
| 4,30      | 450         | -         | -     | -   | 470    | 462   | 415   | 85     | 237                                    | 150 | 93                | 107                | 11,3                | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  |            |
| 5,00      | 450         | -         | -     | -   | 458    | 452   | 409   | 85     | 245                                    | 170 | 91                | 106                | 11,3                | 1,8                 | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  |            |
| 5,30      | 440         | -         | -     | -   | 447    | 445   | 406   | 85     | 240                                    | 205 | 93                | 107                | 13                  | 1,8                 | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  |            |
| 6,00      | 430         | -         | -     | -   | 434    | 435   | 401   | 85     | 230                                    | 205 | 93                | 106                | 13                  | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  |            |
| 6,30      | 410         | -         | -     | -   | 420    | 426   | 395   | 84     | 223                                    | 200 | 91                | 104                | 12                  | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  |            |
| 7,00      | 400         | -         | -     | -   | 415    | 417   | 391   | 84     | 213                                    | 190 | 93                | 103                | 12                  | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  |            |
| 7,30      | 385         | -         | -     | -   | 397    | 406   | 383   | 82     | 204                                    | 180 | 92                | 99                 | 12                  | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  |            |
| 8,00      | 380         | -         | -     | -   | 386    | 398   | 378   | 83     | 197                                    | 180 | 91                | 97                 | 12                  | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  |            |
| 8,30      | 370         | -         | -     | -   | 378    | 391   | 374   | 83     | 191                                    | 175 | 89                | 96                 | 12                  | -                   | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  |            |
| 9,00      | 355         | -         | -     | -   | 366    | 380   | 366   | 82     | 183                                    | 165 | 88                | 94                 | 12,5                | 1,8                 | -                 | -                   | -                      | -                   | -                           | -              | -  |            |

Окончание табл.4.7

| Время     |     | Температура |    |    |        |     |     |  |     |                   |                    |                     |                   | Разрежение за печью | Давление            |                        |                      | Расход газа на печь | Содержание в уходящих газах |    |   | Примечания |
|-----------|-----|-------------|----|----|--------|-----|-----|--|-----|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|----|---|------------|
|           |     | заготовки   |    |    | стенки |     |     | уходящих газов в дымоотводящих каналах |     | поверхности свода | поверхности стенки | окружающего воздуха | газа в магистрالي |                     | газа перед горелкой | воздуха перед горелкой | CO <sub>2</sub>      |                     | O <sub>2</sub>              | CO |   |            |
|           |     | печи        |    |    |        |     |     |  |     |                   |                    |                     |                   |                     |                     |                        |                      |                     |                             |    |   |            |
| часы, мин | °C  | °C          | °C | °C | °C     | °C  | °C  | °C                                     | °C  | °C                | °C                 | °C                  | мм. в. ст.        | бар                 | бар                 | бар                    | м <sup>3</sup> (н)/ч | %                   | %                           | %  |   |            |
| 9,30      | 345 | -           | -  | -  | 357    | 372 | 360 | 82                                     | 177 | 155               | 84                 | 93                  | 12,5              | -                   | -                   | -                      | -                    | -                   | -                           | -  | - | -          |
| 10,00     | 335 | -           | -  | -  | 348    | 364 | 354 | 79                                     | 171 | 150               | 84                 | 90                  | 12,5              | -                   | -                   | -                      | -                    | -                   | -                           | -  | - | -          |
| 10,30     | 325 | -           | -  | -  | 339    | 335 | 347 | 78                                     | 166 | 150               | 84                 | 86                  | 12,5              | -                   | -                   | -                      | -                    | -                   | -                           | -  | - | -          |
| 11,00     | 315 | -           | -  | -  | 332    | 350 | 343 | 79                                     | 162 | 140               | 82                 | 86                  | 12,5              | -                   | -                   | -                      | -                    | -                   | -                           | -  | - | -          |
| 11,30     | 305 | -           | -  | -  | 324    | 342 | 336 | 77                                     | 158 | 140               | 80                 | 85                  | 12,5              | -                   | -                   | -                      | -                    | -                   | -                           | -  | - | -          |
| 12,00     | 300 | -           | -  | -  | 316    | 335 | 332 | 76                                     | 138 | 125               | 81                 | 84                  | 12,5              | -                   | -                   | -                      | -                    | -                   | -                           | -  | - | -          |

Схемы замеров температуры на печи № 2 представлены на рис. 4.15 – 4.17.

Согласно табл. 4.7 производительность печи в день испытания составляла:

$$G = \frac{\sum g_i \cdot n_i}{\tau_n + \tau_k}, \quad (4.7)$$

где  $g_i$  – масса заготовки, кг;  $n_i$  – число заготовок данного типоразмера.

$$G = \frac{(0,785 \cdot 0,0025 \cdot 0,095 \cdot 7700) \cdot (40 \cdot 3 + 41)}{5,87} = 39,4 \text{ кг/ч.}$$

Производительность печи только по периоду нагрева металла:

$$G = \frac{\sum g_i \cdot n_i}{\tau_n} \quad (4.8)$$

$$G_n = \frac{(0,785 \cdot 0,0025 \cdot 0,095 \cdot 7700) \cdot (40 \cdot 3 + 41)}{3,25} = 71 \text{ кг/ч,}$$

то есть 94,5 % от проектной производительности.

Газ на горение подавался в печь в соответствии с графиком, представленным на рис. 4.18. Расход газа определялся по регулировочным характеристикам горелок, полученным в результате испытаний [108]. Схема расположения заготовок дана для первой садки (рис. 4.17).

Средневзвешенное значение расхода топлива за время нагрева иковки (рис. 4.18):

$$B = \frac{18,4 \cdot 2,167 + 18,2 \cdot 0,5 + 18,0 \cdot 0,5 + 17,6 \cdot 1,267 + 17,5 \cdot 0,217 + 17,2 \cdot 0,783 + 12,4 \cdot 0,233}{5,87} =$$

$$= 18,67 \frac{\text{м}^3(\text{н})}{\text{ч}} = 0,00518 \frac{\text{м}^3(\text{н})}{\text{с}}.$$

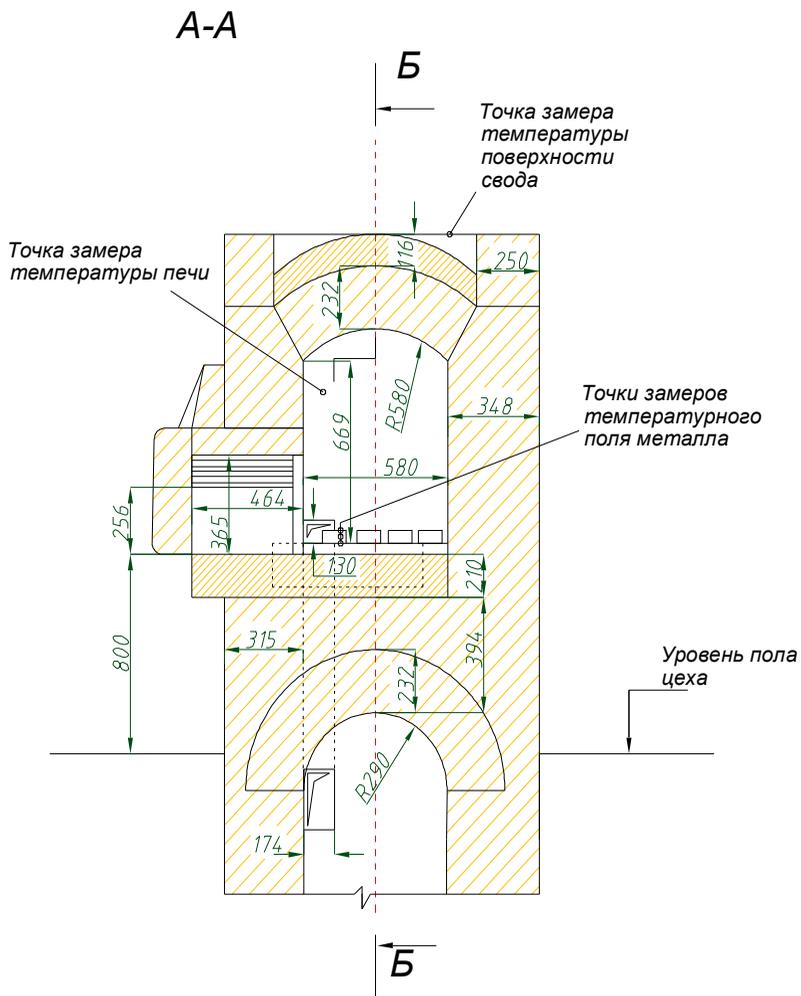


Рис. 4.15. Поперечный разрез печи № 2

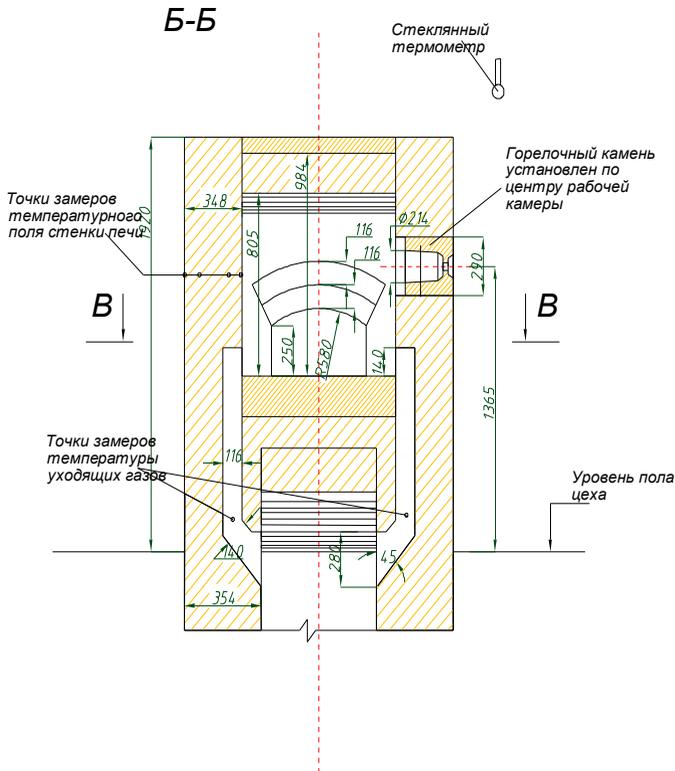


Рис. 4.16. Продольный разрез печи №2

Удельный расход топлива за время испытания составил:

$$b_y = B / G, \text{ м}^3(\text{н})/\text{кг}; \quad (4.9)$$

$$b_y = \frac{18,67}{39,4} = 0,474 \text{ м}^3(\text{н})/\text{кг}.$$

В соответствии с проектной технической характеристикой печи удельный расход топлива должен быть равен:

$$b_y^{np} = \frac{19}{75} = 0,24 \text{ м}^3(\text{н})/\text{кг}.$$

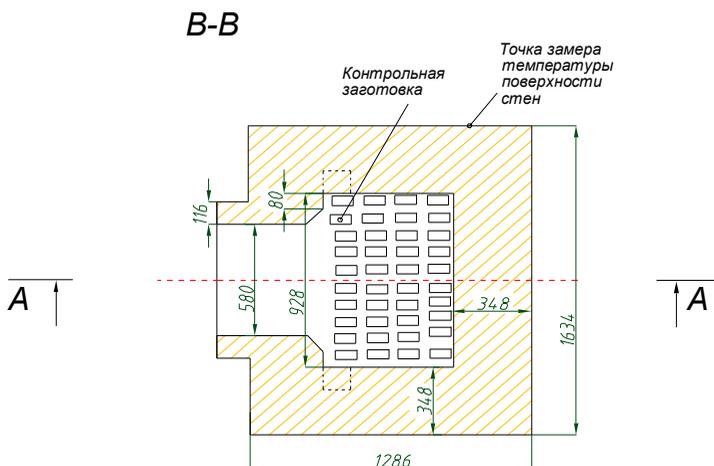


Рис. 4.17. Схемы расположения заготовок печи № 2

Таким образом, в сравнении с проектными данными печь работала с перерасходом топлива на 97 %.

В табл. 4.8 приведены численные значения температур поверхности заготовок и перепадов температур по сечению заготовок в момент выдачи первой заготовки данной садки  $T_n^H$ ,  $\Delta T_{\kappa}^H$ ; в момент выдачи последней заготовки садки соответственно  $T_n^K$ ,  $\Delta T_{\kappa}^K$ ; максимальных перепадов температур на начальном периоде нагрева  $\Delta T_{\max}$ , а также продолжительность начального периода нагрева.

**Таблица 4.8.** Параметры качества нагрева металла в печи № 2

| Номер садки | $T_n^H$ , °C | $\Delta T_{\kappa}^H$ | $T_n^K$ , °C | $\Delta T_{\kappa}^K$ | $\Delta T_{\max}$ | $\tau_{\text{нач}}$ , час |
|-------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|
| 1           | 1091         | 70                    | 1168         | 57                    | 368               | 0,933                     |
| 2           | 1132         | 30                    | 1171         | 19                    | 316               | 0,3                       |
| 3           | 1153         | 60                    | 1174         | 43                    | 79                | 0,5                       |

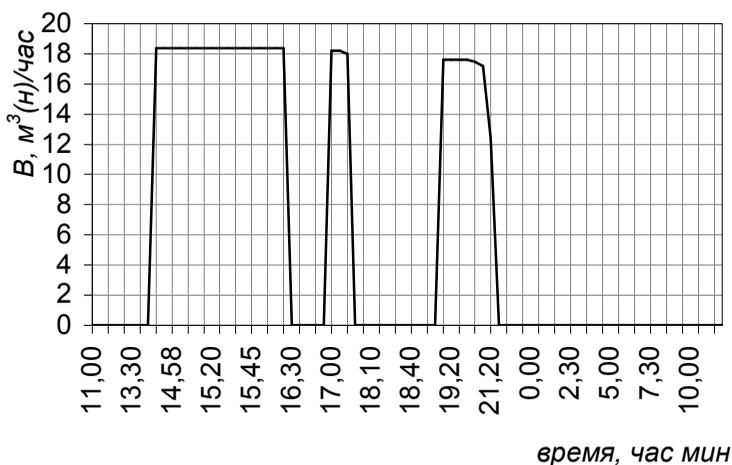


Рис. 4.18. График подачи газа на печь № 2

Распределение температурного поля в кладке печи № 2 представлено на рис. 4.19.

### *Экспериментальное исследование работы печи №3*

Испытание проводилось при нагреве в печи десяти садок металла [107]. Размеры садок и режим работы печи в день испытания приведены в табл. 4.9. Испытание было начато за 5 часов до розжига печи и длилось в течение цикла работы печи (в течение суток).

Результаты испытания приведены в табл. 4.10. Для замера температурного поля металла в одной из заготовок было установлено три термопары. Одна из них находилась на поверхности, обращенной к подине печи (температура центра металла). Для установки второй термопары было просверлено отверстие до середины цилиндра. Третья термопара размещалась на поверхности, обращенной к рабочему пространству печи (температура поверхности

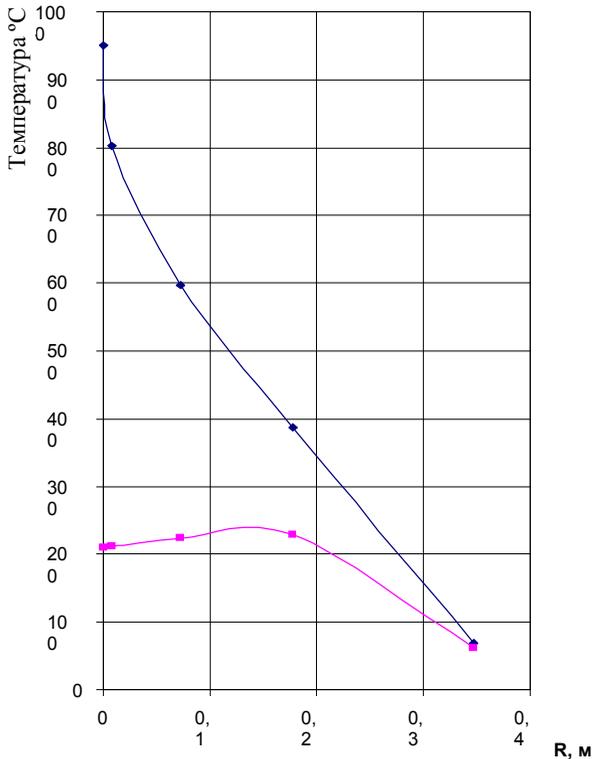


Рис. 4.19. Распределение температурного поля в кладке печи № 2:

—■— в момент розжига печи; —◆— в момент отключения печи

металла) (табл. 4.10, колонки 3 – 5). Температурное поле кладки замерялось в своде печи толщиной 0,348 м, выполненной из шамота кл. А. С этой целью просверливалось несквозное отверстие с наружной стороны свода на глубину 0,34 м и устанавливалось 4 термопары: первая отстояла от внутренней поверхности

кладки на 0,008 м; вторая – на 0,18 м; третья – на 0,283 м; четвертая – на 0,34 м (табл. 4.10, колонки 6 – 9).

**Таблица 4.9.** Размеры садок и режим работы печи № 3

| № садки | Число заготовок в садке | Размеры заготовок |        | Марка стали | Режим работы, час |          |          |             |          |
|---------|-------------------------|-------------------|--------|-------------|-------------------|----------|----------|-------------|----------|
|         |                         | $d, м$            | $l, м$ |             | $\tau_x$          | $\tau_n$ | $\tau_k$ | $\tau_{np}$ | $\tau_o$ |
| 1       | 34                      | 0,1               | 0,065  | Шx15        | 1,17              | 0,466    | 0,817    |             |          |
| 2       | 35                      | 0,1               | 0,065  | Шx15        |                   | 0,5      | 0,817    |             |          |
| 3       | 25                      | 0,1               | 0,065  | Шx15        |                   | 0,5      | 0,583    |             |          |
| 4       | 30                      | 0,1               | 0,065  | Шx15        |                   | 0,5      | 0,683    |             |          |
| 5       | 25                      | 0,1               | 0,065  | Шx15        |                   | 0,583    | 0,517    |             |          |
| 6       | 37                      | 0,1               | 0,065  | Шx15        |                   | 0,733    | 0,717    |             |          |
| 7       | 28                      | 0,1               | 0,065  | Шx15        |                   | 0,583    | 0,550    |             |          |
| 8       | 40                      | 0,1               | 0,065  | Шx15        |                   | 0,7      | 0,867    |             |          |
| 9       | 40                      | 0,1               | 0,065  | Шx15        |                   | 0,5      | 0,8      |             |          |
| 10      | 20                      | 0,1               | 0,065  | Шx15        |                   | 0,417    | 0,417    | 3,75        | 6,83     |

Просасывающей термопарой измерялась температура газа в печи (табл. 4.10, колонка 2). Температура уходящих газов замерялась внутри дымоотводящих каналов на входе в боров печи (табл. 4.10, колонки 10 – 11). Также термопарами определялись температуры на наружной поверхности кладки свода и стен (табл. 4.10, колонки 12 – 13). Все замеры выполнялись термопарами ТХА с учетом компенсации холодного спая. Температура окружающего воздуха замерялась стеклянным термометром (табл. 4.10, колонка 14).

Схемы замеров температуры на печи № 3 представлены на рис. 4.20– 4.22.

Согласно табл. 4.10 производительность печи в день испытания составляла (4.7):

Таблица 4.10. Результаты испытаний печи № 3

| Время     | Температура |           |       |     |       |       |       |  |     |                   |                    |                     |                   | Разрежение за печью | Давление            |                                |                 | Расход газа на печь  | Содержание в уходящих газах |    |    | Примечания |    |
|-----------|-------------|-----------|-------|-----|-------|-------|-------|--|-----|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------------------|----|----|------------|----|
|           | печи        | заготовки |       |     | свода |       |       | уходящих газов в дымоотводящих каналах |     | поверхности свода | поверхности стенки | окружающего воздуха | газа в магистрالي |                     | газа перед горелкой | сжатого воздуха перед горелкой | CO <sub>2</sub> |                      | O <sub>2</sub>              | CO |    |            |    |
|           |             | x=0       | x=0,5 | x=1 | x=1   | x=0,8 | x=0,5 | x=0,02                                 | °C  |                   |                    |                     |                   |                     |                     |                                |                 |                      |                             |    | °C |            | °C |
| часы, мин | °C          | °C        | °C    | °C  | °C    | °C    | °C    | °C                                     | °C  | °C                | °C                 | °C                  | °C                | мм. в. ст.          | бар                 | бар                            | бар             | м <sup>3</sup> (Н)/ч | %                           | %  | %  |            |    |
| 23,00     | 960         | 19        | 18    | 18  | 948   | 845   | 634   | 104                                    | 659 | 710               | 229                | 103                 | 13,8              | 2                   | -                   | -                              | -               | -                    | -                           | -  | -  | -          | -  |
| 23,30     | 900         | 20        | 19    | 18  | 902   | 829   | 644   | 151                                    | 614 | 660               | 238                | 104                 | 13,8              | 2                   | -                   | -                              | -               | -                    | -                           | -  | -  | -          | -  |
| 24,00     | 840         | 20        | 19    | 18  | 856   | 808   | 643   | 156                                    | 567 | 620               | 242                | 107                 | 13,8              | 2                   | -                   | -                              | -               | -                    | -                           | -  | -  | -          | -  |
| 0,30      | 800         | 21        | 19    | 19  | 825   | 787   | 648   | 159                                    | 641 | 600               | 242                | 107                 | 13,8              | 2                   | -                   | -                              | -               | -                    | -                           | -  | -  | -          | -  |
| 1,00      | 780         | 21        | 19    | 18  | 788   | 764   | 653   | 162                                    | 505 | 560               | 257                | 109                 | 13,8              | 2                   | -                   | -                              | -               | -                    | -                           | -  | -  | -          | -  |
| 1,30      | 740         | 21        | 20    | 18  | 751   | 744   | 641   | 165                                    | 479 | 540               | 240                | 112                 | 13,8              | 2                   | -                   | -                              | -               | -                    | -                           | -  | -  | -          | -  |
| 2,00      | 710         | 21        | 20    | 19  | 731   | 724   | 636   | 217                                    | 458 | 515               | 236                | 114                 | 13,8              | 2                   | -                   | -                              | -               | -                    | -                           | -  | -  | -          | -  |
| 2,30      | 680         | 21        | 20    | 18  | 705   | 704   | 629   | 170                                    | 434 | 490               | 231                | 114                 | 13,8              | 2                   | -                   | -                              | -               | -                    | -                           | -  | -  | -          | -  |
| 3,00      | 660         | 21        | 18    | 18  | 683   | 688   | 623   | 171                                    | 416 | 480               | 226                | 114                 | 13,8              | 2                   | -                   | -                              | -               | -                    | -                           | -  | -  | -          | -  |
| 3,30      | 640         | 21        | 17    | 19  | 663   | 670   | 615   | 173                                    | 399 | 460               | 222                | 116                 | 13,8              | 2                   | -                   | -                              | -               | -                    | -                           | -  | -  | -          | -  |
| 4,00      | 620         | 21        | 15    | 16  | 638   | 651   | 601   | 170                                    | 380 | 440               | 212                | 114                 | 11,3              | 2                   | -                   | -                              | -               | -                    | -                           | -  | -  | -          | -  |
| 4,30      | 570         | 21        | 15    | 16  | 618   | 636   | 697   | 173                                    | 389 | 430               | 206                | 118                 | 11,3              | 2                   | -                   | -                              | -               | -                    | -                           | -  | -  | -          | -  |
| 4,50      | 700         | 21        | 16    | 19  | 666   | 624   | 591   | 175                                    | 557 | 540               | 204                | 124                 | 11,3              | 2                   | 0,38                | 0,3                            | 0,6             | 40,2                 | -                           | -  | -  | -          | -  |

Продолжение табл.4.10

| Время              |      | Температура |      |       |           |     |     |     |       |       |        |     |  | Разрежение за печью | Давление          |                    |                     | Расход газа на печь | Содержание в уходящих газах |                     |                                | Примечания |                 |                |    |
|--------------------|------|-------------|------|-------|-----------|-----|-----|-----|-------|-------|--------|-----|--|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------|------------|-----------------|----------------|----|
|                    |      | печи        |      |       | заготовки |     |     |     | свода |       |        |     | уходящих газов в дымоотводящих каналах |                     | поверхности свода | поверхности стенки | окружающего воздуха |                     | газа в магистрالي           | газа перед горелкой | сжатого воздуха перед горелкой |            | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | CO |
|                    |      | °C          | x=0  | x=0,5 | °C        | x=1 | °C  | x=1 | x=0,8 | x=0,5 | x=0,02 | °C  |  |                     |                   |                    |                     |                     |                             |                     |                                |            |                 |                |    |
| Начало работы печи |      |             |      |       |           |     |     |     |       |       |        |     |  |                     |                   |                    |                     |                     |                             |                     |                                |            |                 |                |    |
| 5,00               | 820  | 21          | 16   | 19    | 624       | 620 | 591 | 179 | 701   | 690   | 204    | 126 | 13                                     | 2                   | 0,38              | 0,3                | 0,6                 | 40,2                | -                           | -                   | -                              | -          |                 |                |    |
| 5,15               | 920  | 21          | 16   | 19    | 710       | 618 | 586 | 181 | 816   | 760   | 200    | 131 | 13                                     | 2                   | 0,38              | 0,3                | 0,6                 | 40,2                | -                           | -                   | -                              | -          |                 |                |    |
| 5,30               | 1020 | 21          | 16   | 19    | 790       | 630 | 584 | 184 | 879   | 820   | 196    | 134 | 13                                     | 2                   | 0,38              | 0,3                | 0,6                 | 40,2                | -                           | -                   | -                              | -          |                 |                |    |
| 5,45               | 1030 | 21          | 16   | 19    | 830       | 643 | 580 | 184 | 912   | 850   | 193    | 135 | 13                                     | 2                   | 0,38              | 0,3                | 0,6                 | 40,2                | -                           | -                   | -                              | -          |                 |                |    |
| 6,00               | 1040 | 21          | 16   | 19    | 869       | 674 | 579 | 185 | 954   | 890   | 193    | 139 | 13                                     | 1,5                 | 0,38              | 0,38               | 0,6                 | 55,0                | -                           | -                   | -                              | -          |                 |                |    |
| 6,15               | 1140 | 20          | 15   | 18    | 881       | 689 | 578 | 187 | 952   | 890   | 192    | 133 | 13                                     | 1,5                 | 0,38              | 0,38               | 0,6                 | 55,0                | -                           | -                   | -                              | -          |                 |                |    |
| 6,25               | -    | 60          | 37   | 126   | -         | -   | -   | -   | -     | -     | -      | -   | 13                                     | 1,5                 | 0,38              | 0,38               | 0,6                 | 55,0                | -                           | -                   | -                              | -          |                 |                |    |
| 6,30               | 1140 | 674         | 509  | 1041  | 924       | 707 | 578 | 179 | 891   | 880   | 194    | 128 | 15                                     | 2                   | 0,38              | 0,22               | 0,8                 | 33,0                | -                           | -                   | -                              | -          |                 |                |    |
| 6,35               | -    | 1024        | 1058 | 1173  | -         | -   | -   | -   | -     | -     | -      | -   | 15                                     | 2                   | 0,38              | 0,22               | 0,8                 | 33,0                | -                           | -                   | -                              | -          |                 |                |    |
| 6,40               | -    | 1122        | 1155 | 1199  | -         | -   | -   | -   | -     | -     | -      | -   | 15                                     | 2                   | 0,38              | 0,22               | 0,8                 | 33,0                | -                           | -                   | -                              | -          |                 |                |    |
| 6,46               | -    | 1137        | 1174 | 1206  | -         | -   | -   | -   | -     | -     | -      | -   | 15                                     | 2                   | 0,38              | 0,22               | 0,8                 | 33,0                | -                           | -                   | -                              | -          |                 |                |    |
| 6,55               | -    | 1152        | 1187 | 1219  | -         | -   | -   | -   | -     | -     | -      | -   | 15                                     | 2                   | 0,38              | 0,22               | 0,8                 | 33,0                | -                           | -                   | -                              | -          |                 |                |    |

Продолжение табл.4.10

| Время        | Температура |           |       |      |       |       |       |        |  |      |                   |                    |                     | Разрежение за печью | Давление          |                     |                                | Расход газа на печь | Содержание в уходящих газах |                |    | Примечания |
|--------------|-------------|-----------|-------|------|-------|-------|-------|--------|--|------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------|----|------------|
|              | печи        | заготовки |       |      | свода |       |       |        | уходящих газов в дымоотводящих каналах |      | поверхности свода | поверхности стенки | окружающего воздуха |                     | газа в магистрالي | газа перед горелкой | сжатого воздуха перед горелкой |                     | CO <sub>2</sub>             | O <sub>2</sub> | CO |            |
|              |             | x=0       | x=0,5 | x=1  | x=1   | x=0,8 | x=0,5 | x=0,02 | °C                                     | °C   | °C                | °C                 | °C                  |                     |                   |                     |                                |                     |                             |                |    |            |
| часы,<br>мин | °C          | °C        | °C    | °C   | °C    | °C    | °C    | °C     | °C                                     | °C   | °C                | °C                 | мм. в.<br>ст.       | бар                 | бар               | бар                 | м <sup>3</sup> (Н)/ч           | %                   | %                           | %              |    |            |
| 7,00         | 1150        | 1145      | 1188  | 1207 | 968   | 739   | 579   | 172    | 870                                    | 880  | 190               | 124                | 15                  | 1,8                 | 0,38              | 0,1                 | 0,3                            | 23,0                | -                           | -              | -  | -          |
| 7,15         | -           | 1100      | 1114  | -    | -     | -     | -     | -      | -                                      | -    | -                 | -                  | 15                  | 1,8                 | 0,38              | 0,1                 | 0,3                            | 23,0                | -                           | -              | -  | -          |
| 7,25         | -           | 528       | -     | 783  | -     | -     | -     | -      | -                                      | -    | -                 | -                  | 18                  | 1,8                 | 0,38              | 0,22                | 0,8                            | 33,0                | -                           | -              | -  | -          |
| 7,30         | -           | 849       | -     | 1034 | -     | -     | -     | -      | -                                      | -    | -                 | -                  | 18                  | 1,8                 | 0,38              | 0,22                | 0,8                            | 33,0                | -                           | -              | -  | -          |
| 7,35         | -           | 1041      | -     | 1126 | -     | -     | -     | -      | -                                      | -    | -                 | -                  | 18                  | 1,8                 | 0,38              | 0,22                | 0,8                            | 33,0                | -                           | -              | -  | -          |
| 7,46         | -           | 1163      | -     | 1222 | -     | -     | -     | -      | -                                      | -    | -                 | -                  | 18                  | 1,8                 | 0,38              | 0,22                | 0,8                            | 33,0                | -                           | -              | -  | -          |
| 7,52         | 1160        | 1160      | -     | 1189 | 923   | 770   | 597   | 177    | 962                                    | 980  | 196               | 128                | 1821                | 1,8                 | 0,38              | 0,12                | 0,3                            | 25,1                | -                           | -              | -  | -          |
| 8,20         | -           | 1142      | -     | 1178 | -     | -     | -     | -      | -                                      | -    | -                 | -                  | 21                  | 1,8                 | 0,38              | 0,12                | 0,3                            | 25,1                | -                           | -              | -  | -          |
| 8,35         | 1100        | 1126      | -     | 1140 | 989   | 793   | 612   | 175    | 812                                    | 900  | 208               | 124                | 21                  | 1,8                 | 0,38              | 0,12                | 0,3                            | 25,1                | -                           | -              | -  | -          |
| 9,00         | -           | 1166      | 1187  | 1199 | -     | -     | -     | -      | -                                      | -    | -                 | -                  | 22                  | 1,8                 | 0,38              | 0,12                | 0,3                            | 25,1                | -                           | -              | -  | -          |
| 9,10         | 1220        | 1210      | 1239  | 1252 | 996   | 809   | 627   | 186    | 1044                                   | 1300 | 215               | 134                | 22                  | 1,7                 | 0,38              | 0,38                | 0,3                            | 55,0                | -                           | -              | -  | -          |
| 9,20         | -           | 1191      | 1219  | 1221 | -     | -     | -     | -      | -                                      | -    | -                 | -                  | 22                  | 1,7                 | 0,38              | 0,38                | 0,3                            | 55,0                | -                           | -              | -  | -          |
| 9,30         | -           | 1178      | 1204  | 1216 | -     | -     | -     | -      | -                                      | -    | -                 | -                  | 24                  | 1,7                 | 0,38              | 0,38                | 0,3                            | 55,0                | -                           | -              | -  | -          |

Продолжение табл.4.10

| Время           |      | Температура |       |      |           |       |       |        |       |     |     |     |  |                   | Разрежение за печью | Давление           |                     |                      | Расход газа на печь | Содержание в уходящих газах |                                |                 | Примечания |                |    |
|-----------------|------|-------------|-------|------|-----------|-------|-------|--------|-------|-----|-----|-----|--|-------------------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|------------|----------------|----|
|                 |      | печи        |       |      | заготовки |       |       |        | свода |     |     |     | уходящих газов в дымоотводящих каналах | поверхности свода |                     | поверхности стенки | окружающего воздуха | газа в магистралах   |                     | газа перед горелкой         | сжатого воздуха перед горелкой | CO <sub>2</sub> |            | O <sub>2</sub> | CO |
|                 |      | х=0         | х=0,5 | х=1  | х=1       | х=0,8 | х=0,5 | х=0,02 | °C    | °C  | °C  | °C  |  |                   |                     |                    |                     |                      |                     |                             |                                |                 |            |                |    |
| часы, мин       | °C   | °C          | °C    | °C   | °C        | °C    | °C    | °C     | °C    | °C  | °C  | °C  | °C                                     | мм. в. ст.        | бар                 | бар                | бар                 | м <sup>3</sup> (Н)/ч | %                   | %                           | %                              |                 |            |                |    |
| 9,40            | 1190 | 1177        | 1202  | 1215 | 1026      | 825   | 632   | 176    | 975   | 870 | 216 | 129 | 24                                     | 2,5               | 0,38                | 0,07               | 0,2                 | 19,0                 | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| Отключение печи |      |             |       |      |           |       |       |        |       |     |     |     |  |                   |                     |                    |                     |                      |                     |                             |                                |                 |            |                |    |
| 10,00           | -    | -           | -     | -    | 1022      | 835   | 639   | 178    | 774   | -   | -   | -   | 24                                     | 2,5               | 0,38                | -                  | -                   | -                    | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 10,10           | -    | 690         | 678   | 722  | -         | -     | -     | -      | -     | -   | -   | -   | 24                                     | 2,5               | 0,38                | -                  | -                   | -                    | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 10,20           | -    | 788         | 764   | 801  | -         | -     | -     | -      | -     | -   | -   | -   | 24                                     | 2,5               | 0,38                | -                  | -                   | -                    | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 10,30           | 890  | 827         | 842   | 847  | 910       | 833   | 650   | 178    | 613   | 680 | 225 | 121 | 24                                     | 2,5               | 0,38                | -                  | -                   | -                    | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| Включение печи  |      |             |       |      |           |       |       |        |       |     |     |     |  |                   |                     |                    |                     |                      |                     |                             |                                |                 |            |                |    |
| 10,40           | 960  | 822         | 839   | 840  | -         | -     | -     | -      | -     | -   | -   | -   | 24                                     | 2                 | 0,38                | 0,33               | 0,7                 | 47,5                 | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 10,50           | -    | 960         | 984   | 1040 | -         | -     | -     | -      | -     | -   | -   | -   | 24                                     | 2                 | 0,38                | 0,33               | 0,7                 | 47,5                 | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 11,00           | -    | 1039        | 1069  | 1100 | -         | -     | -     | -      | -     | -   | -   | -   | 24                                     | 2                 | 0,38                | 0,33               | 0,7                 | 47,5                 | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 11,10           | -    | 1076        | 1107  | 1130 | -         | -     | -     | -      | -     | -   | -   | -   | 24                                     | 2                 | 0,38                | 0,33               | 0,7                 | 47,5                 | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 11,28           | 1190 | 1157        | 1200  | 1242 | 905       | 803   | 651   | 182    | 1029  | 890 | 231 | 132 | 24                                     | 2,5               | 0,38                | 0,1                | 0,5                 | 23,0                 | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 11,55           | 1160 | 1139        | 1167  | 1192 | 995       | 817   | 653   | 178    | 948   | 960 | 218 | 130 | 24                                     | 2,5               | 0,38                | 0,1                | 0,4                 | 23,0                 | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |

Продолжение табл.4.10

| Время           |      | Температура |      |       |           |     |       |       |        |      |     |  |    |                   | Разрежение за печью | Давление           |                     |                   | Расход газа на печь | Содержание в уходящих газах |                                |                 | Примечания |                |    |
|-----------------|------|-------------|------|-------|-----------|-----|-------|-------|--------|------|-----|--|----|-------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|------------|----------------|----|
|                 |      | печи        |      |       | заготовки |     |       |       | свода  |      |     | уходящих газов в дымоотводящих каналах |    | поверхности свода |                     | поверхности стенки | окружающего воздуха | газа в магистрالي |                     | газа перед горелкой         | сжатого воздуха перед горелкой | CO <sub>2</sub> |            | O <sub>2</sub> | CO |
|                 |      | °C          | x=0  | x=0,5 | x=1       | x=1 | x=0,8 | x=0,5 | x=0,02 | °C   | °C  | °C                                     | °C |                   |                     |                    |                     |                   |                     |                             |                                |                 |            |                |    |
| 12,15           | 1120 | -           | -    | -     | 1017      | 829 | 660   | 185   | 1003   | 920  | 218 | 139                                    | 24 | 2,5               | 0,38                | 0,3                | 1                   | 40,2              | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 12,45           | 1200 | -           | -    | -     | 1133      | 843 | 664   | 185   | 1056   | 1030 | 220 | 132                                    | 24 | 2,5               | 0,38                | 0,1                | 0,3                 | 23,0              | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 13,15           | 1160 | -           | -    | -     | 1036      | 855 | 666   | 180   | 1040   | 1020 | 211 | 128                                    | 24 | 2,5               | 0,38                | 0,1                | 0,3                 | 23,0              | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| Отключение печи |      |             |      |       |           |     |       |       |        |      |     |  |    |                   |                     |                    |                     |                   |                     |                             |                                |                 |            |                |    |
| 13,50           | 1000 | -           | -    | -     | 1009      | 885 | 693   | 186   | 688    | 750  | 234 | 130                                    | 24 | 2,5               | 0,38                | -                  | -                   | -                 | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 15,20           | 800  | -           | -    | -     | -         | 819 | 681   | 147   | 491    | 560  | 225 | 132                                    | 24 | 2,5               | 0,38                | -                  | -                   | -                 | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 15,30           | 800  | -           | -    | -     | 821       | 811 | 680   | 123   | 585    | 560  | 228 | 123                                    | 24 | 2,5               | 0,38                | -                  | -                   | -                 | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| Включение печи  |      |             |      |       |           |     |       |       |        |      |     |  |    |                   |                     |                    |                     |                   |                     |                             |                                |                 |            |                |    |
| 15,45           | -    | 392         | 371  | 557   | -         | -   | -     | -     | -      | -    | -   | -                                      | 24 | 2,5               | 0,38                | 0,1                | 0,38                | 23,0              | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 15,50           | -    | 806         | 811  | 958   | 878       | 799 | 680   | 161   | 957    | -    | 238 | 155                                    | 24 | 2,5               | 0,38                | 0,1                | 0,38                | 23,0              | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 16,00           | -    | 1098        | 1127 | 1146  | -         | -   | -     | -     | -      | -    | -   | -                                      | 24 | 2,5               | 0,38                | 0,1                | 0,38                | 23,0              | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 16,06           | 1180 | 1155        | 1183 | 1196  | 930       | 801 | 679   | 161   | 1043   | 1000 | 235 | 158                                    | 24 | 2,5               | 0,38                | 0,15               | 0,38                | 28,0              | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |
| 16,12           | -    | 1195        | 1224 | 1219  | -         | -   | -     | -     | -      | -    | -   | -                                      | 24 | 2,5               | 0,38                | 0,15               | 0,38                | 28,0              | -                   | -                           | -                              | -               |            |                |    |

Продолжение табл.4.10

| Время |      | Температура |      |      |           |     |     |     |       |      |     |     |  |     | Разрежение за печью | Давление          |                    |                     | Расход газа на печь | Содержание в уходящих газах |                     |                                | Примечания |                 |                |    |
|-------|------|-------------|------|------|-----------|-----|-----|-----|-------|------|-----|-----|--|-----|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------|------------|-----------------|----------------|----|
|       |      | печи        |      |      | заготовки |     |     |     | свода |      |     |     | уходящих газов в дымоотводящих каналах |     |                     | поверхности свода | поверхности стенки | окружающего воздуха |                     | газа в магистрали           | газа перед горелкой | сжатого воздуха перед горелкой |            | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | CO |
|       |      | °C          | °C   | °C   | °C        | °C  | °C  | °C  | °C    | °C   | °C  | °C  | °C                                     | °C  |                     | мм. в. ст.        | бар                | бар                 |                     |                             |                     |                                |            |                 |                |    |
| 16,18 | -    | 1223        | 1251 | 1245 | -         | -   | -   | -   | -     | -    | -   | -   | 24                                     | 2,5 | 0,38                | 0,15              | 0,38               | 28,0                | -                   | -                           | -                   | -                              |            |                 |                |    |
| 16,30 | -    | -           | -    | -    | 999       | 818 | 676 | 130 | 1008  | 1030 | 227 | 140 | 19                                     | 2,5 | 0,38                | 0,1               | 0,3                | 23,0                | -                   | -                           | -                   | -                              |            |                 |                |    |
| 16,35 | -    | 1211        | 1228 | 1220 | -         | -   | -   | -   | -     | -    | -   | -   | 19                                     | 2,5 | 0,38                | 0,1               | 0,3                | 23,0                | 8,3                 | 2                           | 2,6                 | -                              |            |                 |                |    |
| 17,00 | -    | 1191        | 1211 | 1217 | -         | -   | -   | -   | -     | -    | -   | -   | -                                      | -   | 0,38                | 0,1               | 0,3                | 23,0                | -                   | -                           | -                   | -                              |            |                 |                |    |
| 17,30 | 1225 | -           | -    | -    | 1031      | 867 | 680 | 151 | -     | 615  | 220 | 155 | 19                                     | 2,5 | 0,38                | 0,38              | 1,6                | 55,0                | 7,9                 | 2,9                         | 1,6                 | -                              |            |                 |                |    |
| 18,00 | 1200 | -           | -    | -    | 1023      | 877 | 684 | 124 | -     | 580  | 210 | 165 | 19                                     | 2,5 | 0,38                | 0,1               | 0,3                | 23,0                | -                   | -                           | -                   | -                              |            |                 |                |    |
| 18,30 | 1080 | -           | -    | -    | 1009      | 892 | 691 | 127 | -     | 590  | 220 | 146 | 19                                     | 2,5 | 0,38                | 0,1               | 0,3                | 23,0                | -                   | -                           | -                   | -                              |            |                 |                |    |
| 19,00 | 1160 | -           | -    | -    | 1010      | 885 | 698 | 128 | -     | 570  | 217 | 140 | 19                                     | 2,5 | 0,38                | 0,1               | 0,3                | 23,0                | -                   | -                           | -                   | -                              |            |                 |                |    |
| 19,30 | 1150 | -           | -    | -    | 1023      | 889 | 702 | 125 | -     | 580  | 216 | 140 | 19                                     | 2,5 | 0,38                | 0,1               | 0                  | 23,0                | -                   | -                           | -                   | -                              |            |                 |                |    |
| 20,00 | 1220 | -           | -    | -    | 1021      | 896 | 710 | 156 | -     | 670  | 226 | 159 | 19                                     | 2,5 | 0,38                | 0,38              | 2,65               | 55,0                | -                   | -                           | -                   | -                              |            |                 |                |    |
| 20,30 | 1230 | -           | -    | -    | 1064      | 900 | 713 | 126 | -     | 625  | 220 | 144 | 19                                     | 2,5 | 0,38                | 0,1               | 0,2                | 23,0                | -                   | -                           | -                   | -                              |            |                 |                |    |
| 21,00 | 1220 | -           | -    | -    | 1075      | 914 | 717 | 127 | -     | 620  | 218 | 142 | 19                                     | 2,5 | 0,38                | 0,1               | 0,2                | 23,0                | -                   | -                           | -                   | -                              |            |                 |                |    |
| 21,30 | 1280 | -           | -    | -    | 1085      | 925 | 725 | 130 | -     | 770  | 228 | 149 | 19                                     | 2,5 | 0,38                | 0,3               | 0,3                | 40,2                | -                   | -                           | -                   | -                              |            |                 |                |    |

Окончание табл.4.10

| Время             |      | Температура |           |           |       |       |     |     |  |       |                   |                    |                     | Разрежение за печью | Давление          |                     |                                | Расход газа на печь | Содержание в уходящих газах |                |    | Примечания |    |
|-------------------|------|-------------|-----------|-----------|-------|-------|-----|-----|--|-------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------|----|------------|----|
|                   |      | печи        |           |           | свода |       |     |     | уходящих газов в дымоотводящих каналах |       | поверхности свода | поверхности стенки | окружающего воздуха |                     | газа в магистрали | газа перед горелкой | сжатого воздуха перед горелкой |                     | CO <sub>2</sub>             | O <sub>2</sub> | CO |            |    |
|                   |      | заготовки   | заготовки | заготовки | x=0   | x=0,5 | x=1 | x=1 | x=0,8                                  | x=0,5 | x=0,02            | °C                 | °C                  |                     |                   |                     |                                | °C                  |                             |                |    |            | °C |
| часы,             | мин  | °C          | °C        | °C        | °C    | °C    | °C  | °C  | °C                                     | °C    | °C                | °C                 | °C                  | °C                  | мм. в. ст.        | бар                 | бар                            | бар                 | м <sup>3</sup> (Н)/ч        | %              | %  | %          |    |
| 22,00             | 1180 | -           | -         | -         | 1090  | 932   | 728 | 126 | -                                      | 680   | 224               | 139                | 19                  | 2,5                 | 0                 | 0                   | 0                              | -                   | -                           | -              | -  | -          |    |
| Конец работы печи |      |             |           |           |       |       |     |     |  |       |                   |                    |                     |                     |                   |                     |                                |                     |                             |                |    |            |    |
| 23,00             | 950  | -           | -         | -         | 969   | 916   | 736 | 121 | -                                      | 400   | 232               | 136                | 19                  | 2,5                 | -                 | -                   | -                              | -                   | -                           | -              | -  | -          |    |
| 24,00             | 840  | -           | -         | -         | 882   | 863   | 738 | 127 | -                                      | 320   | 229               | 130                | 19                  | 2,5                 | -                 | -                   | -                              | -                   | -                           | -              | -  | -          |    |
| 1,00              | 770  | -           | -         | -         | 808   | 815   | 728 | 124 | -                                      | 270   | 223               | 130                | 19                  | 2,5                 | -                 | -                   | -                              | -                   | -                           | -              | -  | -          |    |
| 2,00              | 720  | -           | -         | -         | 756   | 775   | 712 | 126 | -                                      | 225   | 215               | 129                | 19                  | 2,5                 | -                 | -                   | -                              | -                   | -                           | -              | -  | -          |    |
| 4,00              | 620  | -           | -         | -         | 668   | 702   | 671 | 125 | -                                      | 180   | 207               | 131                | 19                  | 2,5                 | -                 | -                   | -                              | -                   | -                           | -              | -  | -          |    |
| 5,15              | 570  | -           | -         | -         | 623   | 665   | 643 | 106 | -                                      | 155   | 193               | 126                | 19                  | 2,5                 | -                 | -                   | -                              | -                   | -                           | -              | -  | -          |    |

$$G = \frac{0,785 \cdot 0,01 \cdot 0,065 \cdot 7800 \cdot 314}{5,482 + 6,768} = 102 \text{ кг/ч.}$$

Производительность печи только по периоду нагрева металла (4.8):

$$G_n = \frac{0,785 \cdot 0,01 \cdot 0,065 \cdot 7800 \cdot 314}{5,482} = 228 \text{ кг/ч.}$$

Схема расположения заготовок дана для первой садки (табл. 4.9).

Средневзвешенное значение расхода топлива за время работы печи (рис. 4.23):

$$\begin{aligned} B &= (40,5 \cdot 1,167 + 55,0 \cdot 0,5 + 33,0 \cdot 0,5 + 23,0 \cdot 0,333 + 33,0 \cdot 0,416 + \\ &+ 25,1 \cdot 1,333 + 55,0 \cdot 0,333 + 19,0 \cdot 0,167 + 47,5 \cdot 0,667 + 23,0 \cdot 1,083 + \\ &+ 40,2 \cdot 0,5 + 23,0 \cdot 0,5 + 23,0 \cdot 0,6 + 28,6 \cdot 0,4 + 23,0 \cdot 1,0 + 55,0 \cdot 0,5 + \\ &+ 23,0 \cdot 2,0 + 55,0 \cdot 0,5 + 23,0 \cdot 1,0 + 40,2 \cdot 0,5) / 12,25 = 36,55 \frac{\text{м}^3(\text{н})}{\text{ч}} = \\ &= 0,01 \frac{\text{м}^3(\text{н})}{\text{с}}. \end{aligned}$$

Удельный расход топлива за время испытания составил (4.9):

$$b_y = \frac{36,55}{102} = 0,358 \text{ м}^3(\text{н})/\text{кг.}$$

В соответствии с проектной технической характеристикой печи удельный расход топлива должен быть равен:

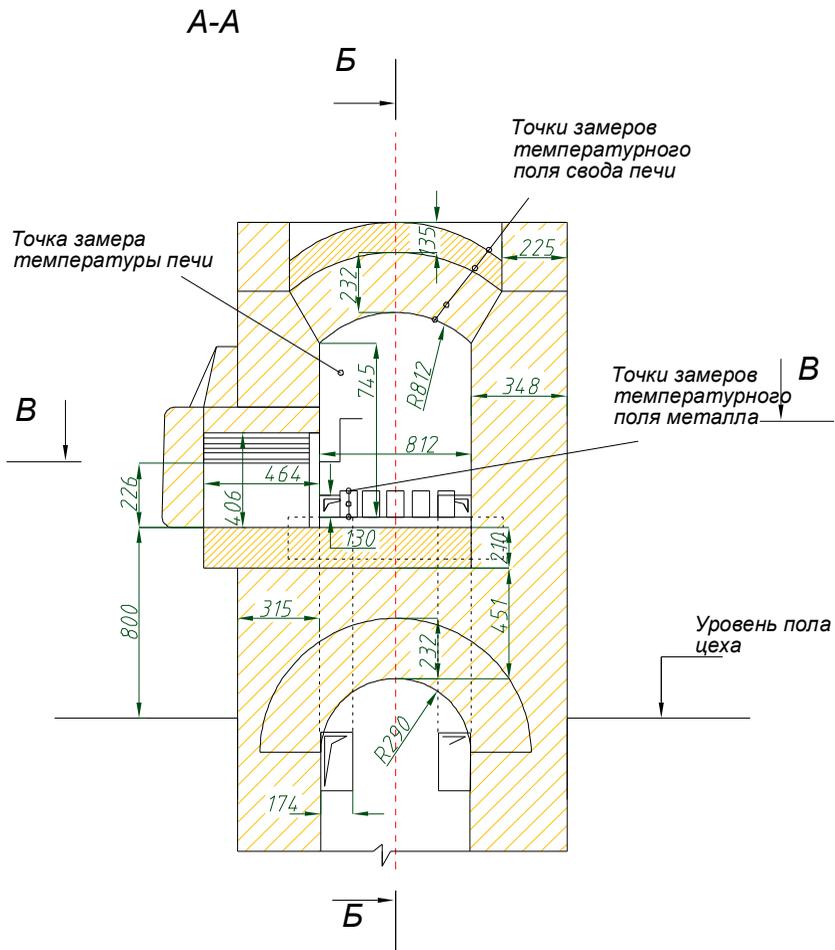


Рис. 4.20. Поперечный разрез печи

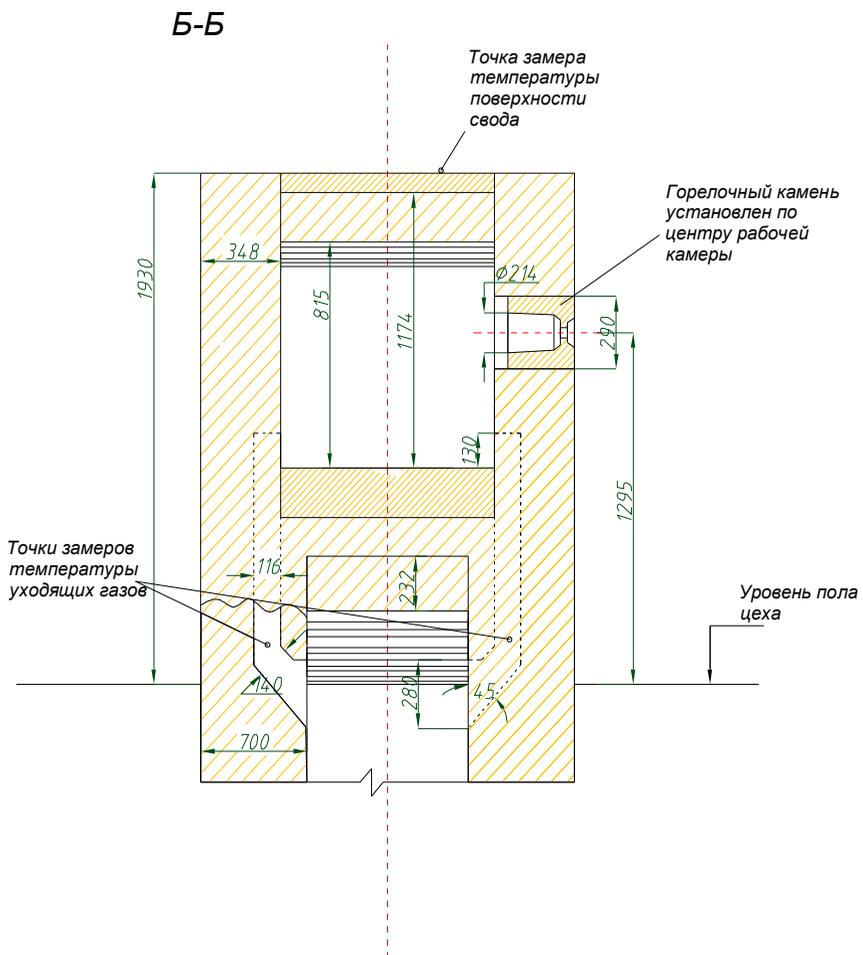


Рис. 4.21. Продольный разрез печи

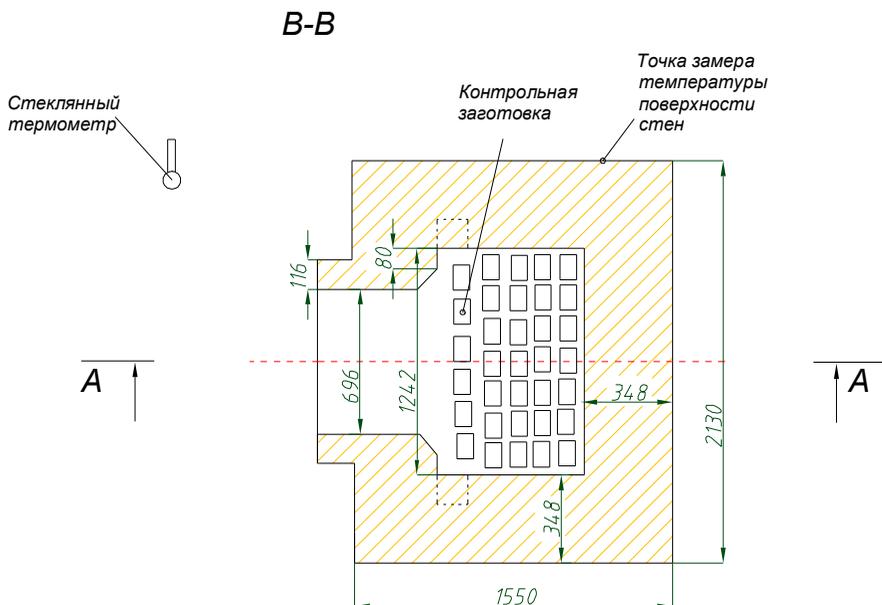


Рис. 4.22. Схемы расположения заготовок печи № 3

**Таблица 4.11.** Параметры качества нагрева металла в печи № 3

| Номер садки | $T_n^n$ , °C | $\Delta T_K^n$ | $T_n^k$ , °C | $\Delta T_K^k$ | $\tau_{нач}$ , час |
|-------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------------|
| 2           | 1189         | 29             | 1140         | 14             | 0,167              |
| 3           | 1212         | 34             | 1177         | 25             | 0,167              |
| 4           | 1120         | 31             | 1167         | 28             |                    |
| 6           | 1252         | 17             | 1222         | 27             | 0,25               |

$$b_y^{np} = \frac{37}{200} = 0,185 \text{ м}^3(\text{н})/\text{кг}.$$

Таким образом, в сравнении с проектными данными перерасход топлива на печь составляет 93,5 %.

В табл. 4.7 приведены численные значения температур поверхности заготовок и перепадов температур по сечению заготовок в момент выдачи первой заготовки

данной садки  $T_n^H$ ,  $\Delta T_K^H$ ; в момент выдачи последней заготовки садки – соответственно  $T_n^K$ ,  $\Delta T_K^K$ ; максимальных перепадов температур на начальном периоде нагрева  $\Delta T_{\max}$ , а также продолжительность начального периода нагрева.

Газ на горение подавался в печь в соответствии с графиком, представленным на рис. 4.23. Расход газа определялся по регулировочным характеристикам горелок, полученным в результате испытаний [107].

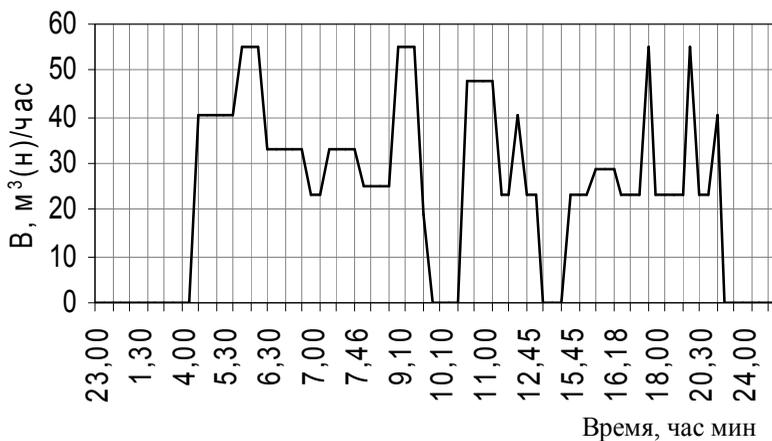


Рис. 4.23. График подачи газа на печь № 3

Распределение температурного поля в кладке печи № 3 представлено на рис. 4.24.

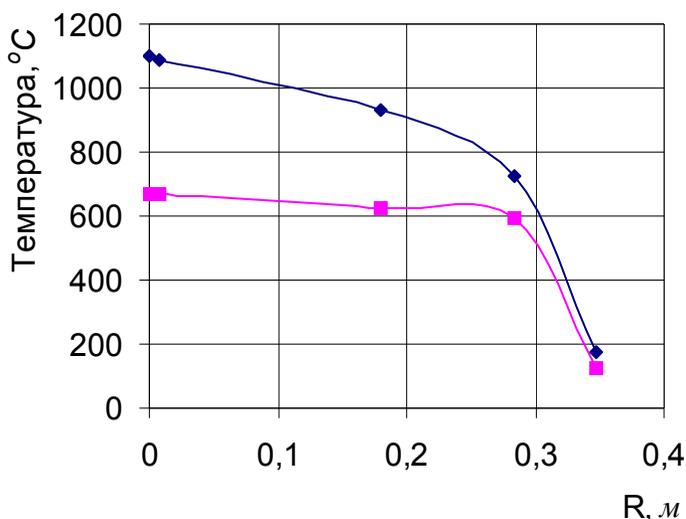


Рис. 4.24. Распределение температурного поля в кладке печи № 3:  
 — в момент розжига печи; — в момент отключения печи

#### *Экспериментальное исследование работы печи № 5*

Испытание проводилось при нагреве в печи 24 заготовок размером  $d=0,15$  м,  $l=0,25$  м из стали марки 7ХГ2ВМ. Заготовки были загружены в печь, не полностью остывшую за нерабочую смену. Нагрев металла сопровождался одновременным разогревом кладки печи. Испытание было начато за 2 часа до розжига печи и длилось в течение цикла работы печи (в течение суток). Он включает нагрев металла до момента выдачи первой заготовки  $\tau_H=3$  часа, ковку металла до момента выдачи последней заготовки  $\tau_K=4$  часа и охлаждение кладки печи в течение  $\tau_O=17$  часов [107].

Результаты испытания приведены в табл. 4.12. Для замера температурного поля металла в одной из заготовок

было установлено три термопары. Одна из них находилась на поверхности, обращенной к подине печи (температура центра металла). Для установки второй термопары было просверлено отверстие до середины цилиндра. Третья термопара размещалась на поверхности, обращенной к рабочему пространству печи (температура поверхности металла) (табл. 4.12, колонки 3 – 5). Температурное поле кладки замерялось в своде и стенке печи толщиной 0,348 м, выполненных из шамота кл. А. С этой целью просверливалось несквозное отверстие с наружной стороны свода и устанавливалось 3 термопары: первая отстояла от внутренней поверхности кладки на 0,007 м; вторая – на 0,174 м; третья – на 0,340 м (табл. 4.12, колонки 6 – 8). С наружной стороны стенки также просверливалось несквозное отверстие и устанавливалось 4 термопары: первая отстояла от внутренней поверхности кладки на 0,003 м; вторая – на 0,12 м; третья – на 0,228 м; четвертая – на 0,34 м (табл. 4.12, колонки 9 – 12).

Просасывающей термопарой измерялась температура газа в печи (табл. 4.12, колонка 2). Температура уходящих газов замерялась внутри дымоотводящих каналов на входе в боры печи (табл. 4.12, колонки 13 – 15). Также термопарами определялись температуры на наружной поверхности кладки свода и стен (табл. 4.12, колонки 16 – 17). Все замеры выполнялись термопарами ТХА с учетом компенсации холодного спада.

Схемы замеров температуры на печи № 5 представлены на рис. 4.25 – 4.27.

Согласно табл. 4.11 производительность печи в день испытания составляла (4.1):

$$G = \frac{34,7 \cdot 24}{7} = 119 \text{ кг/ч.}$$

**Таблица 4.12. Результаты испытаний печи № 5**

| Время        | Температура |           |       |     |        |       |     |        |        |        |   |     |     |                      | Разрежение за печью | Давление              |                      |                           |                           |                              | Расход газа на печь |                              |     |
|--------------|-------------|-----------|-------|-----|--------|-------|-----|--------|--------|--------|---|-----|-----|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|-----|
|              | печи        | заготовки |       |     | свода  |       |     | стенки |        |        | уходящих газов<br>в<br>дымоотводящих<br>каналах |     |     | поверхности<br>свода |                     | поверхности<br>стенки | газа в<br>магистрالي | газа перед<br>горелкой №1 | газа перед<br>горелкой №2 | воздуха перед<br>горелкой №1 |                     | воздуха перед<br>горелкой №2 |     |
|              |             | x=1       | x=0,5 | x=0 | x=0,02 | x=0,5 | x=1 | x=1    | x=0,66 | x=0,35 |   |     |     |                      |                     |                       |                      |                           |                           |                              |                     |                              | x=0 |
| часы,<br>мин | °C          | °C        | °C    | °C  | °C     | °C    | °C  | °C     | °C     | °C     | °C  | °C  | °C  | °C                   | мм. в.<br>ст.       | бар                   | бар                  | бар                       | бар                       | бар                          | бар                 | м <sup>3</sup> (н)/<br>ч     |     |
| 12,00        | 346         | 199       | 192   | 194 | 253    | 249   | 425 | 348    | 433    | 440    | 243   | 220 | 357 | 283                  | 166                 | 123                   | -                    | -                         | -                         | -                            | -                   | -                            | -   |
| 12,10        | 344         | 201       | 202   | 208 | 252    | 278   | 421 | 346    | 430    | 437    | 241   | 221 | 356 | 282                  | 167                 | 122                   | -                    | -                         | -                         | -                            | -                   | -                            | -   |
| 12,20        | 342         | 209       | 212   | 211 | 250    | 276   | 418 | 344    | 426    | 433    | 239   | 222 | 352 | 282                  | 167                 | 122                   | -                    | -                         | -                         | -                            | -                   | -                            | -   |
| 12,30        | 340         | 216       | 220   | 218 | 250    | 276   | 415 | 341    | 424    | 431    | 236   | 223 | 350 | 281                  | 168                 | 121                   | -                    | -                         | -                         | -                            | -                   | -                            | -   |
| 12,40        | 338         | 221       | 226   | 223 | 247    | 274   | 411 | 337    | 420    | 427    | 234   | 224 | 349 | 281                  | 166                 | 121                   | -                    | -                         | -                         | -                            | -                   | -                            | -   |
| 12,50        | 336         | 223       | 232   | 228 | 245    | 271   | 406 | 334    | 416    | 423    | 233   | 224 | 347 | 280                  | 165                 | 120                   | -                    | -                         | -                         | -                            | -                   | -                            | -   |
| 13,00        | 332         | 227       | 235   | 232 | 245    | 271   | 404 | 333    | 413    | 421    | 238   | 220 | 347 | 279                  | 166                 | 118                   | -                    | -                         | -                         | -                            | -                   | -                            | -   |
| 13,10        | 330         | 229       | 238   | 234 | 242    | 267   | 399 | 330    | 411    | 419    | 237   | 218 | 345 | 278                  | 163                 | 117                   | -                    | -                         | -                         | -                            | -                   | -                            | -   |
| 13,20        | 327         | 231       | 240   | 235 | 239    | 264   | 395 | 329    | 409    | 416    | 237   | 217 | 344 | 276                  | 161                 | 116                   | -                    | -                         | -                         | -                            | -                   | -                            | -   |
| 13,40        | 323         | 233       | 243   | 237 | 237    | 262   | 391 | 324    | 403    | 411    | 234   | 215 | 341 | 275                  | 161                 | 115                   | -                    | -                         | -                         | -                            | -                   | -                            | -   |
| 14,00        | 319         | 234       | 244   | 239 | 236    | 261   | 388 | 321    | 398    | 405    | 231   | 216 | 338 | 274                  | 161                 | 115                   | -                    | -                         | -                         | -                            | -                   | -                            | -   |
| 14,20        | 312         | 181       | 243   | 237 | 232    | 256   | 379 | 313    | 389    | 397    | 227   | 214 | 333 | 271                  | 157                 | 112                   | -                    | -                         | -                         | -                            | -                   | -                            | -   |
| 15,00        | 953         | 672       | 452   | 440 | 229    | 365   | 417 | 844    | 556    | 484    | 354   | 231 | 404 | 266                  | 156                 | 116                   | 4                    | 0,37                      | 0,36                      | 0,36                         | 0,65                | 0,6                          | 62  |

Продолжение табл.4.12

| Время        | Температура |           |       |      |        |       |      |        |        |        |  |     |     |                      |                       | Разрежение за печью | Давление             |                           |                           |                              |                              | Расход газа на печь |      |
|--------------|-------------|-----------|-------|------|--------|-------|------|--------|--------|--------|--|-----|-----|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|------|
|              | печи        | заготовки |       |      | свода  |       |      | стенки |        |        | охлаждающих газов<br>в<br>дымоотводящих<br>каналах |     |     | поверхности<br>свода | поверхности<br>стенки |                     | газа в<br>магистрالي | газа перед<br>горелкой №1 | газа перед<br>горелкой №2 | воздуха перед<br>горелкой №1 | воздуха перед<br>горелкой №2 |                     |      |
|              |             | х=1       | х=0,5 | х=0  | х=0,02 | х=0,5 | х=1  | х=1    | х=0,66 | х=0,35 |  |     |     |                      |                       |                     |                      |                           |                           |                              |                              |                     | х=0  |
| часы,<br>мин | °C          | °C        | °C    | °C   | °C     | °C    | °C   | °C     | °C     | °C     | °C   | °C  | °C  | °C                   | мм. в.<br>ст.         | бар                 | бар                  | бар                       | бар                       | бар                          | м <sup>3</sup> (н)/<br>ч     |                     |      |
| 15,10        | 990         | 829       | 584   | 549  | 231    | 414   | 766  | 901    | 597    | 507    | 377  | 235 | 431 | 334                  | 156                   | 117                 | 4                    | 0,37                      | 0,36                      | 0,36                         | 0,65                         | 1,6                 | 62   |
| 15,15        | 1034        | 909       | 688   | 648  | 236    | 418   | 804  | 965    | 636    | 530    | 395  | 239 | 463 | 355                  | 156                   | 118                 | 4                    | 0,37                      | 0,36                      | 0,36                         | 0,05                         | 1,9                 | 62   |
| 15,20        | 1092        | 992       | 770   | 729  | 236    | 435   | 874  | 1018   | 671    | 556    | 415  | 242 | 506 | 381                  | 151                   | 120                 | 4,1                  | 0,37                      | 0,36                      | 0,36                         | 1,2                          | 1,8                 | 62   |
| 15,30        | 1113        | 1049      | 875   | 800  | 247    | 458   | 930  | 1060   | 691    | 573    | 431  | 247 | 531 | 405                  | 151                   | 120                 | 4,1                  | 0,37                      | 0,36                      | 0,36                         | 1,2                          | 2,0                 | 62   |
| 15,45        | 1157        | 1119      | 1082  | 948  | 265    | 476   | 1015 | 1120   | 744    | 593    | 462  | 253 | 578 | 442                  | 154                   | 120                 | 4,1                  | 0,37                      | 0,36                      | 0,36                         | 1,2                          | 2,1                 | 62   |
| 16,00        | 1215        | 1182      | 1106  | 1050 | 284    | 506   | 1135 | 1183   | 783    | 642    | 479  | 259 | 610 | 479                  | 158                   | 121                 | 4,1                  | 0,37                      | 0,36                      | 0,36                         | 1,2                          | 2,1                 | 62   |
| 16,15        | 1218        | 1205      | 1169  | 1121 | 306    | 531   | 1194 | 1202   | 803    | 650    | 489  | 266 | 643 | 514                  | 162                   | 122                 | 4,1                  | 0,37                      | 0,36                      | 0,36                         | 1,2                          | 1,2                 | 62   |
| 16,30        | 1271        | 1250      | 1202  | 1166 | 330    | 545   | 1252 | 1244   | 845    | 684    | 508  | 274 | 672 | 545                  | 170                   | 123                 | 4,1                  | 0,37                      | 0,36                      | 0,36                         | 1,2                          | 1,2                 | 62   |
| 16,45        | 1254        | 1300      | 1242  | 1206 | 352    | 586   | 1317 | 1271   | 860    | 684    | 490  | 277 | 683 | 567                  | 178                   | 122                 | 4,1                  | 0,37                      | 0,36                      | 0,36                         | 1,2                          | 1,2                 | 62   |
| 17,00        | 1252        | 1252      | 1250  | 1219 | 374    | 599   | 1285 | 1231   | 851    | 655    | 456  | 278 | 681 | 578                  | 187                   | 123                 | 4,1                  | 0,37                      | 0,36                      | 0,36                         | 0,5                          | 1                   | 62   |
| 17,15        | 1266        | 1261      | 1260  | 1219 | 390    | 588   | 1319 | 1248   | 900    | 729    | 529  | 290 | 728 | 595                  | 196                   | 123                 | 4                    | 0,37                      | 0,36                      | 0,36                         | 0,5                          | 1                   | 62   |
| 17,30        | 1286        | 1274      | 1274  | 1204 | 401    | 588   | 1345 | 1271   | 929    | 766    | 563  | 302 | 753 | 624                  | 206                   | 125                 | 4                    | 0,37                      | 0,36                      | 0,36                         | 0,5                          | 1                   | 62   |
| 17,45        | 1293        | 1284      | 1264  | 1209 | 429    | 656   | 1358 | 1263   | 866    | 644    | 378  | 283 | 693 | 611                  | 215                   | 121                 | 4                    | 0,37                      | 0,37                      | 0,37                         | 0,5                          | 0,1                 | 62   |
| 18,00        | 1234        | 1245      | 1259  | 1190 | 441    | 655   | 1332 | 1231   | 871    | 635    | 362  | 282 | 686 | 595                  | 223                   | 117                 | 4                    | 0,38                      | 0,22                      | 0                            | 0                            | 0                   | 25,4 |

Продолжение табл.4.12

| Время        |      | Температура |       |      |           |       |      |       |        |        |        |     |     |   |               | Разрежение за печью |     | Давление             |      |                       |      |                          | Расход газа на печь |                           |                           |                              |                              |  |
|--------------|------|-------------|-------|------|-----------|-------|------|-------|--------|--------|--------|-----|-----|---|---------------|---------------------|-----|----------------------|------|-----------------------|------|--------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|--|
|              |      | печи        |       |      | заготовки |       |      | свода |        |        | стенки |     |     | ухляющих газов<br>в<br>дымоотводящих<br>каналах |               |                     |     | поверхности<br>свода |      | поверхности<br>стенки |      | газа в<br>магистралах    |                     | газа перед<br>горелкой №1 | газа перед<br>горелкой №2 | воздуха перед<br>горелкой №1 | воздуха перед<br>горелкой №2 |  |
|              |      | x=1         | x=0,5 | x=0  | x=0,02    | x=0,5 | x=1  | x=1   | x=0,66 | x=0,35 | x=0    |     |     |   |               |                     |     |                      |      |                       |      |                          |                     |                           |                           |                              |                              |  |
| часы,<br>мин | °C   | °C          | °C    | °C   | °C        | °C    | °C   | °C    | °C     | °C     | °C     | °C  | °C  | °C  | мм. в.<br>ст. | бар                 | бар | бар                  | бар  | бар                   | бар  | м <sup>3</sup> (н)/<br>ч |                     |                           |                           |                              |                              |  |
| 18,15        | 1212 | 1218        | 1237  | 1172 | 447       | 656   | 1314 | 1194  | 870    | 644    | 343    | 281 | 679 | 562   | 231           | 119                 | 3,8 | 0,38                 | 0,22 | 0                     | 0    | 0                        | 25,4                |                           |                           |                              |                              |  |
| 18,30        | 1197 | 1200        | 1211  | 1158 | 457       | 660   | 1304 | 1180  | 873    | 648    | 338    | 282 | 674 | 544   | 240           | 118                 | 3,9 | 0,4                  | 0,22 | 0                     | 0    | 0                        | 25,4                |                           |                           |                              |                              |  |
| 18,45        | 1206 | 1212        | 1224  | 1173 | 461       | 660   | 1305 | 1184  | 877    | 658    | 333    | 283 | 675 | 545   | 244           | 117                 | 4   | 0,4                  | 0,22 | 0                     | 0    | 0                        | 25,4                |                           |                           |                              |                              |  |
| 19,00        | 1243 | 1240        | 1225  | 1186 | 467       | 675   | 1324 | 1217  | 882    | 656    | 334    | 285 | 678 | 565   | 246           | 117                 | 4   | 0,38                 | 0,37 | 0                     | 0,15 | 0                        | 32,6                |                           |                           |                              |                              |  |
| 19,15        | 1253 | 1250        | 1240  | 1198 | 474       | 682   | 1331 | 1232  | 891    | 668    | 337    | 286 | 682 | 570   | 254           | 117                 | 4   | 0,38                 | 0,36 | 0                     | 0,15 | 0                        | 32,3                |                           |                           |                              |                              |  |
| 19,30        | 1275 | 1268        | 1254  | 1216 | 486       | 694   | 1352 | 1255  | 904    | 678    | 357    | 291 | 694 | 575   | 263           | 116                 | 4   | 0,37                 | 0,36 | 0,21                  | 0,16 | 0,6                      | 57,3                |                           |                           |                              |                              |  |
| 19,45        | 1274 | 1260        | 1262  | 1204 | 497       | 704   | 1367 | 1255  | 914    | 683    | 341    | 286 | 695 | 568   | 273           | 116                 | 4   | 0,37                 | 0,22 | 0,215                 | 0,16 | 0,5                      | 50,5                |                           |                           |                              |                              |  |
| 20,00        | 1255 | 1234        | 1254  | 1204 | 502       | 703   | 1365 | 1243  | 916    | 688    | 343    | 285 | 703 | 557   | 272           | 115                 | 4   | 0,4                  | 0,3  | 0                     | 0,16 | 0                        | 29,6                |                           |                           |                              |                              |  |
| 20,15        | 1252 | 1295        | 1244  | 1201 | 510       | 706   | 1366 | 1238  | 921    | 693    | 344    | 288 | 707 | 569   | 278           | 118                 | 4   | 0,4                  | 0,3  | 0                     | 0,18 | 0                        | 29,6                |                           |                           |                              |                              |  |
| 20,30        | 1250 | 1221        | 1234  | 1200 | 506       | 696   | 1350 | 1238  | 924    | 696    | 327    | 282 | 700 | 566   | 285           | 116                 | 4   | 0,4                  | 0,3  | 0                     | 0,18 | 0                        | 29,6                |                           |                           |                              |                              |  |
| 20,45        | 1234 | 1283        | 1180  | 1177 | 523       | 709   | 1362 | 1228  | 928    | 701    | 329    | 281 | 694 | 564   | 288           | 116                 | 4   | 0,4                  | 0,3  | 0                     | 0,18 | 0                        | 29,6                |                           |                           |                              |                              |  |
| 00,00        | 722  | -           | -     | -    | 531       | 582   | 952  | 724   | 812    | 715    | 386    | 291 | 458 | 269   | 321           | 136                 | 0   | -                    | -    | -                     | -    | -                        | -                   |                           |                           |                              |                              |  |
| 00,30        | 691  | -           | -     | -    | 516       | 553   | 902  | 692   | 782    | 702    | 387    | 290 | 449 | 265   | 318           | 139                 | -   | -                    | -    | -                     | -    | -                        | -                   |                           |                           |                              |                              |  |

| Время | Температура |    |    |           |     |     |       |     |     |        |     |     |  |                      |                       | Разрежение за печью | Давление              |                           |                           |                              |                              | Расход газа на печь |    |               |     |     |
|-------|-------------|----|----|-----------|-----|-----|-------|-----|-----|--------|-----|-----|--|----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|----|---------------|-----|-----|
|       | печи        |    |    | заготовки |     |     | свода |     |     | стенки |     |     | ухлодящих газов<br>в<br>дымоотводящих<br>каналах | поверхности<br>свода | поверхности<br>стенки |                     | газа в<br>магистралаи | газа перед<br>горелкой №1 | газа перед<br>горелкой №2 | воздуха перед<br>горелкой №1 | воздуха перед<br>горелкой №2 |                     |    |               |     |     |
|       | °C          | °C | °C | °C        | °C  | °C  | °C    | °C  | °C  | °C     | °C  | °C  |  |                      |                       |                     |                       |                           |                           |                              |                              |                     | °C | мм. в.<br>ст. | бар | бар |
| 2,02  | 603         | -  | -  | -         | 472 | 499 | 785   | 600 | 711 | 664    | 383 | 287 | 437  | 274                  | 300                   | 146                 | -                     | -                         | -                         | -                            | -                            | -                   | -  | -             | -   |     |
| 5,00  | 506         | -  | -  | -         | 404 | 428 | 658   | 510 | 618 | 596    | 357 | 278 | 400  | 249                  | 264                   | 147                 | -                     | -                         | -                         | -                            | -                            | -                   | -  | -             | -   | -   |
| 6,00  | 469         | -  | -  | -         | 382 | 402 | 613   | 468 | 585 | 572    | 339 | 282 | 385  | 224                  | 250                   | 144                 | -                     | -                         | -                         | -                            | -                            | -                   | -  | -             | -   | -   |
| 7,00  | 428         | -  | -  | -         | 358 | 344 | 568   | 429 | 555 | 548    | 324 | 284 | 376  | 224                  | 236                   | 142                 | -                     | -                         | -                         | -                            | -                            | -                   | -  | -             | -   | -   |
| 8,00  | 401         | -  | -  | -         | 337 | 351 | 531   | 404 | 529 | 527    | 321 | 282 | 366  | 222                  | 223                   | 137                 | -                     | -                         | -                         | -                            | -                            | -                   | -  | -             | -   | -   |
| 9,00  | 376         | -  | -  | -         | 318 | 333 | 500   | 384 | 504 | 505    | 308 | 279 | 358  | 218                  | 214                   | 134                 | -                     | -                         | -                         | -                            | -                            | -                   | -  | -             | -   | -   |
| 10,00 | 353         | -  | -  | -         | 299 | 314 | 469   | 357 | 477 | 481    | 353 | 278 | 348  | 212                  | 200                   | 130                 | -                     | -                         | -                         | -                            | -                            | -                   | -  | -             | -   | -   |
| 11,00 | 339         | -  | -  | -         | 281 | 298 | 444   | 343 | 455 | 459    | 339 | 275 | 336  | 219                  | 188                   | 127                 | -                     | -                         | -                         | -                            | -                            | -                   | -  | -             | -   | -   |
| 12,00 | 301         | -  | -  | -         | 262 | 275 | 413   | 301 | 435 | 444    | 301 | 271 | 314  | 180                  | 174                   | 122                 | -                     | -                         | -                         | -                            | -                            | -                   | -  | -             | -   | -   |

Производительность печи только по периоду нагрева металла (4.2):

$$G_n = \frac{34,7 \cdot 24}{3} = 278 \text{ кг/ч}, \text{ то есть } 56 \% \text{ от проектной}$$

производительности.

Газ на горение подавался в печь в соответствии с графиком, представленным на рис. 4.28. Расход газа определялся по регулировочным характеристикам горелок, полученным в результате испытаний [107].

Средневзвешенное значение расхода топлива за время нагрева иковки (рис. 4.28):

$$B = \frac{62 \cdot 3 + 25,4 \cdot 1 + 32,6 \cdot 0,25 + 32,3 \cdot 0,25 + 57,3 \cdot 0,25 + 50,5 \cdot 0,25 + 29,6 \cdot 0,2}{3 + 4} =$$

$$= 44,8 \frac{\text{м}^3(\text{н})}{\text{ч}} = 0,0124 \frac{\text{м}^3(\text{н})}{\text{с}}$$

Удельный расход топлива за время испытания составил (4.3):

$$b_y = \frac{44,8}{119} = 0,376 \text{ м}^3(\text{н})/\text{кг}.$$

В соответствии с проектной технической характеристикой печи удельный расход топлива должен быть равен:

$$b_y^{np} = \frac{90}{500} = 0,18 \text{ м}^3(\text{н})/\text{кг}.$$

Таким образом, в сравнении с проектными данными перерасход топлива на печь составляет 109 %.

Температура поверхности металла  $T_n$  и перепад температур по сечению металла  $\Delta T_k$  в момент выдачи первой заготовки составляли:  $T_n^H = 1280^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_n^H = 70^\circ\text{C}$ ; в момент выдачи последней заготовки – соответственно

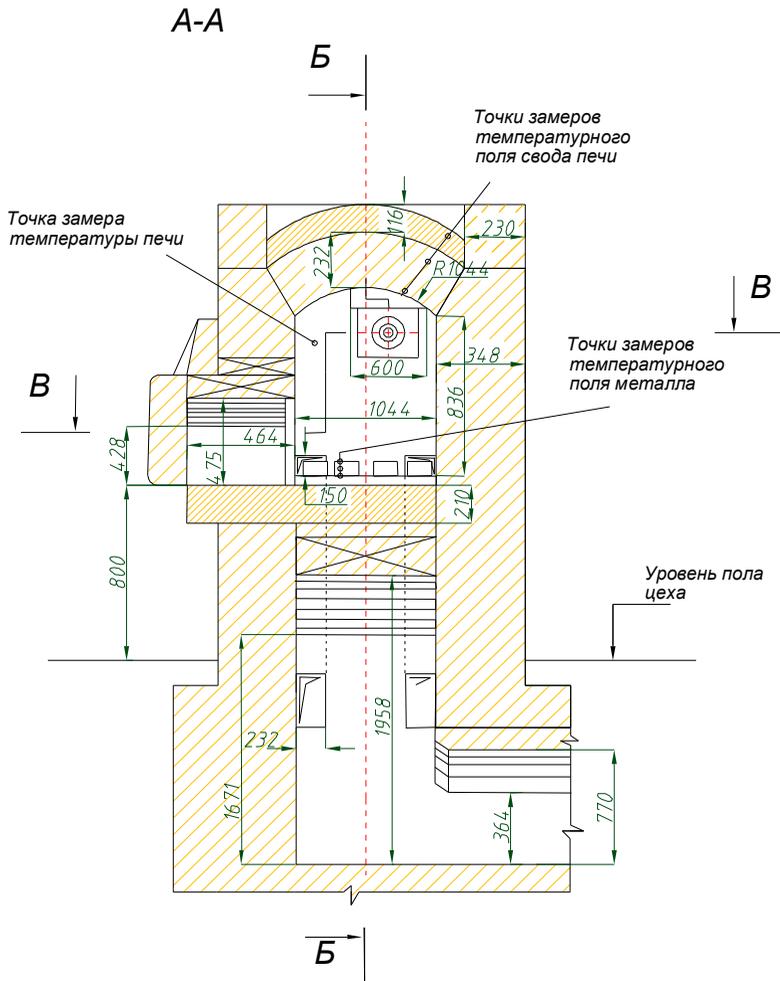


Рис. 4.25. Поперечный разрез печи

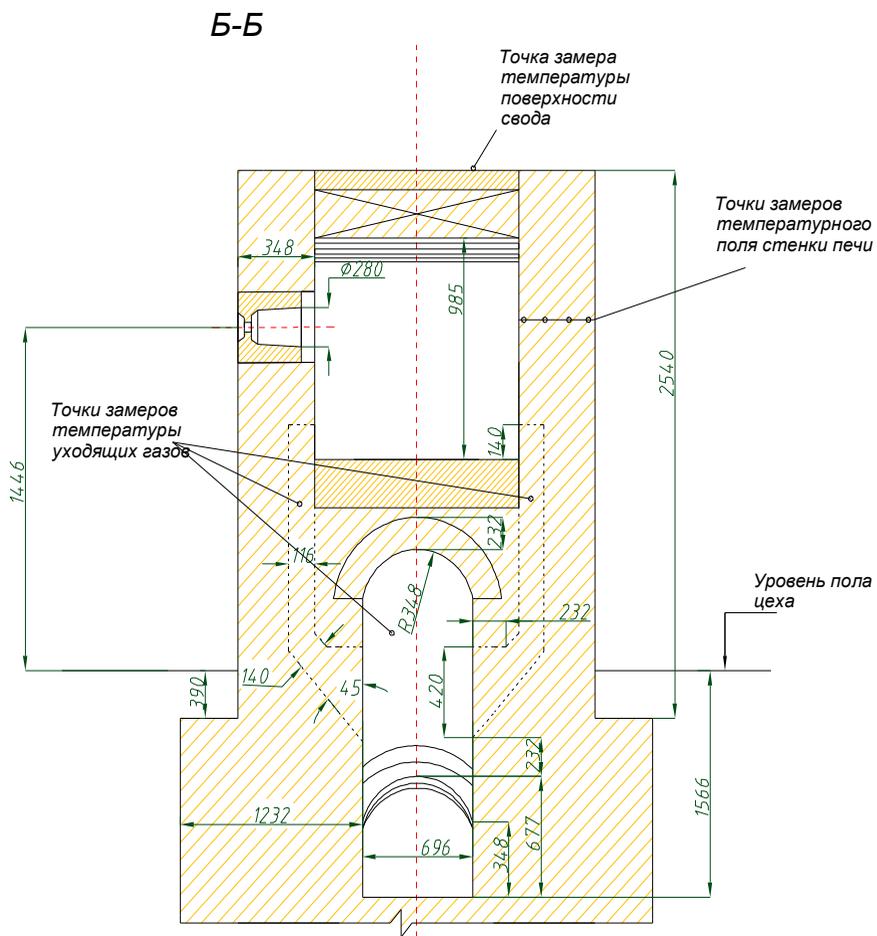


Рис. 4.26. Продольный разрез печи

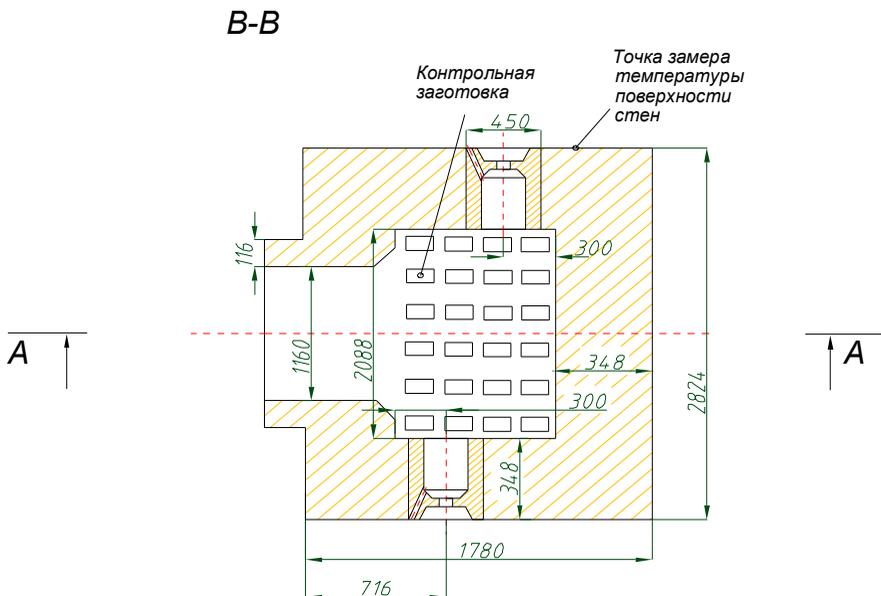


Рис. 4.27. Схемы расположения заготовок печи № 5

$T_n^к = 1235^{\circ}C$ ,  $\Delta T_n^к = 30^{\circ}C$ . Максимальный перепад температур по сечению металла на начальном участке нагрева  $\Delta T_{\max} = 200^{\circ}C$ . Он соответствует моменту времени 15,00.

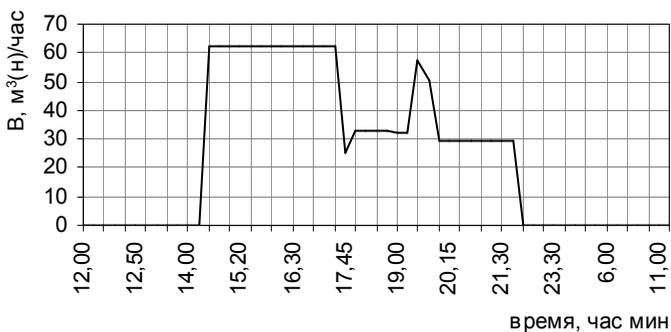


Рис. 4.28. График подачи газа на печь № 5

Распределение температурного поля в кладке печи № 5 представлено на рис. 4.30.

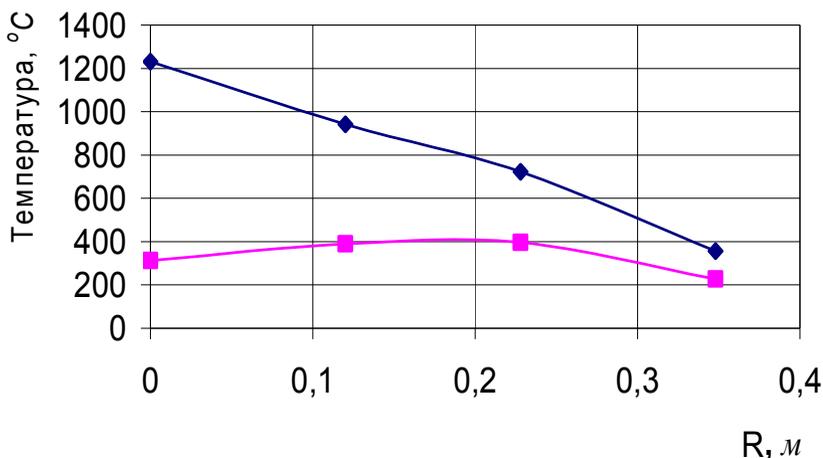


Рис. 4.29. Распределение температурного поля в кладке печи № 5: —■— в момент розжига печи; —◆— в момент отключения печи

#### 4.2.2. Применение нейросетевой технологии при определении параметров качества нагрева заготовок в камерных печах при недостатке экспериментальных данных

При решении этой задачи необходимо собрать данные для обучения, которые представляют собой значения входных и выходных параметров. На первоначальной стадии обучения сети в набор включают все переменные, которые могут влиять на конечный результат. Обучение нейросети осуществляется по экспериментальным данным камерных нагревательных печей №2 и №5. В качестве переменных, влияющих на температуру поверхности и центра заготовки, используются:

- отношение объема рабочего пространства печи к объему нагреваемых в ней заготовок,  $V_{pn} / V_3$ ;
- количество заготовок, находящихся в печи в данный момент,  $n$ ;
- группа стали,  $m$ ;
- отношение теплоты, аккумулированной кладкой печи, к химической теплоте сгорания топлива,  $Q_{акк} / Q$ .

Выходными параметрами являются параметры качества нагрева заготовок (на основании табл. 4.7, 4.10, 4.12).

Значения всех величин, используемых для расчета входных переменных для обучения нейросети, приведены в табл. 4.13.

Объем рабочего пространства печи определялся по формуле:

$$V_{pn} = B \cdot L \cdot H, \quad (4.9)$$

где  $B$ ,  $L$ ,  $H$  – соответственно ширина, длина и высота рабочего пространства,  $m$ .

Объем заготовок вычислялся по формуле:

$$V_3 = P_3 \cdot n, \quad (4.10)$$

где  $P_3$  – объем одной заготовки,  $m^3$ ;  $n$  – количество заготовок, которое изменяется в процессе времениковки от максимального до минимального количества.

В печи №2 нагреваются 3 садки металла. Число заготовок в 1-ой садке – 40 шт., во 2-ой – 41 шт., в 3-ей – 40 шт. В печи №5 нагревается одна садка металла, состоящая из 24-х заготовок.

Группа стали классифицируется по сложности процесса деформации при операциях свободнойковки [108]. Сталь марки 9Х2МФ относится к четвертой группе, а сталь 40х ко второй группе.

**Таблица 4.13.** База входных данных

| Наименование показателя  | Печь №2              |                      |                      | Печь №5               |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
|  | 1-я садка            | 2-я садка            | 3-я садка            |                       |
| 1  | 2                    | 3                    | 4                    | 5                     |
| $V_{\text{рп}}, \text{м}^3$  | 0,4155               | 0,4155               | 0,4155               | 2,147                 |
| Максимальное число заготовок   | 40                   | 41                   | 40                   | 24                    |
| Минимальное число заготовок  | 1                    | 1                    | 1                    | 1                     |
| Максимальный объем заготовок, $\text{м}^3$   | 0,00746              | 0,00764              | 0,00746              | 0,106                 |
| Минимальный объем заготовок, $\text{м}^3$  | $1,86 \cdot 10^{-4}$ | $1,86 \cdot 10^{-4}$ | $1,86 \cdot 10^{-4}$ | $44,16 \cdot 10^{-4}$ |
| Группа стали   | 2                    | 2                    | 2                    | 4                     |
| $Q_p^H, \text{МДж}/\text{м}^3$   | 35,88                | 35,88                | 35,88                | 35,88                 |
| Время нагрева, с   | 3300                 | 1800                 | 3840                 | 10800                 |
| Суммарное время ковки, с   | 2100                 | 1800                 | 1560                 | 14400                 |
| Расход газа за период нагрева $V_n, \text{м}^3/\text{с}$   | 0,0051               | 0,0013               | 0,0006               | 0,0172                |
| Расход газа за период ковки $V_{\text{к}}, \text{м}^3/\text{с}$  | 0,0051               | 0,0050               | 0,0049               | 0,0084                |
| Теплота сгорания топлива за время нагрева, $\text{МДж}$  | 603,86               | 87,09                | 82,67                | 6665,07               |
| Изменение средней внутренней температуры кладки за период нагрева, $T_{\text{кл}}^H - T_{\text{кл}}^K, ^\circ\text{C}$ | 353 – 522,8          | 622 – 654,7          | 714,6 – 701,9        | 844 – 1273            |

Окончание табл. 4.13

| Наименование показателя   | Печь №2       |               |               | Печь №5     |
|---|---------------|---------------|---------------|-------------|
|   | 1-я садка     | 2-я садка     | 3-я садка     |             |
| Изменение средней внутренней температуры кладки за период ковки,<br>$T_{кл}^H - T_{кл}^K, \text{ } ^\circ\text{C}$                    | 522,8 – 605,6 | 654,7 – 692,3 | 701,9 – 726,4 | 1273 – 1216 |
| Коэффициент теплопроводности для материала кладки, при средней температуре во время нагрева,<br>$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ | 1,09          | 1,21          | 1,26          | 1,39        |
| Удельная теплоёмкость материала кладки, при средней температуре во время нагрева,<br>$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$           | 980,7         | 1024,8        | 1045,2        | 1100        |
| Плотность материала кладки, $\text{кг}/\text{м}^3$  | 2550          | 2550          | 2550          | 2550        |
| Внутренняя площадь кладки, $\text{м}^2$   | 2,87          | 2,87          | 2,87          | 8,33        |
| Энергия, полученная за счёт аккумуляции кладкой за время нагрева и ковки заготовок,<br>$\text{МДж}$                                   | 34,665        | 5,31          | -3,10         | 549,98      |
| Коэффициент теплопроводности для материала кладки, при средней температуре во время нагрева,<br>$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ | 1,18          | 1,23          | 1,26          | 1,41        |
| Удельная теплоёмкость материала кладки, при средней температуре во время нагрева,<br>$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$           | 1013,4        | 1034,1        | 1048,9        | 1112,7      |

Потери теплоты на аккумуляцию печи вычислялись по формуле [109]:

$$Q_{акк} = 0,75 \cdot (T_{кл.н} - T_{кл.к}) \cdot \sqrt{\lambda(T) \cdot c(T) \cdot \rho \cdot \tau} \cdot F_{кл}^{вн}, \quad (4.11)$$

где  $T_{кл.н}, T_{кл.к}$  – температуры внутренней поверхности кладки печи в начале и в конце рассматриваемого промежутка времени,  $K$ ;  $\tau$  – рассматриваемый промежуток времени,  $c$ ;  $F_{кл}^{вн}$  – внутренняя поверхность кладки печи,  $m^2$ ;  $\lambda(T)$ ,  $c(T)$ ,  $\rho$  – соответственно коэффициент теплопроводности, удельной массовой теплоёмкости и плотности кладки, определяемые по формулам (4.13 – 4.14) для шамотного кирпича при средней за время  $\tau$  температуре поверхности кладки  $T_{кл.ср}$ ,  $K$ , которая определялась по формуле

$$T_{кл.ср} = 0,5 \cdot (T_{кл.н} + T_{кл.к}) . \quad (4.12)$$

$$\lambda(T) = 0,84 - 0,00058 \cdot T, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad (4.13)$$

$$c(T) = 0,23 \cdot T + 880, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad (4.14)$$

Плотность кладки принималась величиной постоянной  $\rho = 2550 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Тепловая энергия химической теплоты сгорания топлива [109]:

$$Q = V \cdot Q_p^н \cdot \tau, \quad (4.15)$$

где  $V$  – расход газа за время  $\tau$ ,  $m^3(н)/с$ ;  $Q_p^н$  – низшая теплота сгорания топлива,  $MДж}/\text{м}^3$ .

Перед началом моделирования на основе таблиц 4.7, 4.12, 4.13 создается обобщенная база данных в виде таблицы Microsoft Excel (табл. 4.14).

**Таблица 4.14.** Экспериментальные данные для обучения нейросети по определению температуры поверхности металла в конце нагрева

| Группа стали | n  | $V_{pn} / V_3$ | $Q_{акк} / Q$ | $T_m^{нов}$ |
|--------------|----|----------------|---------------|-------------|
| 4            | 24 | 20,25          | 0,082         | 1245        |
| 4            | 20 | 24,21          | 0,07          | 1210        |
| 4            | 16 | 30,27          | 0,065         | 1255        |
| 4            | 12 | 40,36          | 0,056         | 1234        |
| 4            | 8  | 60,54          | 0,051         | 1259        |
| 4            | 4  | 121,08         | 0,48          | 1233        |
| 4            | 1  | 484,3          | 0,045         | 1233        |
| 2            | 40 | 55,7           | 0,061         | 1112        |
| 2            | 35 | 63,65          | 0,057         | 1119        |
| 2            | 30 | 74,26          | 0,54          | 1126        |
| 2            | 25 | 89,12          | 0,51          | 1135        |
| 2            | 20 | 111,4          | 0,049         | 1147        |
| 2            | 15 | 148,52         | 0,047         | 1154        |
| 2            | 10 | 222,8          | 0,045         | 1160        |
| 2            | 5  | 445,6          | 0,044         | 1165        |
| 2            | 1  | 2228           | 0,042         | 1179        |
| 2            | 41 | 54,38          | 0,046         | 1106        |
| 2            | 35 | 63,65          | 0,32          | 1114        |
| 2            | 30 | 74,26          | 0,028         | 1121        |
| 2            | 25 | 89,12          | 0,024         | 1128        |
| 2            | 20 | 111,4          | 0,021         | 1135        |
| 2            | 15 | 148,52         | 0,019         | 1145        |
| 2            | 10 | 222,8          | 0,017         | 1153        |
| 2            | 5  | 445,6          | 0,016         | 1160        |
| 2            | 1  | 2228           | 0,015         | 1167        |
| 2            | 40 | 55,7           | -0,04         | 1144        |
| 2            | 35 | 63,65          | -0,027        | 1149        |
| 2            | 30 | 74,26          | -0,02         | 1153        |
| 2            | 25 | 89,12          | -0,016        | 1156        |

| Группа стали | n  | $V_{pn} / V_z$ | $Q_{акк} / Q$ | $T_m^{нов}$ |
|--------------|----|----------------|---------------|-------------|
| 2            | 20 | 111,4          | -0,012        | 1159        |
| 2            | 15 | 148,52         | -0,01         | 1166        |
| 2            | 10 | 222,8          | -0,008        | 1171        |
| 2            | 5  | 445,6          | -0,006        | 1176        |
| 2            | 1  | 2228           | -0,005        | 1181        |

Для получения более точного результата строки таблицы перемешиваются. Входными данными для нейросети являются: отношение объема рабочего пространства печи к объему нагреваемых в ней заготовок; количество заготовок, находящихся в печи в данный момент; группа стали; отношение теплоты, аккумулированной кладкой печи, к химической теплоте сгорания топлива. Выходными данными сети является температура поверхности заготовок. Для обучения используется нейронную модель многослойный перцептрон с двумя скрытыми слоями. После создания нейросети происходит ее обучение.

Проверка нейронной сети осуществляется на выборке, которая использовалась при обучении нейросети. Итоговую модель, обученную и протестированную, можно использовать для определения температуры поверхности заготовок. Для этого необходимо запустить файл с соответствующей моделью нейросети. В столбцах исходных данных вводятся заданное значение отношения объема рабочего пространства печи к объему нагреваемых в ней заготовок; определенное количество заготовок, находящихся в печи в данный момент; группы стали; отношения теплоты, аккумулированной кладкой печи, к химической теплоте сгорания топлива.

**Таблица 4.15.** Экспериментальные данные для проверки обученной нейросети по определению температуры поверхности металла в конце нагрева

| Группа стали | n  | $V_{pn} / V_3$ | $Q_{акк} / Q$ | $T_M^{нов}$<br>(нейросеть) | $T_M^{нов}$ |
|--------------|----|----------------|---------------|----------------------------|-------------|
| 2            | 25 | 89,12          | 0,024         | <b>1130,6</b>              | 1128        |
| 2            | 35 | 63,65          | 0,32          | <b>1112,8</b>              | 1114        |
| 2            | 1  | 2228           | 0,042         | <b>1179,5</b>              | 1179        |
| 2            | 25 | 89,12          | 0,51          | <b>1134,7</b>              | 1135        |
| 4            | 20 | 24,21          | 0,07          | <b>1210,7</b>              | 1210        |
| 2            | 35 | 63,65          | -0,027        | <b>1149,1</b>              | 1149        |
| 4            | 1  | 484,3          | 0,045         | <b>1233,1</b>              | 1233        |

Полученная нейросетевая модель обучена по экспериментальным данным камерных нагревательных печей [107] в диапазоне следующих параметров:

- объем рабочего пространства печи  $V_{pn}$  : 0,4155 – 2,147 м<sup>3</sup>;
- объём нагреваемых заготовок  $V_3$  : 1,86·10<sup>-4</sup> – 44,16·10<sup>-4</sup> м<sup>3</sup>;
- группа стали  $m$ : 2 – 4;
- число заготовок  $n$ : 1 – 41;
- расход газа  $B$  : 17,6 – 62 м<sup>3</sup>(н)/с;
- время нагрева  $\tau$ : 1800 – 10800 с;
- температура поверхности в момент выдачи первой заготовки  $T_k^n$  : 1091 – 1245 °С.

Эта нейросетевая модель позволяет прогнозировать один из параметров качества нагрева заготовок: температуру на поверхности металла в момент выдачи металла для операцийковки.

## 5. Применение нейросетевой технологии при прогнозировании точности вычисления параметров качества нагрева металла в камерных печах в пакете Phoenics

### 5.1. Математическая модель камерной кузнечной печи № 2 в многоцелевом вычислительном комплексе

В окне визуального редактора PHOENICS устанавливаются исходные данные для решения задачи. Сначала задаются размеры области изучения, в которой будут находиться кладка, металл и газ между ними. Для этого на панели управления областью и объектами, расположенной справа от окна визуального редактора, необходимо нажать на кнопку *'Menu'* («Меню»). В появившейся первой странице главного меню нажимается кнопка *'Geometry'* («Геометрия»). В строке *'Tolerance'* («Точность») устанавливается 0,001. Далее в *'Domain Size'* («Определяющий размер») задается: в X-директории - 1,624 м; в Y-директории - 1,276 м; в Z-директории - 1,92 м (рис. 5.1).

Далее в строке *'Time dependence'* («Временная зависимость») задается вместо *'Steady'* («Постоянная») *'Transient'* («Переменная»). Затем нажимается появившаяся кнопка *'Time step settings'* («Установки шага по времени»). Чтобы установить время нагрева 1-ой садки до момента выдачи первой заготовки, в строках *'Time at start of step1'* («Время начала первого шага») устанавливается 0 секунд; *'Time at end of last step'* («Время конца последнего шага») - 3300 секунд; *'First step number'* («Номер первого шага») - 1; *'Last step number'* («Номер последнего шага») - 33. В строке *'Power'* («Мощность») задается 1, *'Step power'* («Шаг мощности») устанавливается *'Free'* (рис. 5.2). Далее нажимаются

кнопки 'OK' для фиксации параметров настройки, и возвращаемся в главное меню.

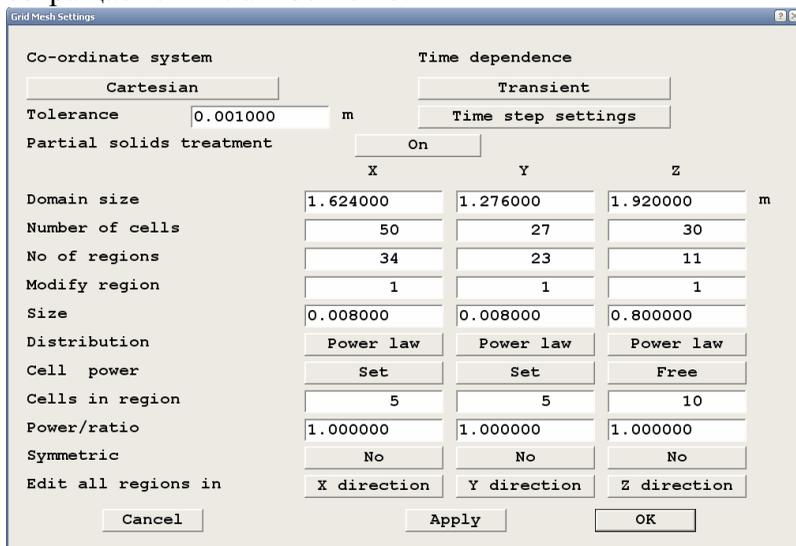


Рис. 5.1. Установка размеров области изучения

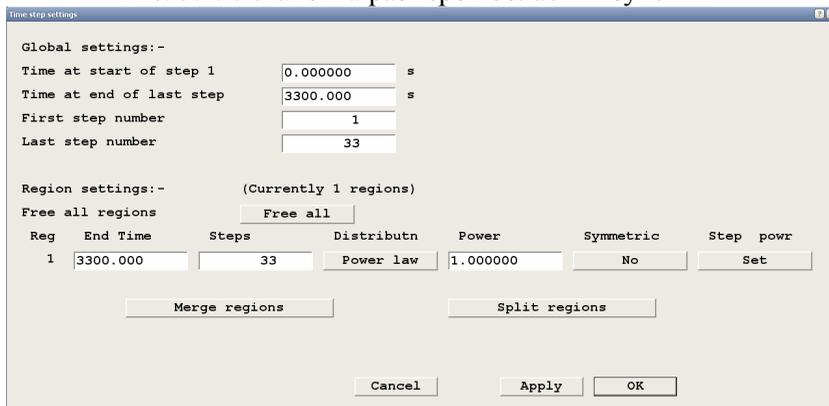


Рис. 5.2. Установка времени нагрева и количества шагов по времени

Для выбора физических процессов моделирования открывается страница 'Models' («Модели»). Чтобы активизировать вычисление температурного поля,

необходимо переключатель **'Energy Equation'** («Уравнение энергии») поставить в положение 'ON' нажатием на кнопку 'OFF' и затем выбрать **'Temperature'** («Температура»). Появившийся справа переключатель установить в положение **'TOTAL'** («Общая»). Далее выбирается модель турбулентности. Для этого в графе **'Turbulence models'** («Модели турбулентности») нажимается кнопка **'LAMINAR'** («Ламинарная»). В появившемся списке находим **'KLMODL'** («*k-l* модель»), которая является более точной для грубых сеток. Для активации расчета излучения нажимается кнопка **'OFF'** в графе **'Radiation models'** («Радиационные модели») и выбирается модель **'Immersol'**. Далее задаются параметры выбранной модели. С этой целью нажимается появившаяся справа кнопка **'Settings'**. В строках **'Absorbtion Coefficient per unit length'** («Коэффициент поглощения») и **'Scattering Coefficient per unit length'** («Коэффициент рассеяния») устанавливается значение 0,2 по рекомендациям [108] (рис. 5.3).

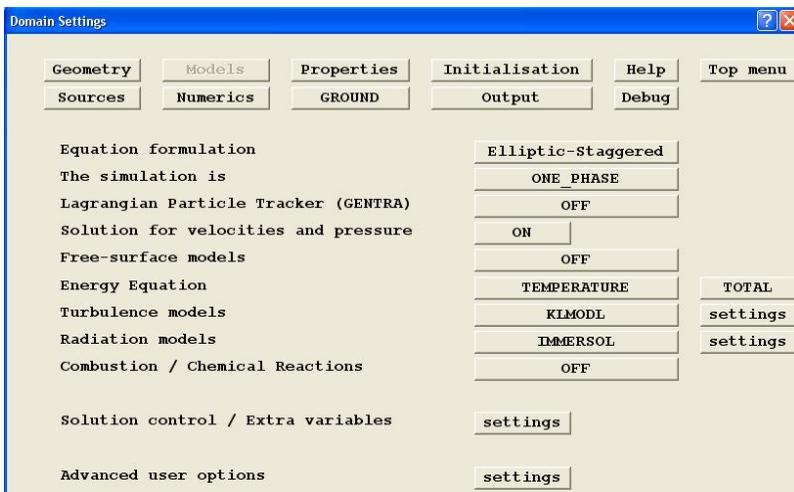


Рис. 5.3. Задание физических процессов моделирования

Затем с помощью блоков создается камерная кузнечная печь. Для этого на панели управления областью и объектами, расположенной справа от окна визуального редактора, необходимо нажать на кнопку **'Obj'** («Создание нового объекта»). В появившемся диалоговом окне в строке **'Name'** («Имя») присваиваем объекту имя **'PODINA'**. В графах **'Position'** («Координата») и **'Size'** («Размер») устанавливаются координаты и размеры данного объекта (рис. 5.4). Далее определяется тип объекта. В графе **'Type'** («Тип») устанавливается **'BLOCKAGE'** («Блок»). Для задания геометрической формы объекта в графе **'Geometry'** («Геометрия») нажимается кнопка **'default'** и выбирается папка **'SHAPES'** («Виды»). В появившемся списке находим **'CUBE14'**, то есть данный объект имеет форму куба (параллелепипеда). Нажимается кнопка «Открыть» для фиксации выбора. Для задания физических свойств объекта нажимается кнопка **'Attributes'** («Атрибуты»). В появившемся диалоговом окне в графе **'Types'** («Типы») выбирается материал **'Other Materials'** («Другие материалы»), **'Solids'** («Твердое вещество»). Нажимается **'OK'** и устанавливается **'102 Brick at 20 deg c'** («Кирпич»). Фиксируется выбранный материал. Для установки отсутствия теплоотдачи от наружной поверхности пода в строке **'Energy Source'** («Источник энергии») нажимается кнопка **'Adiabatic'** («Адиабатический»). В строке **'Emissivity'** («Степень черноты») устанавливается значение 0,7 [71]. Для задания начальной температуры пода в графе **'Initial Temperature'** («Начальная температура») нажимается кнопка **'No'** и устанавливается значение 416 K (табл. 4.7), так как заготовки помещаются в разогретую печь. Нажимается кнопка **'OK'** для сохранения настроек. Кроме этого данному объекту можно придать определенную окраску, чтобы он отчетливо просматривался. Для этого

нажимаются кнопки **‘Colour’** («Цвет»), **‘Default’**, **‘Based on default’**, **‘Choose’** («Выбрать»). Появляется цветовая палитра PHOENICS, где выбирается понравившийся цвет и фиксируется нажатием кнопки **‘OK’**. Далее сохраняются выбранные параметры.

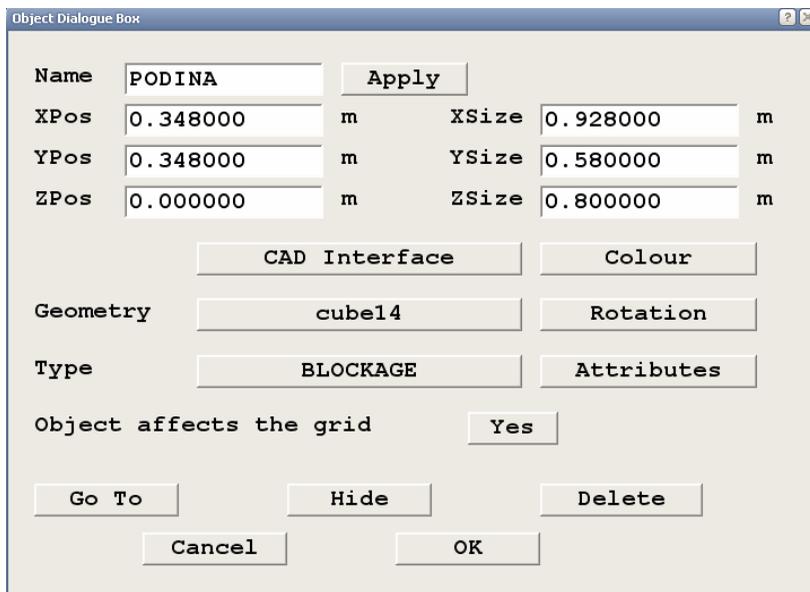


Рис. 5.4. Построение кладки печи

Затем аналогично создаются остальные объекты кладки печи согласно рис. 4.16 – 4.18. Для учета переменного температурного поля кладки печи в момент загрузки каждой садки необходимо разбить каждый элемент печи на несколько слоев. Например, торцевую стену делим на 4 слоя различной толщины:  $\Delta_1 = 0,08 \text{ м}$ ,  $\Delta_2 = 0,166 \text{ м}$ ,  $\Delta_3 = 0,166 \text{ м}$  и  $\Delta_4 = 0,08 \text{ м}$ , далее для каждого слоя задаем температуру в соответствии с табл. 4.7. Так, для начала периода нагрева 1 - ой садки

температура 1 - го слоя – 335 K, 2 - го – 420 K, 3 - го – 501 K, 4 - го – 626 K.

В торцевых стенах печи вырисовываются отверстия под горелку и два дымоотводящих канала. В одной из боковых стен располагается окно загрузки-выгрузки, которое для периода нагрева полностью закрыто заслонкой.

После построения кладки печи создаются заготовки в виде цилиндров, расположенные на поду (рис. 4.18). Для этого на панели управления областью и объектами необходимо нажать на кнопку **'Obj'**. В появившемся диалоговом окне в строке **'Name'** («Имя») присваиваем объекту имя **'ZAGOTOVKA'**. В графах **'Position'** («Координата») и **'Size'** («Размер») устанавливаются координаты и размеры данного объекта (рис. 5.5).

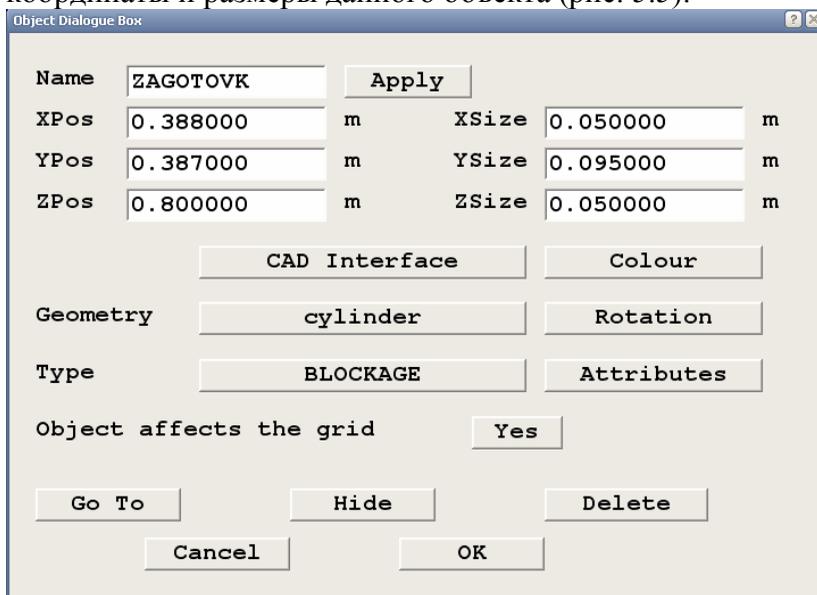


Рис. 5.5. Построение цилиндрической заготовки

Далее определяется тип объекта. В графе **'Type'** («Тип») устанавливается **'BLOCKAGE'** («Блок»). Для

задания геометрической формы объекта в графе **‘Geometry’** («Геометрия») нажимается кнопка **‘default’** и выбирается папка **‘SHAPES’** («Виды»). В появившемся списке находим **‘CULINDER’**, то есть данный объект имеет форму цилиндра. Нажимается кнопка «Открыть» для фиксации выбора. Для задания физических свойств объекта нажимается кнопка **‘Attributes’** («Атрибуты»). В появившемся диалоговом окне в графе **‘Types’** («Типы») выбирается материал **‘Other Materials’** («Другие материалы»), **‘Solids’** («Твердое вещество»). Нажимается ‘OK’ и устанавливается **‘111 Steel at 27 deg c (C=1%)’** («Сталь»). Фиксируется выбранный материал. Для установки отсутствия теплоотдачи от наружной поверхности металла в строке **‘Energy Source’** («Источник энергии») нажимается кнопка **‘Adiabatic’** («Адиабатический»). Далее в строке **‘Emissivity’** («Степень черноты») устанавливается значение 0,8 [71]. Для задания начальной температуры металла в графе **‘Initial Temperature’** («Начальная температура») нажимается кнопка **‘No’** и устанавливается значение 293 K, так как заготовки помещаются в разогретую печь холодными. Нажимается кнопка ‘OK’ для сохранения настроек.

Так как в печи по условиям эксперимента [107] нагреваются 40 заготовок, то для их построения используется кнопка **‘Duplicate using array’** на панели управления областью и объектами. Сначала выделяется объект, который необходимо продублировать (в данном случае это цилиндрическая заготовка). Затем нажимается кнопка **‘Duplicate using array’**, и в появившемся окне устанавливаются **‘Dimension’** и **‘Pitch’** (рис.5.6).

Полученная в результате модель печи с расположенными на поду заготовками и закрытой заслонкой представлена на рис. 5.7.

Для задания входных граничных условий (вход потока из горелки в рабочее пространство печи) в области моделирования необходимо нажать на кнопку **‘Obj’**. В появившемся диалоговом окне в графах **‘Position’** и **‘Size’** устанавливаются координаты и размеры данного объекта в виде плоскости. Далее определяется тип объекта.

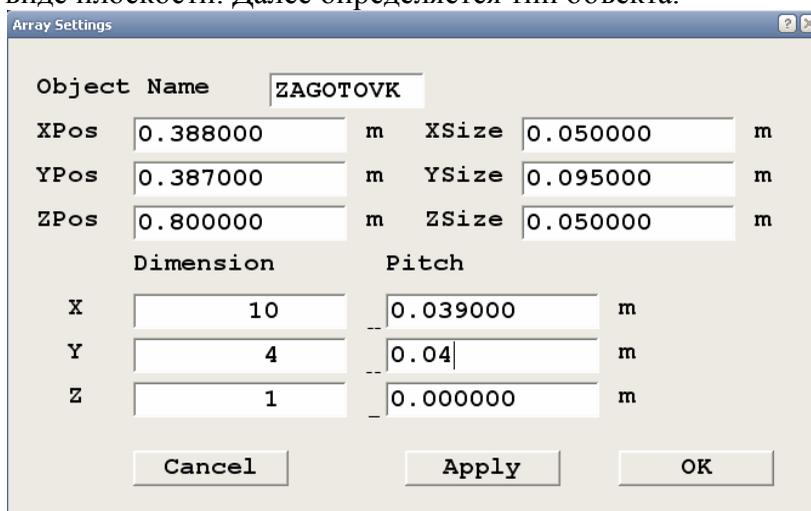


Рис. 5.6. Построение группы заготовок

В графе **‘Type’** («Тип») устанавливается **‘INLET’** («Вход»). Для задания физических свойств нажимается кнопка **‘Attributes’** («Атрибуты»). В появившемся диалоговом окне нажимается кнопка **‘Domain fluid’** («Область потока») и в соответствующих графах задаются плотность продуктов сгорания и действительная температура горения в рабочем пространстве печи, которые определяются из расчета (рис. 5.8).

Далее нажимается кнопка **‘Velocities’** («Скорости») и устанавливается значение расхода газа через горелку в период нагрева [107]. Нажимается кнопка **‘OK’** для сохранения настроек.

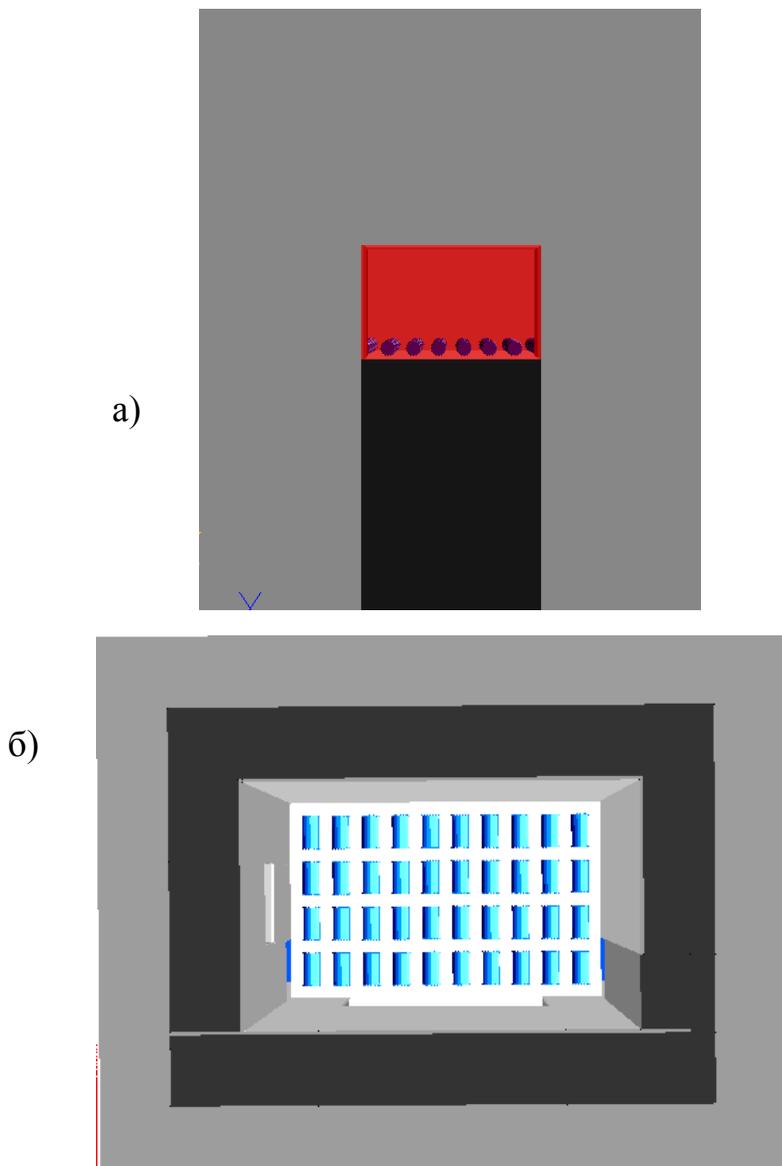


Рис. 5.7. Геометрическая модель камерной кузнечной печи в вычислительном комплексе PHOENICS  
а) вид со стороны загрузочного окна; б) вид сверху

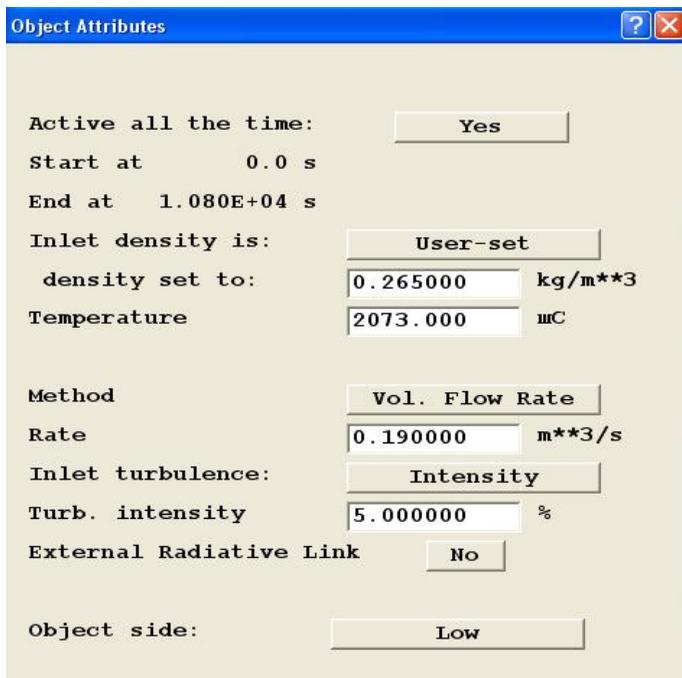


Рис. 5.8. Задание входных параметров потока

Затем задаются выходные граничные условия (выход потока из рабочего пространства печи через дымоотводящие каналы) из области моделирования. Для этого необходимо нажать на кнопку **‘Obj’**. В появившемся диалоговом окне в графах **‘Position’** («Координата») и **‘Size’** («Размер») устанавливаются координаты и размеры данного объекта в виде плоскости.

Далее определяется тип объекта. В графе **‘Type’** («Тип») устанавливается **‘OUTLET’** («Выход»). Для задания физических свойств нажимается кнопка **‘Attributes’** («Атрибуты»). В появившемся диалоговом окне фиксируются значения по умолчанию нажатием кнопки **‘OK’**. Аналогичным образом задаются выходные условия для остальных дымоотводящих каналов (рис. 5.9).

Для всех материалов, используемых при решении задачи, были установлены переменные в зависимости от температуры теплофизические свойства с помощью модуля In-Form. Для того чтобы активировать модуль In-Form, в меню редактирования свойств доменной области нажимается кнопка **'Properties'** («Свойства»).

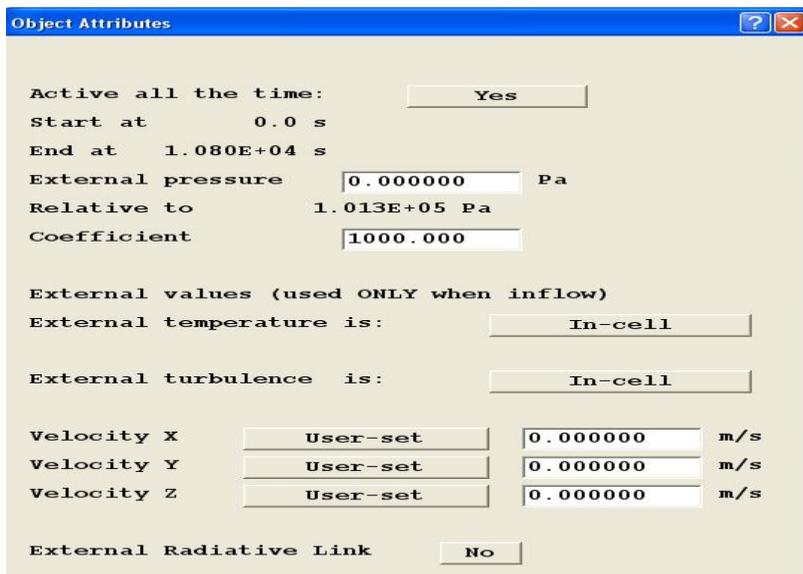


Рис. 5.9. Задание выходных параметров потока

В строке **'InForm-Group 9'** нажимается кнопка **'edit InForm'**. Появляется окно редактора модуля InForm для группы 9 (рис.5.10). В данном диалоговом окне между операционными скобками «inform9begin – inform9end» необходимо задать законы изменения теплофизических свойств материалов от температуры, используя следующий оператор:

(property of COEF is F(T) with imat=xxx,

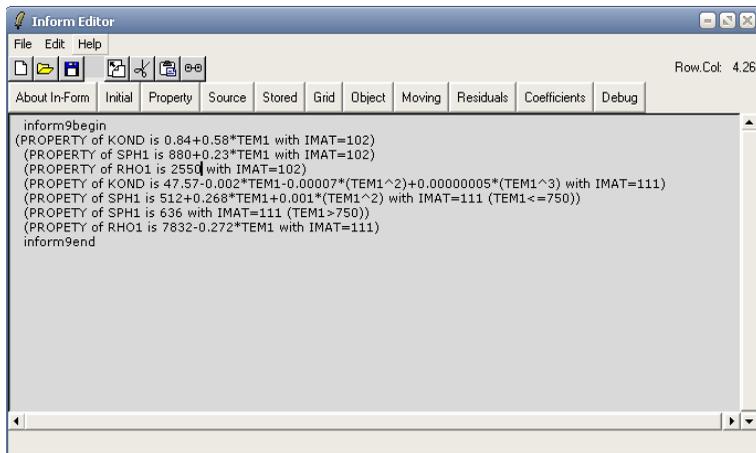


Рис. 5.10. Окно редактора InForm

где COEF – обозначение теплофизического свойства, принятое в Phoenics:

RHO1 – плотность,  $кг/м^3$ ;

SPH1 – удельная теплоемкость,  $Дж/(кг \cdot K)$ ;

KOND – коэффициент теплопроводности,  $Вт/(м \cdot K)$ ;

F(T) – функциональная зависимость теплофизического свойства от температуры;

imat – номер материала, для которого задается свойство (для стали в Phoenics этот номер равен 111).

Получены следующие законы изменения теплофизических свойств от температуры для нагреваемого металла и обмуровки.

Для шамота класса А[71]:

- коэффициент теплопроводности

$$\lambda(T) = 0,84 - 0,00058 \cdot T \text{ Вт}/(м \cdot K); \quad (5.1)$$

- удельная массовая теплоемкость

$$c(T) = 0,23 \cdot T + 880 \text{ Дж}/(кг \cdot K); \quad (5.2)$$

- ПЛОТНОСТЬ

$$\rho = 2550 \text{ кг}/м^3. \quad (5.3)$$

Для стали 40x [111]:

- коэффициент теплопроводности

$$\lambda(T) = 47,57 - 0,002 \cdot T - 7 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 5 \cdot 10^{-8} \cdot T^3; \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) \quad (5.4)$$

- удельная массовая теплоемкость стали

при  $T \leq 1023 \text{ К}$  :

$$c(T) = 0,0007 \cdot T^2 + 0,0991 \cdot T + 482,15 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad (5.5)$$

при  $T > 1023 \text{ К}$  :  $c(T) = 636 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

- плотность стали

$$\rho(T) = 7863 - 0,318 \cdot T \text{ кг}/\text{м}^3. \quad (5.6)$$

Для того чтобы задать свойства области между металлом и кладкой печи, в строке **'The current domain material is'** устанавливается **'Gases'** («Газы»), нажимается **'OK'** и из появившегося списка выбирается **'CO2 using Ideal Gas Law, STP'**. После этого в графах **'Reference pres (Pa)'** («Рекомендуемое давление») и **'Reference temp (K)'** («Рекомендуемая температура») устанавливаются соответственно значения **101300 Па** и **493 К** (рис. 5.11).

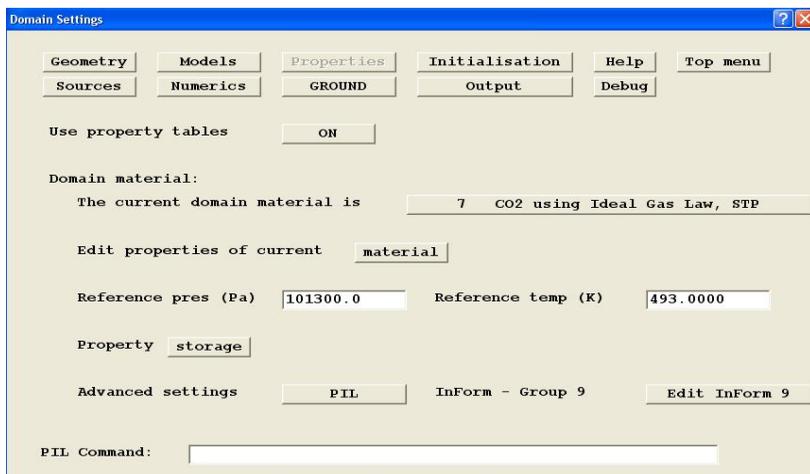


Рис. 5.11. Задание свойств изучаемых материалов

Далее задаются начальные значения давления и температуры. Для этого нажимается кнопка **'Initialisation'**

(«Инициализация»). В графе ***'FINIT Value'*** («Значение») диалогового окна необходимо для переменных P1 и TEM1 ввести соответственно значения 101300 и 493.

Для установки количества итераций нажимается кнопка ***'Numerics'*** («Итерации»). В графе ***'Total number of iterations'*** («Общее число итераций») вводится число 500 для получения наиболее точного решения. Затем в окне ***'Global convergence criterion'*** («Глобальная сходимость решения») устанавливается погрешность при итерационном процессе 0,01%. Далее нажимается кнопка ***'Limits on Variables'*** («Границы переменных») и для переменной TEM1 (температура) устанавливается максимум и минимум, то есть 2073 и 293 K.

Далее необходимо создать расчетную сетку в различных направлениях нажатием кнопок ***'Mesh toggle'***  и ***'Wire frame toggle'***  на панели управления областью и объектами. После появления линий сетки нажимается левая кнопка мыши при нахождении иконки «карандаш» в области металла. В открывшемся окне устанавливается число разбиений по осям в графе ***'Number of cells'*** («Количество ячеек»), после чего нажимается 'OK'. То же повторяется для кладки и газа. В итоге изучаемая область разбивается на 37500 ячеек, то есть по оси X – 50; по оси Y – 25; по оси Z – 30 (рис. 5.12).

Для того чтобы установить позицию пространства, в которой будет проведено исследование, необходимо нажать на кнопку ***'Menu'***, затем ***'Output'*** («Ввод»). В графе ***'Monitor-cell location'*** («Положение точки на мониторе») устанавливаются координаты контрольной точки (28,13,14), расположенной в центре рабочего пространства. После этого панель главного меню закрывается.

Далее запускается решающее устройство PHOENICS.

Результаты моделирования просматриваются в постпроцессоре PHOENICS в просмотрщике визуального редактора (рис. 5.13). Для начала просмотра выбирается плоскость 'Y' при нажатии на кнопку '*Slice direction Y*' («Плоскость просмотра Y»). Затем нажимаются кнопки '*Select temperature*' («Показать температуру») и '*Contour Toggle*' («Координаты контура»). Контур температурного поля отобразится на текущей плоскости. Использование кнопки стрелки Y-позиции сдвигает расположение текущей плоскости с результатами по оси Y. Таким образом, можно посмотреть значение температуры, скорости потока в любой точке рассматриваемой области, перемещая иконку «карандаш» с помощью стрелок.

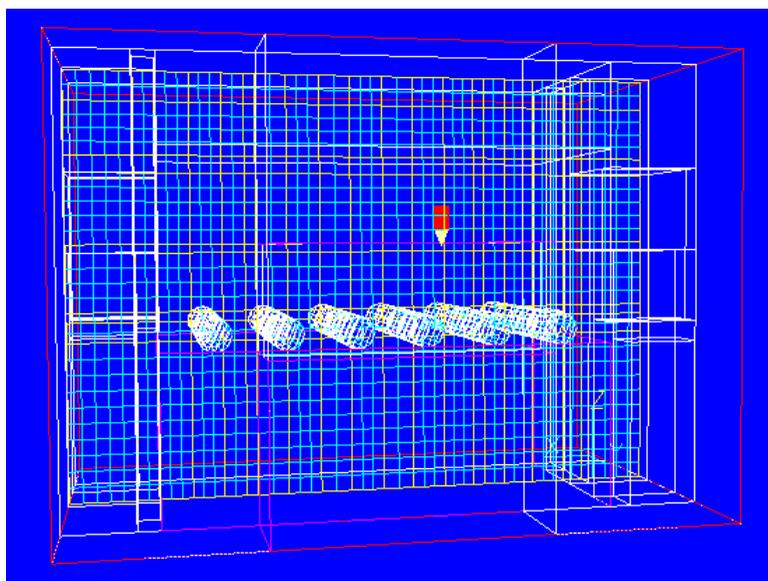
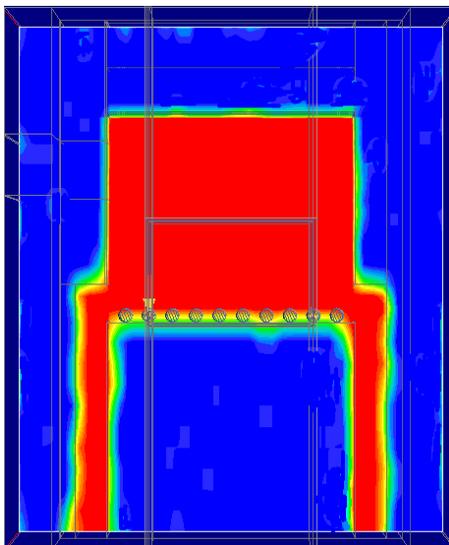


Рис. 5.12. Полученная расчетная сетка

Далее с помощью созданной модели кузнечной печи производится расчет 2-й и 3-й садок металла. При нагреве 2-й садки, состоящей из 41 металлического цилиндра, горелку на печи отключают, и заготовки нагреваются в

течение 1200 с за счет тепла, аккумулированного кладкой печи. Затем горелку включают и устанавливают расхода газа  $18,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Для учета переменного температурного поля кладки печи в момент загрузки 2-й садки необходимо для каждого из четырех слоев задать начальную температуру в соответствии с табл. 4.7. Так для 1-го слоя –  $334 \text{ К}$ , 2-го –  $423 \text{ К}$ , 3-го –  $579 \text{ К}$ , 4-го –  $895 \text{ К}$ . Для расчета периодаковки 2-й садки (1800 с) заслонка приоткрывается на высоту кирпича ( $0,116 \text{ м}$ ) и устанавливается свободный выход потока на наружной поверхности ограждения. При этом по условиям эксперимента [107] в процессековки 2-й садки значение расхода газа через горелку устанавливается равным  $18,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ . При нагреве 3-й садки металла (3840 с) горелку также отключают до 18.56. Затем за 8 минут до момента выдачи первой заготовки горелку включают, установив расход газа равным  $17,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ . На периодковки 3-й садки металла (1560 с) заслонка приоткрывается на высоту кирпича ( $0,116 \text{ м}$ ), расход газа равен  $17,6 \text{ м}^3/\text{ч}$  и устанавливается свободный выход потока на наружной поверхности ограждения (рис. 5.14). При этом по условиям эксперимента [107] в процессековки 1-й садки значение расхода газа через горелку не меняется. Распределение температурного поля по оси X в результате расчета периодаковки представлено на рис. 5.15.

а)



б)

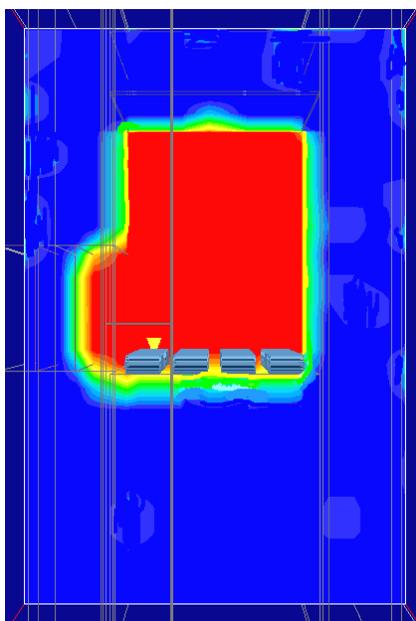


Рис. 5.13. Распределение температурного поля для времени 2100 с: а – по оси Y; б – по оси X (начало)

в)

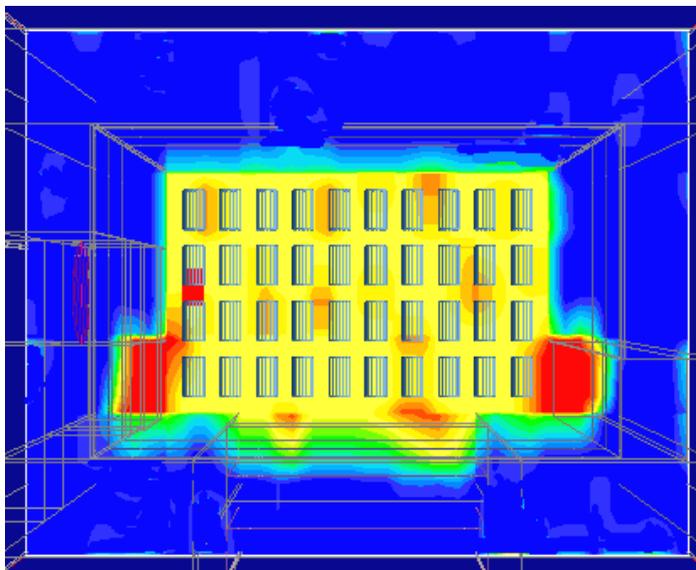


Рис. 5.13. Распределение температурного поля для времени 2100 с: в – по оси Z (окончание)

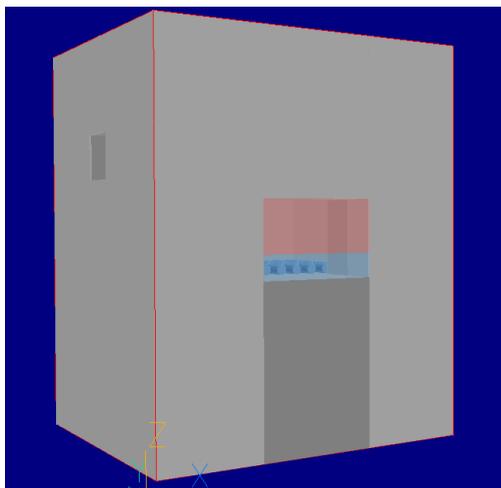


Рис. 5.14. Математическая модель камерной кузнечной печи для расчета периодаковки

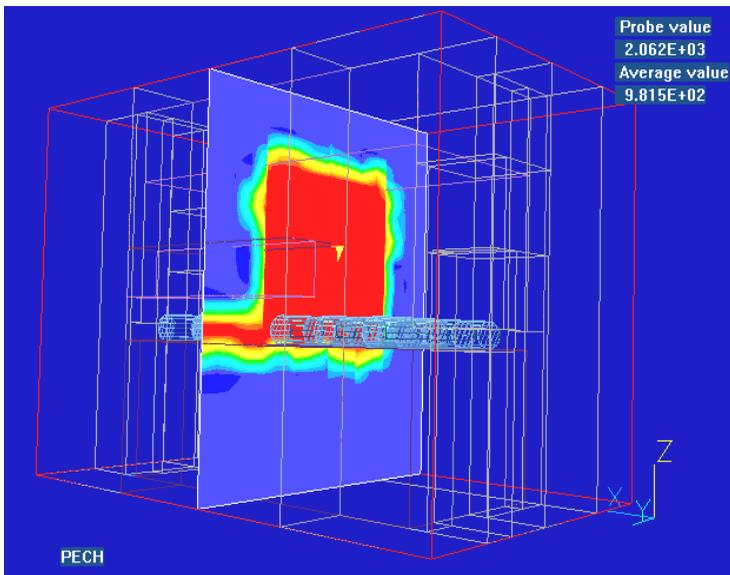


Рис. 5.15. Распределение температурного поля по оси X для периода ковки

## 5.2. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными

Результаты проведенного моделирования печи представлены в табл. 5.1, а погрешность моделирования с экспериментом – в табл. 5.2.

**Таблица 5.1.** Результаты моделирования печи в пакете PHOENICS

| Время            | Температура        |                    |                    |                    |                    |                    |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                  | заготовки          |                    | стенки             |                    |                    |                    |
|                  | x=0                | x=1                | x=0,02             | x=0,2              | x=0,5              | x=0,98             |
| <i>часы, мин</i> | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ |
| 1-я садка        |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| 14.45            | 20                 | 20                 | 353                | 228                | 200                | 62                 |

Продолжение табл. 5.1

| Время                | Температура |           |           |           |           |           |
|----------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | заготовки   |           | стенки    |           |           |           |
|                      | x=0         | x=1       | x=0,02    | x=0,2     | x=0,5     | x=0,98    |
| <i>часы,<br/>мин</i> | <i>°C</i>   | <i>°C</i> | <i>°C</i> | <i>°C</i> | <i>°C</i> | <i>°C</i> |
| 14.55                | 141,2       | 185,1     | -         | -         | -         | -         |
| 15.05                | 187,4       | 412,2     | 489,1     | 267,4     | 227,9     | 61,7      |
| 15.15                | 518,9       | 747,3     | -         | -         | -         | -         |
| 15.25                | 876,7       | 964,7     | 498,3     | 284,9     | 235,1     | 62,5      |
| 15.35                | 1001        | 1063      | -         | -         | -         | -         |
| 15.40                | 1030        | 1112      | 522,8     | 301,7     | 237,4     | 62,9      |
| 15.50                | 1067        | 1127      | -         | -         | -         | -         |
| 16.00                | 1089        | 1151      | 568,4     | 338,8     | 240,1     | 63,0      |
| 16.10                | 1104        | 1162      | -         | -         | -         | -         |
| 16.15                | 1118        | 1179      | 605,6     | 364,4     | 243,6     | 63,1      |
| 2-я садка            |             |           |           |           |           |           |
| 16.30                | 20          | 20        | 622       | 372       | 240       | 61        |
| 16.40                | 756,1       | 912,4     | -         | -         | -         | -         |
| 16.50                | 1026        | 1059      | 614,7     | 388,1     | 246,3     | 63,0      |
| 17.00                | 1071        | 1106      | 654,9     | 397,2     | 251,9     | 62,9      |
| 17.10                | 1089        | 1123      | -         | -         | -         | -         |
| 17.20                | 1101        | 1140      | -         | -         | -         | -         |
| 17.30                | 1125        | 1167      | 692,3     | 439,4     | 267,6     | 62,5      |
| 3-я садка            |             |           |           |           |           |           |
| 18.00                | 20          | 20        | 714,6     | 464,9     | 280,7     | 62,7      |
| 18.16                | 724,1       | 739,8     | -         | -         | -         | -         |

Окончание табл. 5.1

| Время                | Температура        |                    |                    |                    |                    |                    |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                      | заготовки          |                    | стенки             |                    |                    |                    |
|                      | x=0                | x=1                | x=0,02             | x=0,2              | x=0,5              | x=0,98             |
| <i>часы,<br/>мин</i> | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ |
| 18.32                | 769,4              | 852,7              | 684,5              | 422,8              | 285,4              | 62,8               |
| 18.48                | 1004               | 1069               | -                  | -                  | -                  | -                  |
| 19.04                | 1095               | 1144               | 701,9              | 489,9              | 311,4              | 62,9               |
| 19.17                | 1108               | 1159               | -                  | -                  | -                  | -                  |
| 19.30                | 1117               | 1181               | 726,4              | 514,7              | 332,6              | 63,0               |

**Таблица 5.2.** Относительная погрешность (%) вычисления параметров качества нагрева заготовок в пакете PHOENICS

| 1-я садка |                        |                      | 2-я садка |                        |                      | 3-я садка |                        |                      |
|-----------|------------------------|----------------------|-----------|------------------------|----------------------|-----------|------------------------|----------------------|
| Время     | $T_{\text{пов}},$<br>% | $T_{\text{ц}},$<br>% | Время     | $T_{\text{пов}},$<br>% | $T_{\text{ц}},$<br>% | Время     | $T_{\text{пов}},$<br>% | $T_{\text{ц}},$<br>% |
| 14.45     | 1,16                   | 0                    | 16.30     | 0                      | 0                    | 18.00     | 0                      | 0                    |
| 15.05     | 3,82                   | 3,87                 | 16.40     | 3,94                   | 4,16                 | 18.16     | 3,58                   | 1,48                 |
| 15.25     | 2,01                   | 2,66                 | 16.50     | 2,93                   | 2,24                 | 18.48     | 1,21                   | 2,05                 |
| 15.40     | 1,92                   | 0,88                 | 17.00     | 1,96                   | 1,92                 | 19.04     | 0,78                   | 0,90                 |
| 15.44     | 1,54                   | 1,06                 | 17.05     | 0,54                   | 1,73                 | 19.08     | 0,52                   | 1,67                 |
| 15.49     | 1,35                   | 1,53                 | 17.09     | 1,85                   | 1,63                 | 19.11     | 0,35                   | 1,94                 |
| 15.53     | 1,25                   | 1,71                 | 17.13     | 0,88                   | 1,35                 | 19.14     | 0,33                   | 1,73                 |
| 15.58     | 0,79                   | 1,31                 | 17.17     | 0,53                   | 1,79                 | 19.17     | 0,26                   | 1,31                 |
| 16.02     | 0,84                   | 1,02                 | 17.21     | 0,79                   | 1,43                 | 19.21     | 0,13                   | 0,72                 |
| 16.07     | 0,96                   | 2,02                 | 17.24     | 0,44                   | 1,07                 | 19.24     | 0,26                   | 0,80                 |
| 16.11     | 0,69                   | 0,27                 | 17.27     | 0,69                   | 0,79                 | 19.27     | 0,43                   | 0,97                 |
| 16.15     | 1,29                   | 0,72                 | 17.30     | 0,95                   | 0,62                 | 19.30     | 0,60                   | 1,24                 |

По графикам, приведенным на рис. 5.16, можно сделать вывод, что в предложенной модели камерной кузнечной печи распределение температур печи, металла и кладки близко к экспериментальным данным. Диапазон относительной погрешности по температуре составляет  $0 \div 4,16$  %. Таким образом, полученная модель адекватно описывает реальные процессы во время нагрева иковки заготовок в печи. Она может быть рекомендована к использованию на практике для исследования процесса нагрева в камерной кузнечной печи, где изменены тепловые, гидродинамические, теплофизические параметры, а также конструктивные особенности установки.

Кроме этого в результате моделирования были выявлены следующие особенности работы печи.

- Из рис. 5.13 в) видно, что заготовки в печи нагреваются неравномерно. Максимальное значение температуры поверхности достигает  $1214$  °C (1-я заготовка во втором ряду), значение температуры поверхности контрольной заготовки  $1179$  °C.

- Распределение температурного поля по сечению заготовки во время нагрева неравномерное (рис. 5.13 а)). Максимальный температурный перепад составляет  $87$  °C (3-я заготовка в четвертом ряду), минимальный –  $37$  °C (1-я заготовка во втором ряду), для контрольной заготовки эта величина равна  $61$  °C.

### **5.3. Математическая модель камерной нагревательной печи №5 с учетом переменных теплофизических свойств**

В печи № 5 с размерами рабочего пространства  $1,044$  м  $\times$   $2,088$  м  $\times$   $0,985$  м нагреваются 24 заготовки диаметром  $0,15$  м и длиной  $0,25$  м из стали марки 7ХГ2ВМ

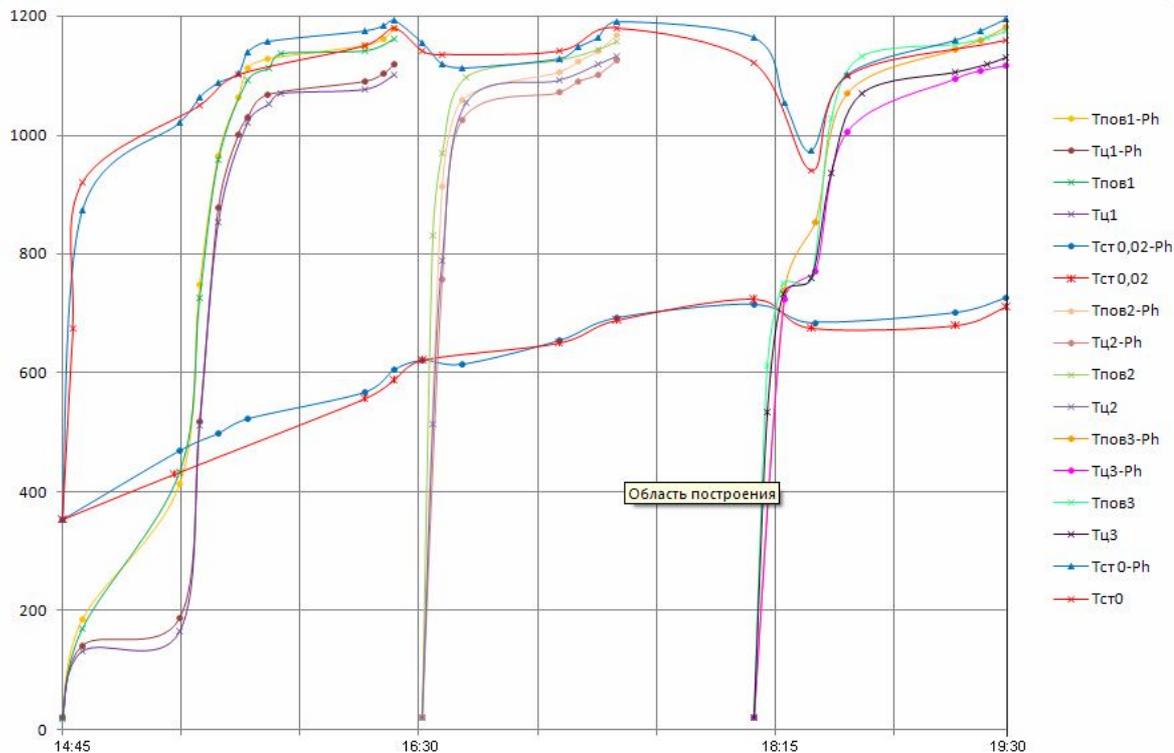


Рис. 5.16. Сравнение результатов моделирования по температурам кладки печи и заготовки с экспериментальными данными

до заданных параметров качества. Цикл работы печи включает в себя следующие периоды:

- нагрев металла до момента выдачи первой заготовки (3 часа);
- ковку металла до момента выдачи последней заготовки (4 часа);
- охлаждение кладки печи (17 часов).

Созданная математическая модель, печи №5 учитывает законы изменения теплофизических свойств материала обмуровки от температуры с помощью модуля In-Form (рис 5.17).

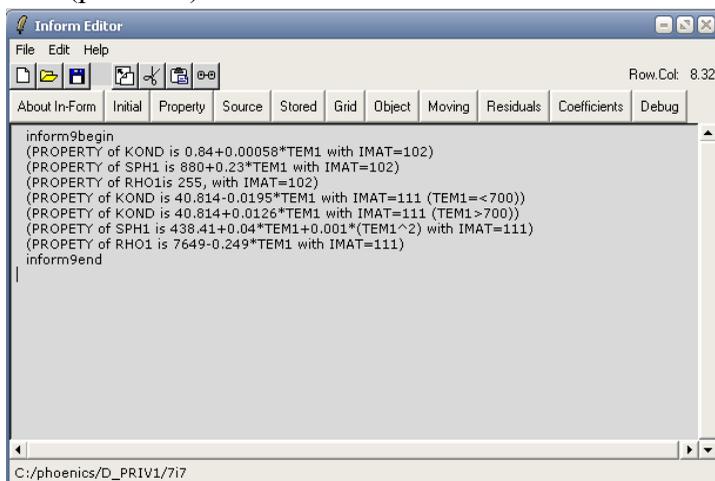


Рис. 5.17. Окно редактора InForm

Сталь 7ХГ2ВМ из-за отсутствия на неё теплофизических свойств была заменена на близкую по химическому составу сталь марки 9Х2МФ. Для стали 9Х2МФ получены следующие законы изменения теплофизических свойств от температуры [111]:

- коэффициент теплопроводности:

при  $T \leq 1023K$  :

$$\lambda(T) = 40,814 - 0,0195 \cdot T \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad (5.7)$$

при  $T > 1023K$  :

$$\lambda(T) = 16,314 + 0,0126 \cdot T \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad (5.8)$$

- удельная массовая теплоемкость стали:

$$c(T) = 0,001 \cdot T^2 + 0,04 \cdot T + 438,41 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad (5.9)$$

- плотность стали:

$$\rho(T) = 7649 - 0,249 \cdot T \text{ кг}/\text{м}^3. \quad (5.10)$$

Для шамота класса А законы изменения теплофизических свойств от температуры определяются по формулам 5.1 – 5.3.

Результаты моделирования просматриваются в постпроцессоре PHOENICS в просмотрщике визуального редактора (рис. 5.18).

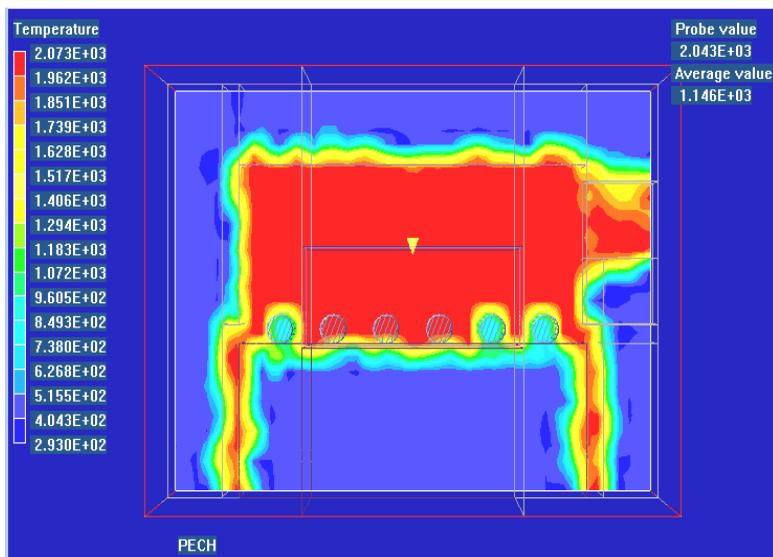


Рис. 5.18. Распределение температурного поля по оси Y

Результаты проведенного моделирования печи представлены в табл. 5.3.

**Таблица 5.3.** Результаты моделирования печи №5 в пакете PHOENICS

| Время                | Температура |           |           |           |           |
|----------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | заготовки   |           | стенки    |           |           |
|                      | x=0         | x=1       | x=0,02    | x=0,5     | x=0,98    |
| <i>часы,<br/>мин</i> | <i>°C</i>   | <i>°C</i> | <i>°C</i> | <i>°C</i> | <i>°C</i> |
| 15.00                | 450         | 670       | 844       | 500       | 354       |
| 15.30                | 811,9       | 1012      | -         | -         | -         |
| 16.00                | 1033        | 1167      | 1194      | 722,1     | 473,1     |
| 16.30                | 1159        | 1233      | -         | -         | -         |
| 17.00                | 1173        | 1259      | 1249      | 759,4     | 474,5     |
| 17.30                | 1187        | 1282      | -         | -         | -         |
| 18.00                | 1196        | 1291      | 1273      | 783,6     | 475,1     |
| 18.40                | 1184        | 1214      | 1235      | 794,4     | 475,0     |
| 19.20                | 1189        | 1247      | 1238      | 799,1     | 472,4     |
| 20.00                | 1201        | 1253      | 1231      | 802,9     | 470,6     |
| 20.40                | 1206        | 1261      | 1220      | 807,4     | 467,1     |
| 21.20                | 1198        | 1244      | 1218      | 811,7     | 461,6     |
| 22.00                | 1184        | 1237      | 1216      | 810,6     | 450,4     |

График сравнения результатов расчета с экспериментальными данными приведен на рис. 5.19.

Максимальная погрешность составляет не более 4%.

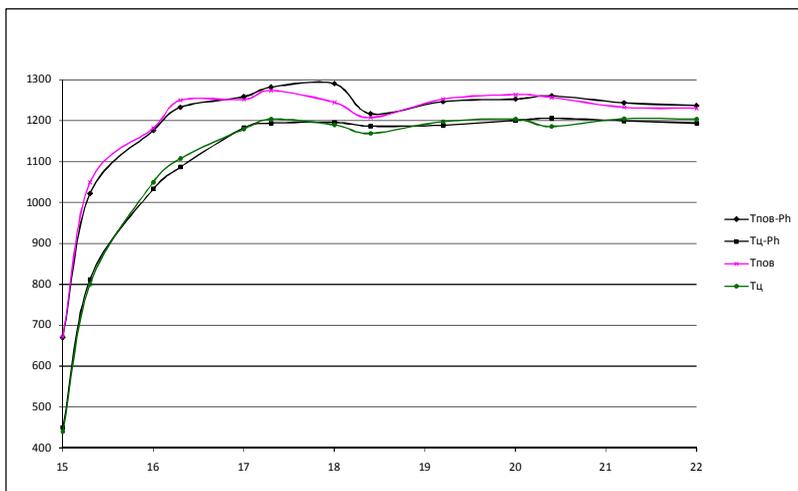


Рис. 5.19. Температурное поле металлической заготовки

#### 5.4. Создание базы данных

При решении задачи прогнозирования точности вычисления для параметров качества нагрева заготовок с помощью нейросети необходимо собрать данные для обучения, которые представляют собой значения входных и выходных параметров. На первоначальной стадии обучения сети в набор включают все переменные, которые могут влиять на конечный результат.

Обучение нейросети осуществляется по расчетным данным камерных нагревательных печей №2 (п.5.1) и №5 (п.5.3). В качестве переменных, влияющих на температуру поверхности и центра заготовки, используются:

- отношение объема рабочего пространства печи к объему нагреваемых в ней заготовок,  $\frac{V_{\text{пп}}}{V_3}$  ;
- количество заготовок, находящихся в печи в данный момент,  $n$ ;
- группа стали,  $m$ ;

- отношение теплоты, аккумулированной кладкой печи, к химической теплоте сгорания топлива,  $Q_{акк}/Q$ .

Выходным параметром являются параметры качества нагрева заготовок и относительная погрешность (%) их вычисления с помощью многоцелевого вычислительного комплекса Phoenics (на основании табл. 5.1, 5.2, 5.3).

Объем рабочего пространства печи определяется по формуле (4.9), а объем заготовок вычисляется по формуле

$$V_3 = P_3 \cdot n, \quad (5.6)$$

где  $P_3$  – объем одной заготовки,  $м^3$ .

Для печи №2:  $P_3 = 1,86 \cdot 10^{-4} м^3$ , а для печи №5:  $P_3 = 44,16 \cdot 10^{-4} м^3$ .

В печи №2 нагревались 3 садки металла. Число заготовок в 1-й садке – 40 шт., во 2-й – 41 шт., в 3-й – 40 шт. В печи №5 нагревалась одна садка металла, состоящая из 24-х заготовок.

Группа стали (классификация по ковкости) [108] (для стали 9Х2МФ – 4-я группа, для стали 40х – 2-я группа).

Потери теплоты на аккумуляцию печи вычислялись по формуле (4.11).

Значения всех величин, используемых для расчета входных переменных, приведены в табл. 4.13.

Перед началом моделирования на основе таблиц 4.6, 5.1, 4.13 создается обобщенная база данных в виде таблицы Microsoft Excel (рис.5.20).

## **5.5. Обработка результатов с помощью нейронных сетей**

В состав NeuroSolutions входит NeuroSolutions for Excel, который позволяет просто выделить участок данных в листе Excel для тренировки, кросспроверки или тестирования, пройти через несколько панелей конфигурации и получить работающую нейронную сеть, определить ее оптимальные параметры, а также

произвести графическую обработку результатов серий экспериментов.

Сначала запускается программа *NeuroSolution for Excel*. В меню *Файл* выбирается пункт *Открыть* и находится база данных, которую необходимо обработать (рис. 5.20). Для получения более точного результата строки таблицы необходимо перемешать нажатием кнопок *NeuroSolution*, *'Preprocess Data'*, *'Randomize Rows'*.

Затем выделяются полные столбцы входных данных (в данном случае это отношение объема рабочего пространства печи к объему нагреваемых в ней заготовок; количество заготовок, находящихся в печи в данный момент времени; группа стали; отношение теплоты, аккумулированной кладкой печи, к химической теплоте сгорания топлива). Затем выделяются полные столбцы выходных данных (в данном случае это температура поверхности заготовок и относительная погрешность (%) ее вычисления). После обозначения входных и выходных величин необходимо выделить все строки, для этого нажимаются кнопки: *NeuroSolution*, *'Tag Data'*, *'All Rows As Training'*.

Далее создается нейронная сеть. Для этого в меню *NeuroSolution* находится пункт *'Create/Open Network'* («Создать/Открыть Сеть»), *'New'* («Новая»). В результате запустится *Neural Builder*.

Выбираем нейронную модель – *'Multilayer Perceptron'* («Многослойный персептрон») и нажимаем кнопку . Переходим к окну *'Multilayer'*. Число входных (Input PEs) и выходных (Output PEs) обрабатывающих элементов обозначается здесь согласно выбору входных и выходных столбцов. Также здесь определяется число скрытых слоев (*'Hidden Layers'*).

|    | A          | B          | C        | D      | E    | F    | G |
|----|------------|------------|----------|--------|------|------|---|
| 1  | Группа ст: | Число загл | Отношени | Qакк/Q | %    | Tпов |   |
| 2  | 4          | 24         | 20,25    | 0,082  | 2,69 | 1245 |   |
| 3  | 4          | 20         | 24,21    | 0,07   | 0,33 | 1210 |   |
| 4  | 4          | 16         | 30,27    | 0,065  | 1,83 | 1255 |   |
| 5  | 4          | 12         | 40,36    | 0,056  | 2,35 | 1234 |   |
| 6  | 4          | 8          | 60,54    | 0,051  | 0,94 | 1259 |   |
| 7  | 4          | 4          | 121,08   | 0,48   | 0,89 | 1233 |   |
| 8  | 4          | 1          | 484,3    | 0,045  | 0,32 | 1233 |   |
| 9  | 2          | 40         | 55,7     | 0,061  | 1,92 | 1112 |   |
| 10 | 2          | 35         | 63,65    | 0,057  | 1,54 | 1119 |   |
| 11 | 2          | 30         | 74,26    | 0,54   | 1,35 | 1126 |   |
| 12 | 2          | 25         | 89,12    | 0,51   | 1,25 | 1135 |   |
| 13 | 2          | 20         | 111,4    | 0,049  | 0,79 | 1147 |   |
| 14 | 2          | 15         | 148,52   | 0,047  | 0,84 | 1154 |   |
| 15 | 2          | 10         | 222,8    | 0,045  | 0,96 | 1160 |   |
| 16 | 2          | 5          | 445,6    | 0,044  | 0,69 | 1165 |   |
| 17 | 2          | 1          | 2228     | 0,042  | 1,29 | 1179 |   |
| 18 | 2          | 41         | 54,38    | 0,046  | 1,96 | 1106 |   |
| 19 | 2          | 35         | 63,65    | 0,32   | 0,54 | 1114 |   |
| 20 | 2          | 30         | 74,26    | 0,028  | 1,85 | 1121 |   |
| 21 | 2          | 25         | 89,12    | 0,024  | 0,88 | 1128 |   |
| 22 | 2          | 20         | 111,4    | 0,021  | 0,53 | 1135 |   |
| 23 | 2          | 15         | 148,52   | 0,019  | 0,79 | 1145 |   |
| 24 | 2          | 10         | 222,8    | 0,017  | 0,44 | 1153 |   |
| 25 | 2          | 5          | 445,6    | 0,016  | 0,69 | 1160 |   |
| 26 | 2          | 1          | 2228     | 0,015  | 0,95 | 1167 |   |
| 27 | 2          | 40         | 55,7     | -0,04  | 0,78 | 1144 |   |
| 28 | 2          | 35         | 63,65    | -0,027 | 0,52 | 1149 |   |
| 29 | 2          | 30         | 74,26    | -0,02  | 0,35 | 1153 |   |
| 30 | 2          | 25         | 89,12    | -0,016 | 0,33 | 1156 |   |
| 31 | 2          | 20         | 111,4    | -0,012 | 0,26 | 1159 |   |
| 32 | 2          | 15         | 148,52   | -0,01  | 0,13 | 1166 |   |
| 33 | 2          | 10         | 222,8    | -0,008 | 0,26 | 1171 |   |
| 34 | 2          | 5          | 445,6    | -0,006 | 0,43 | 1176 |   |
| 35 | 2          | 1          | 2228     | -0,005 | 0,6  | 1181 |   |
| 36 |            |            |          |        |      |      |   |

Рис. 5.20. Полученная база данных

Выбираем два скрытых слоя и нажимаем кнопку . В появившемся окне *'Hidden Layer #1'* определяются параметры 1-го скрытого слоя, для этого в сроке *'Processing Elements'* вводим 9. Далее определяются параметры 2-го скрытого слоя, для этого в сроке *'Processing Elements'* вводим 7. Нажимаем кнопку . В следующем окне *'Output Layer'* определяются

параметры выходного слоя аналогично скрытому и нажимается кнопка . Появляется окно **'Supervised Learning Control'** («Контролируемое управление обучением»), в котором задается максимальное число периодов (**'Maximum Epochs'**) и условие остановки процесса обучения (**'Termination'**). В данном случае задается 30000 периодов для получения более точного результата. После этого нажимается кнопка . В появившемся окне **'Probe Configuration'** («Конфигурация исследования») остается все без изменения и нажимается кнопка **'Build'** («Построить»). Получается графическое изображение нейронной сети, представленное на рис. 5.21.

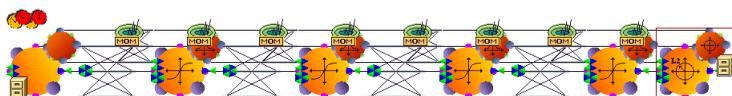


Рис. 5.21. Графическое изображение, полученной нейросети

После создания нейросети происходит ее обучение. Для этого в меню *NeuroSolution* выбирается пункт **'Train Network'**, а затем **'Train N Times'**. Появляется окно обучения *Train*, в котором вводится имя обучения (**'Train Name'**), задается количество периодов (**'Number of Epochs'**) – 30000 и количество повторов (**'Number of Runs'**) – 50, нажимается кнопка 'OK'. Затем генерируется сообщение результатов обучения, которое содержит следующую информацию.

Проверка нейронной сети осуществляется нажатием кнопки **'Test'** в меню *NeuroSolution*, **'Test Network'**. Появляется окно тестирования **'Test'**, в котором вводится имя тестирования (**'Test Name'**), выбирается тип задачи – **'Regression'** и нажимается кнопка 'OK'. Затем генерируется сообщение результатов тестирования.

Итоговую модель, обученную и протестированную, можно использовать для определения температуры поверхности заготовок и относительной погрешности (%) ее вычисления с помощью многоцелевого вычислительного комплекса Phoenix (рис.5.22). Для этого необходимо запустить файл с соответствующей моделью нейросети. В столбцах исходных данных вводятся заданное значение отношения объема рабочего пространства печи к объему нагреваемых в ней заготовок и количество заготовок, находящихся в печи в данный момент; группы стали; отношения теплоты, аккумулированной кладкой печи, к химической теплоте сгорания топлива.

### **5.6. Проверка адекватности нейросети на печи №3**

В печи № 3 с размерами рабочего пространства  $1,242\text{ м} \times 0,812\text{ м} \times 0,763\text{ м}$  нагреваются 10 садок металла [112]. Размеры садок и режим работы печи в день испытания приведены в табл. 5.4.

Для проверки на печи №3 итоговой модели нейросети, полученной в п. 5.5, нам необходимо задать значения входных параметров (отношение объема рабочего пространства печи к объему нагреваемых в ней заготовок; количество заготовок, находящихся в печи в данный момент; группу стали; отношение теплоты, аккумулированной кладкой печи, к химической теплоте сгорания топлива). Рассчитаем их значение для 2-й садки печи №3 по формулам 4.9 – 4.14 (табл. 5.5).

В результате нейросеть выводит значение температуры поверхности заготовок 2-й садки печи №3, а также относительную погрешность (%) ее вычисления в многоцелевом вычислительном комплексе Phoenix (рис. 5.23).

Полученная нейросетевая модель обучена по экспериментальным данным камерных нагревательных печей [112] в диапазоне следующих параметров:

- объем рабочего пространства печи  $V_{\text{рп}}$ ,  $0,4155 \text{ м}^3 - 2,147 \text{ м}^3$ ;
- типоразмер заготовок  $V_3$ ,  $1,86 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 - 44,16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ ;
- группа стали  $m$ , 2 – 4;
- число заготовок  $n$ , 1 – 41;
- расход газа  $B$ ,  $17,6 - 62 \text{ м}^3(\text{н})/\text{с}$ ;
- время нагрева  $\tau$ , 1800 – 10800 с;
- температура поверхности в момент выдачи первой заготовки  $T_{\text{к}}^{\text{н}}$ ,  $1091^{\circ}\text{C} - 1245^{\circ}\text{C}$ .

**Таблица 5.4.** Размеры садок и режим работы печи № 3

| Номер садки | Число заготовок в садке | Размеры заготовок |                | Марка стали | Режим работы, час |          |          |             |          |
|-------------|-------------------------|-------------------|----------------|-------------|-------------------|----------|----------|-------------|----------|
|             |                         | $d, \text{ м}$    | $l, \text{ м}$ |             | $\tau_x$          | $\tau_n$ | $\tau_k$ | $\tau_{np}$ | $\tau_o$ |
| 1           | 34                      | 0,1               | 0,065          | Шх15        | 1,17              | 0,466    | 0,817    |             |          |
| 2           | 35                      | 0,1               | 0,065          | Шх15        |                   | 0,5      | 0,817    |             |          |
| 3           | 25                      | 0,1               | 0,065          | Шх15        |                   | 0,5      | 0,583    |             |          |
| 4           | 30                      | 0,1               | 0,065          | Шх15        |                   | 0,5      | 0,683    |             |          |
| 5           | 25                      | 0,1               | 0,065          | Шх15        |                   | 0,583    | 0,517    |             |          |
| 6           | 37                      | 0,1               | 0,065          | Шх15        |                   | 0,733    | 0,717    |             |          |
| 7           | 28                      | 0,1               | 0,065          | Шх15        |                   | 0,583    | 0,550    |             |          |
| 8           | 40                      | 0,1               | 0,065          | Шх15        |                   | 0,7      | 0,867    |             |          |
| 9           | 40                      | 0,1               | 0,065          | Шх15        |                   | 0,5      | 0,8      |             |          |
| 10          | 20                      | 0,1               | 0,065          | Шх15        |                   | 0,417    | 0,417    | 3,75        | 6,83     |

Данная нейросеть позволяет прогнозировать точность вычисления параметров качества нагрева заготовок с помощью математических моделей камерных нагревательных печей, построенных в пакете Phoenix.

|    | A            | B               | C                 | D      | E        | F        | G |
|----|--------------|-----------------|-------------------|--------|----------|----------|---|
| 1  | Группа стали | Число заготовок | Отношение объемов | Qакц/Q | %        | Тлов     |   |
| 14 | 2            | 41              | 54,38             | 0,046  | 1,96     | 1106     |   |
| 15 | 2            | 5               | 445,6             | 0,044  | 0,69     | 1165     |   |
| 16 | 2            | 1               | 2228              | -0,005 | 0,6      | 1181     |   |
| 17 | 4            | 16              | 30,27             | 0,065  | 1,83     | 1255     |   |
| 18 | 2            | 20              | 111,4             | 0,049  | 0,79     | 1147     |   |
| 19 | 2            | 30              | 74,26             | -0,02  | 0,35     | 1153     |   |
| 20 | 2            | 5               | 445,6             | -0,006 | 0,43     | 1176     |   |
| 21 | 2            | 20              | 111,4             | 0,021  | 0,53     | 1135     |   |
| 22 | 4            | 4               | 121,08            | 0,48   | 0,89     | 1233     |   |
| 23 | 2            | 40              | 55,7              | 0,061  | 1,92     | 1112     |   |
| 24 | 2            | 5               | 445,6             | 0,016  | 0,69     | 1160     |   |
| 25 | 2            | 30              | 74,26             | 0,028  | 1,85     | 1121     |   |
| 26 | 2            | 10              | 222,8             | -0,008 | 0,26     | 1171     |   |
| 27 | 2            | 10              | 222,8             | 0,045  | 0,96     | 1160     |   |
| 28 | 2            | 15              | 148,52            | 0,047  | 0,84     | 1154     |   |
| 29 | 2            | 25              | 89,12             | 0,024  | 0,88     | 1128     |   |
| 30 | 2            | 35              | 63,65             | 0,32   | 0,54     | 1114     |   |
| 31 | 2            | 1               | 2228              | 0,042  | 1,29     | 1179     |   |
| 32 | 2            | 25              | 89,12             | 0,51   | 1,25     | 1135     |   |
| 33 | 4            | 20              | 24,21             | 0,07   | 0,33     | 1210     |   |
| 34 | 2            | 35              | 63,65             | -0,027 | 0,52     | 1149     |   |
| 35 | 4            | 1               | 484,3             | 0,045  | 0,32     | 1233     |   |
| 36 |              |                 |                   |        |          |          |   |
| 37 |              |                 |                   |        |          |          |   |
| 38 | 2            | 25              | 89,12             | 0,024  | 0,879714 | 1130,62  |   |
| 39 | 2            | 35              | 63,65             | 0,32   | 0,545232 | 1112,843 |   |
| 40 | 2            | 1               | 2228              | 0,042  | 1,286482 | 1179,487 |   |
| 41 | 2            | 25              | 89,12             | 0,51   | 1,251875 | 1134,727 |   |
| 42 | 4            | 20              | 24,21             | 0,07   | 0,334333 | 1210,664 |   |
| 43 | 2            | 35              | 63,65             | -0,027 | 0,520943 | 1149,145 |   |
| 44 | 4            | 1               | 484,3             | 0,045  | 0,321463 | 1233,05  |   |
| 45 |              |                 |                   |        |          |          |   |

Рис. 5.22. Пример использования, обученной нейросети

**Таблица 5.5.** Значение входных параметров для проверки нейросетевой модели на печи №3

| Название параметра | Печь №3 (2-я садка) |    |   |
|--------------------|---------------------|----|---|
| Число заготовок    | 35                  | 12 | 1 |

Окончание табл. 5.5

| Название параметра  | Печь №3 (2-я садка)                    |           |           |
|---|--|-----------|-----------|
|   | Объем печи $V_{\text{рп}}, \text{м}^3$ | 0,7695    | 0,7695    |
| Объем заготовок $V_3, \text{м}^3$   | 0,0179                                 | 0,0061    | 0,0005    |
| $V_{\text{рп}} / V_3$   | 43,085                                 | 125,674   | 1507,98   |
| Группа стали  | 3                                      | 3         | 3         |
| $Q_p^H, \text{МДж} / \text{м}^3$  | 35,88                                  | 35,88     | 35,88     |
| Время выдержки $\tau, \text{с}$   | 1620                                   | 1680      | 900       |
| Расход газа за время $\tau, B_n, \text{м}^3 / \text{с}$   | 0,0092                                 | 0,0069    | 0,0069    |
| $Q$ за время нагрева, $\text{МДж}$  | 532,818                                | 953,0924  | 1178,2394 |
| Изменение температуры кладки за время $\tau$ :<br>$T_{\text{кл}}^H - T_{\text{кл}}^K, ^\circ\text{C}$ | 954 – 973                              | 973 – 983 | 983 – 986 |
| $\lambda, \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{K})$  | 1,39                                   | 1,39      | 1,39      |
| $c, \text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$   | 1100                                   | 1100      | 1100      |
| $\rho, \text{кг} / \text{м}^3$  | 2550                                   | 2550      | 2550      |
| $F_{\text{кл}}^{\text{вн}}, \text{м}^2$   | 24,1429                                | 24,1429   | 24,1429   |
| $Q_{\text{акк}}$ за время нагрева, $\text{МДж}$   | 4,692                                  | 7,207     | 8,311     |
| $Q_{\text{акк}} / Q$  | 0,0088                                 | 0,0076    | 0,0071    |

|    | A            | B               | C                 | D      | E        | F        | G | H |
|----|--------------|-----------------|-------------------|--------|----------|----------|---|---|
| 1  | Группа стали | Число заготовок | Отношение объемов | Qакк/Q | %        | Тлов     |   |   |
| 17 | 2            | 5               | 445,6             | 0,016  | 0,69     | 1160     |   |   |
| 18 | 4            | 8               | 60,54             | 0,051  | 0,94     | 1259     |   |   |
| 19 | 2            | 35              | 63,65             | 0,32   | 0,54     | 1114     |   |   |
| 20 | 2            | 15              | 148,52            | 0,047  | 0,84     | 1154     |   |   |
| 21 | 2            | 41              | 54,38             | 0,046  | 1,96     | 1106     |   |   |
| 22 | 4            | 4               | 121,08            | 0,48   | 0,89     | 1233     |   |   |
| 23 | 2            | 20              | 111,4             | 0,021  | 0,53     | 1135     |   |   |
| 24 | 2            | 25              | 89,12             | 0,51   | 1,25     | 1135     |   |   |
| 25 | 2            | 1               | 2228              | -0,005 | 0,6      | 1181     |   |   |
| 26 | 2            | 40              | 55,7              | 0,061  | 1,92     | 1112     |   |   |
| 27 | 2            | 30              | 74,26             | 0,028  | 1,85     | 1121     |   |   |
| 28 | 2            | 20              | 111,4             | -0,012 | 0,26     | 1159     |   |   |
| 29 | 2            | 35              | 63,65             | 0,057  | 1,54     | 1119     |   |   |
| 30 | 2            | 1               | 2228              | 0,042  | 1,29     | 1179     |   |   |
| 31 | 2            | 20              | 111,4             | 0,049  | 0,79     | 1147     |   |   |
| 32 | 2            | 35              | 63,65             | -0,027 | 0,52     | 1149     |   |   |
| 33 | 4            | 1               | 484,3             | 0,045  | 0,32     | 1233     |   |   |
| 34 | 2            | 5               | 445,6             | 0,044  | 0,69     | 1165     |   |   |
| 35 | 2            | 10              | 222,8             | 0,017  | 0,44     | 1153     |   |   |
| 36 |              |                 |                   |        |          |          |   |   |
| 37 |              |                 |                   |        |          |          |   |   |
| 38 | 4            | 8               | 60,54             | 0,051  | 0,940717 | 1257,726 |   |   |
| 39 | 3            | 35              | 43,085            | 0,0088 | 2,685413 | 1225,42  |   |   |
| 40 | 2            | 15              | 148,52            | 0,047  | 0,836072 | 1154,57  |   |   |
| 41 | 3            | 12              | 125,674           | 0,0076 | 1,87959  | 1201,78  |   |   |
| 42 | 3            | 1               | 1507,98           | 0,0071 | 0,12203  | 1163,711 |   |   |
| 43 | 2            | 20              | 111,4             | 0,021  | 0,538434 | 1134,723 |   |   |
| 44 |              |                 |                   |        |          |          |   |   |
| 45 |              |                 |                   |        |          |          |   |   |

Рис. 5.23. Использование обученной нейросети для определения температуры поверхности заготовки

## **6. Обучение нейросетей с помощью сложных математических моделей и на этой основе более совершенная организация работы теплотехнологических установок**

### **6.1. Влияние на энергетическую эффективность переходных процессов в теплотехнологических установках**

Энергетическая эффективность теплотехнологических установок на любом машиностроительном предприятии во многом зависит от того, как учитываются и регулируются переходные процессы, происходящие в тепло-технологическом оборудовании. Все операции технологии, связанные с нагревом, имеют большую тепловую инерционность, которую необходимо учитывать, особенно там, где производство изделий носит единичный или мелкосерийный характер и перестройка режимов осуществляется несколько раз во время одно-двухсменного режима работы оборудования.

Потери теплоты, связанные с разогревом ограждений теплотехнологического оборудования (потери с аккумуляцией), и потери в окружающую среду зависят не только от режимов работы печей, но и от организации производства. Актуальной становится задача уменьшения потерь и, как следствие, снижение издержек производства.

Одним из первых направлений решения этой задачи является интенсивный метод перебора вариантов. Составляются математические модели теплотехнологических установок, находящихся в цехе, записываются условия их сопряжения между собой, составляется база данных по обрабатываемым изделиям. Затем идет перебор различных вариантов по размещению

изделий на теплотехнологические установки. Перебирается также и очерёдность обработки изделий с разными размерами. Оцениваются потери теплоты, связанные с перестройкой работы оборудования с одного типоразмера на другой, и выбирается наилучший вариант. Такой подход связан с большими затратами машинного времени и часто такую математическую модель организации производства практически невозможно использовать.

Существуют экстенсивные пути решения задачи, когда предлагается критерий или параметр оценки того или иного варианта.

### **6.1.1. Параметр стабилизации режимов для камерных нагревательных печей с непрерывным процессом загрузки – выгрузки**

Задачей эксплуатационного персонала теплотехнологических установок является поддержание режима работы теплового оборудования в наиболее стабильном температурном режиме даже при переходе с обработки одного изделия на другое, так, чтобы потери от издержек производства составляли минимальную величину. В качестве параметра для оценки стабильности температурного режима, который используется при переходе с обработки одного изделия на другое, предлагается параметр стабилизации температурного режима. Этот параметр может использоваться при работе группы нагревательных печей кузнечного цеха, в которых нагрев осуществляется при постоянной температуре печи, а процессе загрузки–выгрузки металла непрерывен.

#### *Понятие параметра стабилизации*

Если учесть, что в кузнечных печах нагреваются заготовки сравнительно небольших размеров, то понятие

параметра стабилизации вытекает из решения задачи теплопроводности для тел умеренной массивности, нагреваемых в среде с постоянной температурой при граничных условиях 3 рода [89,113–115]:

$$\frac{T_z - T_{m,k}}{T_z - T_{m,0}} = \exp\left(-\frac{\alpha_\Sigma \cdot \tau}{c_m \cdot R_g \cdot m}\right), \quad (6.1)$$

где  $T_z$  – температура газа в камере печи,  $K$ ;  $T_{m,0}$ ,  $T_{m,k}$  – начальная и конечная температура металла, соответственно,  $K$ ;  $R_g = V_m / f_{\text{эф}}$  – обобщенный размер заготовки,  $m$ ;  $V_m$  – объем нагреваемого металла,  $m^3$ ;  $f_{\text{эф}}$  – эффективная поверхность металла при радиационном теплообмене в системе газ-кладка-металл,  $m^2$ ; поправка на массивность  $m = 1 + \alpha_\Sigma \cdot R_g / [(k + 2) \cdot \lambda_m]$ , (6.2)

где  $\alpha_\Sigma$  – приведённый коэффициент теплоотдачи, учитывающий радиационную и конвективную составляющие,  $Bm / (m^2 \cdot K)$ ;  $\tau$  – время нагрева заготовки,  $s$ ;  $c_m$  – удельная теплоемкость металла,  $Dж / (m^3 \cdot K)$ ;  $k$  – коэффициент формы тела;  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности металла,  $Bm / (m \cdot K)$ .

Формула (6.1) предполагает, что сложный радиационно-конвективный поток на металл приведен к условно конвективному виду с суммарным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_\Sigma$ .

При заданной конечной температуре металла температура газа будет постоянной при постоянном показателе экспоненты. Отсюда стабильный

температурный режим печи определяется стабилизацией параметра:

$$Kl = \frac{\alpha_{\Sigma} \cdot \tau}{c_M \cdot R_g \cdot m}, \quad (6.3)$$

который представляет отношение количества теплоты, подведенной к металлу при единичном температурном напоре за время, к энергии, усвоенной металлом при единичном приращении температуры. При усредненных за время нагрева значениях  $\alpha_{\Sigma}$ ,  $c_M$ ,  $\lambda_M$  параметр стабилизации  $Kl$  является для заготовок каждого типоразмера постоянной величиной.

В печах с непрерывным процессом загрузки и выгрузки время нагрева и времяковки связаны между собой соотношением:

$$\tau = \tau_K \cdot n = \tau_K \cdot F_{акт} / f, \quad (6.4)$$

где  $\tau_K$  – времяковки заготовки, с;  $n$  – число заготовок, одновременно находящихся в печи, шт.;  $F_{акт}$  – площадь активного пода,  $m^2$ ;  $f$  – площадь пода занятая одной заготовкой с относящимися к ней зазорами,  $m^2$ .

Если принять, что для конкретной печи площадь активного пода постоянна  $F_{акт} = const$ , суммарный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\Sigma}$  являющийся, функцией температуры газа, конечной температуры металла и обобщенного размера заготовки:  $\alpha_{\Sigma} = f(T_g, T_{м,к}, R_g)$ , – изменяется в пределах  $\alpha_{\Sigma} = 300-500 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K)$  и в нулевом приближении может быть средним и постоянным, а удельная теплоемкость металла  $c_M$  также слабо изменяется от температуры, поэтому приблизительно постоянна  $c_M = const$ , то исходя из

формулы (6.3), для стабилизации режима работы печи постоянным должно поддерживаться отношение

$$Kl = \tau_K \cdot f_{\text{эф}} / (V_M \cdot f \cdot m). \quad (6.5)$$

Это выражение с принятыми допущениями называется параметром стабилизации температурного режима печи [116]. Величины, входящие в формулу (6.4), относятся к геометрическим размерам нагреваемых заготовок, геометрическим размерам зазоров между заготовками, времени обработки под молотом, форме заготовок и теплофизическим характеристикам нагреваемого материала. Все эти параметры нагреваемых заготовок можно легко найти.

В общем случае без принятых допущений параметр стабилизации имеет вид

$$Kl = \left[ \tau_K \cdot f_{\text{эф}} / (V_M \cdot f \cdot m \cdot c_M) \right] \cdot [\alpha_{\Sigma} \cdot F_{\text{акт}}]. \quad (6.6)$$

Комплекс величин  $\left[ \tau_K \cdot f_{\text{эф}} / (V_M \cdot f \cdot m \cdot c_M) \right]$  учитывает параметры нагреваемой заготовки, а  $[\alpha_{\Sigma} \cdot F_{\text{акт}}]$  – параметры нагревательной печи.

Для использования параметра стабилизации существующая в цехе номенклатура нагреваемых заготовок должна быть расположена в очередности по возрастанию или убыванию параметра стабилизации. Затем осуществляется деление всех типоразмеров заготовок на группы по числу печей в цехе. Таким образом, в каждой печи будут нагреваться заготовки с достаточно близкими значениями параметра стабилизации.

Если очередность нагрева заготовок в каждой печи установить тоже в соответствии с ростом или уменьшением параметра стабилизации, то колебания температурного режима печи при переходе с нагрева одного типоразмера на другой будут минимальными.

Использование параметра позволит сократить затраты теплоты на разогрев кладки.

*Исследование влияния очередности нагрева в печи заготовок различных типоразмеров на температурное поле кладки*

Для оценки влияния распределения заготовок между печами по типоразмерам и установления очередности нагрева в печах с учетом параметра стабилизации рассмотрим пример. В кузнечном цехе машиностроительного завода в течение смены должны быть обработаны девять различных типоразмеров заготовок. При нагреве каждого типоразмера в печи необходимо поддерживать температуру газа в рабочем пространстве печи соответственно 1663, 1523, 1633, 1703, 1543, 1773, 1733, 1563, 1603 К. Один из существующих вариантов изменения температуры газа в рабочем пространстве при произвольной очередности нагрева заготовок разных типоразмеров показан в табл. 6.1.

В этой таблице приведены также области изменения температуры газа при распределении типоразмеров заготовок между печами с учетом параметра стабилизации. Из таблицы видно, что максимальная температура газа в печах №1 и №2 уменьшается на 100 К при рекомендуемом режиме работы. Как следствие, сокращаются затраты теплоты на разогрев кладки и уменьшаются потери теплоты кладкой в окружающую среду. При этом в печи №3 максимальная температура газа возрастает на 50 К.

**Таблица 6.1.** Интервалы изменения температуры газа в рабочем пространстве печей, К

| Режим работы  | Номер печи |           |           |
|---------------|------------|-----------|-----------|
|               | 1          | 2         | 3         |
| Существующий  | 1523÷1663  | 1543÷1773 | 1563÷1723 |
| Рекомендуемый | 1523÷1563  | 1603÷1662 | 1703÷1773 |

В целом использование параметра стабилизации для распределения типоразмеров заготовок между печами позволяет снизить расход топлива на группу печей.

Для определения влияния параметра стабилизации на тепловую работу кладки выполнено три варианта расчетов температурного поля кладки:

а) при произвольной очередности нагрева заготовок с разными типоразмерами;

б) при очередности нагрева заготовок с разными типоразмерами в порядке возрастания параметра стабилизации;

в) при очередности нагрева заготовок с разными типоразмерами в порядке убывания параметра стабилизации.

Расчеты производились для кладки, выполненной из шамота класса А толщиной 0,345 м, при нагреве в течение рабочей смены заготовок четырех типоразмеров, для которых поддерживали температуру в рабочем пространстве печи 1655, 1500, 1782, 1511 К. Расчеты производились для печи, работающей в одну, две и три смены в сутки. Время разогрева печи после простоя до необходимой температуры составляло один час. На рис. 6.1 представлены графики изменения температуры газа в рабочем пространстве печи в режиме циклического равновесия.

Температурное поле кладки рассчитывалось методом конечных разностей по явной консервативной схеме [117,118] при условиях радиационно-конвективного нагрева на внутренней поверхности кладки и граничных условиях третьего рода на наружной поверхности. При этом формулировка задачи теплопроводности имеет вид:

$$c(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} ; \quad (6.7)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(1, \tau)}{\partial x} = \sigma_{\varepsilon-к\lambda} [T_{\varepsilon}^4 - T^4(1, \tau)] + \alpha_{\text{вн}} [T_{\varepsilon} - T(1, \tau)], \quad (6.8)$$

где  $\sigma_{\varepsilon-к\lambda}$  – приведенный коэффициент излучения в системе газ–кладка,  $Вт/(м^2 \cdot К^4)$ .

$$\lambda(T) \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_n [T_{oc} - T(0, \tau)] \quad (6.9)$$

$$T(x, 0) = T_{oc} \quad (6.10)$$

Условие (6.10) соответствует первому циклу работы печи после продолжительного простоя.

В соответствии с методом конечных разностей температура во внутренних узлах расчетной сетки на  $j$  временном слое рассчитывается по формуле:

$$T_{i,j+1} = \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2 \cdot c(T_{i,j+0,5})} \cdot [\lambda(T_{i+0,5,j}) \cdot (T_{i+0,5,j} - T_{i,j}) - \lambda(T_{i-0,5,j}) \cdot (T_{i-0,5,j} - T_{i-1,j})]. \quad (6.11)$$

Температура на обогреваемой поверхности кладки определится из условия (6.8):

$$T_{I,j+1} = \frac{\sigma_{\varepsilon-к\lambda} \cdot T_{\varepsilon}^4 + \alpha_{\text{вн}} \cdot T_{\varepsilon} + \lambda(T_{I,j+1}) \cdot (2 \cdot T_{I-1,j+1} - 0,5 \cdot T_{I-2,j+1}) / \Delta x}{[\sigma_{\varepsilon-к\lambda} \cdot T_{I,j+1}^3 + \alpha_{\text{вн}} - 1,5 \cdot \lambda(T_{I,j+1}) / \Delta x]} \quad (6.12)$$

Температура на не обогреваемой поверхности пластины определится из условия (6.9):

$$T_{0,j+1} = \frac{\alpha_n \cdot T_{oc} + \lambda(T_{0,j+1}) \cdot (2 \cdot T_{0+1,j+1} - 0,5 \cdot T_{0+2,j+1}) / \Delta x}{[\alpha_n - 1,5 \cdot \lambda(T_{0,j+1}) / \Delta x]} \quad (6.13)$$

.2.

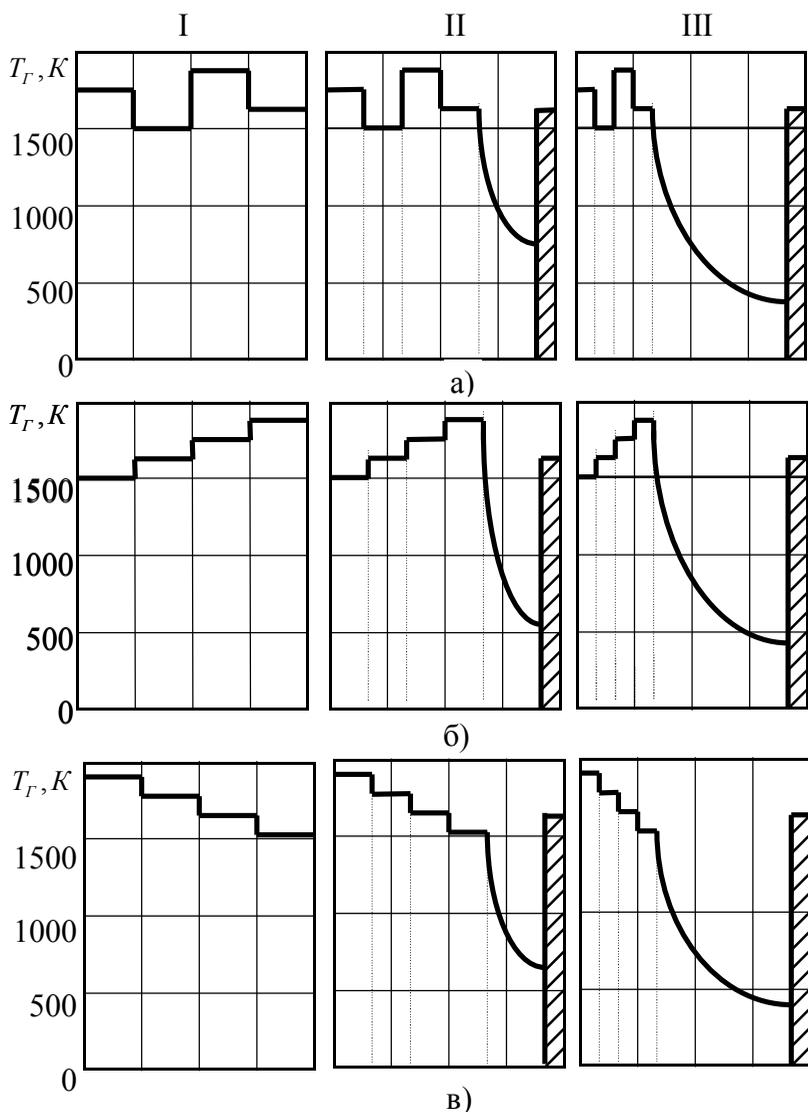


Рис 6.1. Изменение температуры газа в печи при различной очередности нагрева различных типоразмеров заготовок: а – в случайном порядке; б – в порядке возрастания параметра стабилизации; в) – в порядке убывания параметра стабилизации; I, II, III – при трех-, двух- и односменном режимах работы печи соответственно;  - период разогрева печи после простоя

Оценка погрешности расчета температурного поля проводилась по принципу Рунге. Погрешность расчета не превышает 0,2%. Результаты расчета представлены в табл. 6

Анализ результатов показывает, что при трех сменном режиме работы печи очередность нагрева типоразмеров заготовок не влияет на удельные потери теплоты кладкой. Эффект получается при режимах работы в одну и две смены и условии, что очередность нагрева заготовок разных типоразмеров устанавливается в порядке возрастания.

При этом потери теплоты в окружающую среду снижаются на 1–3%. Удельные потери на нагрев кладки, усредненные за цикл работы печи (сутки), для двух- и односменного режимов работы снижаются соответственно на 5,3 и 2,7% по сравнению с произвольной очередностью нагрева типоразмеров заготовок и на 23,2 и 14% по сравнению с очередностью нагрева типоразмеров заготовок по убыванию параметра стабилизации.

**Таблица 6.2.** Удельные потери кладки из шамота в режиме циклического равновесия

| Количество рабочих смен | № варианта | Удельные потери тепла, $кВт/м^2$ |                    |                           | Увеличение потерь по сравнению с наилучшим режимом, % |
|-------------------------|------------|----------------------------------|--------------------|---------------------------|---|
|                         |            | на разогрев                      | в окружающую среду | кладкой при останове печи |   |
| 3                       | а)         | 6,64                             | 4,12               | 0,0                       | 0,0   |
|                         | б)         | 6,37                             | 4,13               | 0,0                       | 0,0   |
|                         | в)         | 7,53                             | 4,13               | 0,0                       | 0,0   |

Окончание табл. 6.2

| Количество рабочих смен | № варианта | Удельные потери тепла, $кВт/м^2$ |                    |                           | Увеличение потерь по сравнению с наилучшим режимом, % |
|-------------------------|------------|----------------------------------|--------------------|---------------------------|---|
|                         |            | на разогрев                      | в окружающую среду | кладкой при останове печи |   |
| 2                       | а)         | 4,83                             | 3,62               | 1,73                      | 5,3   |
|                         | б)         | 4,70                             | 3,60               | 1,64                      | 0,0   |
|                         | в)         | 5,23                             | 3,70               | 2,03                      | 23,2  |
| 1                       | а)         | 2,98                             | 2,62               | 2,88                      | 2,7   |
|                         | б)         | 2,93                             | 2,59               | 2,80                      | 0,0   |
|                         | в)         | 3,11                             | 2,71               | 3,10                      | 14,0  |

## **6.2. Определение производительности нагревательных печей для проектирования нового кузнечного цеха при известной номенклатуре изделий, выпускаемых цехом**

Задачу оптимального распределения номенклатуры заготовок по ТТУ кузнечного цеха целесообразно решать на стадии проектного задания. При проектировании нового кузнечного цеха или реконструкции старого, когда известна номенклатура заготовок, обрабатываемых в цеху, предложенный параметр стабилизации можно использовать в качестве одного из критериев выбора производительности печей. Целевой функцией при таком выборе является минимум издержек производства, а варьируемым параметром – производительность печей.

В настоящее время при проектировании производительность печей определяется исходя из максимальной часовой производительности сопряженного с печами оборудования (станов, прессов, молотов) и выбранного числа печей [119]. Число печей определяется в зависимости от проектируемой схемы работы печи и молота (пресса). Если транспортировка заготовок из печи к любому молоту механизирована, то количество печей не лимитировано и выбирается в зависимости от местных условий. Блочная схема предполагает работу печи и молота в блоке, т.е. печь обслуживает один молот, доставка нагретых заготовок по цеху к другим молотам затруднена. Возможен вариант, когда печи могут обслуживать любой молот. На практике наиболее распространена блочная схема *печь–молот*. Для такой схемы производительность печей принято определять по максимально возможной производительности молотов. Если печь может работать с любым молотом, то разработчик при выборе производительности печи руководствуется практическим опытом.

Типоразмеры заготовок можно распределять между печами с учетом параметра стабилизации температурного режима установки. Для блочной схемы *печь–молот* при распределении типоразмеров заготовок необходимо дополнительно учитывать техническую характеристику молота, в частности, максимально возможную массу обрабатываемой детали.

Для единичного и мелкосерийного кузнечного производства характерна широкая номенклатура нагрываемых заготовок, насчитывающая сотни типоразмеров при небольшом числе заготовок каждого типоразмера.

Каждый типоразмер имеет свой параметр  $Kl$  и соответственно температуру газа, которую необходимо поддерживать в рабочем пространстве печи.

Алгоритм определения производительности печей для вновь проектируемого цеха строится следующим образом. Суммарный годовой фонд рабочего времени в цехе зависит от затрат времени на обработку поковок каждого типоразмера с учетом их сложности:

$$H_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{I_0} (k_{n,i} \cdot \tau_{\kappa,i}) \quad (6.14)$$

где  $I_0$  – количество типоразмеров поковок в цехе;  $k_{n,i}$  – количество поковок  $i$ -го типоразмера в годовой продукции цеха;  $\tau_{\kappa,i}$  – время работы молота, затрачиваемое на одну поковку данного типоразмера.

Количество установок *печь–молот*, необходимое в цехе,

$$Y_n = H_{\Sigma} / \tau_{200}, \quad (6.15)$$

где  $\tau_{200}$  – время работы цеха в году.

Для распределения известной номенклатуры заготовок между печами все существующие в цехе типоразмеры заготовок необходимо расположить в ряд по возрастанию параметра стабилизации, после чего разделить их на группы по числу печей в цехе. Таким образом, в каждой группе будут типоразмеры заготовок с наиболее близкими значениями параметра  $Kl$ , и изменение режима работы печи при переходе от одного типоразмера к другому будет связано с минимальным изменением  $T_r$  и, соответственно, минимальными тепло потерями.

Задачей оптимизации является нахождение границ между группами нагреваемых в разных печах заготовок, которые находятся по условию:

$$\sum_{j=1}^{Y_n} \sum_{l=1}^{X_j} \left[ \sum_{l=1}^{X_j} (Kl_{l,j} \cdot \gamma_{l,j}) - Kl_{l,j} \right]^2 = \min, \quad (6.16)$$

где  $Y_n$  – количество печей, молотов;  $X_j$  – количество типоразмеров на  $j$ - печь (искомая величина);  $l$  – текущий номер типоразмера в  $j$ - й печи;  $j$  – текущий номер печи;  $\gamma_{l,j}$  – количественная доля  $l$ -го типоразмера поковок в продукции  $j$ - й печи.

### 6.2.1. Исследование выбора типа средневзвешенного параметра стабилизации на определение производительности печей

Из приведенных исследований следует, что при трехсменном режиме работы кузнечно-штамповочного производства эффект от использования параметра стабилизации достигается только потому, что колебания температурных режимов от средних режимов минимальны. Этого позволяет добиться условие (6.16). Определение границ деления на группы типоразмеров зависит от разницы по абсолютной величине соседних параметров стабилизации и от среднего параметра стабилизации в группе.

Средний параметр стабилизации в группе определяется по формуле:

$$Kl_{cp,j} = \sum_{l=1}^{X_j} (Kl_{l,j} \cdot \gamma_{l,j}) \quad (6.17)$$

Доля  $l$ -го типоразмера поковок в продукции  $j$ - печи  $\gamma_{l,j}$  в формуле (6.17) может быть определена по четырем методам.

1. Часть, которую составляет  $l$ -й типоразмер от общего числа типоразмеров заготовок, нагреваемых в  $j$ -й печи.

$$\gamma_{l,j} = 1/X_j \quad (6.18)$$

2. Отношение количества заготовок  $l$ -го типоразмера к общему количеству заготовок, нагреваемых в  $j$ -й печи, без учета массы заготовок.

$$\gamma_{l,j} = n_{l,j} / \sum_{l=1}^{X_j} n_{l,j}, \quad (6.19)$$

где  $n_{l,j}$  – количество заготовок  $l$ -го типоразмера в  $j$ -й печи.

3. Отношение объема  $V_{M,l,j}$  (массы) заготовок  $l$ -го типоразмера к общему объёму (массе) заготовок, нагреваемых в  $j$ -й печи

$$\gamma_{l,j} = V_{M,l,j} \cdot n_{l,j} / \sum_{l=1}^{X_j} (V_{M,l,j} \cdot n_{l,j}). \quad (6.20)$$

4. Отношение времени ковки заготовок  $l$ -го типоразмера к общему времени ковки заготовок, нагреваемых в  $j$ -й печи.

$$\gamma_{l,j} = \tau_{к,l,j} \cdot n_{l,j} / \sum_{l=1}^{X_j} (\tau_{к,l,j} \cdot n_{l,j}), \quad (6.21)$$

где  $\tau_{к,l,j}$  – время ковки заготовки  $l$ -го типоразмера при нагреве в  $j$ -й печи.

Таким образом,  $\gamma_{l,j}$  можно назвать весовым коэффициентом средневзвешенного параметра стабилизации, определяемым по одному из четырех методов: абсолютному, количественному, объемному (массовому) или временному.

В табл. 6.3 приведены результаты расчета оптимальной производительности печей и оптимального

распределения номенклатуры заготовок между печами в зависимости от способа определения средневзвешенного параметра стабилизации  $Kl_{cp,j}$  (от способа определения  $\gamma_{l,j}$ ). Исследования проведены с целью выбора варианта реконструкции теплотехнологических установок кузнечного цеха Ивановского завода тяжелого станкостроения производительностью 800  $к2/ч$  на различных выборках из существующей базы данных нагреваемых заготовок.

Из табл. 6.3 видно, что практически не отличаются результаты расчета при определении средневзвешенного параметра стабилизации по абсолютному и объемному признакам, а также при расчете средневзвешенного параметра стабилизации по количественному и временному признакам.

Влияние способа расчета средневзвешенного параметра стабилизации усиливается с увеличением количества типоразмеров заготовок, нагреваемых в цехе. Так, если число типоразмеров составляет 623, то в зависимости от способа определения  $Kl_{cp,j}$  оптимальные производительности установок № 1 и 2 различаются, соответственно, на 22% и 282%, а количество типоразмеров нагреваемых заготовок на – 10% и 24%. В этом случае средневзвешенное значение параметра стабилизации целесообразно рассчитывать по абсолютному методу, где минимальная сумма среднеквадратичных отклонений имеет наименьшее значение. Аналогичные результаты получаются, если количество типоразмеров заготовок обрабатываемых в цехе составляет 500, 400, 200. Если число типоразмеров нагреваемых заготовок составляет 100, то все методы определения  $Kl_{cp,j}$  дают расхождение оптимальной производительности и оптимального количества

нагреваемых в печах типоразмеров заготовок, не превышающее 1%.

Наилучшее усреднение (минимальная сумма среднеквадратичных отклонений) получается при выборе средневзвешенного значения параметра стабилизации по абсолютному методу.

Производительность печей определялась по формуле

$$N_j = \sum_{l=1}^{X_j} (k_{n,l,j} \cdot M_{l,j}) \cdot N_n / \sum_{j=1}^{Y_n} \sum_{l=1}^{X_j} (k_{n,l,j} \cdot M_{l,j}), \quad (6.22)$$

где  $k_{n,l,j}$  – количество поковок, шт;  $l$  – го типоразмера в  $j$  – й печи;  $M_{l,j}$  – масса  $l$  – го типоразмера в  $j$  – й печи, кг;  $N_n$  – проектная производительность цеха, кг/ч.

Исследования, результаты которых приведены в табл. 6.3, выполнены при средних и постоянных значениях  $\alpha_\Sigma, \lambda_M, c_M$ , входящих в формулу (6.1). Из рис. 6.1 видно, что изменение суммарного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_\Sigma$  в пределах 150 – 500  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  не оказывает влияния на распределение номенклатуры заготовок между печами и соответственно производительность печей. Аналогичные результаты получаются при любом способе вычисления параметра  $Kl_{CP,j}$ .

Исследования показали, что изменения коэффициента теплопроводности металла  $\lambda_M$  в интервале от 20 до 50  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  также практически не сказываются на оптимальном распределении номенклатуры заготовок между печами.

Средняя за время нагрева теплоемкость металла  $c_M$  зависит в основном только от марки нагреваемой стали, изменяется при переходе от одного типоразмера к другому

незначительно и не оказывает влияния на оптимальное распределение номенклатуры заготовок между печами.

**Таблица 6.3.** Влияние метода определения средневзвешенного значения параметра стабилизации на оптимальное распределение номенклатуры заготовок между печами

| Количество типоразмеров заготовок, обрабатываемых в цехе | Показатели усреднения                           | Усреднение параметра стабилизации по методам: |     |    |                       |     |    |                       |     |    |                       |     |    |
|--|---|---|-----|----|-----------------------|-----|----|-----------------------|-----|----|-----------------------|-----|----|
|  |   | абсолютному                                   |     |    | количественному       |     |    | объемному (массовому) |     |    | временному            |     |    |
| № ТТУ  |   | 1   | 2   | 3  | 1                     | 2   | 3  | 1                     | 2   | 3  | 1                     | 2   | 3  |
| 623  | Минимальная сумма среднеквадратичных отклонений | 4,60·10 <sup>12</sup>                         |     |    | 5,13·10 <sup>12</sup> |     |    | 4,62·10 <sup>12</sup> |     |    | 5,08·10 <sup>12</sup> |     |    |
|  | Производительность, кг/ч                        | 705   | 85  | 10 | 549                   | 241 | 10 | 706                   | 84  | 10 | 549                   | 241 | 10 |
|  | Количество типоразмеров загот.                  | 436   | 140 | 47 | 398                   | 177 | 48 | 441                   | 135 | 47 | 398                   | 177 | 48 |
| 300  | Минимальная сумма среднеквадратичных отклонений | 1,59·10 <sup>12</sup>                         |     |    | 1,81·10 <sup>12</sup> |     |    | 1,67·10 <sup>12</sup> |     |    | 1,76·10 <sup>12</sup> |     |    |
|  | Производительность, кг/ч                        | 755   | 43  | 2  | 755                   | 43  | 2  | 778                   | 20  | 2  | 752                   | 46  | 2  |
|  | Количество типоразмеров заготовок               | 252   | 39  | 9  | 253                   | 38  | 9  | 261                   | 30  | 9  | 250                   | 41  | 9  |

Окончание табл. 6.3

| Количество типоразмеров заготовок, обрабатываемых в цехе | Показатели усреднения                           | Усреднение параметра стабилизации по методам: |   |   |                       |   |   |                       |   |   |                       |   |   |
|--|---|---|---|---|-----------------------|---|---|-----------------------|---|---|-----------------------|---|---|
|  |   | абсолютному                                   |   |   | количественному       |   |   | объемному (массовому) |   |   | временному            |   |   |
| № ТТУ  |   | 1   | 2 | 3 | 1                     | 2 | 3 | 1                     | 2 | 3 | 1                     | 2 | 3 |
| 100  | Минимальная сумма среднеквадратичных отклонений | 1,00·10 <sup>12</sup>                         |   |   | 1,00·10 <sup>12</sup> |   |   | 1,14·10 <sup>12</sup> |   |   | 1,01·10 <sup>12</sup> |   |   |
|  | Производительность, кг/ч                        | 792   | 7 | 1 | 792                   | 7 | 1 | 791                   | 8 | 1 | 791                   | 8 | 1 |
|  | Количество типоразмеров заготовок               | 88  | 8 | 4 | 88                    | 8 | 4 | 87                    | 9 | 4 | 87                    | 9 | 4 |

В формуле (6.1) обобщенный размер заготовки  $R_g$  является функцией эффективной поверхности металла, которая, в свою очередь, зависит от величины  $R_M = S_3/H_3$  – отношения расстояния между заготовками к высоте заготовок. По результатам исследований определено, что величина  $R_M$  существенно влияет на производительность печей. С увеличением параметра  $R_M$  производительность печи № 1 растет, а печи № 3 – уменьшается.

Однако некоторыми исследователями установлено, что в нагревательных печах кузнечного производства минимум стоимости операции цехового передела

соответствует значению  $R_M=0,5$  [81]. Поэтому, несмотря на существенную зависимость производительности печей от величины  $R_M$ , при решении задачи оптимального распределения номенклатуры заготовок между печами целесообразно принимать  $R_M=0,5$ .

При решении задачи оптимального распределения номенклатуры заготовок между печами и определении производительности печей средневзвешенное значение параметра стабилизации целесообразно определять, используя абсолютный метод, если число типоразмеров обрабатываемых заготовок превышает 100. При меньшем количестве типоразмеров выбор способа усреднения параметра стабилизации не играет роли.

База данных по заготовкам, которые нагреваются в печах, должна быть наиболее полной, так как от этого существенно зависит результат расчета.

Усреднение суммарного коэффициента теплоотдачи к металлу  $\alpha_\Sigma$ , а также теплофизических свойств металла  $\lambda_M$ ,  $c_M$  не оказывают существенного влияния на величину средневзвешенного параметра стабилизации и соответственно производительность проектируемых печей.

Отношение толщины нагреваемых заготовок к расстоянию между ними  $R_M$  существенно влияет на распределение типоразмеров заготовок между печами. Однако в соответствии с [81] целесообразно принимать  $R_M=0,5$ .

### **6.2.2. Метод ускоренного решения задачи оптимизации по определению производительности нагревательных печей**

Наиболее надежный метод решения уравнения (6.16) – перебор вариантов. Но простым перебором вариантов это уравнение при большом количестве печей непосильно

даже современной вычислительной технике. Время вычисления задачи для базы данных нагреваемых заготовок для машиностроительного предприятия приведено на рис. 6.2. Из графика видна необходимость разработки эффективного алгоритма расчета уравнения 6.16.

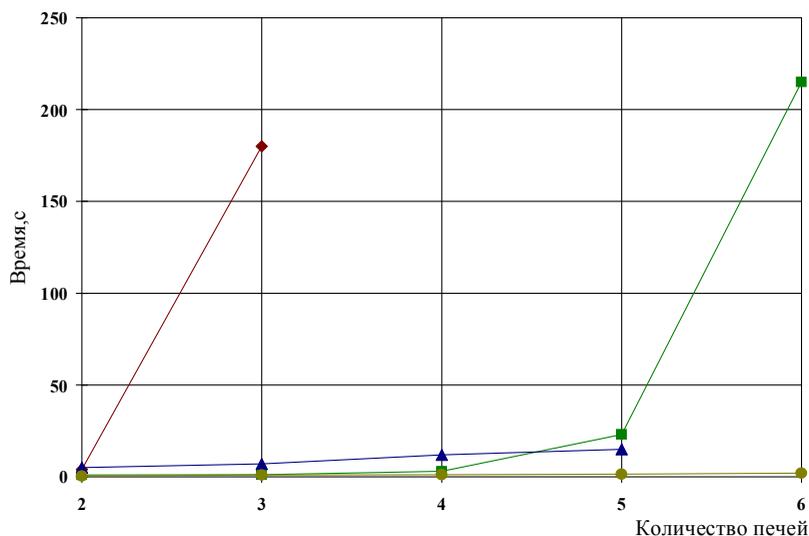


Рис.6.2. Влияние на время счета количества установок при нахождении оптимального значения  $X_j$  – количества типоразмеров на  $j$  - печь для алгоритма построенного на методе перебора вариантов и для алгоритма предложенного ниже: —♦— перебор 623 заготовок; —▲— предложенное решение перебора 623 заготовок; —■— перебор 50 заготовок; —◆— предложенное решение перебора 50 заготовок

В работе [120] приведен алгоритм, который основан на предположении: граница деления нагреваемых заготовок на группы должна находиться в местах резкого изменения значений параметра  $Kl$ . Поэтому в качестве первого приближения выбираются границы в местах

резкого изменения значений параметра  $Kl$ , затем перемещением границы от принятой границы вправо и влево до следующей уточняется принятое распределение. Расчеты показывают, что программа, составленная по такому алгоритму, работает быстро, но не всегда дает точный результат по сравнению с программой, построенной на методе перебора вариантов.

Можно совместить достоинства обоих алгоритмов. Первый алгоритм будем использовать для сужения области поиска оптимального решения. Второй – для уточнения оптимального решения. В чистом виде первый алгоритм использовать нельзя, так как решение по этому алгоритму может оказаться как справа, так и слева от оптимального решения, а для снижения области поиска решение по первому алгоритму должно оказываться и справа и слева от оптимального. Это будет зависеть от выбора первоначального деления на группы. Для выбора начального распределения чтобы после уточнения границ решение всегда находилось слева от оптимального значения или совпадало с ним лучше воспользоваться кратным делением нагреваемых заготовок по количеству печей. Поэтому в качестве первого приближения деления заготовок на группы используется ниже приведенная формула

$$n_i^{\circ} = (\sum_{j=1}^{Y_n} X_j) / Y_n \cdot i, \quad (6.23)$$

где  $n_i^{\circ}$  – номер элемента, по которому проходит  $i$ -я граница деления на группы в первом приближении слева от оптимального значения.

Для сужения границы справа в качестве начального распределения лучше выбрать деление с учетом параметра  $Kl$

$$n_i^{\Pi} = \left( \sum_{j=1}^{Y_n} \sum_{l=1}^{X_j} Kl_{l,j} \right) / Y_n \cdot i, \quad (6.24)$$

где  $n_i^{\Pi}$  – номер элемента, по которому проходит  $i$ -я граница деления на группы в первом приближении справа от оптимального значения.

После того, как проведено предварительное деление на группы по формуле (6.23) и (6.24), происходит уточнение этих границ деления на группы. Как в предыдущем алгоритме, перемещением границы от принятой границы вправо и влево до следующей границы, уточняется принятое распределение.

Таким образом получаем два решения приближенных к оптимальному решению. При чем оптимальное решение находится между этими приближенными или может совпасть с одним из этих приближенных решений.

Далее используется алгоритм, построенный на методе перебора вариантов, но диапазон варьирования параметров для него значительно сужен, т.е. перебираются только те варианты, которые находятся между двумя приближенными решениями. На рис. 6.3 а), приведён пример решения задачи по уравнению (6.16) для выборки состоящей из пятидесяти типоразмеров заготовок при делении их на 2, 3, 4, 5 и 6 печей.

На рис. 6.3 б), в виде гистограммы показано решение задачи оптимизации распределения 50 типоразмеров на шесть нагревательных печей. На гистограмму также нанесены точки, полученные приближенными решениями, по алгоритмам у которых в качестве первого приближения использовано деление на группы по формулам (6.23), (6.24).

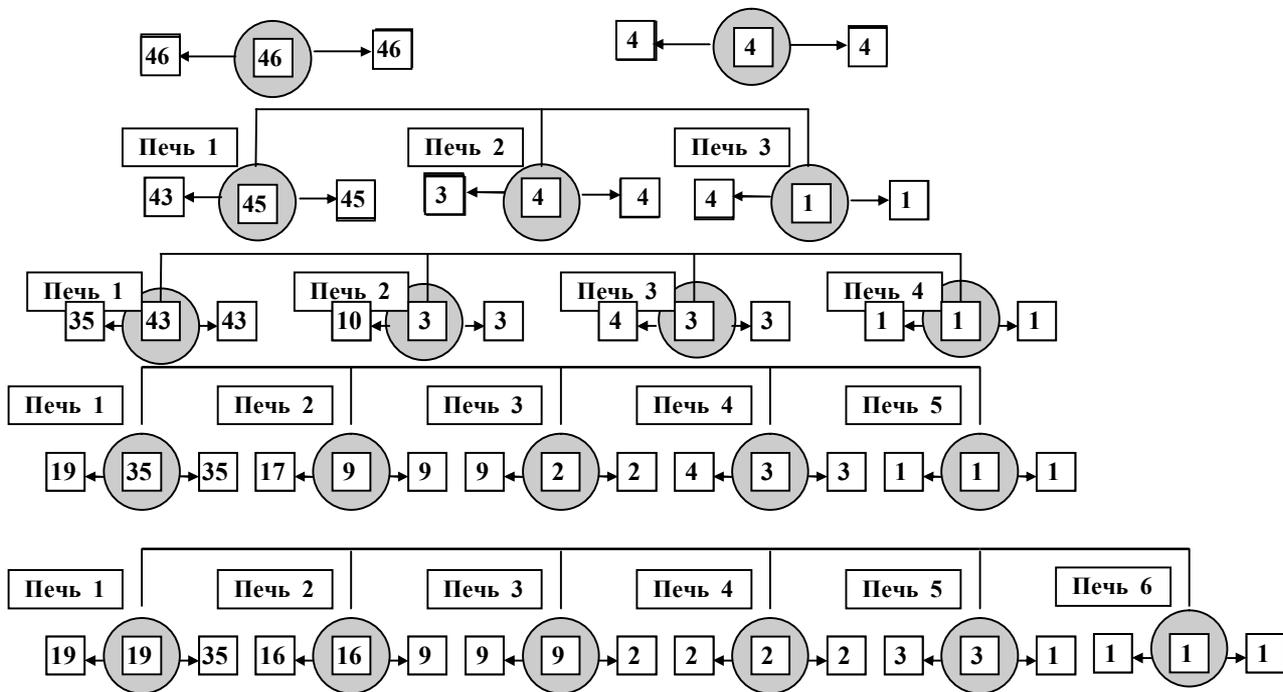


Рис.6.3. а. Результаты расчета оптимального распределения по 2,3,4,5,6 печам для нагрева пятидесяти типоразмеров заготовок под ковку

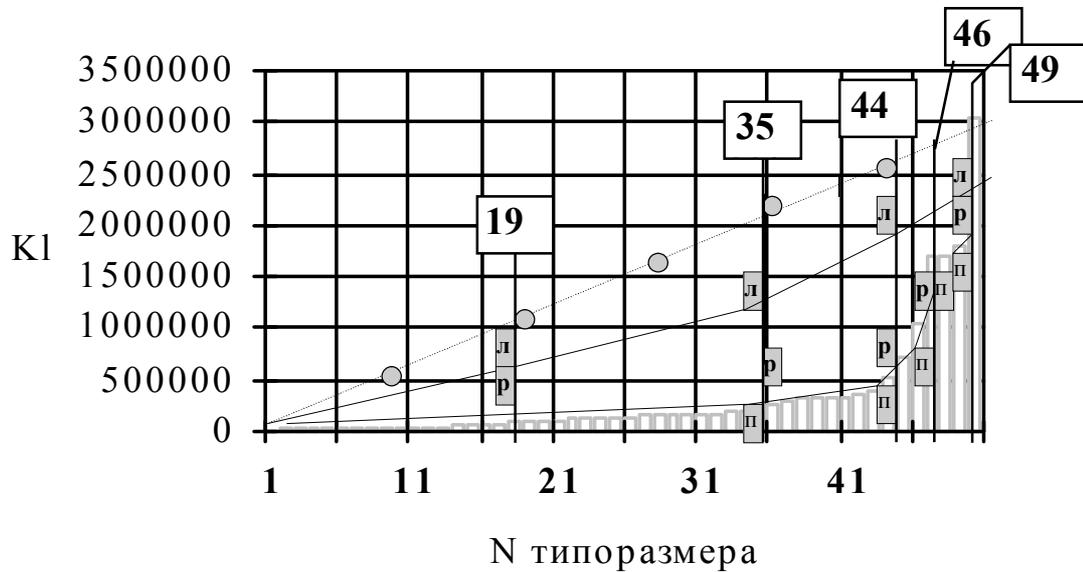


Рис. 6.3. б. Результаты оптимального распределения 50-ти типоразмеров заготовок на шесть нагревательных печей :.....●..... - распределение в первом приближении по формуле 6.23; - л- уточненное распределение по формуле 6.23; - п- уточненное распределение по формуле 6.24; - р- оптимальное распределение

Предложенный метод решения уравнения значительно сокращает время решения оптимизационной задачи, распределения нагреваемых типоразмеров заготовок по печам, решение которой позволяет снизить расход топлива на группу печей. В сравнении с методом перебора вариантов точность выбора оптимального решения не изменяется.

### **6.3. Использование параметра стабилизации для улучшения организации работы производства действующего кузнечно-штамповочного цеха**

#### **6.3.1. Учёт температурных напряжений в начальной стадии нагрева металла**

Режим нагрева металла в печах кузнечного производства зависит от группы нагреваемой стали. Для мягких углеродистых и низколегированных сталей с температурой началаковки выше  $1200^{\circ}\text{C}$  температурные напряжения в процессе нагрева не опасны [121], поэтому скорость нагрева металла не ограничена, и нагрев осуществляется при постоянной номинальной температуре газа. Для средне- и высоколегированных сталей, для которых температура началаковки меньше или равна  $1200^{\circ}\text{C}$ , скорость нагрева в начальном периоде (до достижения температуры  $500^{\circ}\text{C}$ ) ограничивается возникающими в металле температурными напряжениями [121]. Нагрев металла в начальном периоде осуществляется при пониженной температуре газа, которая является функцией термического сопротивления металла и допустимого перепада температур по сечению заготовки.

Метод оптимального распределения типоразмеров заготовок между печами и очередности нагрева в каждой печи отдельных типоразмеров, изложенный выше, имеет ряд допущений. В том числе, метод не учитывает

ограничение по температуре газа в начальном периоде нагрева средне- и высоколегированных сталей.

При заданных параметрах качество нагрева металла температура газа  $T_G$  определяется решением сопряженной задачи теплообмена в системе газ–кладка–металл (6.1). Если темп выдачи металла из печи соответствует времениковки, то параметр стабилизации определяется по формуле (6.4).

Сопоставляя (6.1) и (6.5) получим

$$Kl = c_M / (\alpha_\Sigma \cdot F_{AKT}) \cdot \left| \ln \left( T_G - T_{M,K} \right) / \left( T_G - T_{M,0} \right) \right|. \quad (6.25)$$

На основе решения (6.1) температура поверхности металла в конце нагрева  $T_{M,K}^{\text{II}}$  согласно [122] рассчитывается по формуле

$$\left( T_G - T_{M,K}^{\text{II}} \right) / \left( T_G - T_{M,0} \right) = 1/m \cdot \exp \left[ -\alpha_\Sigma \cdot \tau / \left( c_M \cdot R_g \cdot m \right) \right]. \quad (6.26)$$

Температура теплового центра заготовки в конце нагрева  $T_{M,K}^{\text{II}}$  определяется из выражения

$$\left( T_G - T_{M,K}^{\text{II}} \right) / \left( T_G - T_{M,0} \right) = (1 + 0,5 \cdot Bi) / m \cdot \exp \left[ -\alpha_\Sigma \cdot \tau / \left( c_M \cdot R_g \cdot m \right) \right], \quad (6.27)$$

где  $Bi = \alpha_\Sigma \cdot R_g / \lambda_M$  – критерий Био.

Максимальный температурный перепад в заготовке наступает в конце времени запаздывания  $\tau_3$

$$\tau_3 = R_g^2 / (2 \cdot k \cdot a_M), \quad (6.28)$$

где  $a_M$  – коэффициент температуропроводности,  $m^2/c$ .

Для определения максимальной разности температур между поверхностью и центром подставим вместо  $\tau, \tau_3$  и вычтем из (6.26) (6.25):

$$\Delta T_{MAX} = T_{M,K}^{\text{II}} - T_{M,K}^{\text{I}} = 0,5 \cdot Bi \cdot \left( T_G - T_{M,0} \right) / m \cdot \exp \left[ -Bi / (2 \cdot k \cdot m) \right]. \quad (6.29)$$

Если принять коэффициент Пуассона  $\nu = 0,25-0,3$  (справедливо для сталей любых марок), а произведение линейного коэффициента теплового расширения на модуль

упругости  $\alpha_T \cdot E = 2,5$  (что справедливо для сталей при размерности модуля упругости  $m \cdot H / m^2$ ), то для определения допустимого перепада температур по сечению металла в момент  $\tau_3$  можно воспользоваться упрощенными формулами [123]:

$$\Delta T_{доп,1} = (2 + k) / (3,6 \cdot k) \cdot \sigma_{доп,1}(T_M); \quad (6.30)$$

$$\Delta T_{доп,2} = (2 + k) / 7,2 \cdot \sigma_{доп,2}(T_M), \quad (6.31)$$

где  $\sigma_{доп,1}(T_M)$ ,  $\sigma_{доп,2}(T_M)$  – величина допустимого термического напряжения соответственно на растяжение и сжатие для данной марки металла. При этом под  $\sigma_{доп}$  понимается предел текучести.

Подставив уравнения (6.30) и (6.31) в (6.29), получим

$$T_{Г,3} = T_{M,0} + 2 \cdot m \cdot (2 + k) / (3,6 \cdot k \cdot Bi) \cdot \sigma_{доп,1} \cdot \exp[Bi / (2 \cdot k \cdot m)]; \quad (6.32)$$

$$T_{Г,3} = T_{M,0} + 2 \cdot m \cdot (2 + k) / (7,2 \cdot Bi) \cdot \sigma_{доп,2} \cdot \exp[Bi / (2 \cdot k \cdot m)], \quad (6.33)$$

где  $T_{Г,3}$  – температура газа, которую нельзя превышать в рабочем пространстве печи в начальном периоде нагрева, чтобы максимальный перепад температур в заготовке  $\Delta T_{MAX}$  не превышал допустимый  $\Delta T_{доп}$ .

При решении задачи возможны три случая.

1.  $T_{Г,3} < T_G$ , но  $T_{Г,3} > T_{M,K}^II$ .

В этом случае нагрев осуществляется в одну стадию при постоянной температуре газа, равной  $T_{Г,3}$ . Параметр стабилизации, рассчитанный по формуле (6.25)  $KI^{6.25}$ , будет больше, чем параметр, вычисленный по формуле (6.5)  $KI^{6.5}$ . Данный типоразмер переместится в номенклатурном ряду в соответствии с параметром  $KI^{6.25}$ .

2.  $T_{Г,3} > T_G$ .

В этом случае за расчетное значение температуры газа следует принять значение  $T_G$ , найденное решением сопряженной задачи теплообмена. Ей будет соответствовать параметр  $KI^{6.5}$ . Нагрев металла осуществляется в одну стадию.

$$3. T_{G,3} < T_G, \text{ и } T_{G,3} < T_{M,K}^{\text{II}}.$$

В этом случае необходим двухстадийный нагрев: в первом периоде при температуре газа  $T_{G,3}$ , во втором периоде при температуре  $T_G$ . Параметр стабилизации в этом случае не определен, так как в формуле (6.25) выражение под знаком логарифма отрицательно.

В качестве примера рассмотрим распределение нескольких типоразмеров заготовок между нагревательными печами (табл. 6.4)

Из таблицы видно, что типоразмеры заготовок № 1 и № 4 имеют температуры началаковки выше  $1200^\circ\text{C}$ , поэтому нагрев этих заготовок осуществляется в одну стадию при постоянной температуре газа  $T_G$ , а их место в номенклатурном ряду определяется параметром стабилизации, рассчитанным по формуле (6.5)  $KI^{6.5}$ . Типоразмер № 5 имеет  $KI^{6.25} > KI^{6.5}$ , его нагрев осуществляется в одну стадию при температуре газа  $T_{G,3}$ . Типоразмер № 6 имеет  $KI^{6.25} < KI^{6.5}$  и, соответственно, нагрев осуществляется в одну стадию при температуре газа  $T_G$ . Типоразмеры заготовок № 2, № 3, № 7 имеют  $T_{G,3} < T_G$  и  $T_{G,3} < T_{M,K}^{\text{II}}$ ; для них параметр стабилизации  $KI^{6.25}$  не определен. Эти типоразмеры должны иметь двухстадийный нагрев и должны быть выведены из номенклатурного ряда.

**Таблица 6.4.** Пример расчета параметра стабилизации для некоторых типоразмеров нагреваемых заготовок в камерных нагревательных печах

| Наименование параметра                                       | Номер заготовки         |                                      |                                      |                                  |                                       |                            |                                      |
|--|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
|  | 1                       | 2                                    | 3                                    | 4                                | 5                                     | 6                          | 7                                    |
| № п/п  |                         |                                      |                                      |                                  |                                       |                            |                                      |
| Начальные размеры, <i>м</i>                                  | Ø-0,2;<br><i>l</i> -0,3 | Ø-0,15;<br><i>l</i> -0,61            | Ø -0,18;<br><i>l</i> -0,306          | Ø-0,14;<br><i>l</i> -0,308       | a-0,06;<br>b-0,15;<br><i>l</i> - 0,78 | Ø-0,075;<br><i>l</i> -0,56 | Ø-0,2;<br><i>l</i> -0,104            |
| Марка стали  | 20X                     | 7XГ2ВМ                               | ШХ15                                 | 45                               | 7XГ2ВМ                                | 25X2H4MA                   | 18XГТ                                |
| Ориентировочное время ковки, <i>с</i>                        | 114                     | 161                                  | 117                                  | 79                               | 87                                    | 69                         | 124                                  |
| Конечные размеры, <i>мм</i>                                  | Ø-323;<br><i>l</i> -143 | a-14;<br>b-65;<br><i>l</i> -1038     | Ø -19;<br><i>l</i> -255              | a-486;<br>b-121;<br><i>l</i> -86 | a-55;<br>b-11;<br><i>l</i> -1035      | Ø -75<br>72<br>440<br>Ø 85 | Ø 224;<br>Ø 103;<br><i>l</i> -97     |
| Допустимое термическое напряжение, <i>МПа</i>                | 195                     | 550                                  | 370                                  | 175                              | 550                                   | 970                        | 300                                  |
| Температуры начала и конца ковки <i>T</i> , °C               | 1280 ÷<br>750           | 1160 ÷<br>800                        | 1150 ÷<br>800                        | 1250 ÷<br>700                    | 1160 ÷<br>800                         | 1200 ÷<br>800              | 1200 ÷<br>800                        |
| Обобщенный размер заготовки, <i>R<sub>g</sub></i> , <i>м</i> | 0,0599                  | 0,0601                               | 0,0568                               | 0,0488                           | 0,0505                                | 0,0407                     | 0,0402                               |
| Параметр стабилизации заготовки <i>Kl</i> <sup>6.4</sup>     | 13500                   | 14900                                | 16600                                | 17900                            | 13000                                 | 22600                      | 43600                                |
| Допустимый температурный перепад $\Delta T$ , °C             | 382                     | 1072                                 | 762                                  | 415                              | 1260                                  | 2181                       | 857                                  |
| Допустимый параметр стабилизации, <i>Kl</i> <sup>6.25</sup>  | -                       | -                                    | -                                    | -                                | 33190                                 | 10402                      | -                                    |
| Принятый параметр стабилизации <i>Kl</i>                     | 13500                   | <i>T<sub>Г</sub></i> -<br>переменная | <i>T<sub>Г</sub></i> -<br>переменная | 17900                            | 33190                                 | 22600                      | <i>T<sub>Г</sub></i> -<br>переменная |

Метод оптимального распределения номенклатуры заготовок между нагревательными печами кузнечного производства и очередности нагрева в каждой печи отдельных типоразмеров заготовок распространен на случай нагрева легированных сталей.

Разработан алгоритм, позволяющий определять для каждого типоразмера заготовок необходимость одно- или двухстадийного режима нагрева с учетом температурных напряжений в начальной стадии.

#### **6.4. Оптимизация организации и прогнозирование работы теплотехнологических установок при работе производства с полной загрузкой**

Этот алгоритм можно использовать на кузнечно-штамповочном производстве различных предприятий. Алгоритм предназначен для рационализации производства продукции в кузнечно-штамповочном производстве при энергоэффективном использовании оборудования.

При создании алгоритма преследовались следующие цели: повышение энергетической эффективности работы кузнечно-штамповочного производства; развитие навыков персонала кузнечного цеха по грамотной эксплуатации теплотехнологического оборудования; снижение затрат на производство единицы продукции за счет оптимизации режима работы установки *печь–молот* и оптимизации затрат энергии на группу установок в цехе; создание карт технологического процесса.

На любом машиностроительном предприятии необходимо управлять производством. Распределять работы между цехами. Для кузнечно-штамповочного производства определять срок, наименование и количество заготовок, необходимых к выпуску.

Кузнечно-штамповочное производство может включать холодную, полугорячую и горячую ковку,

штамповку, прокатку, прессование и другие процессы, предназначено для преобразования механическим воздействием форм заготовок к виду готового изделия.

Для этого в цехе имеется несколько тепло-технологических установок – нагревательных печей со вспомогательным оборудованием, а также молоты, штампы, прессы и т.п.

На основе задания из «Отдела управления производством» специалист, занимающийся организацией работы цеха на заданный период, определяет какие заготовки, в какой день и на какой ТТУ будут обрабатываться. Затем оформляется и выдается «Техническое задание для обслуживающего персонала ТТУ».

Обслуживающим персоналом ТТУ являются нагревальщик – специалист, обслуживающий нагревательную печь, и кузнец – специалист, обслуживающий молот. Нагревальщик, согласно заданию, обеспечивает непрерывную подачу заготовок в печь и устанавливает температуру в печи регулированием расхода газа. После нагрева заготовки до температуры, заданной технологическим процессом, подаются на молот для механического воздействия.

Заготовки после обработки поступают на склад. Далее по мере необходимости они поступают в другие производственные цеха.

Алгоритм оптимизации и организации и прогнозирования работы производства состоит из двух этапов.

Первый этап должен оптимизировать работу кузнечного цеха на длительный период (неделя, месяц, год и т.д.). Для оптимального распределения номенклатуры заготовок кузнечного цеха должны быть определены возможности цеха по повышению производительности

труда. Большое влияние на уменьшение затрат в кузнечно-штамповочном производстве оказывает размер партий заготовок. Увеличение размера партий способствует повышению производительности труда за счет приобретения рабочими производственных навыков, и уменьшение в среднем затрат на одну деталь обеспечивает более полное использование времени работы оборудования, упрощает планирование и учет. Вместе с тем удлиняется производственный цикл, возникают дополнительные потребности в производственных и складских помещениях, увеличивается объем незавершенного производства, что связывает часть оборотных финансовых средств.

В многономенклатурном производстве установление для каждой детали индивидуального размера партий усложняет календарное планирование. Поэтому в настоящее время принят машинно-комплексный метод планирования. С развитием вычислительной техники и все большим применением ее для оперативного планирования стала возможным оптимизация партий для каждого типоразмера заготовок. За критерий оптимизации в математической модели принимается минимум издержек цехового передела. Причем если количество излишков  $i$ -го типоразмера на складе больше необходимого запаса, то при определении оптимального размера партии этот типоразмер не учитывается. Для тех типоразмеров заготовок, запас которых на складе меньше нормы, оптимальный размер партии определяется из условия минимума суммы затрат на переналадку  $S_{з.пер}$  и потерь от связывания оборотных средств  $S_{об.с}$ .

$$\frac{d}{d\Pi_i} [S_{з.пер}(\Pi_i) + S_{об.с}(\Pi_i)] = 0; \quad (6.34)$$

$$\frac{d^2}{d\Pi_i^2} [S_{з.пер}(\Pi_i) + S_{об.с}(\Pi_i)] > 0. \quad (6.35)$$

Решив систему уравнений (6.33) и (6.34), получим выражение, которое имеет вид

$$\Pi_i = K_{уз.и} \cdot K_{н.н} \cdot N_{год} / N_{расч} \times \sqrt{\frac{(K_{сл} - 0,82) \cdot R_{расч} \cdot K_{уз.и} \cdot K_{н.с}}{R_{расч} \cdot K_{д.з} \cdot K_{пр} \cdot K_{соц} \cdot K_{уз.и} \cdot K_{н.н} / P_{вед.и} + S_{М.и} + S_{кз.и}} \cdot P_{вед.и}} + 1, \quad (6.36)$$

где  $K_{уз.и}$  – количество изделий  $i$ -го типоразмера, которое необходимо изготовить за расчетный период (*шт.*);  $K_{н.н}$  – коэффициент перевыполнения плана;  $N_{год}$  – количество рабочих суток в рассчитываемый год;  $N_{расч}$  – количество рабочих суток за расчетный период;  $K_{сл}$  – коэффициент сложности, учитывающий расход подготовительно-заключительного периода;  $K_{д.з.}$  – коэффициент дополнительной заработной платы;  $K_{пр}$  – коэффициент премии;  $K_{соц}$  – коэффициент отчислений на социальное страхование;  $R_{расч}$  – расценка операцииковки  $i$ -го типоразмера, *руб.*;  $P_{вед.и}$  – масса комплекта заготовок  $i$ -го типоразмера, *кг.*;  $S_{М.и}$  – затраты на материал для  $i$ -го вида продукции, *руб./кг.*;  $S_{кз.и}$  – косвенные затраты цеха (затраты на содержание и эксплуатацию оборудования, цеховые затраты  $i$ -го вида продукции), *руб./кг.*

При учете затрат на переналадку  $S_{з.пер}$  были использованы поправочные коэффициенты на партию к норме штучного времени. При учете расценки операцииковки с поправочным коэффициентом размера партии  $K_{р.н}=1,0$  она может в зависимости от размера партии  $K_{р.н}$  увеличиваться или уменьшаться. Поэтому, если партия состоит из числа заготовок более 20 шт., требуется уточнение оптимального размера партии, которое

производиться по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
 \Pi_i = & K_{uzi} \cdot K_{n.n} \cdot N_{zod} / N_{расч} \times \\
 & \times \sqrt{\frac{(K_{сл} - 0.92) \cdot R_{расч} \cdot K_{uzi} \cdot K_{n.n} \cdot 0.8}{R_{расч} \cdot K_{\partial з} \cdot K_{np} \cdot K_{соц} \cdot K_{uzi} \cdot K_{n.n} / P_{ведi} + S_{Mi} + S_{кзи}} \cdot P_{ведi}} + 1}. \quad (6.37)
 \end{aligned}$$

Если производительность цеха, составленная из оптимальных партий, получится больше проектной, то в партиях с числом заготовок более 50 шт. устанавливается число заготовок, равное 50. Так как увеличение партии свыше 50 шт., уже не способствует увеличению производительности труда за счет приобретения кузнцом производственных навыков, т.е. уменьшению  $K_{p.n}$ , а уменьшение числа заготовок в партии значительно увеличивает времяковки. Если и в этом случае производительность цеха получится больше проектной, то каждая партия заготовок пропорционально уменьшается в соответствии с проектной производительностью цеха.

Затем уточняется коэффициент размера партии, влияющий на расценку операцииковки. Он вычисляется по формуле

$$K_{p.n} = 0,994 \cdot e^{-0,0000218 \cdot \Pi_i}. \quad (6.38)$$

Потери от связывания оборотных средств на страховой запас определяются по формуле

$$H_i = (S_{з.i} + S_{m.i}) \cdot P_{вед.i} \cdot C_{над} \cdot C_{нтд} / N_{расч}, \quad (6.39)$$

где  $S_{з.i}$  – основная заработная плата  $i$ -го вида продукции;  $C_{над}$  – степень надежности оборудования;  $C_{нтд}$  – степень нарушения трудовой, производственной и технологической дисциплины.

Цеховая себестоимость  $i$ -го типоразмера в  $j$ -й день определяется по формуле

$$C_{z.i} = S_{ц.n} \cdot P_{вед.i} \cdot \Pi_i / (K_{uzi} \cdot K_{n.n}). \quad (6.40)$$

Затем уточняется размер запаса для  $i$ -го типоразмера на складе после  $j$ -го дня работы и определяется суммарная себестоимость за расчетный период.

Описанный алгоритм используется для разработки программы распределения номенклатуры заготовок между печами кузнечного цеха.

Блок-схема алгоритма распределения заготовок между печами на заданный период с оптимизацией партий заготовок по минимуму издержек цехового передела приведена на рис. 6.4.

Модель позволяет для действующего кузнечно-штамповочного производства распределить номенклатуру заготовок между печами цеха с оптимизацией партий заготовок по минимуму издержек цехового передела на заданный период, а также определить за расчетный период:

- количество отходов металла в цехе;
- себестоимость продукции за каждый день работы цеха;
- затраты на материал;
- приведенные затраты цехового передела на 1 кг продукции в кузнечном цехе за расчетный период;
- приведенную заработную плату основных рабочих.

Данный метод может применяться для цехов машиностроительных заводов при планировании производства на день, неделю, месяц, квартал и т.д. Если во время производства возникает необходимость в обработке нового изделия, программа предусматривает возможность включения его в производственный процесс.

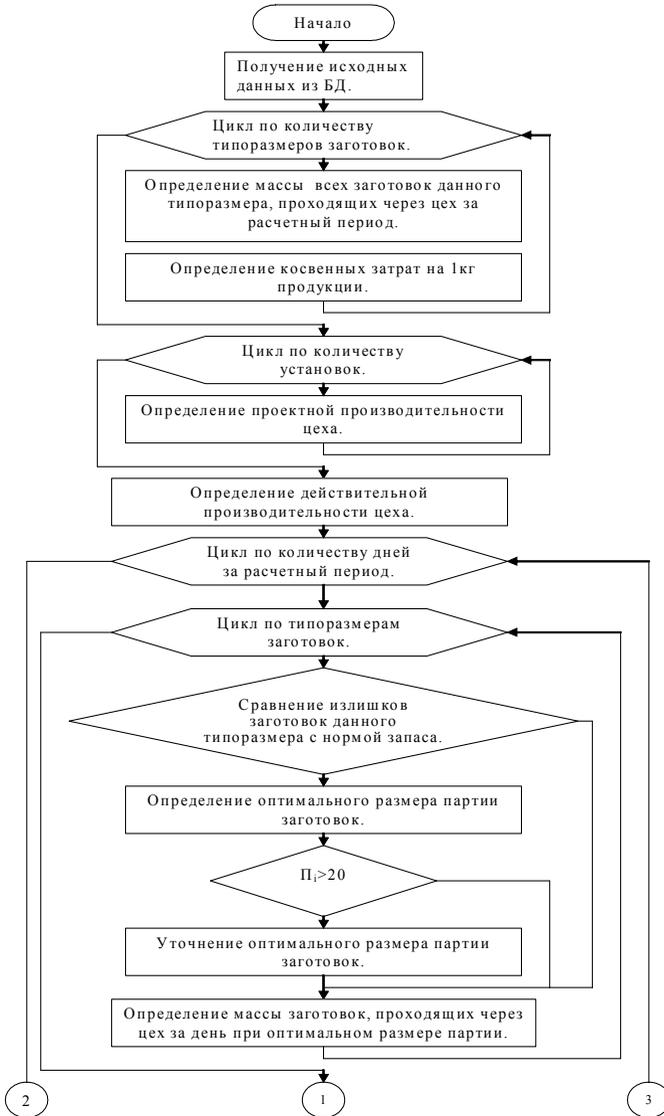


Рис. 6.4. Блок-схема алгоритма распределения номенклатуры кузнечно-штамповочного производства с оптимизацией партий заготовок (начало)

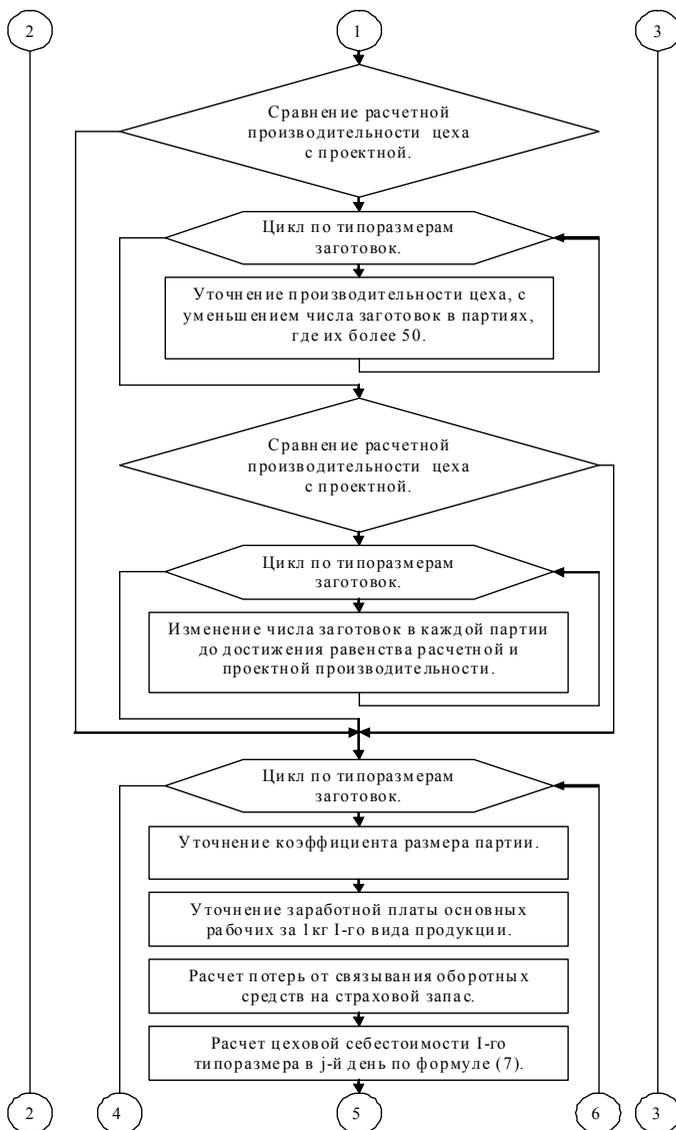


Рис. 6.4. Блок-схема алгоритма распределения номенклатуры кузнечно-штамповочного производства с оптимизацией партий заготовок (окончание)

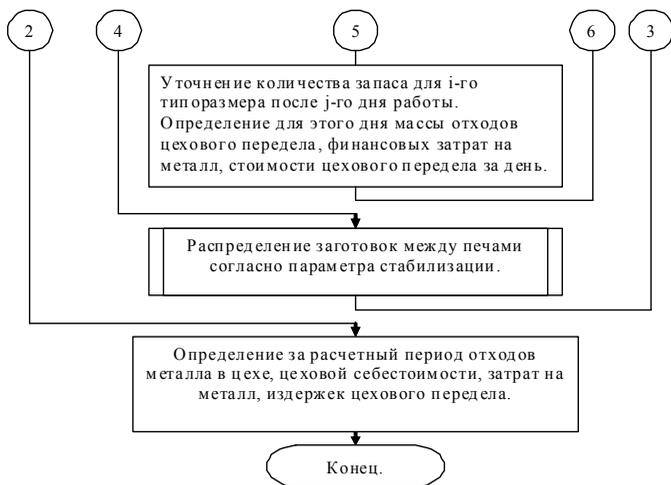


Рис. 6.4. Блок-схема алгоритма распределения номенклатуры кузнечно-штамповочного производства с оптимизацией партий заготовок (окончание)

Второй этап должен оптимизировать режимные параметры работы установок. Целесообразность внедрения данного этапа обусловлена тем, что в настоящее время многие предприятия различных отраслей промышленности, в которых применяется кузнечно-штамповочное оборудование (для нагрева металла при последующей его пластической обработке) сталкиваются с экономическими трудностями, которые связаны с повышением цен на топливо, электроэнергию.

Экономия энергоресурсов зависит от умения грамотно управлять оборудованием в цехе, а в частности, построить работу печей так, чтобы при распределении и смене типоразмера заготовок изменение температуры газа в рабочем пространстве печи не приводила к дополнительным затратам теплоты на разогрев кладки. То есть должно управляться распределение нагреваемых типоразмеров между печами и очередность нагрева их в печи.

Для этого можно использовать метод оптимизации расхода топлива согласно «параметру стабилизации». Учет этого параметра позволяет решать задачу оптимального распределения номенклатуры заготовок между печами кузнечного цеха с единичным и мелкосерийным производством продукции и устанавливать наиболее целесообразную очередность нагрева типоразмеров заготовок с целью уменьшения затрат теплоты на разогрев кладки и потерь теплопроводностью через кладку печи.

Параметр стабилизации температурного режима определяется из решения задачи теплопроводности для тел умеренной массивности (6.1), нагреваемых в среде с постоянной температурой при граничных условиях 3-го рода.

Для каждого типоразмера заготовок при нагреве в печи отношение единичного приращения энергии с наружной стороны заготовки к внутреннему единичному приращению постоянно и определяется по формуле (6.3). В печах с непрерывным процессом загрузки и выгрузки время нагрева и ковки связаны между собой отношением (6.4). Приведенный коэффициент теплоотдачи в общем случае является функцией температуры газов, конечной температуры металла и обобщенного размера заготовки. Исследования показывают, что приведенный коэффициент теплоотдачи для интервала температур газа, характерных для нагрева металла под ковку и конечных температур поверхности металла  $T_{M,K} = 1373 - 1573 \text{ K}$ , а также значений обобщенного размера  $R_V = 0,005 - 0,03 \text{ м}$ , изменяется в пределах  $\alpha_\Sigma = 300 - 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ K})$  и в нулевом приближении может быть принят средним и постоянным. При таком допущении можно отношение записать в виде (6.5). В таком виде параметр стабилизации можно использовать при решении одноуровневой задачи

оптимизации, т.к. коэффициенты  $\alpha_{\Sigma}$ ,  $c$ ,  $f_{эф}$  принимаются постоянными коэффициентами.

При решении одноуровневой задачи оптимизации в качестве целевой функции принимается минимум издержек производства, на которые влияют три параметра: выбор установки для обработки изделия, выбор очередности обработки различных типоразмеров в течение смены в каждой установке и выбор количества заготовок каждого типоразмера (размер партии), которые должны обрабатываться (рис. 6.5).

Для использования параметра стабилизации все обрабатываемые в этот день в цехе типоразмеры нагреваемых заготовок должны быть расположены в ряд по возрастанию параметра стабилизации, после чего осуществляется деление всех типоразмеров заготовок на группы по числу печей в цехе. В данной математической модели используются усреднённые параметры стабилизации с постоянными коэффициентами  $\alpha_{\Sigma}$ ,  $c$ ,  $f_{эф}$ . Очередность обработки каждого типоразмера производится в порядке возрастания параметра стабилизации.

Таким образом, в каждой печи будут нагреваться заготовки с достаточно близкими значениями параметра стабилизации (близкими режимами термообработки). В результате экономия топлива скажется за счет снижения затрат, связанных с перегревом кладки.

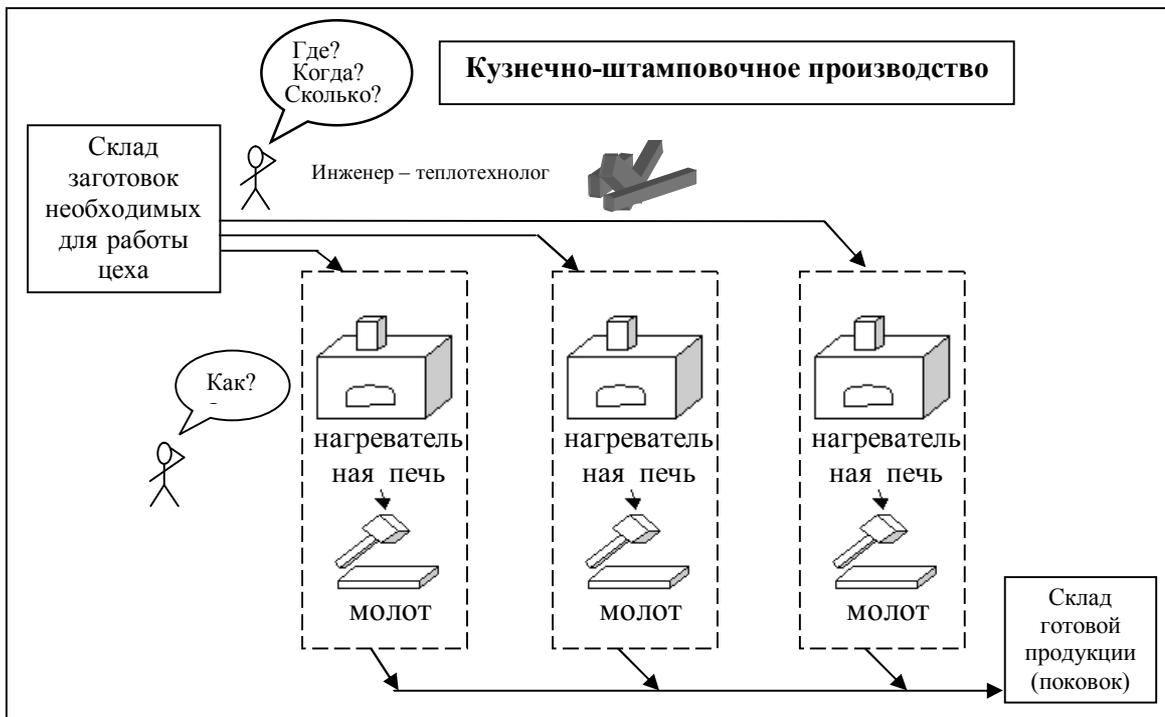


Рис. 6.5. Работа кузнечно-штамповочного производства с участием инженера-теплотехнолога

## **6.5. Математическая модель кузнечно-штамповочного производства на основании решения задачи двухуровневой оптимизации**

Сбережение энергоресурсов зависит как от снижения себестоимости за счет оптимизации режимов работы установок, так и от уменьшения издержек производства, связанных с его организацией: распределения номенклатуры между печами, очередностью нагрева типоразмеров заготовок, оптимизации партии каждого типоразмера.

Математическая модель установки оптимизирует режимы ее работы, но связи и взаимодействия между установками не учитывает. Задачей математического моделирования производства является максимальный учет всех взаимосвязей работы установок различного типа и оптимизация организации работы установок в целом для производства.

С ростом производительности вычислительной техники появилась возможность разработки математической модели по организации производства на основе учета оптимальной работы каждой установки. Выше была представлена математическая модель работы кузнечно-штамповочного производства [116], которая позволяет оптимизировать очередность нагрева типоразмеров заготовок в печи, оптимально распределять обрабатываемые типоразмеры между печами и определять оптимальный размер партии нагреваемых изделий каждого типоразмера. В качестве целевой функции в этой модели был выбран минимум издержек производства. В модели предложено использовать параметр стабилизации.

Математическая модель *печь–молот* (раздел 3.1) оптимизирует себестоимость цехового передела на основе трех варьируемых параметров: температуры на

поверхности, температурного перепада по сечению металла в конце нагрева и параметра, связанного с размещением заготовок на подине печи (отношение расстояния между заготовками к высоте заготовок). В модели используется ряд технических ограничений: по температуре газов в рабочем пространстве печи, которая не может превышать действительную температуру горения топлива, по темпу выдачи заготовок из печи, который не должен быть меньше времениковки; по допустимому температурному перепаду во время начального нагрева, который зависит от допустимых температурных напряжений и температуры применения огнеупорных и изоляционных материалов, из которых выполнена трехслойная кладка печи, по мощности горелок, по производительности установки.

Если принять в качестве первого уровня оптимизации кузнечно-штамповочного производства математическую модель *печь–молот*, то можно получить ответ на вопросы: как греть, сколько заготовок одного типоразмера должно быть в печи, какое должно быть давление газа перед горелками для нагрева каждого типоразмера, сколько времени необходимо нагревать заготовку (рис.3.2)? Математическая модель *печь–молот* дает ответы на эти вопросы с учетом минимальной себестоимости цехового передела.

При рассмотрении кузнечно-штамповочного производства в целом остается еще ряд вопросов, которые приходится решать (рис.6.5): где, на какой установке *печь–молот* производить обработку изделий, когда, какова должна быть очередность обработки различных типоразмеров заготовок, сколько их должно быть (размер партии изделий одного типоразмера)? Для частичного ответа на эти вопросы можно привлечь модель *печь–молот*. Необходимо просмотреть все варианты

обработки заготовок на разных установках, а затем выбрать вариант с оптимальной себестоимостью производства всех поковок, произведенных в цехе за год. Решить такую задачу очень сложно из-за очень большого количества вариантов.

Предлагается экстенсивный путь для решения этой задачи, который основан на использовании параметра стабилизации. Математическую модель работы кузнечно-штамповочного производства предлагается использовать в качестве второго уровня оптимизации. Для этого необходимо произвести уточнение параметра стабилизации на основе использования математической модели *печь–молот*. В приведенном алгоритме для определения параметра стабилизации для значений  $c$ ,  $\alpha_{\Sigma}$ ,  $F_{акт}$ ,  $t$  используются усредненные значения, которые не учитывают особенности нагрева того или иного типоразмера [124]. Их определение с учётом расчёта оптимального режима в модели *печь–молот* позволит уточнить параметр стабилизации. Для этих целей необходимо разработать математическую модель кузнечно-штамповочного производства, которая бы использовала обе математические модели в одном комплексе (рис.6.6) и позволила бы решать новые задачи, которые напрямую связаны с ресурсо- и энергосбережением кузнечно-штамповочных производств.

Предложен алгоритм математической модели двухуровневой оптимизации, который позволит решать ряд задач для действующих кузнечно-штамповочных производств:

- проводить тренинг и подбор персонала для работы на производстве;
- управлять производством;

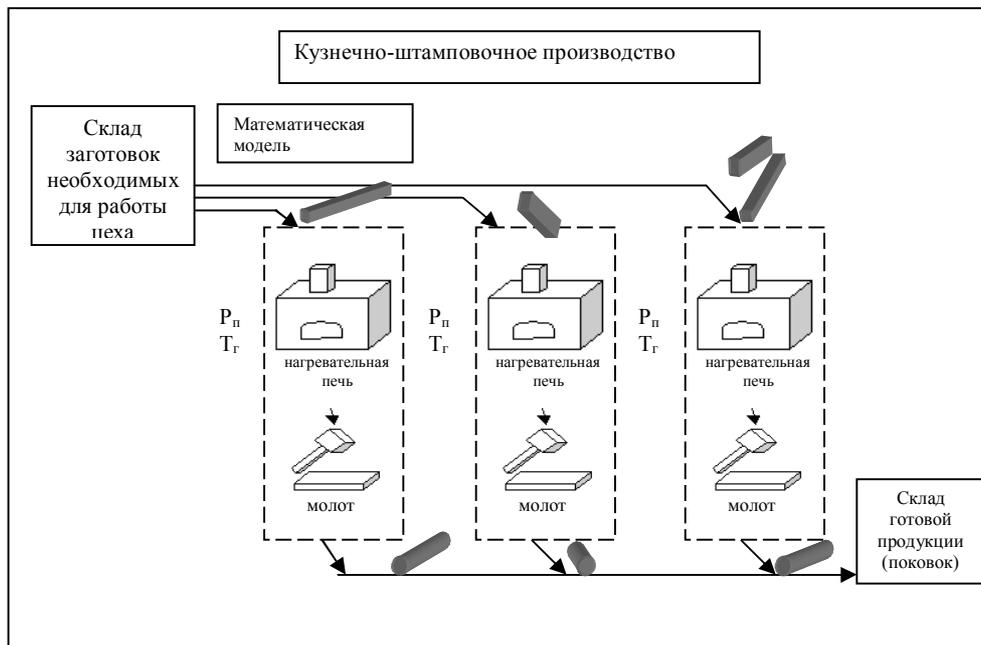


Рис. 6.6. Работа кузнечно-штамповочного производства с использованием математической модели

- прогнозировать работу производства на заданный период с учетом различных технологических и производственных ограничений.

В разделе 6.2 решена задача по определению производительности установок на основе параметра стабилизации, без учета оптимального режима работы установки *печь–молот*. Параметр стабилизации при работе этого алгоритма принимался с постоянными коэффициентами  $\alpha_\Sigma$ ,  $c$ ,  $f_{эф}$ . Первый этап расчёта первого уровня оптимизации производится с помощью программы оптимального распределения номенклатуры заготовок между печами проектируемого цеха. Производительность печей не известна, условием распределения является минимум суммы средневзвешенных квадратичных отклонений от среднего критерия стабилизации для данной печи. Программа позволяет выбрать для известной номенклатуры цеха и известного количества печей их оптимальную производительность.

По результатам работы программы в файл записывается приближённое распределение номенклатуры заготовок по печам в порядке возрастания параметра стабилизации и определяется производительность печей.

Вторым этапом оптимизации является уточнение параметров стабилизации. Уточнённые параметры стабилизации рассчитываются в программе оптимизации режима работы теплотехнологической установки *печь–молот* кузнечного производства, алгоритм расчёта был описан в разделе 3.1. Программа работает с операционной системой Windows и имеет графический интерфейс. Рассмотрим расчёт уточнённого параметра стабилизации на примере одной заготовки и расчёт уточнённого параметра стабилизации для печи №1, работающей с молотом №1. Для этого в программе

необходимо выбрать входные данные для печи №1 и нажать «Далее» (рис.6.7).

Оптимизация режима работы системы печь-молот. Таблица №1

ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО КОНСТРУКЦИИ ПЕЧИ

|   |       |   |                   |
|---|-------|---|-------------------|
| 1. Длина рабочего пространства печи, м (PL)                     | 0.94  | 20. Площадь 2-го ограждения внутренняя, м2 (TRF52)                    | 1.009             |
| 2. Ширина рабочего пространства печи, м (PW)                    | 2.088 | 21. Площадь 3-го ограждения внутренняя, м2 (TRF53)                    | 1.009             |
| 3. Высота рабочего пространства печи, м (PH)                    | 0.333 | 22. Площадь 1-го ограждения наружная, м2 (TRF51)                      | 10.5              |
| 4. Коэффициент учета, в расчете теплового баланса (NDG)         | 3     | 23. Площадь 2-го ограждения наружная, м2 (TRF52)                      | 2.84              |
| 5. Количество отверстий с выбивающимися газами (ND)             | 1     | 24. Площадь 3-го ограждения наружная, м2 (TRF53)                      | 2.84              |
| 6. Количество горелочных устройств (KG)                         | 1     | 25. Коэффициент формы ограждения (KF)                                 | 2                 |
| 7. Количество рекуператоров (KR)                                |       | 26. Номера материалов в 1-ом ограждении                               | 99 40 159         |
| 8. Площадь выходных отверстий горелочных клапанов, м2 (SGK)     | 0.108 | 27. Номера материалов в 2-ом ограждении                               | 99 40 159         |
| 9. Максимальная производительность печи, кг/час (PFOI3M)        | 500   | 28. Номера материалов в 3-ом ограждении                               | 99 99 146         |
| 10. Максимально возможный расход газа на печь, м3/ч (BGOR)      | 90    | 29. Толщины трех слоев 1-го ограждения, м                             | 0.23 0.116 0.05   |
| 11. Давление газа перед печью, кПа (DGGP)                       | 40    | 30. Толщины трех слоев 2-го ограждения, м                             | 0.23 0.116 0.047  |
| 12. Давление воздуха перед печью, кПа                           | 40    | 31. Толщины трех слоев 3-го ограждения, м                             | 0.114 0.134 0.006 |
| 13. Тип 1-го ограждения (TP)                                    |       | 32. MIN возж. доля прод. горения выбв. через н-ое отв. в долек (DVM1) | 0.01              |
| 14. Тип 2-го ограждения (TP)                                    |       | 33. MAX возж. доля прод. горения выбв. через н-ое отв. в долек (DVM1) | 0.3               |
| 15. Тип 3-го ограждения (TP)                                    |       | 34. Избыточное давление в печи на уровне отверстия, Па (DP)           | 1                 |
| 16. Поверхность нагрева рекуператоров, м2 (FR)                  |       | 35. Средний коэффициент сопротивления n-го отв. в долек (SOPR)        | 1.5               |
| 17. Температура продуктов сгорания перед рекуператором, К (TPR) |       | 36. Доля времени действия условий на н-ое отверстие, в долек (DWR)    | 0.5               |
| 18. Температура продуктов сгорания после рекуператора, К (TSR)  |       | 37. Высота или диаметр n-го отверстия, м (HO)                         | 0.31              |
| 19. Площадь 1-го ограждения внутренняя, м2 (TRF51)              | 3.36  | 38. Ширину n-го отверстия, м (для круглого отверстия ВО=0)            | 0.656             |
|   |       | 39. Толщина стенки n-го отверстия, м (RO)                             | 0.464             |

Подключение базы данных:

Входные данные по конструкции печи ПЕЧЬ1

Характеристики отверстий печей Отв.1

Размеры и материалы ограждений ПЕЧЬ1

ПЕЧЬ2  
ПЕЧЬ3

«Назад» «Далее» «Отмена» «Справка»

Рис.6.7. Выбор параметров печи

После нажатия кнопки «Далее» появится новое окно, где необходимо будет выбрать входные данные по конструкции вспомогательного оборудования и качеству нагрева. В нижнем левом углу выбираем в первом поле «Печь 1», а во втором «1» и нажимаем «Далее» (рис.6.8).

В поле «Характеристики нагреваемых заготовок» выбирается заводской номер заготовки, например №501410 в поле «Теплофизические и физические свойства металла» выбираем сталь 20X (т.к. эта заготовка выполнена из стали 20X), а в поле «Конструкция молота» выбираем «МОЛОТ1» и нажимаем «Далее» (рис.6.9).

В следующем окне выбираются исходные данные по характеристикам теплоносителей и окружающей среде, а также по характеристикам кузнечного цеха и нажимается кнопка «Далее» (рис. 6.10).

Оптимизация режима работы системы печь-молот. Таблица №2

II ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО КОНСТРУКЦИИ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

- Коэффициент загрузки электродвигателей, вентилятор (КЗВ) 0,8
- Допустимая температура перекач. среды дымососов, К (ТДС1) 353
- Допустимая температура перекач. среды вентиляторов, К (ТДС2) 353
- К.П.Д. передачи дымососа для к.номер=0,92, номер=1 (КРDP1) 1
- К.П.Д. передачи вентилятора для к.номер=0,92, номер=1 (КРDP2) 0,92
- Расход продуктов сгорания перекач. дымососов в 1-ой т., м<sup>3</sup>/ч/ч (QB11) 465
- Расход продуктов сгорания перекач. дымососов в 2-ой т., м<sup>3</sup>/ч/ч (QB21) 530
- Расход продуктов сгорания перекач. дымососов в 3-ей т., м<sup>3</sup>/ч/ч (QB31) 1630
- Расход продуктов сгорания перекач. вентилят. в 1-ой т., м<sup>3</sup>/ч/ч (QB12) 650
- Расход продуктов сгорания перекач. вентилят. в 2-ой т., м<sup>3</sup>/ч/ч (QB22) 1680
- Расход продуктов сгорания перекач. вентилят. в 3-ой т., м<sup>3</sup>/ч/ч (QB32) 2450
- Напор дымососа в 1т. из раскладной характеристики, ДПа (НВ11) 90
- Напор дымососа в 2т. из раскладной характеристики, ДПа (НВ21) 100
- Напор дымососа в 3т. из раскладной характеристики, ДПа (НВ31) 90
- Напор вентилятора в 1т. из раскладной характеристик., ДПа (НВ12) 0
- Напор вентилятора в 2т. из раскладной характеристик., ДПа (НВ22) 0
- Напор вентилятора в 3т. из раскладной характеристик., ДПа (НВ32) 0
- К.П.Д. дымососа в 1т. из раскладной характеристики (КРDP1) 0,6
- К.П.Д. дымососа в 2т. из раскладной характеристики (КРDP2) 0,7
- К.П.Д. дымососа в 3т. из раскладной характеристики (КРDP3) 0,74
- К.П.Д. вентилятора в 1т. из раскладной характеристики (КРDP12) 0,5
- К.П.Д. вентилятора в 2т. из раскладной характеристики (КРDP2) 0,65
- К.П.Д. вентилятора в 3т. из раскладной характеристики (КРDP32) 0,6

III ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО КАЧЕСТВУ НАГРЕВА

- Конечная температура нагрева металла, К (ТПК) 1423
- Интервал варьирования кон. темп. нагрева металла, К (Dx(3)) 1363 1523
- Температура поверхности металла в нудовой ном. вр.К (FPO) 353
- Допустимый порог температур в конце нагрева, К (DT) 70
- Интервал варьиров. допуст. переп. темп. в конце нагр. К (Dx(1)) 15 105
- Количество чисел Фурье (G) 0
- Начальные и конечные номера типа функции (T1,T2) 1 3
- Начальн. и конечные номера функ. дентипа для границ. (INGING2) 1 5
- Начальн. и конечные номера функ. дентипа для напус. (NINNING2) 0 0
- Кон. числ. членов сумм, апр. темп. поля мет. в 0 ном. вр (M1,M2) 1 1
- 11-й коэф. аппроксимации темп. поля мет. в 0 ном. вр (BM1) 0
- 12-й коэф. аппроксимации темп. поля мет. в 0 ном. вр (BM2) 0
- 13-й коэф. аппроксимации темп. поля мет. в 0 ном. вр (BM3) 0
- Нач. Фурье с которого произв. сравн. макс темп переп (FDM) 0,001
- Приращение Фурье при сравнении (DFO) 0,05
- Коэф. адаптации на температуру печи (KAD(1)) 0,995
- Коэф. адаптации на время нагрева заготовок (KAD(2)) 1
- Коэф. адаптации на расход газа на печь (KAD(3)) 1

Подключение базы данных: ПЕЧЬ1

Входные данные по конструкции вспомогательного оборудования: 1

Входные данные по качеству нагрева: 1

< Назад    Далее >    Отмена    Справка

Рис.6.8. Выбор входных данных по конструкции вспомогательного оборудования и качеству нагрева

Оптимизация режима работы системы печь-молот. Таблица №3

IV ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ НАГРЕВАЕМЫХ ЗАГОТОВОК

- Диаметр заготовки (для параллелипипа, задается 0), м (D(1)) 0,105
- Ширина заготовки (для цилиндра задается 0), м (A(1)) 0
- Высота заготовки (для шп. зад. 0, для труб. вк. диам.), м (B(1)) 0
- Длина заготовки, м (C(1)) 0,075
- Расчетный размер заготовки после операции ковки, м (FK(1)) 0,0144
- Отношение расстояния между заготовк. к высоте заготовки (FM) 2
- Интервал варьирования параметров по FM (Dx(2)) 0 6
- Зазор между стенкой печи и активной площадью пода, м (DELTA) 0,03
- Плотность металла, кг/м<sup>3</sup> (PLDT) 7730
- Группа нагреваемой стали (1-6) (GR) 1
- Коэффициент формы нагреваемых заготовок (K) 3
- Первый коэффициент окисления металла (C1) 4,473e-5
- Второй коэффициент окисления металла (C2) 0,00575e-5
- Количество точек замера тепловлажн. характеристики металла (K1) 10
- Количество точек замера физических характеристик металла (G3) 4

V ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ МОДЕЛИ ПО КОНСТРУКЦИИ МОЛОТА

- Скорость падающей части молота, м/с (VK) 7
- Эффект кинетич. энергии падающ. част. мол. при ударе, МДж (VKIN) 0,00931
- Мощность холостого хода молота, кВт (M00) 3,33
- Установочная мощность молота (см. паспорт на молот), кВт (MUM) 30
- Коэффициент загрузки электродвигателя молота (КЗМ) 0,2

|  | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 16. Температура, К (Tc)                            | 293     | 373     | 473     | 573     | 673     | 773     | 873     | 973     | 1073    | 1173    |
| 17. Теплопроводность, Вт/(мК) (LM)                 | 42      | 42      | 41      | 40      | 38      | 36      | 33      | 32      | 31      | 30      |
| 18. Температуропроводность, м <sup>2</sup> /с (KM) | 8,47e-0 | 8,47e-0 | 8,07e-0 | 7,62e-0 | 7,08e-0 | 6,35e-0 | 5,61e-0 | 5,11e-0 | 4,39e-0 | 4,25e-0 |
| 19. Теплоемкость, Дж/(кгК) (CM)                    | 496     | 496     | 508     | 525     | 537     | 567     | 588     | 626     | 706     | 706     |
| 20. Температура, К (TM)                            | 473     | 573     | 673     | 773     | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 21. Предел прочности, МН/м <sup>2</sup> (SIGMA1)   | 680     | 680     | 690     | 780     | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |

Характеристики нагреваемых заготовок: 501410

Теплофизические и физические свойства металла: 20K

Конструкция молота: МОЛОТ1

< Назад    Далее >    Отмена    Справка

Рис.6.9. Выбор теплофизических и физических свойств металла, конструкции молота и характеристик нагреваемых заготовок

Оптимизация режима работы системы печь-молот. Таблица №4

VI. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

|   |       |   |          |
|---|-------|---|----------|
| 1. Парциальное давление водяного пара, в долек (PH2O)                                     | 0,182 | 14. Удельная энгальпия дополнительного теплоносителя, кДж/кг (DOP)                                | 0        |
| 2. Парциальное давление углекислого газа, в долек (PCO2)                                  | 0,067 | 15. Плотность дополнительного теплоносителя при 100 Ц, кг/м <sup>3</sup> (PD)                     | 0        |
| 3. Парциальное давление азота, в долек (PN2)  | 0,714 | 16. Расход охлаждаемого теплоносителя, м <sup>3</sup> /с (GB)                                     | 0,000375 |
| 4. Парциальное давление кислорода, в долек (PO2)  | 0,017 | 17. Температура охлаждающего теплоносителя на входе, гр. Ц (TBK)                                  | 4        |
| 5. Парциальное давление угарного газа, в долек (PCO)                                      | 0     | 18. Температура охлаждающего теплоносителя на выходе, гр. Ц (TLK)                                 | 34       |
| 6. Содержание сажи в продуктах сгорания, г/м <sup>3</sup> (CS)                            | 0     | 19. Энгальпия продуктов сгорания при T=2200 гр. Ц, Дж/м <sup>3</sup> г (EGM)                      | 4,1191e+ |
| 7. Низшая теплота сгорания топлива, кДж/м <sup>3</sup> (QFN)                              | 36445 | 20. Температура продуктов сгорания, заданных на ТТУ, К (TCU)                                      | 1373     |
| 8. Температура топлива, гр. Ц (TT)  | 10    | 21. Энгальпия продуктов сгорания, заданных на ТТУ, кДж/м <sup>3</sup> (LUCU)                      | 1697     |
| 9. Удельный расход воздуха, поступающего на горение, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> н (L) | 10,29 | 22. Расход пара на технологический процесс, ГДж/с (RPARA)   | 0        |
| 10. Коэффициент расхода воздуха (KRB)   | 1,05  | 23. Расход горячей воды на технологический процесс, ГДж/с (RG800)                                 | 0        |
| 11. Температура воздуха, поступающего на горение, гр. Ц (TB)                              | 20    | 24. Восполнение потерь окл. телениос. при обр. снет. ок. м <sup>3</sup> /с (R800)                 | 7,5e-005 |
| 12. Температура внутри помещения, гр. Ц (TBN)   | 20    | 25. Расход силатого воздуха на технологический процесс, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> с (RCB030) | 1,1111e- |
| 13. Удельный расход дополнительного теплоносителя, кг/м <sup>3</sup> (DUR)                | 0     | 26. Расход кислорода на технологический процесс, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> с (RKCCL)         | 0        |

VII. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ КУЗНЕЧНОГО ЦЕХА

|   |        |
|---|--------|
| 1. Число часов работы оборудования в году, ч/год (BRG)                        | 2132   |
| 2. Площадь в цехе, занятая под рассчитываемое оборуд., м <sup>2</sup> (PL30B) | 110    |
| 3. Площадь цеха, м <sup>2</sup> (PL2)   | 7344   |
| 4. План выпуска продукции кузнечным цехом, кг/год (PLAN)                      | 264950 |

Подключение базы данных:  
 Входящие данные по характеристикам теплоносителей и окружающей среде: 1  
 Входящие данные по характеристикам кузнечного цеха: 1

< Назад    Далее >    Отмена    Справка

Рис. 6.10. Выбор исходных данных по характеристикам теплоносителей, окружающей среде и характеристикам кузнечного цеха

В пятом окне выбираются входные данные по стоимостным показателям работы оборудования и цеха и нажимается кнопка «Далее» (рис.6.11), а в следующем окне кнопка «Готово» (рис.6.12).

После нажатия на кнопку «Готово» программа «Оптимизации режима работы установки печь-молот» выполняет расчёт уточнённого параметра стабилизации для выбранной заготовки в установке *печь-молот1* и в появившемся окне выдаёт параметр стабилизации (рис.6.13).

Таким образом, рассчитывается уточнённый параметр стабилизации для одной заготовки, обрабатываемой на установке *печь-молот1*. Для расчёта уточнённых параметров стабилизации всей номенклатуры заготовок нужно просчитать каждую заготовку отдельно во всех печах аналогично приведённому примеру, описанному выше. После расчёта всех имеющихся заготовок все результаты заносятся в таблицу (см. табл. 6.5).

Оптимизация режима работы системы печь-молот. Таблица №5

VIII. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО СТОИМОСТНЫМ ПОКАЗАТЕЛИМ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ И ЦЕХА

|   |         |  |        |
|---|---------|--|--------|
| 1. Содержание аппарата управления цехом (машинист), руб/г (САУЗ)              | 1.176e+ | 19. Цена 1Г.Дж горячей воды, руб/Г.Дж (ЗВВ00)                                  | 85.97  |
| 2. Содержание прочего цехового персонала, не отн. к ул., руб/г (СРРЗР)        | 3.67e+0 | 20. Цена 1 м3 холодной воды, руб/м3 (ЗВВ00)                                    | 11.29  |
| 3. Амортизация здания, соор. инвент. кроме затр. на эксл., руб/г (АЗ)         | 1.195e+ | 21. Цена 1 м3(н) топлива, руб/м3(н) (ЗДАЗА)                                    | 257000 |
| 4. Содержание здания, сооружения, инвентаря цеха, руб/г (СЗИИ)                | 0       | 22. Цена 1 м3(н) сжатого воздуха, руб/м3(н) (ЗСВВЗ0)                           | 1600   |
| 5. Отопление здания, руб/г (ОЗ)   | 4.107e+ | 23. Цена 1 м3(н) кислорода, руб/м3(н) (ЗКЧЛ)                                   | 0      |
| 6. Горячее водоснабжение здания, руб/г (ВВВ)                                  | 3.08e+0 | 24. Цена 1кг нагретого металла, руб/м3(н) (ЗМЕТ)                               | 1540   |
| 7. Вентиляция здания, руб/г (ВЗ)  | 8.213e+ | 25. Цена экологического ущерба от тоны CO вых. в атм., руб/г (ЗСО)             | 1e+006 |
| 8. Освещение здания, руб/г (ОСВ)  | 6.61e+0 | 26. Цена экологического ущерба от тоны NO2 вых. в атм. (ЗNO2)                  | 3e+006 |
| 9. Текущий ремонт здания и сооружений, руб/г (ТРЗС)                           | 8.12e+0 | 27. Зароб. плата с допл. и начис. встан. раб. обл. обор., руб/год (ПЛБР)       | 5e+006 |
| 10. Испытания, опыты, исследования, рационал. и изобр. ц., руб/г (ОИРИЗ)      | 0       | 28. Затр. на тек. ремонт техн. оборуд., трансп. средство, инс., руб/год (ТРИТ) | 580000 |
| 11. Опр. труда, техн. безоп., сан. гигиена, спец. одежда и др., руб/г (ОКПТВ) | 1.8e+00 | 29. Внутри заводск. и цеховые перем. грузов. в ц. и склад., руб/год (ПГР)      | 330000 |
| 12. Износ малощенного и быстрознашаещ. хоз. инвент. цеха, руб/г (ЗМКЗ)        | 1.53e+0 | 30. Износ быстрознашаещ. и малощенных инструментов, руб/год (ИЗМЗ)             | 340000 |
| 13. Прочие расходы цеха (ПРАС)  | 3.06e+0 | 31. Прочие раском., связ. с содерж. эксплуат. оборуд., руб/год (ПРСОД)         | 40     |
| 14. Амортизация оборудования, трансп. средств, ценн. инв., руб/г (РАОВ)       | 1.36e+0 | 32. Расценки на операции ковки, руб (РАСП1)                                    | 1e+006 |
| 15. Вспомогательные матер. масла, эмульсии, облит. матер., руб/г (ВМАТ)       | 23667   | 33. К-коэффициент дополнительной заработной платы (КДЗ)                        | 1.301  |
| 16. Основная плата за кВт установленной мощности, руб (ОСНБ)                  | 578400  | 34. Коэффициент премии (КПР)   | 1.582  |
| 17. Стоим. 1 кВтч затрат энергии без учета устан. мощн., руб/кВтч (СТКВ4)     | 174     | 35. Коэффициент отчисления на социальное страхование (КООЗ)                    | 1.38   |
| 18. Цена 1 Г.Дж пара, руб/Г.Дж (ЗПРА)   | 28256   |  |        |

Подключение базы данных:

Вводить данные по стоимостным показателям работы оборудования и цеха:

< Назад    Далее >    Отмена    Справка

Рис.6.11. Входные данные по стоимостным показателям работы оборудования и цеха

Оптимизация режима работы системы печь-молот



1. Если вы уверены в правильности ввода исходных данных, нажмите кнопку "Готово"

2. Для исправления значений исходных данных нажмите кнопку "Назад"

3. Чтобы получить помощь нажмите кнопку "Справка"

3. Чтобы выйти из программы нажмите кнопку "Отмена"

< Назад    Готово    Отмена    Справка

Рис.6.12. Запуск программы на расчёт

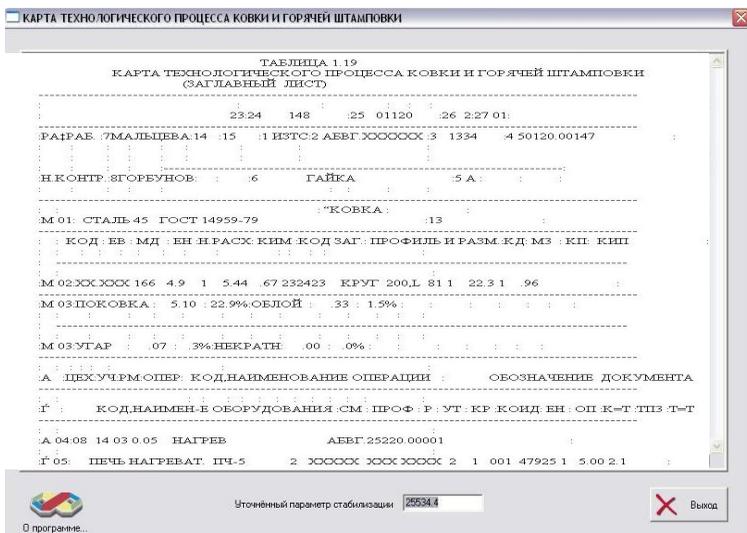


Рис.6.13. Вывод уточнённого параметра стабилизации

Таблица 6.5. Значения уточнённых параметров стабилизации для некоторых заготовок

| № печи  | № заготовки | Параметр стабилизации | стали | Уточнённые параметры стабилизации |         |         |
|---------|-------------|-----------------------|-------|-----------------------------------|---------|---------|
|         |             |                       |       | Печь 1                            | Печь 2  | Печь 3  |
| Печь №1 | 7401701013  | 66,4                  | 40X   | -                                 | 57358,7 | 106242  |
|         | 74017011    | 101                   | 45    | 20183,1                           | -       | -       |
|         | 7401701015  | 116                   | 40X   | -                                 | 35776,1 | -       |
|         | 7401701000  | 318                   | 40X   | -                                 | 44757,4 | -       |
|         | 740170100   | 349                   | 45    | 21389,1                           | -       | -       |
|         | 101402      | 388                   | 40X   | 41981,1                           | -       | -       |
|         | 740170060   | 698                   | 20X   | 26031                             | -       | -       |
|         | 6151703401  | 2150                  | 65Г   | -                                 | 52929,3 | 77498,7 |
|         | 794070102   | 2220                  | 40X   | 19754,6                           | -       | -       |
|         | 7401701000  | 3470                  | 40X   | -                                 | 44757,4 | -       |
|         | 201401      | 11700                 | 3     | 21856,5                           | -       | -       |
|         | 206415      | 13100                 | 20X   | 21670,2                           | -       | -       |
|         | 204402      | 14300                 | 20X   | 21740,4                           | -       | -       |
|         | 201501      | 17100                 | 40X   | 33972                             | -       | -       |

Продолжение табл. 6.5

| № печи | № заготовки | Параметр стабилизации | стали | Уточнённые параметры стабилизации |         |        |
|--------|-------------|-----------------------|-------|-----------------------------------|---------|--------|
|        |             |                       |       | Печь 1                            | Печь 2  | Печь 3 |
|        | 0121407     | 20200                 | 40X   | 41981,1                           | -       | -      |
|        | 277402      | 21700                 | 20X   | 19927,2                           | 39971,9 | -      |
|        | 503401      | 22500                 | 40X   | 33327,5                           | -       | -      |
|        | 310404      | 23100                 | 20X   | 20949,6                           | -       | -      |
|        | 0121406     | 23700                 | 40X   | 41981,1                           | -       | -      |
|        | 121407      | 25600                 | 20X   | 22335,9                           | -       | -      |
|        | 221501      | 27100                 | 40X   | 33972                             | -       | -      |
|        | 4024020     | 28200                 | 40X   | 21615,9                           | -       | -      |
|        | 234421      | 28500                 | 20X   | 16867,4                           | -       | -      |
|        | 101402      | 31500                 | 40X   | 41981,1                           | -       | -      |
|        | 1014010     | 31500                 | 40X   | 41981,1                           | -       | -      |
|        | 2044060     | 31600                 | 20X   | 27308                             | 35723,2 | -      |
|        | 402402      | 31700                 | 20X   | 21615,9                           | -       | -      |
|        | 273501      | 31900                 | 40X   | -                                 | 35800,6 | -      |
|        | 231406      | 32500                 | 20X   | 19211,8                           | 40586,2 | -      |
|        | 201502      | 34000                 | 40X   | 33972                             | -       | -      |
|        | 221422      | 35000                 | 40X   | -                                 | 41096,6 | -      |
|        | 0141502     | 35700                 | 40X   | 33023,3                           | -       | -      |
|        | 212401      | 36500                 | 45    | 27199,5                           | -       | -      |
|        | 875409      | 36700                 | 40X   | 30542                             | -       | -      |
|        | 615401      | 37400                 | 40X   | -                                 | 35968,3 | -      |
|        | 871412      | 37400                 | 20X   | 18685,1                           | 39372,1 | -      |
|        | 402405      | 37900                 | 20X   | 21236,2                           | 39972,4 | -      |
|        | 204511      | 38500                 | 40X   | 32641,2                           | -       | -      |
|        | 315406      | 39700                 | 45    | 22894,9                           | -       | -      |
|        | 701504      | 40100                 | 3     | 31390,4                           | -       | -      |
|        | 277403      | 40400                 | 40X   | 33394,4                           | -       | -      |
|        | 116405      | 41200                 | 45    | 21185,2                           | -       | -      |
|        | 452405      | 41300                 | 40X   | 18735,3                           | -       | -      |
|        | 234412      | 41300                 | 40X   | 21473,5                           | -       | -      |

Продолжение табл. 6.5

| № печи | № заготовки | Параметр стабилизации | стали | Уточнённые параметры стабилизации |         |        |
|--------|-------------|-----------------------|-------|-----------------------------------|---------|--------|
|        |             |                       |       | Печь 1                            | Печь 2  | Печь 3 |
|        | 116501      | 41700                 | 40X   | -                                 | 39833,1 | -      |
|        | 231421      | 42500                 | 20X   | 22166,2                           | 39201,5 | -      |
|        | 277401      | 42800                 | 20X   | 21587,5                           | -       | -      |
|        | 501638      | 43000                 | 20X   | -                                 | 36336,3 | -      |
|        | 206417      | 43000                 | 40X   | 32197                             | 58349,1 | 109418 |
|        | 871414      | 43100                 | 20X   | 21292,1                           | 41735,6 | -      |
|        | 312409      | 43400                 | 40X   | 22795,3                           | -       | -      |
|        | 126408      | 44200                 | 20X   | 19199,3                           | -       | -      |
|        | 514401      | 44300                 | 20X   | 20707,8                           | -       | -      |
|        | 401403      | 44600                 | 20X   | 19222,4                           | -       | -      |
|        | 42340102    | 45600                 | 20X   | 32114,6                           | -       | -      |
|        | 210412      | 46200                 | 40X   | 22300,5                           | -       | -      |
|        | 219406      | 46700                 | 40X   | 16988,6                           | -       | -      |
|        | 539501      | 46700                 | 20X   | 19063,6                           | 37438,3 | -      |
|        | 501634      | 47200                 | 20X   | 18313,8                           | -       | -      |
|        | 1612434     | 47400                 | 20X   | 25380,8                           | -       | -      |
|        | 231409      | 48100                 | 20X   | 19175,6                           | -       | -      |
|        | 231405      | 49100                 | 20X   | 33403,4                           | 34838,8 | -      |
|        | 221421      | 49600                 | 40X   | 24669,5                           | -       | -      |
|        | 105510      | 49600                 | 40X   | 19120,5                           | -       | -      |
|        | 505409      | 50600                 | 20X   | 27939,7                           | 36340,4 | -      |
|        | 105507      | 52100                 | 40X   | 23458,7                           | -       | -      |
|        | 204501      | 53400                 | 20X   | 37380,4                           | 32423,6 | -      |
|        | 205455      | 53400                 | 20X   | 21740,7                           | 35405,5 | -      |
|        | 204404      | 53900                 | 20X   | 17254,7                           | -       | -      |
|        | 323501      | 54400                 | 45    | 31500,4                           | -       | -      |
|        | 871401      | 54800                 | 20X   | 18315,4                           | -       | -      |
|        | 610401      | 55000                 | 40X   | 38512,7                           | -       | -      |
|        | 876401      | 55400                 | 20X   | 19663,2                           | -       | -      |

Продолжение табл. 6.5

| № печи | № заготовки | Параметр стабилизации | стали   | Уточнённые параметры стабилизации |         |        |
|--------|-------------|-----------------------|---------|-----------------------------------|---------|--------|
|        |             |                       |         | Печь 1                            | Печь 2  | Печь 3 |
|        | 212401      | 58200                 | 45      | 21622,1                           | -       | -      |
|        | 312403      | 58400                 | 20X     | 18508,1                           | 35290   | -      |
|        | 501623      | 58400                 | 20X     | -                                 | 35591,1 | -      |
|        | 423405      | 59500                 | 20X     | -                                 | 40084,2 | -      |
|        | 232406      | 60700                 | 40X     | 18598,5                           | -       | -      |
|        | 271402      | 62900                 | 40X     | 35124,4                           | -       | -      |
|        | 401402      | 65200                 | 20X     | 19536,8                           | -       | -      |
|        | 112401      | 66300                 | 45      | 23411,2                           | -       | -      |
|        | 208402      | 67000                 | 20X     | 26565,2                           | 37579,1 | -      |
|        | 423401      | 68800                 | 20X     | 32114,6                           | -       | -      |
|        | 502410      | 69700                 | 40X     | 20892,1                           | -       | -      |
|        | 570510      | 71400                 | 20X     | -                                 | 33375,5 | -      |
|        | 541503      | 72300                 | 20X     | 23534,2                           | -       | -      |
|        | 74017011    | 72900                 | 45      | 20183,1                           | -       | -      |
|        | 501615      | 74400                 | 45      | 21887,1                           | -       | -      |
|        | 202424      | 76300                 | 20X     | 23661,5                           | -       | -      |
|        | 202466      | 78100                 | 45      | 19160,6                           | -       | -      |
|        | 423403      | 78600                 | 38X2МЮА | 27196,3                           | 34180,4 | -      |
|        | 621401      | 81400                 | 40X     | 19013                             | 37147,4 | -      |
|        | 709402      | 82900                 | 45      | 35296,9                           | -       | -      |
|        | 609401      | 84400                 | 40X     | 38512,7                           | -       | -      |
|        | 205401      | 85900                 | 20X     | 20388,7                           | -       | -      |
|        | 505401      | 87700                 | 65Г     | 28457,1                           | -       | -      |
|        | 605401      | 87900                 | 40X     | 38512,7                           | -       | -      |
|        | 324502      | 88100                 | 45      | 28405,6                           | -       | -      |
|        | 232409      | 88900                 | 40X     | 16715,4                           | -       | -      |
|        | 231413      | 89100                 | 20X     | 19498,1                           | -       | -      |
|        | 0612288     | 89400                 | 38X2МНА | 21233,8                           | -       | -      |
|        | 239412      | 89700                 | 38X2МНА | -                                 | 30928,6 | -      |

Продолжение табл. 6.5

| № печи | № заготовки | Параметр стабилизации | стали | Уточнённые параметры стабилизации |         |         |
|--------|-------------|-----------------------|-------|-----------------------------------|---------|---------|
|        |             |                       |       | Печь 1                            | Печь 2  | Печь 3  |
|        | 126409      | 90300                 | 40X   | 43004,4                           | -       | -       |
|        | 239414      | 90900                 | 20X   | 19278,8                           | 40838,2 | -       |
|        | 405402      | 92100                 | 65Г   | 20244                             | 33091,9 | -       |
|        | 402417      | 93100                 | 45    | 20292,3                           | -       | -       |
|        | 620401      | 93700                 | 40X   | -                                 | 28385,4 | -       |
|        | 647401      | 94400                 | 40X   | 22082,7                           | -       | -       |
|        | 875438      | 95500                 | 45    | 28577,2                           | -       | -       |
|        | 604401      | 95600                 | 40X   | 38512,7                           | -       | -       |
|        | 402403      | 95900                 | 65Г   | 23625,2                           | 33239,2 | 64637,2 |
|        | 624401      | 96900                 | 45    | 16498,4                           | -       | -       |
|        | 621418      | 98400                 | 3     | 15533,3                           | -       | -       |
|        | 329412      | 100000                | 45    | 18017,4                           | -       | -       |
|        | 710403      | 101000                | 45    | 24881,1                           | -       | -       |
|        | 617401      | 101000                | 20X   | 32954                             | -       | -       |
|        | 301441      | 103000                | 45    | 35686,5                           | -       | -       |
|        | 204421      | 106000                | 20X   | 19548,7                           | -       | -       |
|        | 622501      | 108000                | 45    | 18009,4                           | -       | -       |
|        | O270401     | 109000                | 45    | 17786,8                           | -       | -       |
|        | 501632      | 112000                | 20X   | 28059,3                           | -       | -       |
|        | 611402      | 112000                | 20X   | 20580,2                           | -       | -       |
|        | 502411      | 114000                | 40X   | 30690,8                           | 56144,8 | -       |
|        | 328411      | 114000                | 45    | 33625,8                           | -       | -       |
|        | 1612433     | 115000                | 20X   | 25380,8                           | -       | -       |
|        | 6214010     | 115000                | 45    | 19013                             | -       | -       |
|        | 161425      | 115000                | 45    | 20190,1                           | -       | -       |
|        | 532402      | 116000                | 40X   | -                                 | -       | 127387  |
|        | 63147047    | 117000                | 20X   | 23344,1                           | 36195,4 | -       |
|        | 215406      | 122000                | 65Г   | 31294,7                           | 32316,4 | -       |
|        | 273502      | 122000                | 40X   | 28137,8                           | 66431,9 | -       |

Продолжение табл. 6.5

| № печи | № заготовки | Параметр стабилизации | стали | Уточнённые параметры стабилизации |         |         |
|--------|-------------|-----------------------|-------|-----------------------------------|---------|---------|
|        |             |                       |       | Печь 1                            | Печь 2  | Печь 3  |
|        | 706501      | 123000                | 45    | 21599,1                           | -       | -       |
|        | 633412      | 123000                | 20X   | -                                 | 28342,3 | -       |
|        | 720430      | 124000                | 45    | 18372,2                           | -       | -       |
|        | 206422      | 126000                | 40X   | 34306,4                           | -       | -       |
|        | 6154010     | 126000                | 40X   | 36053,5                           | -       | -       |
|        | 273404      | 126000                | 65Г   | 19941,9                           | -       | -       |
|        | 536402      | 127000                | 20X   | 18319,5                           | -       | -       |
|        | 6354011     | 129000                | 20X   | -                                 | 30849,3 | -       |
|        | 201405      | 129000                | 45    | 22425,8                           | -       | -       |
|        | 570401      | 130000                | 20X   | -                                 | 39769,1 | -       |
|        | 204406      | 130000                | 20X   | 17118                             | 32178,7 | -       |
|        | 1471402     | 130000                | 40X   | -                                 | 31258,5 | -       |
|        | 125501      | 132000                | 45    | 17053,6                           | -       | -       |
|        | 622402      | 133000                | 20X   | 23638,2                           | -       | -       |
|        | 1451401     | 136000                | 40X   | 28890,4                           | -       | -       |
|        | 63147046    | 138000                | 20X   | 32796,9                           | 33780,3 | -       |
|        | 539410      | 138000                | 40X   | 30067                             | 31995,7 | -       |
|        | 532410      | 139000                | 40X   | 32114,9                           | 59610,6 | -       |
|        | 249402      | 141000                | 3     | 25634,5                           | 34211,5 | -       |
|        | 537401      | 141000                | 20X   | 33274,7                           | -       | -       |
|        | 602401      | 144000                | 40X   | 23352,2                           | -       | -       |
|        | 202464      | 151000                | 45    | 20930,3                           | -       | -       |
|        | 235401      | 151000                | 45    | 53061,8                           | -       | -       |
|        | 561431      | 152000                | 20X   | -                                 | -       | 68930,9 |
|        | 631415      | 154000                | 40X   | 38276,5                           | -       | -       |
|        | 63147037    | 157000                | 20X   | 27725,1                           | -       | 68913,7 |
|        | 611404      | 159000                | 20X   | 20607,1                           | -       | -       |
|        | 603401      | 160000                | 40X   | 51879,4                           | -       | -       |
|        | 63147045    | 162000                | 20X   | 22284                             | 31796   | -       |
|        | 623402      | 167000                | 65Г   | 15615                             | -       | -       |

Продолжение табл. 6.5

| № печи | № заготовки | Параметр стабилизации | стали   | Уточнённые параметры стабилизации |         |         |
|--------|-------------|-----------------------|---------|-----------------------------------|---------|---------|
|        |             |                       |         | Печь 1                            | Печь 2  | Печь 3  |
|        | 503414      | 170000                | 65Г     | 21818,1                           | 29593,8 | 63810   |
|        | 236405      | 172000                | 45      | 18324,6                           | -       | -       |
|        | 120403      | 172000                | 65Г     | -                                 | 51589,9 | 89361,4 |
|        | 401415      | 174000                | 20X     | 23605                             | 40295,9 | 83241   |
|        | 63067015    | 175000                | 20X     | 30166,8                           | -       | 104350  |
|        | 606401      | 176000                | 40X     | 23352,2                           | -       | -       |
|        | 401412      | 181000                | 20X     | 33552,9                           | 42553,4 | 72170,5 |
|        | 731402      | 191000                | 45      | 21200,1                           | -       | -       |
|        | 601401      | 193000                | 40X     | 23352,2                           | -       | -       |
|        | 206401      | 204000                | 50XФА   | -                                 | 55626,8 | -       |
|        | 614401      | 206000                | 40X     | 36053,5                           | -       | -       |
|        | 209405      | 210000                | 45      | 20312,1                           | -       | -       |
|        | 707418      | 210000                | 45      | -                                 | -       | -       |
|        | 451408      | 212000                | 20X     | 17877,3                           | 58394   | -       |
|        | 532412      | 213000                | 40X     | -                                 | -       | -       |
|        | 112402      | 216000                | 65Г     | -                                 | 55982,7 | -       |
|        | 206425      | 219000                | 65Г     | 29693,5                           | -       | -       |
|        | O212403     | 222000                | 45      | 17759,8                           | -       | -       |
|        | 63147044    | 222000                | 20X     | 29570,4                           | -       | -       |
|        | 843401      | 225000                | 40X     | 27700,4                           | -       | -       |
|        | 451407      | 227000                | 20X     | 25643                             | -       | -       |
|        | 501624      | 228000                | 38X2МнА | -                                 | 47949,3 | -       |
|        | 61627011    | 231000                | 20X     | 20572                             | -       | -       |
|        | 401411      | 233000                | 20X     | -                                 | 56390,4 | -       |
|        | O775430     | 241000                | 45      | 25986,4                           | -       | -       |
|        | 401409      | 251000                | 20X     | 25066,7                           | -       | -       |
|        | 204416      | 253000                | 20X     | 22748,7                           | 46145,1 | -       |
|        | 622401      | 255000                | 65Г     | 24935,7                           | 53954,1 | -       |
|        | 501410      | 262000                | 20X     | 25534,4                           | -       | -       |
|        | 615170340   | 266000                | 65Г     | 26532,6                           | 52929,3 | 77498,7 |

Продолжение табл. 6.5

| № печи   | № заготовки | Параметр стабилизации | стали   | Уточнённые параметры стабилизации |         |         |
|----------|-------------|-----------------------|---------|-----------------------------------|---------|---------|
|          |             |                       |         | Печь 1                            | Печь 2  | Печь 3  |
|          | 6151703401  | 266000                | 65Г     | 26532,6                           | -       | -       |
|          | 616408      | 279000                | 7ХГ2ВМ  | 29363                             | -       | -       |
|          | 63147035    | 286000                | 20Х     | 24332,2                           | 44799,8 | -       |
|          | 1452401     | 287000                | 38Х2МЮА | -                                 | 47343,7 | 84341,8 |
|          | 631502      | 287000                | 20Х     | 27639,4                           | -       | -       |
|          | 381401      | 288000                | 20Х     | 20133,8                           | -       | -       |
|          | 539461      | 299000                | 38Х2МЮА | 22903,4                           | -       | -       |
|          | 539470      | 303000                | 38Х2МЮА | 22390,6                           | -       | -       |
|          | 1453401     | 339000                | 38Х2МЮА | -                                 | 47343,7 | -       |
|          | 63067014    | 365000                | 20Х     | 23242                             | -       | -       |
|          | 876503      | 434000                | 45      | 24077,1                           | -       | -       |
|          | 315408      | 441000                | 40Х     | 27071,2                           | -       | -       |
|          | 14534012    | 446000                | 38Х2МЮА | -                                 | 47343,7 | 84341,8 |
|          | 621402      | 476000                | 40Х     | 25744,1                           | -       | -       |
|          | 539460      | 503000                | 38Х2МЮА | 22903,4                           | -       | -       |
|          | 637401      | 520000                | 20Х     | 20803,7                           | -       | -       |
|          | О672402     | 565000                | 40Х     | 27607,5                           | -       | -       |
|          | О412409     | 685000                | 20Х     | 21764,8                           | -       | -       |
|          | О412318     | 979000                | 20Х     | 21764,8                           | -       | -       |
|          | 316402      | 1770000               | 20Х     | 20342,7                           | -       | 81988,6 |
| 624420   | 2550000     | 65Г                   | -       | 40909,9                           | -       |         |
| О312419  | 5280000     | 20Х                   | 21659,1 | -                                 | -       |         |
| Печь № 2 | О219411     | 21100000              | 45      | 18132,6                           | -       | -       |
|          | 104401      | 22300000              | 40Х     | 36726                             | 36726   | -       |
|          | О370501     | 45600000              | 45      | 35335,1                           | -       | -       |
|          | О312410     | 57800000              | 20Х     | 28149                             | 28149   | -       |
|          | О512421     | 60100000              | 40Х     | -                                 | -       | 98859,5 |
|          | 570401      | 60400000              | 20Х     | -                                 | 39769,1 | -       |
|          | О104501     | 83800000              | 45      | 22941,4                           | -       | -       |
|          | О512430     | 84700000              | 20Х     | 22524                             | 56225,2 | 90439,4 |

Окончание табл. 6.5

| № печи  | № заготовки | Параметр стабилизации | стали | Уточнённые параметры стабилизации |         |         |
|---------|-------------|-----------------------|-------|-----------------------------------|---------|---------|
|         |             |                       |       | Печь 1                            | Печь 2  | Печь 3  |
| Печь №3 | O512415     | 113000000             | 45    | -                                 | 34025,7 | -       |
|         | O770402     | 114000000             | 45    | -                                 | -       | 61507,9 |
|         | O205404     | 352000000             | 20X   | -                                 | -       | 85341,7 |

При расчёте второго уровня оптимизации в качестве целевой функции используется минимум издержек кузнечного производства. Для решения задачи при проектировании оптимального выбора производительности установок при реконструкции цеха в качестве варьируемого параметра используется параметр стабилизации (см. ф-лу (6.5)).

Второй уровень оптимизации состоит из двух шагов:

- 1) корректировка приближённого распределения номенклатуры заготовок с учётом уточнённых значений параметров стабилизации;
- 2) перераспределение номенклатуры заготовок с учётом уточнённых параметров стабилизации.

На первом шаге производится корректировка приближённого распределения номенклатуры заготовок. Для этого уточнённые значения параметра стабилизации заготовки сравниваются с приближёнными значениями параметра стабилизации этой же заготовки. Если эти два значения совпадают, то корректировка не происходит, а если значения не совпадают, то уточнённый параметр стабилизации перемещается в колонку с приближёнными параметрами  $KL$  таким образом, чтобы все параметры стабилизации располагались в порядке возрастания. Такую процедуру необходимо провести с каждой из рассчитываемых заготовок. При корректировке некоторые заготовки могут переместиться в другую печь на основании уточнённого значения параметра стабилизации

(табл. 6.5). В этом случае подставляется значение уточнённого параметра стабилизации, соответствующее значению для этой печи.

Второй этап производит перераспределение всей номенклатуры заготовок по уточнённым параметрам стабилизации. Чтобы распределить заготовки по печам, необходимо подготовить текстовый файл, в который заносятся исходные данные, необходимые для распределения заготовок между установками. К исходным данным для распределения номенклатуры заготовок относятся:

- 1) допустимое относительное расхождение элементов массивов (0,1);
- 2) количество типоразмеров заготовок (максимум 1000);
- 3) количество установок (максимум 10);
- 4) заводские номера заготовок;
- 5) откорректированные значения параметров стабилизации.

После того как все параметры будут занесены в текстовый документ, производится расчёт. Результаты расчёта программа записываются в текстовый файл. В этом текстовом файле находятся перераспределённая номенклатура заготовок. Результат распределения номенклатуры заготовок необходимо занести в таблицу (табл. 6.5). В табл. 6.5 представлены результаты расчёта математической модели двухуровневой оптимизации. В первой колонке номенклатура заготовок разбита по трём печам по приближённому параметру стабилизации, рассчитанному в программе, по усреднённым значениям параметров стабилизации, приведенных в третьей колонке табл. 6.5. В колонке №3 представлены типоразмеры заготовок, перераспределённые по усреднённому параметру стабилизации. Во второй колонке приведены заводские номера заготовок. Четвёртая колонка содержит

марки сталей. Пятая, шестая и седьмая колонка содержат данные расчёта уточнённого параметра стабилизации по трём печам №1, №2, №3 соответственно.

В данном разделе был показан пример работы модели кузнечно-штамповочного производства с учётом двухуровневой оптимизации работы производства на основе расчёта уточнённого распределения нагрева заготовок по трём печам. Уточнённое распределение позволило выявить, что некоторые заготовки, которые при приближённом распределении должны были обрабатываться в установках №2 и №3, а с учётом двухуровневой оптимизации переместились в печь №1, а следовательно, производительность установок №2 и №3, оказалась меньше ранее принятой производительностей печей, которые были определены в начале по усреднённым параметрам стабилизации.

Окончательная версия программы по оптимизации режима работы установки *печь–молот* имеет очень сложную структуру и была написана на двух языках программирования Fortran и C++. Для верификации модели необходимо протестировать программу оптимизации режима работы установки *печь–молот*. Тестирование производилось путём расчёта всей имеющейся базы номенклатуры заготовок по трём печам. В этой базе имеются 622 типоразмера заготовок с различными размерами, теплофизическими свойствами и марками стали.

## **6.6. Тренажёры менеджеров и теплотехнологов машиностроительного производства**

### **Постановка задачи тренинга**

В настоящее время многие предприятия различных отраслей промышленности, в которых применяется кузнечно-штамповочное оборудование (для нагрева

металла при последующей его пластической обработке), сталкиваются с экономическими трудностями, связанными с повышением цен на топливо, электроэнергию. Экономия энергоресурсов зависит от умения теплотехнолога грамотно управлять оборудованием в цехе. Он должен построить работу печей таким образом, чтобы при распределении и смене типоразмера заготовок изменение температуры газа в рабочем пространстве печи не приводило к дополнительным затратам тепловой энергии на разогрев кладки, то есть он должен определить очередность нагрева заготовок в печи и распределить нагреваемые заготовки между установками.

Развитие вычислительной техники даёт возможность составления программы тренинга для развития и закрепления навыков по грамотной эксплуатации технологического оборудования у работников кузнечного цеха. Используя тренажёр, можно обучить теплотехников технически обоснованному распределению типоразмеров нагреваемых заготовок по существующим в цехе печам и выбору правильной очередности обработки типоразмеров в течение рабочей смены.

Здесь рассматривается метод рациональной организации работы оборудования и реализация метода для задач тренинга. Программа-тренажёр оценивает правильность принимаемых решений теплотехником цеха в процессе работы оборудования.

Алгоритм тренажёра строится на понятии параметра стабилизации температурного режима печи, определение которого вытекает из решения задачи теплопроводности для тел умеренной массивности (ф-лы 6.1– 6.6).

Задача тренинга заключается в том, чтобы обучить технически грамотной работе теплотехников кузнечно-штамповочного производства, а также использовать тренажёр во время подбора персонала для работы в

должности теплотехнолога цеха. Персонал кузнечно-штамповочного производства должен экономично использовать энергию на теплотехнологические установки и постоянно уменьшать издержки производства на основе грамотной эксплуатации оборудования. Этому можно научиться, используя программу-тренажёр, в которой используется в алгоритме понятие параметра стабилизации, являющийся для заготовок каждого типоразмера величиной постоянной. Номенклатуру заготовок, проходящих через цех, целесообразно расположить в ряд по возрастанию параметра стабилизации и затем распределить с учётом производительности печей.

Для обучения и развития навыков работы у теплотехнологов в кузнечном производстве, необходимы тренажёры, которые позволили бы сравнивать принимаемые технологом решения с оптимальным распределением заготовок и определять, какой экономический ущерб может быть причинён производству от технически неграмотных действий теплотехнолога.

### **Алгоритм организации производства**

Алгоритм организации производства должен выбираться с учётом минимальных финансовых издержек на производство. Потери энергии при организации кузнечно-штамповочного производства могут возникнуть из-за неучёта особенностей режима нагрева для различных типоразмеров заготовок. Если эти особенности не учитывать, возникают потери энергии при переходе от одного режима работы к другому.

Алгоритм, построенный на выборе очерёдности нагрева в порядке возрастания параметра стабилизации, позволяет учесть плавный переход температуры в рабочей камере печи от обработки одного типоразмера к другому.

Остаётся решить вопрос, как разделить типоразмеры заготовок при операциях нагрева по технологическим установкам. Деление должно осуществляться по условию (6.16).

Таким образом, задача сводится к определению минимальной суммы среднеквадратичных отклонений от средневзвешенных параметров стабилизации. Для определения производительности каждой печи используется формула (6.17).

Доля  $l$ -го типоразмера поковок в продукции  $j$ -печи  $\gamma_{l,j}$  в формуле (6.17) определяется по четырем методам по формулам (6.18 – 6.21).

### **Оценка действий пользователя**

Действия пользователя оцениваются двумя параметрами. Первый параметр оценивает распределение типоразмеров заготовок, участвующих в тренинге, по печам. Второй параметр оценивает очерёдность обработки различных типоразмеров заготовок в течение смены в порядке возрастания параметра стабилизации. Первый параметр более важен, так как он в большей степени влияет на расход топлива. Поэтому пользователь получает две оценки своих действий. Первую – за правильное распределение. Вторую – за правильное определение очерёдности нагрева типоразмеров. Ошибки пользователя оцениваются в процентах.

Определение ошибки *пользователя*

1. При распределении заготовок между теплотехнологическими установками используется следующий алгоритм. Минимальная ошибка получается в случае удовлетворения условию, определяемому по формуле (6.16), а максимальная ошибка получается при выполнении условия:

$$\sum_{j=1}^{Y_n} \sum_{l=1}^{X_j} \left[ \sum_{l=1}^{X_j} (Kl_{l,j} \cdot \gamma_{l,j}) - Kl_{l,j} \right]^2 = \max. \quad (6.41)$$

В процентах ошибка выражается следующим образом:

$$O = \frac{Pt - \min}{\max - \min} \cdot 100, \quad (6.42)$$

где  $Pt$  – результат, полученный теплотехнологом при распределении типоразмеров по печам и определении очередности нагрева;  $\min$  – результат, полученный по формуле (6.15), при распределении типоразмеров по печам и определении очередности нагрева;  $\max$  – результат, полученный по формуле (6.42), при распределении типоразмеров по печам и определении очередности нагрева.

2. При определении очередности нагрева заготовок используется алгоритм, предложенный в разделе 6, когда рассматриваются минимальные потери энергии и когда заготовки, обрабатываемые в данной печи, будут расположены в порядке возрастания параметра стабилизации (рис. 6.14). Потери будут максимальны при расположении заготовок в порядке убывания параметра стабилизации (рис. 6.15). Для вычисления ошибки необходимо определить минимальное значение второго параметра и максимальное – по формулам (6.16), (6.41). Отличие будет только в очередности следования типоразмеров заготовок и, как следствие, параметров стабилизации.

Минимальное значение получится при возрастании параметра, максимальное – при убывании. Ошибка теплотехнолога по второму параметру оценивается по аналогии с первым распределением по выражению (6.42).

Распределение, выбранное теплотехнологом, представлено на рис. 6.16.

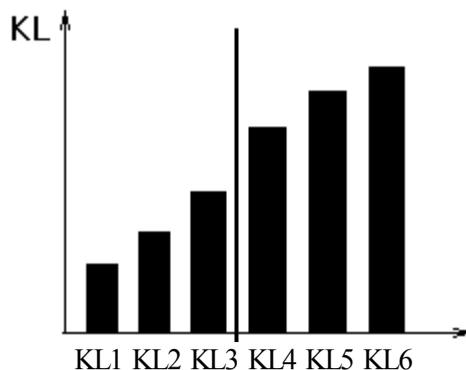


Рис. 6.14. Распределение заготовок сопряженное с минимальными потерями энергии

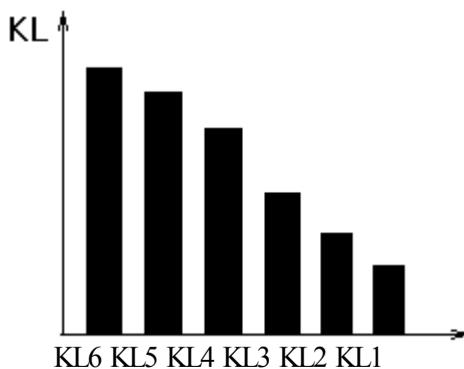


Рис. 6.15. Распределение заготовок сопряженное с максимальными потерями энергии

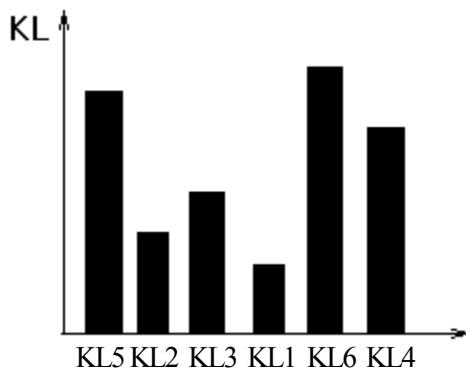


Рис.6.16. Распределение заготовок, полученное во время тренинга

Описанные выше показатели работы пользователя будут отображены в диалоговом окне, имеющем вид, показанный на рис. 6.20.

### **Руководство пользователя**

Деловая игра «Тренажёр теплотехнолога кузнечно-штамповочного производства» предназначена для обучения молодых специалистов навыкам работы в условиях реального производства и проверки знаний работающих специалистов. Основной задачей играющего является рациональное распределение номенклатуры по теплотехнологическим установкам и определение очередности нагрева заготовок. Цель – минимизировать расход топлива на переходных процессах.

Игра проходит в два этапа. Перед началом первого этапа необходимо задать параметры следующего сеанса игры, которые определяются в диалоговом окне (рис.6.17).

Параметр «Количество установок» – это количество печей различной производительности, которые будут участвовать в игре. Этот параметр должен находиться в диапазоне от 1 до 7.

Параметр «Количество заготовок» определяет, сколько всего заготовок различных характеристик будет использовано за сеанс. Приблизительно 5 заготовок на одну установку.

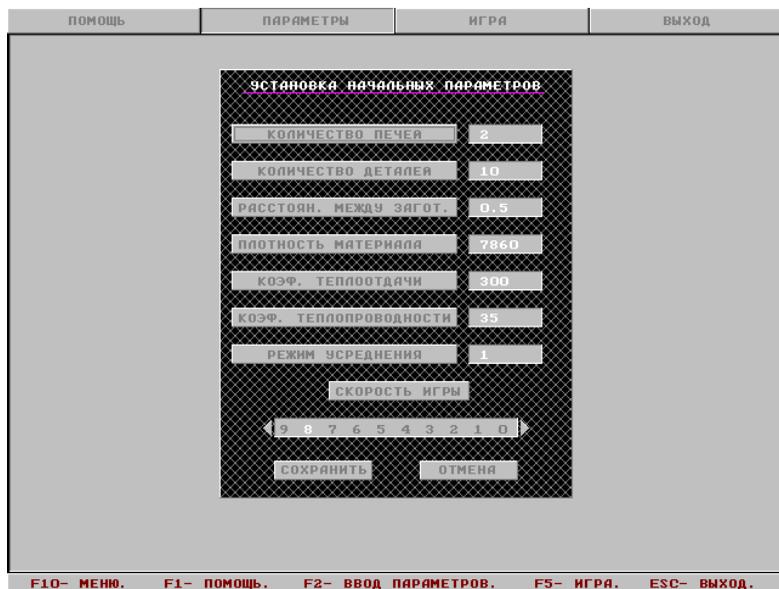


Рис. 6.17. Установка начальных параметров

Параметр «Скорость падения» определит скорость падения заготовок. Самая быстрая – 9, медленная – 0.

Параметр «Расстояние между заготовками» – отношение расстояния между заготовками к их высоте. Пределы изменения: от 0 до 0,99.

Параметр «Плотность материала» – плотность нагреваемого материала. Реально может изменяться от 5000 до 7850  $кг/м^3$ .

Параметр «Приведённый коэффициент теплоотдачи» – суммарный коэффициент теплоотдачи, учитывающий конвективную и лучистую составляющие. Пределы

изменения в реально действующих печах: от 300 до 500  $Вт/(м^2 \cdot К)$ .

Параметр «Коэффициент теплопроводности» – коэффициент теплопроводности материала. Пределы изменения: от 30 до 48,1  $Вт/(м \cdot К)$ .

Все параметры могут быть приняты по умолчанию. Для начала игры необходимо нажать на кнопку «Принять». Если вы передумали играть, то нажмите на кнопку «Отмена».

#### *Первый этап игры*

В правой нижней части экрана расположено несколько кнопок, обозначающих теплотехнологические установки. Они изображены в масштабе, в зависимости от их производительности. В левом верхнем углу выводятся характеристики текущей заготовки: масса и размеры. Заготовка начинает «падать» с верхней части экрана со скоростью, определённой пользователем. Перемещаясь по кнопкам, обозначающим печи (перемещаться можно либо с помощью клавиш «Влево» и «Вправо», либо при помощи клавиши «ТАВ»), пользователь может выбирать, по его мнению, установку для обработки заготовки, нажимая «Пробел» («SPACE»), или необходимо ждать, пока заготовка сама «упадёт» в печь. В данной версии игры время, потраченное игроющим на обдумывание решения, не учитывается. Как только заготовка «упала», счётчик заготовок в печи увеличивается на единицу.

Сразу после нажатия клавиши «Пробел» начинает «падать» следующая заготовка (рис. 6.18).

#### *Второй этап игры*

После того, как было размещено по печам указанное в начале игры количество заготовок, возникает окно, обозначающее начало «второго этапа». Появившимся курсором, клавишами «Влево» и «Вправо» выбирается печь и нажимается клавиша «ENTER». В открывшемся

окне требуется распределить типоразмеры заготовок в порядке очередности нагрева. Клавишами «Влево» и «Вправо» вы можете перемещаться по списку типоразмеров заготовок. Для изменения порядка очередности нагрева, нажмите «Пробел», и текущая заготовка будет перемещена в начало списка. После того, как заготовки, относящиеся к данной установке, будут распределены, нажмите «ENTER», и тогда осуществляется переход к следующей печи. Для завершения данного этапа и получения результатов, выбирается «Принять» и нажимается клавиша «ENTER» (рис. 6.19).

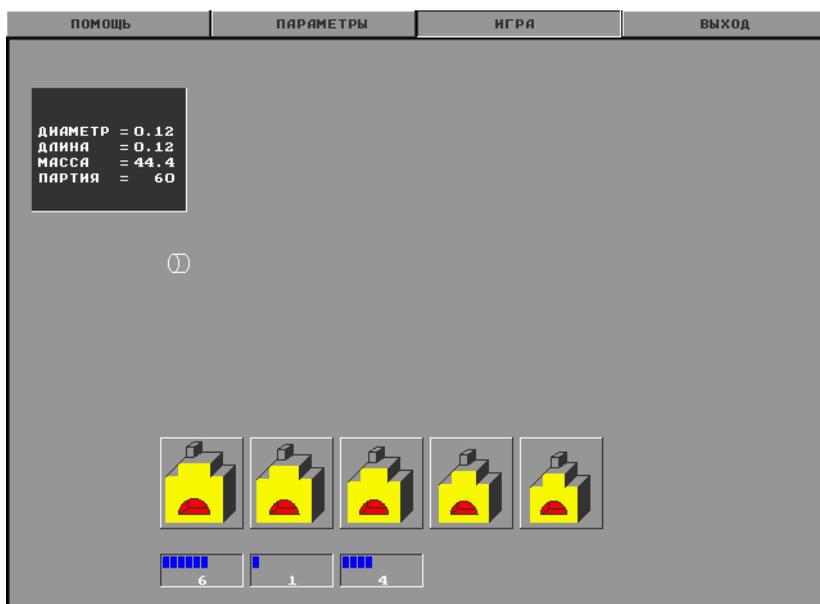


Рис. 6.18. Распределение заготовок по печам

### *Результаты*

После нажатия клавиши «ENTER» появится диалоговое окно, которое имеет вид, показанный на рис. 6.20.

Адекватность тренинга зависит от выбора

количества установок и количества типоразмеров заготовок. Данное окно содержит информацию, которая отображает результаты работы пользователя. Для продолжения необходимо нажать любую клавишу. Закрытие данного окна вызовет появление окна, в котором наглядно с помощью столбиковых диаграмм показаны ошибки игравшего. Столбик диаграмм соответствует параметру стабилизации отдельной заготовки. Сплошной белой линией обозначено, как должны быть расположены заготовки с учётом данного параметра, для обеспечения наиболее экономного расхода топлива и достижения максимального экономического эффекта.

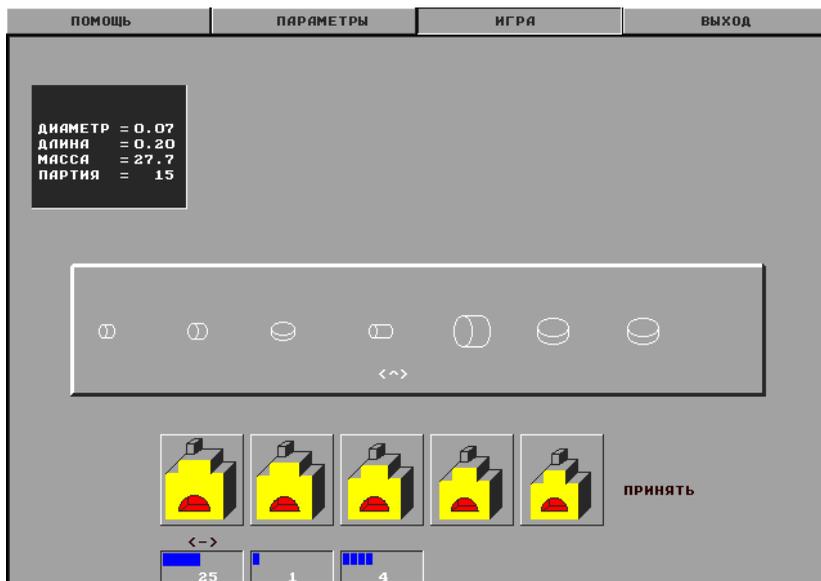


Рис. 6.19. Выбор очередности нагрева заготовок

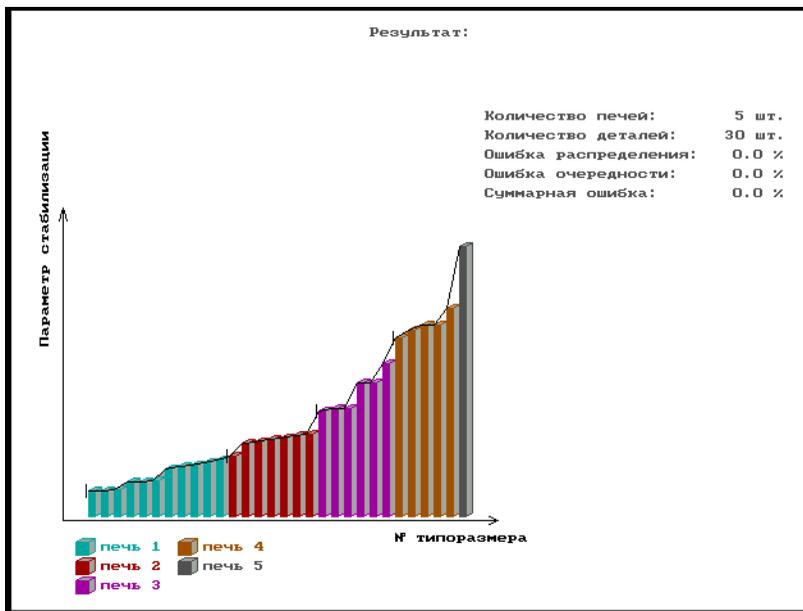


Рис. 6.20. Результат работы пользователя

### *Выводы*

Созданный тренажёр позволит развивать навыки у персонала, работающего в кузнечном цехе, а также обучить технически грамотной работе теплотехнологов кузнечно-штамповочного производства.

## **6.7. Использование нейросетей для определения технически - обоснованных режимов работы установок**

Одной из многих энергоёмкой технологией является кузнечно-штамповочное производство. Нормы расхода энергии при свободной ковке определяются приблизительно, в основном с использованием физического моделирования во время наладки печей и молотов. Себестоимость разработки таких норм чрезвычайно высока, так как имеется широкая номенклатура изделий, выпускаемых такими производственными цехами. В последнее время для

разработки норм используются методы математического моделирования теплотехнологических установок *печь–молот*. Математические модели установок строятся на основании решения сопряженных задач теплообмена, что требует длительного времени выполнения программ даже для современных ЭВМ.

Математическая модель кузнечного производства [125] предназначена для оперативного использования в кузнечном цехе (рис. 6.2). Выбор оптимального режима нагрева по себестоимости цехового передела происходит варьированием следующих параметров: температуры на поверхности, температурного перепада по сечению металла в конце нагрева и параметра, связанного с размещением заготовок на подине печи (отношение расстояния между заготовками к высоте заготовок). Оптимальное распределение заготовок между печами находится с учетом параметра стабилизации, который представляет собой отношение количества теплоты, подведенной к металлу при единичном температурном напоре за промежуток времени, к энергии, усвоенной металлом при единичном приращении температуры [126].

Если использовать для обучения нейронных сетей математическую модель кузнечно-штамповочного производства (рис. 6.21), которая для выбора оптимального варианта работает несколько часов, то нейросети можно использовать для оперативной работы производства с определением технически обоснованных норм расхода энергии для конкретного предприятия для существующих и новых изделий.

Эта технология моделирования позволяет разработать технически обоснованные нормы расхода энергии для оборудования любой сложности, для которого ранее нормы расхода энергии определялись приблизительно или полностью отсутствовали.

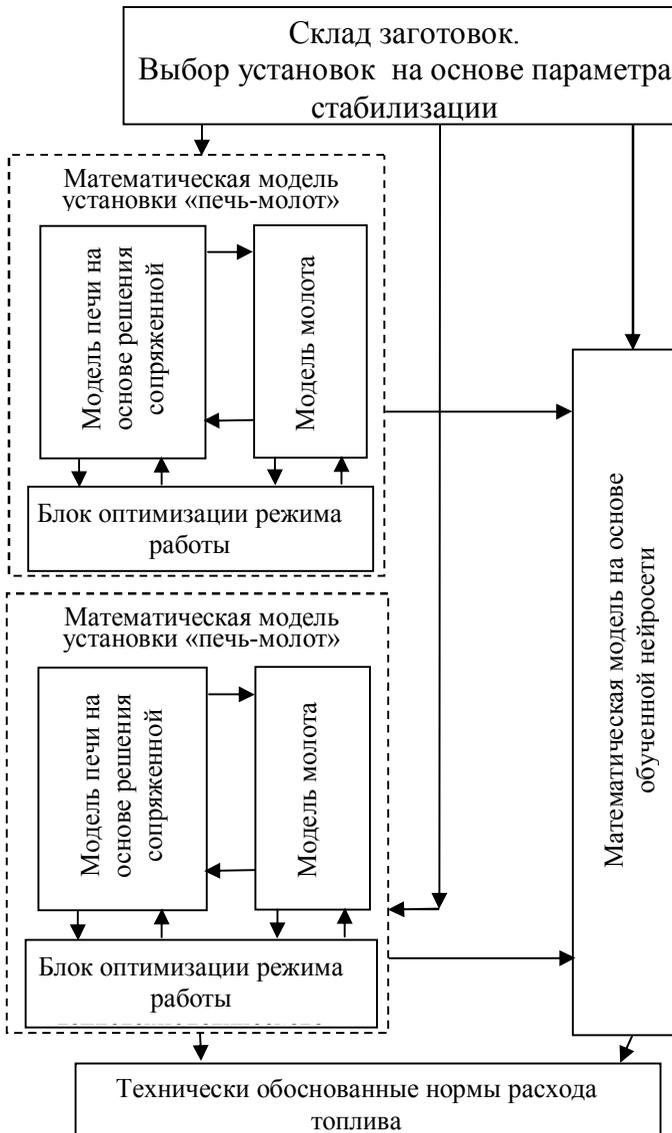


Рис. 6.21. Математическая модель кузнечно-штамповочного производства с использованием нейронных сетей.

## **7. Использование природных алгоритмов для решения оптимизационных задач по режимам работы теплотехнологических установок**

### **7.1. Оптимальный нагрев металла с минимальным расходом топлива в камерной термической печи на основе генетического алгоритма**

Для эффективной эксплуатации значительного количества нагревательных печей, работающих с садочной загрузкой металла, решение задачи оптимального нагрева с минимальным расходом топлива является актуальной проблемой. Этому вопросу посвящено несколько работ [127 – 130].

Для этой цели разработана математическая модель камерной нагревательной печи. Печь работает в садочном режиме с периодом нагрева металла и периодом его выдержки до параметров качества нагрева. Для параметров качества нагрева принята конечная температура металла на поверхности и перепад температур в конце нагрева между поверхностью металла и его центром. Температура на поверхности металла не может быть выше заданной.

Для модели поставлена задача оптимизации режима работы печи и её решением на основе генетического алгоритма, а также сравнение эффективности и точности решения задачи оптимизации по сравнению с методом перебора вариантов.

Известно два основных пути решения задач оптимизации: метод перебора вариантов и локально градиентный метод. Метод перебора вариантов наиболее прост по своей сути и тривиален в программировании. Для поиска оптимального решения (точки минимума целевой функции) требуется последовательно вычислить значения

целевой функции во всех возможных точках, запоминая минимальное значение из них. Недостатком этого метода является большая вычислительная стоимость.

К локально градиентным методам относятся, например, популярный метод градиентного спуска. При этом в начале выбираются некоторые случайные значения параметров, и затем эти значения постепенно изменяются таким образом, чтобы добиться наибольшей скорости убывания целевой функции. Достигнув локального минимума, такой алгоритм останавливается, и для поиска глобального оптимума требуются дополнительные усилия. Градиентные методы работают очень быстро, но не гарантируют оптимальности найденного решения в многомерных задачах. Типичная практическая задача оптимизации режима работы печи с минимальным расходом топлива, как правило, является многомерной, имеющей ряд ограничений. Для такой задачи не существует ни одного универсального метода, который бы позволил достаточно быстро найти абсолютно точное решение.

В качестве третьего пути используются методы, основанные на комбинации метода перебора вариантов и градиентных методах, которые позволяют получить приближенное решение, точность которого будет возрастать с увеличением времени счёта. К одному из таких методов можно отнести метод генетического алгоритма, в котором механизмы скрещивания и мутации реализуют переборную часть метода, а отбор лучших решений градиентный спуск [131 – 132].

### **Математическая модель камерной нагревательной печи с садочной загрузкой**

Предлагается модель для определения норм расхода топлива на печь и разработки тепловых режимов работы

камерной термической печи, работающей в садочном режиме. Для нагреваемого металла задан перепад температур между поверхностью и центром в конце нагрева, при этом температура поверхности металла не должна превышать заданной. В качестве центра для металла принята его поверхность, обращенная к поду печи, а для кладки – наружная поверхность ограждения печи.

Структура математической модели показана на рис. 7.1.

Входными параметрами модели являются:

- 1) параметры, связанные с конструкцией печи (размеры рабочего пространства, размеры и теплофизические характеристики материалов ограждений, мощность горелок и др.);
- 2) параметры нагреваемых заготовок (размеры и масса садки, теплофизические характеристики нагреваемого материала);
- 3) параметры нагрева заготовок и начальные параметры кладки (температура металла в центре и на наружной поверхности кладки в начальный момент и коэффициенты полиномов для описания начального температурного поля кладки и металла, температура на поверхности и температурный перепад между температурой поверхности и центра в конце нагрева);
- 4) параметры теплоносителей, топлива (состав и теплота сгорания топлива, теплофизические характеристики воздуха, топлива и продуктов сгорания и др.);
- 5) общецеховые и экономические параметры, связанные с характеристикой цеха.

Математическая модель строится на основании решения сопряженной задачи теплообмена в системе газ – кладка – металл при условии радиационного – конвективного нагрева на внутренней поверхности кладки и металла и граничных условиях 3 рода на наружной поверхности кладки. Между металлом и подом печи

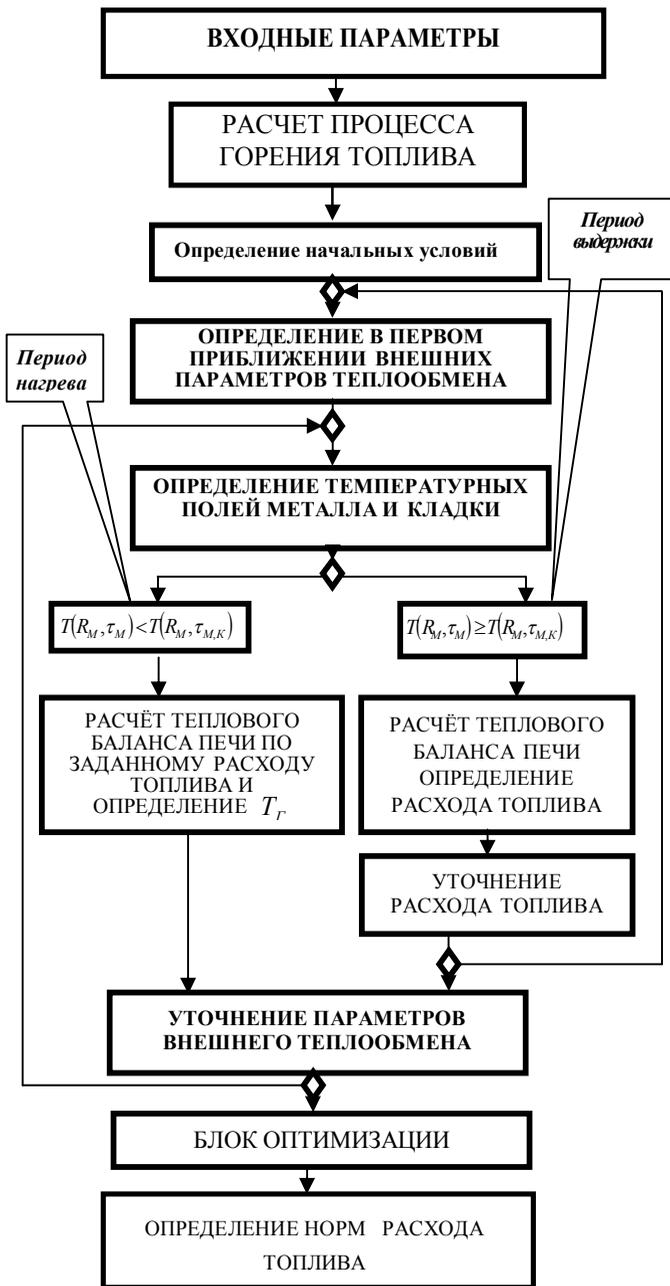


Рис. 7.1. Составные части математической модели нагревательной печи с садочной загрузкой

приняты адиабатные условия теплообмена. В качестве математического метода моделирования принята неявная конечно - разностная схема. Газовый объем в рабочем пространстве печи принят изотермичным. Температурные поля ограждений и металла сводятся к температурному полю пластин. Излучение газа, кладки и металла принято серым.

При этом формулировка задачи имеет вид:

$$c_{KL}(T_{KL}) \frac{\partial T_{KL}(x_{KL}, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_{KL}} \lambda_{KL}(T_{KL}) \frac{\partial T_{KL}(x_{KL}, \tau)}{\partial x_{KL}}$$

при  $\tau > 0$  и  $0 < x_{KL} < R_{KL}$  ;

(7.1)

$$c_M(T_M) \frac{\partial T_M(x_M, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_M} \lambda_M(T_M) \frac{\partial T_M(x_M, \tau)}{\partial x_M}$$

при  $\tau > 0$  и  $0 < x_M < R_M$  ,

(7.2)

где  $T_{KL}$ ,  $T_M$  – температура кладки и металла, соответственно,  $K$ ;  $c_{KL}$ ,  $c_M$  – удельная теплоемкость кладки и металла,  $Дж/(м^3 \cdot K)$ ;  $\lambda_{KL}$ ,  $\lambda_M$  – коэффициент теплопроводности материала кладки и металла,  $Вт/(м \cdot K)$ ;  $x_{KL}$ ,  $x_M$  – текущая пространственная координата кладки и металла,  $м$ ;  $\tau$  – время,  $с$ ;  $R_{KL}$ ,  $R_M$  – толщина кладки и металла,  $м$ .

Начальные условия для температурного поля кладки и металла:

$$T_{KL}(x_{KL}, 0) = T_{KL}(0, 0) + \sum_{n=1}^{m_{KL}} (b_{n, KL} \cdot x_{KL}^n) ;$$
(7.3)

$$T_M(x_M, 0) = T_M(0, 0) + \sum_{n=1}^{m_M} (b_{n, M} \cdot x_M^n) ,$$
(7.4)

где  $b_{n, KL}$ ,  $b_{n, M}$  – коэффициенты в аппроксимации начального температурного поля кладки и металла.

*Граничные условия*

$$\lambda_{\text{кЛ}}(T_{\text{кЛ}}) \frac{\partial T_{\text{кЛ}}(0, \tau)}{\partial x_{\text{кЛ}}} = \alpha_{\text{OC}} \cdot [T_{\text{кЛ}}(0, \tau) - T_{\text{OC}}]; \quad (7.5)$$

$$\lambda_{\text{M}}(T_{\text{M}}) \frac{\partial T_{\text{M}}(0, \tau)}{\partial x_{\text{M}}} = 0; \quad (7.6)$$

$$\lambda_{\text{кЛ}}(T_{\text{кЛ}}) \frac{\partial T_{\text{кЛ}}(1, \tau)}{\partial x_{\text{кЛ}}} = q_{\text{P,кЛ}} + q_{\text{K,кЛ}}; \quad (7.7)$$

$$\lambda_{\text{M}}(T_{\text{M}}) \frac{\partial T_{\text{M}}(1, \tau)}{\partial x_{\text{M}}} = q_{\text{P,M}} + q_{\text{K,M}}, \quad (7.8)$$

где  $q_{\text{P,кЛ}}, q_{\text{P,M}}$  – удельный результирующий радиационный тепловой поток на кладку и металл,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $q_{\text{K,кЛ}}, q_{\text{K,M}}$  – удельный конвективный тепловой поток на кладку и металл,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

$$q_{\text{P,кЛ}} = \sigma_0 \cdot A_{\text{кЛ}} \cdot [T_{\text{Г}}^4(\tau) - T_{\text{кЛ}}^4(R_{\text{кЛ}}, \tau)] - \sigma_0 \cdot B_{\text{кЛ}} \cdot [T_{\text{кЛ}}^4(1, \tau) - T_{\text{M}}^4(R_{\text{M}}, \tau)]; \quad (7.9)$$

$$q_{\text{P,M}} = \sigma_0 \cdot A_{\text{M}} \cdot [T_{\text{Г}}^4(\tau) - T_{\text{M}}^4(1, \tau)] + \sigma_0 \cdot B_{\text{M}} \cdot [T_{\text{кЛ}}^4(R_{\text{кЛ}}, \tau) - T_{\text{M}}^4(R_{\text{M}}, \tau)]; \quad (7.10)$$

$$A_{\text{кЛ}} = \frac{E_{\text{Г}} \cdot E_{\text{кЛ}} \cdot [1 + (1 - E_{\text{Г}}) \cdot (1 - E_{\text{M}})] \frac{F_{\text{M}}^{\text{BH}}}{F_{\text{кЛ}}^{\text{BH}}}}{M}, \quad (7.11)$$

где  $F_{\text{кЛ}}^{\text{BH}}, F_{\text{M}}^{\text{BH}}$  – площади внутренней поверхности кладки и обогреваемой поверхности металла,  $\text{м}^2$ .

$$A_{\text{M}} = \frac{E_{\text{Г}} \cdot E_{\text{M}} \cdot [1 + (1 - E_{\text{Г}}) \cdot (1 - E_{\text{кЛ}})] \frac{F_{\text{M}}^{\text{BH}}}{F_{\text{кЛ}}^{\text{BH}}}}{M}; \quad (7.12)$$

$$M = 1 - (1 - E_{\text{Г}}) \cdot (1 - E_{\text{кЛ}}) \cdot \left(1 - \frac{F_{\text{M}}^{\text{BH}}}{F_{\text{кЛ}}^{\text{BH}}}\right) - (1 - E_{\text{Г}})^2 \cdot (1 - E_{\text{M}}) \cdot (1 - E_{\text{кЛ}}) \cdot \left(1 - \frac{F_{\text{M}}^{\text{BH}}}{F_{\text{кЛ}}^{\text{BH}}}\right); \quad (7.13)$$

$$B_{\text{кЛ}} = \frac{F_{\text{M}}^{\text{BH}} \cdot E_{\text{M}} \cdot E_{\text{кЛ}} \cdot (1 - E_{\text{Г}})}{F_{\text{кЛ}}^{\text{BH}} \cdot M}; \quad (7.14)$$

$$B_M = \frac{E_M \cdot E_{KL} \cdot (1 - E_\Gamma)}{M}; \quad (7.15)$$

$$q_{K,KL} = \alpha_{KL} \cdot [T_\Gamma(\tau) - T_{KL}(R_{KL}, \tau)]; \quad (7.16)$$

$$q_{K,M} = \alpha_M \cdot [T_\sigma(\tau) - T_M(R_M, \tau)]; \quad (7.17)$$

где  $\sigma_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $B_M / (M^2 \cdot K^4)$ ;  $T_\Gamma(\tau)$  – температура газа в текущий момент времени,  $K$ ;  $T_{KL}(R_{KL}, \tau)$ ,  $T_M(R_M, \tau)$  – температура кладки и металла на поверхности в текущий момент времени,  $K$ ;  $A_{KL}$ ,  $A_M$ ,  $M$ ,  $B_{KL}$ ,  $B_M$  – коэффициенты для расчёта приведённого коэффициента излучения с учётом излучения от продуктов сгорания и кладки на металл [83].  $E_\Gamma$ ,  $E_{KL}$ ,  $E_M$  – степень черноты газа, кладки и металла;  $\alpha_{KL}$ ,  $\alpha_M$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией к поверхности кладки и металла,  $B_M / (M^2 \cdot K)$ .

Температура газа может быть выражена из уравнения теплового баланса:

$$T_\Gamma(\tau) = \frac{B(\tau) \cdot (Q_H^P + Q_B + Q_T) + Q_{ЭКЗ} - q_{P,KL}(\tau) \cdot F_{KL}^{BH} - q_{P,M}(\tau) \cdot F_M^{BH} - q_{K,KL}(\tau) \cdot F_{KL}^{BH} - q_{K,M}(\tau) \cdot F_M^{BH}}{B(\tau) \cdot V_{ПГ} \cdot c_{ПГ}}, \quad (7.18)$$

где  $B(\tau)$  – расход топлива,  $M^3/c$ ;  $Q_H^P$  – теплотворная способность топлива,  $Дж/M^3(н)$  газа;  $Q_B$  – физическая теплота воздуха,  $Дж/M^3(н)$  газа;  $Q_T$  – физическая теплота топлива,  $Дж/M^3(н)$  газа;  $Q_{ЭКЗ}$  – теплота экзотермических реакций,  $Вт$ ;  $V_{ПГ}$  – удельный выход продуктов сгорания,  $M^3(н)$  *прод. гор./M^3(н) газа*;  $c_{ПГ}$  – удельная теплоёмкость продуктов горения,  $Дж/(M^3 \cdot K)$ .

Условие для периода нагрева

$$T_{\Gamma}(\tau) = f[B(\tau)]. \quad (7.19)$$

Условие для периода выдержки:

$$T_{\Gamma}(\tau) = f\left[T_M(R_M, \tau_{\text{ВЫД}})\right]; \quad (7.20)$$

$$T_M(R_M, \tau_{\text{ВЫД}}) = \text{const}, \quad (7.21)$$

где  $T_M(R_M, \tau_{\text{ВЫД}})$  – температура на поверхности металла во время периода выдержки, которая равна температуре на поверхности металла в конечный момент времени,  $K$ .

### Решение сопряженной задачи теплообмена

1. Вначале определяются параметры расчетной сетки метода конечных разностей. Пространственное и временное разбиение считаем равномерным. Определяется приращение по толщине пластины металла:

$$\Delta x_M = R_M / I_M, \quad (7.22)$$

где  $R_M$  – толщина металла,  $m$ ;  $I_M$  – число разбиений по координате  $x_M$  для металла.

Шаг по времени находится по формуле:

$$\Delta \tau_M = \tau_M / J_M, \quad (7.23)$$

где  $\tau_M$  – время нагрева,  $c$ ;  $J_M$  – число разбиений по координате  $\tau$  для металла.

2. Значения температур для внутренних узлов определяются из уравнения

$$T_{i,j+1} = T_{i,j} + \frac{\Delta \tau_M}{\Delta x_M^2 \cdot c_M(T_{i,j})} \cdot \left[ \lambda_M(T_{i+0,5}) \cdot (T_{i+1} - T_i) - \lambda_M(T_{i-0,5}) \cdot (T_i - T_{i-1}) \right]_{j+1}. \quad (7.24)$$

3. Температура для внутренних узлов аппроксимируется зависимостью

$$(A_i \cdot T_{i+1} - B_i \cdot T_i + D_i \cdot T_{i-1} + F_i)_{j+1} = 0. \quad (7.25)$$

Используется квазилинейная схема, по которой коэффициенты  $\lambda_M(T_{i+0,5})$  и др. вычисляются по

температурам предыдущего временного слоя  $T_j$ . При решении разностных уравнений относительно температур  $T_{j+1}$  на текущем временном слое эти коэффициенты известны, и поэтому система является линейной относительно  $T_{j+1}$ .

4. Определяются коэффициенты прямой прогонки в уравнении (7.25).

5. Уравнение сопряжения для центра металла:

$$\left[ \lambda_{M,0,j} \frac{3 \cdot T_0 - 4 \cdot T_1 + T_2}{2 \cdot \Delta x_M} \right]_{j+1} = 0. \quad (7.26)$$

6. Определяются коэффициенты обратной прогонки  $a_0, b_0$  в нулевой точке и обратной прогонки  $a_i, b_i$  от первого шага до  $(I_M - 1)$ .

7. Температуры в точке  $I_M$  определяются из выражения:

$$\lambda_M(T_{I,j}) \frac{3 \cdot T_I - 4 \cdot T_{I-1} + T_{I-2}}{2 \cdot \Delta x_M} = \sigma_0 \cdot A_M \cdot (T_{\Gamma,j+1}^4 - T_{I,j+1}^4) + \alpha_M \cdot (T_{\Gamma,j+1} - T_{I,j+1}). \quad (7.27)$$

$T_{\Gamma,j+1}$  – определяется из уравнения теплового баланса (для периода нагрева) при заданном расходе газа  $B(\tau)$ , а  $T_{I-1}$  и  $T_{I-2}$  находятся по формулам:

$$T_{I-1} = a_{I-1} \cdot T_I + b_{I-1}; \quad (7.28)$$

$$T_{I-2} = a_{I-2} \cdot T_{I-1} + b_{I-2} \quad (7.29)$$

и так далее.

8. Температура  $T_{I,j}$  определяется итерацией по методу Ньютона:

$$T_{I,j}^{(n+1)} = T_{I,j}^{(n)} - \left[ 3 \cdot T_{I,j}^{(n)} - 4 \cdot a_{I-1} \cdot T_{I,j}^{(n)} - 4 \cdot b_{I-1} + a_{I-2} \cdot a_{I-1} \cdot T_{I,j}^{(n)} + a_{I-2} \cdot b_{I-1} + b_{I-2} - W_1 \cdot T_{\Gamma,j+1}^4 + W_1 \cdot (T_{I,j}^{(n)})^4 - W_2 \cdot (T_{KI,I,j}^{(n)})^4 + W_2 \cdot (T_{I,j}^{(n)})^4 - W_3 \cdot T_{\Gamma,j+1} + W_3 \cdot T_{I,j}^{(n)} \right] / [3 - 4 \cdot a_{I-1} + a_{I-2} \cdot a_{I-1} +$$

$$+ 4 \cdot W_1 (T_{I,j}^{(n)})^3 + 4 \cdot W_2 (T_{I,j}^{(n)})^3 + W_3 ], \quad (7.30)$$

где  $T_{I,j}^{(n)}, T_{I,j}^{(n+1)}$  – значение температуры на наружной поверхности металла на предыдущем и последующем итерационных шагах,  $K$ ;

$$W_1 = 2 \cdot \sigma_0 \cdot A_M \cdot \Delta x_M / \lambda (T_{I,j}), \quad (7.31)$$

$$W_2 = 2 \cdot \sigma_0 \cdot B_M \cdot \Delta x_M / \lambda (T_{I,j}), \quad (7.32)$$

$$W_3 = 2 \cdot \alpha_M \cdot \Delta x_M / \lambda (T_{I,j}). \quad (7.33)$$

9. Расчет продолжается до выполнения условия:

$$\left| T_{I,j}^{(n+1)} - T_{I,j}^{(n)} \right| < \varepsilon_1. \quad (7.34)$$

10. Температура по сечению металла на каждом шаге определяется по формулам:

$$T_{I-1} = a_{I-1} \cdot T_I + b_{I-1}; \quad (7.35)$$

$$T_{I-2} = a_{I-2} \cdot T_I + b_{I-2} \quad (7.36)$$

и так далее.

Температурное поле кладки рассчитывается аналогично температурному полю металла. Вначале определяются параметры расчетной сетки. Уравнение сопряжения для наружной поверхности кладки при конвективном теплообмене

$$\left[ \lambda_{KL,0,j} \frac{3 \cdot T_0 - 4 \cdot T_1 + T_2}{2 \cdot \Delta x_{KL}} \right]_{j+1} = \alpha_{OC} \cdot (T_{OC} - T_0). \quad (7.37)$$

Далее расчет ничем не отличается от расчета температурного поля металла. Из расчета теплового баланса на каждом шаге по времени вычисляются температуры газов в рабочем пространстве печи и уточняются коэффициенты конвективной теплоотдачи к металлу и внутренней стенки кладки  $\alpha_M, \alpha_{KL}$ .

Коэффициент конвективной теплоотдачи  $\alpha_M$  от газа

к поверхности металла принимается на каждом шаге по времени постоянным коэффициентом и равным значению на предыдущем шаге. Для уточнения коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha_M$  от газов к поверхности металла на каждом шаге используется формула (3.51), предложенная Л.А. Бровкиным и Б.Г. Коптевым [92]:

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_M$ , вычисленный по формуле (3.51), сравнивается с величиной  $\alpha_M^0$ , принятой в нулевом приближении. Если условие

$$|\alpha_M - \alpha_M^0| \leq \varepsilon_2 \quad (7.38)$$

на шаге по времени не выполняется, осуществляется корректировка  $\alpha_M$  и повторяется определение температуры  $T_r(\tau)$ .

Для определения и уточнения  $\alpha_{кл}$  используется также формула (3.51). Кинематическая вязкость продуктов горения  $\nu$ ,  $m^2/c$ , в пограничном слое у поверхности кладки берётся при температуре, средней между температурой на внутренней поверхности кладки и температурой газа.

Период выдержки начинается после того, как температура на наружной поверхности металла достигает заданной по технологии. Целью периода выдержки является получение необходимого перепада между температурами центра и поверхности металла. Если при расчёте периода нагрева из формулы (7.30) определялась температура металла на поверхности, то при расчёте периода выдержки она известна, а неизвестной становится температура газов  $T_r(\tau)$ , которая необходима в печи для обеспечения  $T_M(R_M, \tau_{ввд})^{34Д}$  постоянной. Температура газов  $T_r(\tau)$  в первом приближении задается. Для заданной температуры газов решается сопряженная задача

теплообмена – определяется расход газа на печь. Уточняются параметры внешнего теплообмена. Затем происходит сравнение температуры на поверхности металла  $T_M(R_M, \tau_{ВЫЦ})^{ЗАД}$  – заданной и полученной в результате расчёта  $T_M(R_M, \tau_{ВЫЦ})^i$  на  $i$  - ом шаге итерации. Расчет продолжается до выполнения условия

$$|T_M(R_M, \tau_{ВЫЦ})^{ЗАД} - T_M(R_M, \tau_{ВЫЦ})^i| < \varepsilon_3. \quad (7.39)$$

После выполнения условия определяется расход топлива на  $j$  - ом шаге по времени, затем расчёт повторяется на следующем временном шаге.

Расчёт считается законченным при выполнении для металла условия по заданному перепаду температур между температурой поверхности и центра:

$$|T_M(R_M, \tau_K) - T_M(0, \tau_K)| < \varepsilon_4. \quad (7.40)$$

### **Сопоставление результатов расчета на математической модели с данными промышленного эксперимента**

Промышленный эксперимент проводился в термическом цехе Ивановского завода тяжелого станкостроения (ИЗТС). Печь, на которой производились замеры, представляла собой камерную термическую печь, и предназначалась для нагрева металла под закалку. Заготовки на подине этой печи располагались в произвольном порядке. Во время эксперимента на камерной термической печи, работающей на природном газе низкого давления, замерялось температурное поле нагреваемого металла и кладки, а также температура печи. Металл загружался уже в разогретую печь, поэтому в математическую модель печи начальное температурное поле кладки аппроксимировалось зависимостью (7.3) по

данным из эксперимента. Результаты замеров приведены в [112].

Результаты экспериментальных замеров и расчета на модели приведены и сопоставлены на рис. (7.2). Из рисунка видно, что модель адекватно описывает реальные процессы нагрева в камерной термической печи.

Расчетные значения температур при сопоставлении с экспериментальными данными отличаются не более чем на 5%.

Предложенная математическая модель реализована на языке FORTRAN Power Station 4.0 для Windows 95.

### **Постановка задачи оптимизации работы печи**

В разработанную математическую модель можно добавить блок оптимизации для разработки оптимального режима работы печи, где в качестве целевой функции используется минимальный суммарный расход топлива за периоды нагрева и выдержки  $\sum_0^{JM} B_j$ .

В качестве варьируемого параметра принят расход топлива, который в период нагрева может подаваться на каждом расчётном интервале, или с минимальным, или с максимальным расходом топлива.

Задача оптимизации сводится к выбору режима подачи расхода газа  $B_H(\tau)$  в период нагрева  $\tau_H$  при условии изменения времени  $0 \leq \tau \leq \tau_H$ . Расход газа в период нагрева представлен в виде кусочно-непрерывной функции, которая удовлетворяет ограничению

$$B_{MIN} \leq B_H(\tau) \leq B_{MAX} \quad (7.41)$$

Оптимальное решение лежит в диапазоне между двумя крайними решениями подачи топлива в печь. В первом случае горелки в период нагрева могут работать с

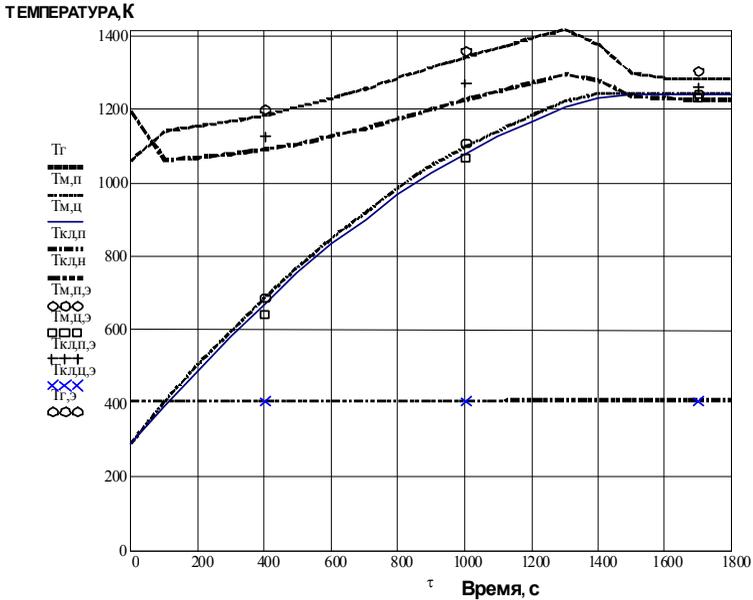


Рис.7.2. Результаты экспериментальных замеров температур и их расчета на модели: ----- – расчётная температура газов  $T_g$ ;  $\circ$  – точки замера температуры газов  $T_g$ ; -.-.-.- – расчётная температура внутренней поверхности кладки  $T_{KL}(R_{KL}, \tau)$ ;  $\dagger$  – точки замера температуры внутренней поверхности кладки  $T_{KL}(R_{KL}, \tau)$ ; -.-.-.- – расчётная температура поверхности металла  $T_M(R_M, \tau)$ ;  $\circ$  – точки замера температуры поверхности металла  $T_M(R_M, \tau)$ ; — — — — – расчётная температура центра металла  $T_M(0, \tau)$ ;  $\square$  – точки замера температуры центра металла  $T_M(0, \tau)$ ; -.-.-.- – расчётная температура наружной поверхности кладки  $T_{KL}(0, \tau)$ ;  $\times$  – точки замера температуры на наружной поверхности кладки  $T_{KL}(0, \tau)$

максимальным расходом топлива  $B_{MAX}$  (рис.7.3,б), во втором с минимальным расходом  $B_{MIN}$  (рис.7.3,а).

На первом этапе подготовки решения задачи оптимизации необходимо определить максимальное количество шагов по времени. Для этого рассчитывается режим с подачей в горелки минимального расхода топлива. Чтобы оценить точность и время решения задачи по оптимизации режима подачи топлива с помощью генетического алгоритма необходимо решить её с использованием метода перебора вариантов. На каждом временном шаге в период нагрева металла топливо подаётся или с минимальным, или с максимальным расходом (соответствует двух–позиционному закону регулирования с “малым” и “большим” горением).

В качестве примера проведён расчёт камерной термической печи, описанной выше. Расчёт производился для печи, которая была после длительного простоя. Количество закодированных вариантов подачи топлива принималось 18. Таким образом, закодированный вариант подачи топлива с минимальным расходом топлива на всех временных участках составит код 000000000000.

Задача метода перебора вариантов заключается в нахождении варианта кода, который удовлетворит условию

$$\sum_0^{J_M} B_j = \min$$

Поле искомым воздействий на подачу топлива лежит между вариантами подачи топлива **а** и **б**. Для получения этого решения была составлена программа, и после расчёта более 370000 вариантов было получено оптимальное решение (рис.7.3, в). Время счёта на компьютере Пентиум-3 составило более 3 суток непрерывной работы.

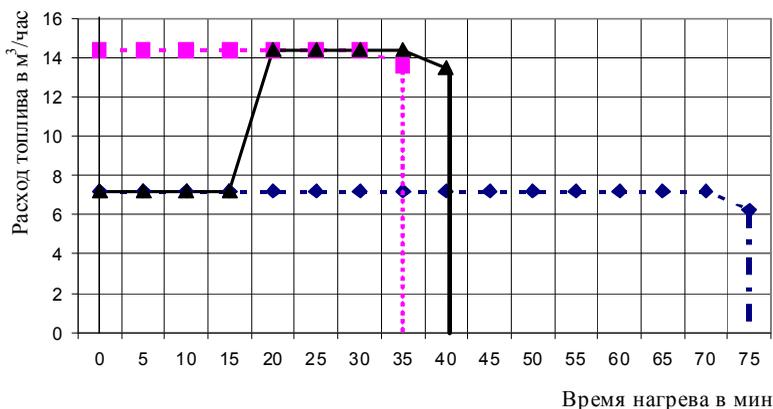


Рис. 7.3. Графики подачи топлива в печь:

- ◆ - - подача топлива по коду 000000 000000 000000;
- ■ - - подача топлива по коду 111111 111111 111111;
- ▲ - - подача топлива по коду 000111 110000 000000  
(оптимальный режим)

### Генетический алгоритм для решения задачи оптимизации расхода топлива на печь

Входные данные:

$k$  – количество закодированных вариантов подачи топлива за полное время нагрева металла в печи (особей);

$n$  – полное количество закодированных элементарных расходов подачи топлива в печь (элементов) за время её работы при нагреве металла;

$q$  – количество закодированных элементарных расходов топлива (элементов) в каждом варианте подачи топлива в печь в операции кроссовера (операция, при которой два закодированных варианта подачи топлива в печь (две хромосомы) обмениваются своими частями);

$g$  – номер позиции, в которой происходит замена одной части кода для первого варианта подачи топлива в

печь на часть кода второго варианта подачи топлива в печь, при их скрещивании (при операции кроссовера).

Генетический алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Формируется начальная популяция из  $k$  вариантов подачи топлива за полное время нагрева металла в печи (особей)  $B_0 = (A_1, A_2, \dots, A_k)$ .

2. Вычисляется приспособленность (значение функции  $\sum_0^{J_M} B_j$  для этого варианта) каждого из вариантов подачи топлива за полное время нагрева металла в печи (особи)  $F_{A_i} = fit(A_i), i = 1, k$  и в целом всех вариантов (популяции  $B_t$ )  $F_t = fit(B_t)$ , то есть  $\sum_{i=1}^k \sum_0^{J_M} B_j$ . По этому значению

проверяется, насколько хорошо вариант подачи топлива в печь (особь) подходит для решения задачи.

3. Выбирается вариант подачи топлива в печь (особь)  $A_c$  из текущего количества вариантов (популяции  $B_t$ )  $A_c = Get(B_t)$ .

4. С определённой вероятностью (вероятностью кроссовера  $P_c$ ) выбирается второй вариант подачи топлива (особь  $A_{c_1}$ ) из текущего количества вариантов (популяции  $B_t$ )  $A_{c_1} = Get(B_t)$  и производится оператор кроссовера (обмен частями).  $A_c = Cros\ sin\ g(A_c, A_{c_1})$ .

Возможны различные методы выбора варианта подачи топлива (особи):

а) Метод отбора, называемый “рулетка”. При использовании такого метода вероятность выбора варианта

подачи топлива (особи  $A_{c_1}$ ) определяется его приспособленностью, то есть  $P_{Get}(A_i) \approx fit(A_i)/fit(B_t)$ .

При использовании этого метода вероятность передачи признаков более приспособленными вариантами подачи топлива (особями  $A_{c_1}$ ) потомкам возрастает.

б) Метод, который называется “турнирный отбор”. При использовании этого метода случайно выбираются чаще две или более особей из всех вариантов популяции  $B_t$ . Победителем выбирается особь с наибольшей приспособленностью  $F_{A_i} = fit(A_i)$ .

#### *Операции кроссовера*

Сначала выбираются два случайных числа  $g$  и  $q$ ,  $g \leq n$  и  $q \leq n$ , где  $g$  – номер случайной позиции для начала операции скрещивания, с которой происходит копирование  $q$  – закодированных элементарных расходов топлива (элементов) из первого варианта подачи топлива (особи  $A_c$ ) в новый вариант подачи топлива в печь (новую особь  $A_{c+1}$ ), названный первым потомком;  $q$  – количество элементов в операции кроссовера;  $n$  – полное количество закодированных элементарных расходов топлива (элементов) в варианте. В том случае, если  $q$  больше оставшихся позиций элементарных расходов топлива, то запись оставшихся элементарных расходов топлива происходит с первой позиции. Затем оставшиеся позиции в первом потомке заполняются из второго варианта подачи топлива (особи  $A_{c_1}$ ) в той же последовательности, в которой они встречаются в списке

(особи  $A_{c_1}$ ). Аналогично происходит заполнение второго потомка (новой особи  $A_{c_1 + 1}$ ). Затем с вероятностью 0,5 из двух потомков выбирается один первый потомок.

5. С заданной вероятностью  $P_m$  выбирается оператор мутации (случайное изменение одной позиции в хромосоме), а именно номер  $g_m$  элемента, в котором может произойти мутация и с заданной вероятностью  $P_m$  значение элемента, которое может измениться в пределах от минимального до максимального значения закодированного элемента.

6. С заданной вероятностью выполняется оператор инверсии (случайное изменение нескольких позиций в хромосоме)  $P_i$ , а именно выбирается количество элементарных расходов топлива (элементов) инверсии  $q_i$ , номер позиции начала инверсии  $g_i$  и затем после инверсии происходит сдвиг на  $q_i$  закодированных элементарных расходов топлива (элементов) с номера позиции начала инверсии  $g_i$  на  $q_i$  элементов.

7. Новый вариант подачи топлива в печь (особь  $A_{c+1}$  или  $A_{c_1 + 1}$ ), помещается в новую популяцию  $insept(B_{t+1}, A_c)$ .

8. Затем операции алгоритма с пункта 3 необходимо выполнить  $k$  раз.

9. После этого увеличивается номер текущей эпохи, которая также состоит из  $k$  вариантов подачи топлива за полное время нагрева металла в печи с  $t$  на  $t + 1$ .

10. Если условие  $F_t - F_{t+1} \geq \varepsilon$  не выполняется, то алгоритм повторяется со второго шага.

По предложенному выше алгоритму была составлена программа, входными данными которой были  $k=22$ ,  $n=18$ ,  $P_c=0,5$ ,  $P_m=0,1$ ,  $P_i=0,9$ . При использовании генетического алгоритма результаты вычислений полностью совпали с методом перебора вариантов уже на 5 эпохе, то есть это около 550 вариантов вычислений. Следовательно, по генетическому алгоритму количество вычислений на 3 порядка меньше количества вычислений методом перебора вариантов[133].

#### *Выводы*

1. Предложена методика теплового расчёта печей с садочной загрузкой, достоинством которой является оригинальность объединения периодов нагрева и выдержки металла в едином алгоритме.

2. Разработанная выше математическая модель предлагается для использования при расчёте технически обоснованных норм расхода топлива и технологических карт нагрева металла для камерных нагревательных и термических печей, работающих в садочном режиме.

3. Для оптимизации режима работы печи предложен к использованию универсальный генетический алгоритм, позволяющий на несколько порядков сократить время счёта при выборе оптимального режима работы печи по сравнению с методом перебора вариантов.

Это существенное преимущество генетического алгоритма позволит решать задачи оптимизации с применением более сложных математических моделей печей.

## Заключение

Проведенный анализ по использованию моделирования теплотехнологических установок, используемых в машиностроении и металлургии, позволил сделать заключение, что для обеспечения повышения энергетической эффективности теплотехнологического и энергетического оборудования необходима разработка высокоэффективных нейросетевых технологий, обученных на базе промышленных экспериментальных данных и сложных математических моделей. Разработанные нейросетевые модели могут эффективно использоваться при принятии решения в случае неполных данных и для управления сложными процессами.

В монографии предложена методика для оценки точности решения задач нагрева в современных вычислительных комплексах на стадии подготовки задачи на основе использования нейросетевой технологии, которая численно проверена на задачах нагрева пластины из металла при граничных условиях первого и второго рода и в результате получена нейросетевая программа. Она может быть рекомендована к применению с работой в многоцелевых вычислительных комплексах Phoenix, Ansys, FlowVision и других.

Разработана математическая модель установки нагревательная печь (на основании решения сопряженной задачи теплообмена) – пневматический молот (модель получена на основании экспериментальных данных в ходе промышленного эксперимента) и блока оптимизации параметров качества нагрева и зазоров между заготовками в качестве целевой функции используется себестоимость цехового передела. Математическая модель использовалась для получения режимных карт нагрева на машиностроительных заводах в кузнечном производстве.

Предложена и разработана методика обучения нейросети с помощью программы оптимизации режима работы установки: камерной нагревательной печи и пневматического молота для свободной ковки для построения прогнозов и принятия мгновенных решений.

Предложено и произведено расширение существующей оптимизационной математической модели установки «печь – молот» путем интеграции в неё блока моделирующего работу утилизационного теплообменника – рекуператора для подогрева воздуха, идущего на горение.

Приведена разработанная методика и математическая программа использования нейросетевой технологии при выборе технического решения по реконструкции теплотехнологических установок для повышения их эффективности (дооснащения их подогревателями воздуха, поступающего на горение). Полученная программа является удобным инструментом для различных исследовательских целей, связанных с оценкой влияния на принятие решения об установке рекуператора, значений входных переменных (производительности печи, площади нагрева рекуператора, экономических показателей и др.).

На основе нейросетевой технологии создана программа по моделированию режимов работы газовой утилизационной турбины (ГУБТ), которая позволяет не только нормировать расход энергии доменного газа на выработку электрической энергии, но и позволяет прогнозировать работу турбины по выработке электрической энергии в реальных условиях при изменении параметров доменного газа. Разработанная математическая модель используется в программном обеспечении на металлургическом комбинате. Разработаны режимные карты, позволяющие оценить эффективность эксплуатации турбины. По режимной карте

можно определять мощность на клеммах генератора, приводимого турбиной ГУБТ при различных давлениях доменного газа до и за турбиной. Разработанные режимные карты используются на металлургическом комбинате.

Полученна нейросетевая модель, обученная по экспериментальным данным камерных нагревательных печей, которая позволяет прогнозировать один из параметров качества нагрева заготовок: температуру на поверхности металла в момент выдачи металла для операцийковки.

В работе описано, как с помощью предложенного параметра стабилизации, использующегося для группы нагревательных печей кузнечного цеха, в которых нагрев осуществляется при постоянной температуре печи, а процесс загрузки–выгрузки металла непрерывен составить математическую модель кузнечного производства. Предложен алгоритм и составлена модель, которая используется на стадии проектного задания для оптимального распределения заготовок между печами. В качестве целевой функции при таком выборе является минимум издержек производства, а варьируемым параметром являются производительности печей.

Предложен метод решения оптимизационной задачи, распределения нагреваемых типоразмеров заготовок по печам, которой позволяет значительно сократить время расчёта по сравнению с методом перебора вариантов.

Разработана методика, позволяющая определять для каждого типоразмера заготовок необходимость одно- или двухстадийного режима нагрева с учетом температурных напряжений в начальной стадии.

Предложен и разработан алгоритм математической модели двухуровневой оптимизации, который позволит решать ряд задач для действующих кузнечно-штамповочных производств: проводить тренинг и подбор

персонала для работы на производстве, управлять производством, прогнозировать работу производства на заданный период с учетом различных технологических и производственных ограничений, разрабатывать научно-обоснованные режимно-технологические карты нагрева заготовок, разрабатывать научно-обоснованные нормы расхода топлива и электроэнергии на установке *печь–молот*.

Предложена и описана методика теплового расчёта печей с садочной загрузкой, достоинством которой является оригинальность объединения периодов нагрева и выдержки металла в едином алгоритме. Разработанная математическая модель предлагается для использования при расчёте технически обоснованных норм расхода топлива и технологических карт нагрева металла для камерных нагревательных и термических печей, работающих в садочном режиме. Для оптимизации режима работы печи предложен к использованию универсальный генетический алгоритм, позволяющий на несколько порядков сократить время счёта при выборе оптимального режима работы печи по сравнению с методом перебора вариантов.

### Библиографический список

1. Джонс, М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях / М. Т. Джонс; пер с англ. А. И.Осипова. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 312 с.
2. Оссовский, С. Нейронные сети для обработки информации ; пер. с польского И. Д. Рудянского – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
3. Hebb, D. Organization of behaviour / D. Hebb – N.Y.: J. Wiley, 1949.
4. Нейроинформатика / А.Н.Горбань [и др.].– Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 296 с.
5. Винер, Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине / Н. Винер; пер. с англ., 2-е изд., – М, 1968. – 344 с.
6. Уоссермэн, Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика 1990. / Ф. Уоссермэн; пер с англ. Ю.А. Зуевой; В.А. Точёновой – М.: Мир, 1992. – 240 с.
7. Горбань, А.Н. Нейронные сети на персональном компьютере / А.Н. Горбань, Д.А. Россиев. – Новосибирск: Наука (Сиб. отделение), 1996. – 276 с.
8. Kohonen, T. /Self-organized formation of topologically correct feature maps/ T. Kohonen //Biological Cybernetics, – 1982. – Vol. 43. – p.59-69.
9. Kohonen, T. Self-Organizing Maps/ T. Kohonen – Springer, 1995.
10. Hecht-Nielsen, R. Counterpropagation networks/ R. Hecht-Nielsen //Applied Optics, – 1987. – Vol. 23. – N26. – p. 4979-4984.
11. Hecht-Nielsen, R. Counterpropagation networks, Proc. First // IEEE Int. Conf. on Neural Networks. eds. M.Candill, C.Butler, Vol. 2, San Diego, CA: SOS Printing. 1987. – p. 19 - 32.

12. Rummelhart, D. E. Learning representations by back-propagating errors/ D. E. Rummelhart, G. E. Hinton, R. J. Williams // Nature, – 1986. – Vol. 323. – p.533-536.
13. Круг, П.Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры: учебное пособие по курсу «Микропроцессоры» / П.Г. Круг – М.: МЭИ, 2002. – 176 с.
14. Тухватулин, И.Х. Прогноз свойств металлических сплавов с помощью нейронных сетей/ И.Х. Тухватулин, Ю.П. Ланкин // Научная сессия МИФИ-2000. II Всероссийская научно-техническая конференция “Нейроинформатика-2000”. Сборник научных трудов. В 2 частях. Ч.2. – 296 с. – М.: МИФИ, 2000. – С.119 - 125.
15. Вехник, В.А. Нейросетевое моделирование тепловой работы проходной печи // Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. Том 8. – Днепропетровск: НМетАУ, 2002. – 226 с.
16. Галушкин, А.И. Применение нейрокомпьютеров в энергетических системах [Электронный ресурс]: статья / А.И. Галушкин. – Режим доступа:<http://kiryushin.boom.ru/docs/neuro1.htm>
17. King, R.L. An architecture for the intelligent detection and alleviation of overloaded transmission lines / R.L.King, D.Novosel (Dept. of Electr. & Comput. Eng., Mississippi State Univ., MS, USA). Electr. Power Syst. Res (Switzerland), vol.30, no.3, p.241-9 (Sept. 1994). (Third Biennial Industrial Electric Power Application Symposium, New Orleans, LA, USA, 12-13 Nov. 1992).
18. Peng, T.M. Conceptual approach to the application neural networks for short-term load forecasting / Peng T.M., Hubele N.F., Karady G.G. // IEEE Int. Symp. Circuits and Syst., New Orleans La, May 1-3, 1990, vol.4 - New York (N.Y.), 1990. – p.2942 - 2945.

19. Cheok, K. Load Forecasting for remote area power supply systems/ K.Cheok (Sch. of Math. & Phys. Sci., Murdoch Univ., WA, Australia), K.Kottathra, T.L.Pryor, G.R.Cole. Proceeding. The 11th Conference on Artificial Intelligence for Applications (Car.No.95CH35758), Los Angeles, CA, USA, 20-23 Feb. 1995 (Los Alamitos, CA, USA: IEEE Comput. Soc. Press 1995), p.231-237.
20. Short term load Forecasting Using Fuzzy neural networks/ Bakirtzis, A.G. [and oth.]// IEEE Power Eng. Review. – 1995.– vol.10. – N3. – Aug.
21. Kwang-Ho, K. Implementation of Hybrid short-term load Forecasting System Using Artificial Neural Networks and Fuzzy Expert systems. //IEEE Power Eng. Review. – 1995.– vol.10. – N3. – Aug.
22. A neural network short term load forecasting model for the Greek Power system /Bakirtzis, A.G. [and oth.] // IEEE Trans. on Power Systems. – 1996.– vol.11. – N2.
23. Bacha, H. Automated load forecasting using neural networks / H.Bacha, W. Mayer // Proc. Amer. Power Conf. vol.54. Pt 2. 54tp Annu. Meet. Amer. Power Conf., Chicago,III., Apr. 1992. - Chicago (III), 1992. - p.1149.
24. Peng, T.M. Conceptual approach to the application neural networks for short-term load forecasting / T.M. Peng, N.F. Hubele, G.G. Karady // IEEE Int. Symp. Circuits and Syst., New Orleans La, May 1-3, 1990, vol.4 - New York (N.Y.), 1990. – p.2942 – 2945,3030.
25. An adaptive modular Artificial neural network Hourly Forecaster and its Implementation at Electric utilities/ A.Khotanzad [and oth.] // IEEE Trans. on Power System. – 1996.– vol.1. – N3. – Aug.
26. Demand Forecasting using fuzzy Neu-ral Computation with special Emphasis on Weekend and Public Holiday Forecasting/ D.Srinivasan [and oth.] // IEEE Trans. on Power Systems. – 1995.– vol.10. – N4.

27. Satoshi, M. The representation of large numbers in neural networks and its application to economical load dispatching of electric power / M. Satoshi, A.Yoshiakira // IJCNN Int. Joint Conf. Neural Networks, Washington, D.C., 1989. Vol.1. - New York (N.Y.), 1989. – p.587-592.
28. Santoso, N. I. Neural net based real-time control of capacitors installed on distribution systems / N.I. Santoso, O.T. Tan // IEEE Trans. Power. Deliv. – 1990.– N1. – p.266-272.
29. Александров, О.И. Оперативные алгоритмы расчета потокораспределения в сложной ЭЭС. / О.И.Александров, Г. Г. Бабкевич // Электронное моделирование. – 1992 – N6. – С.66 -70.
30. Marzio, L. A new utility-user interface for a qualified energy consumption / L. Marzio // Pattern Recogn. – 1995. – N10. – p.1507-1515.
31. Caudana, B. A prototype expert system for large scale energy auditing in buildings / B. Caudana, F. Conti, G. Helcke, R. Pagani // Pattern Recogn. – 1995. – N10. – p.1467-1475.
32. Evaluation of neural networks based Re-al time maximum power tracking Controller for PV system / T. Hiyama [and oth.] // IEEE Trans. on Energy Conversion. – 1995. – v.10. – N3. – Sept.
33. Methods to Build Neural networks for Evaluation of state Variable Patterns / K. Nishimura [and oth].
34. Preliminary results on using artificial neural networks for security assessment / M. Aggoune [and oth.] // IEEE – 1989 – N4 – p. 252-258.
35. Thomas, R.J. On-line security screening using an artificial network / R.J. Thomas, E. Sakk, K. Hashemi, B.Y. Ku, H.D. Chiang // IEEE Int. Symp. Circuits and Syst. New Orleans, La, May 1-3, 1990. V.4 - New York (N.Y.), 1990 – p.2921-2924.

36. Chan Edward, H.P. Using neural network to interpret multiple alarms// IEEE Comput. Appl. Power. – 1990. – N2. – p.33-37.
37. Aggoune Mohamed, E. Use of artificial neural networks in a dispatcher training simulator for power system dynamic security assessment / E. Aggoune Mohamed, V. Vadari Subramanian, // IEEE Int. Conf. Syst., Man, and Cybern., Los Angeles, Calif., Nov. 4-7, 1990: Conf. Proc. - New York (N.Y.), 1990. – p.233-238.
38. Screening power system contingencies using a back-propagation trained multiperceptron. / M.E.Aggoune [and oth.] // ISCAS.89 (486-489).-5654. Artificial neural networks for power system static security assessment. ISCAS. 1989. – p.490-494.
39. Real-time security monitoring of electrical power systems using parallel associative memory./ D.J Sobajic [and oth.] // IEEE. 1990. – p. 2929-2932.
40. On-line security screening using an artificial neural network. / R.I.Thomas [and oth.] // IEEE. 1990. – p. 2921-2924.
41. A new neural networks approach to on-line fault section estimation using information of protective relays and circuit breakers./ H.T.Yang [and oth.] // IEEE Trans. on Power Delivery. 1994. – v.9. – N1. – Jan.
42. El-Keib, A.A. Application of artificial neural networks in voltage stability assessment./ A.A.El-Keib, X.Ma. // IEEE Trans. on Power Systems. 1995. – vol.10. – N4. – Nov.
43. La Scala, M. A neural network based method for voltage security monitoring./ M. La Scala, M. Trovato, F. Torelli// IEEE Trans. on Power Systems. 1996.– vol.11. – N3. – Aug.
44. Hiroyuki, M. Application of a genetic algorithm to meter allocation in electric power systems / M.Hiroyuki, I. Seiji // Proc. Int. Jt Conf. Neural Networks, Nagoya, Oct. 25-29, 1993: IJCNN'93 - Nagoya. Vol.2. – Nagoya. – 1993. – p.1594-1597.

45. Kolla, S.R. Digital protection of power transformers using artificial neural networks. 1995.
46. Assadi, H. Application of the ARTMAP neural network to power system stability studies / H. Assadi, A. Tan, M. Amoli-Etezadi, D. Egbert, M.S. Fadali // IEEE Int. Conf. Syst., Man and Cybern. , Chicago, Oct. 18-21, 1992: Conf. Proc. vol.1. - Piscataway (N.J.), – 1992. – p.1080-1085.
47. Michalik-Mielczarska, G. Dynamilic state estimation of a synchronous generator using neural-networks techniques: Prepr. Pap. Control'92: Conf. , Perth. 2-4 Nov. 1992 / Michalik-Mielczarska G., Mielczarski W. // Nat. Cont. Publ. / Inst. Eng., Austral – 1992. – N92/15 – p.21-28.
48. Mooyucn, C. Real time application of artificial neural networks for incipient fault detection of induction machines / C. Mooyucn, Y. S. Oi // 3rd Int. Conf. Und. and Eng. Appl. Artif. Intell. and Expert Sys. (IEA/AIE'90), Charleston, S.C., July 15-18, 1990: Proc. Vol.2. New York (N.Y.). – 1990. – p.1030-1036.
49. Sudharsanan, S.I. Self-Tuning adaptive control of multi-input, multi-output nonlinear systems using multilayer recurrent neural networks with application to synchronous power generators / S.I. Sudharsanan, I. Muhsin, M.K. Sundareshan // IEEE Int. Conf. Neural Networks, San Francisco, Calif., March 29 - Apr.1 1993: ICNN'93. Vol.3. - Piscataway (N.J.). – 1993. – p.1307-1312.
50. Wang, M. Novel clustering method for coherency identification using an artificial neural network./ M.Wang, H. C. Chang (Dept. of Electr. Eng. Nat. Taiwan Inst. of Technol., Taipei, Taiwan) // IEEE Trans. Power Syst. (USA), vol.9, no.4, – 1994. – p.2056-2062 – Nov.
51. Liang, R.-H. Scheduling of hydroelectric generation using artificial neural networks. / R.-H.Liang, Y.-Y.Hsu (Dept. of Electr. Eng., Nat. Taiwan Univ., Taipei, Taiwan).// IEE Proc.,

Gener. Transm. Distrib. (UK), vol.141, no.5, – 1994. – p.452-458. – Sept.

52. Losleay, A. A neural network controlled unity power factor three pha-se current source PWM front-end rectifier for adjustable speed drives./ A.Losleay, N.R. Zargari, G.Joos (Concordia Univ., Montreal, Que., Canada). Fifth International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives (Conf. Publ. No.399), London, UK, 26-28 Oct. 1994 (London, UK: IEE 1994), – 1994. – p.251-255.

53. Tahan, S.A. A Two-Factor Saturation Model for synchronons Machines with Multiple Rotor Circuits.// IEEE Power Engineering Review, Dec. 1995.

54. Development of a neural network based sa-turation Model for synchronous generator analysis/ H.Tsai [and oth.] // IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995. – vol.10. – N4. – Dec.

55. Kyoko, S. A practical method based on structured neural networks to optimize power system operation / S. Kyoko, N. Kazuo, H. Hideki // Proc. Int. Jt Conf. Neural Networks, nagoya, Oct. 25-29, 1993: IJCNN'93 – Nagoya, 1993. – Vol.1. – p.873.

56. Artificial neural network power system Stabilizers in Multi-Machine Power System Snviroment./ Y.Zhang [and oth.] // IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995. – vol.10. – N1.– March,

57. Neural networks - based selforganizing Fuzzy Controller for transient Stability of Multi machine Power Systems./ H.C.Chang [and oth.] // IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995. – vol.10. – N2.– June.

58. Localization of WindingShorts Using Fuzzi fied Neural networks./ M.A.El-Sharkawi [and oth.] // IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995. – vol.10. – N1.– March.

59. An artificial - neural network Method for the identification of Saturated Turbogenerator Parameters dased on a coupled Finite-Element/State-Space Computational algorinhm./

- S.R.Chaudhry [and oth.] // IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995. – vol.10. – N4.– Dec.
60. Damping of torsional Oscillations in a parallel AC/DC System using an artificial neural network tuned supplemental subsynchronous damping controller./ L.H.Jeng [and oth.] // Proc. Natl. Sci. Conn. Roc(A), 1996. – vol.20.– N2. – p.174-184.
61. Application of neural network to power Converter Control./ F.Harashima [and oth.] //JNNC-91, Syngapoure, 1991.
62. Identification of optimal Operating Point of PV Modules using neural network for real time maximum power tracking control./ T.Hiyyama [and oth.] // IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995. – vol.10. – N2.– June.
63. Neural-net based coordinated stabilizing control for the exciter and governor loops of lowhead hydropower plants./ M.Djukanovic [and oth.] // IEEE Trans. on Energy Conversion, 1995. – vol.10. – N4.– Dec.
64. Application of neural networks to the optimal control of Three-phase Voltage-Controlled Inverters./ A.M.Trzynadlowski [and oth.] // IEEE Trans. on Power Electronics, 1994. – vol.9. – N2.– July.
65. Коздоба, Л.А. Электрическое моделирование явлений тепло- и массопереноса /Л.А. Коздоба – М.: Энергия, 1972. – 296 с.
66. Карпушкина, С.А. Анализ точности численных решений краевых задач на основе аналитических решений / С.А. Карпушкина // exponenta PRO. – 2004.– № 3-4. – С. 126 - 132.
67. Иванов, А.В. О достоверности использования вычислительного комплекса PHOENICS в расчетах рассеяния вещества в возмущенном потоке / А.В. Иванов, Б.С. Мастрюков // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 11 - С. 64 – 69.

68. Соколов, А.К. Оптимизация режимных и конструктивных параметров и совершенствование методов расчета газовых нагревательных печей: дис... докт. техн. Наук: 05.14.14: / Соколов Анатолий Константинович. – Иваново, 2003. – 345 с.
69. Бухмиров, В.В. Разработка и использование математических моделей для решения теплотехнических задач металлургического производства / В.В. Бухмиров // Вестник ИГЭУ. – 2001. – Вып. 1. – С. 72 - 80.
70. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
71. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е издание, дополненное и переработанное / под ред. Е.И. Казанцева. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
72. Солодов, А.П. Mathcad. Дифференциальные модели / А.П. Солодов, В. Ф. Очков. – М.: МЭИ, 2002. – 239 с.
73. Бровкин, Л.А. Теплообмен и тепловые режимы промышленных печей: учеб. пособие / Л.А. Бровкин. – Иваново: Ив. гос. университет, 1982. – 85 с.
74. Бровкин, Л.А., Пыжов, В.К. Соколов, А.К. О поэтапном расчёте температурных полей методом дискретного удовлетворения краевых условий. Тепло-массообмен в промышленных установках: сб. ст. / под ред. Л.А. Бровкина – Иваново: Ив. гос. университет., 1975. С. 9 –12.
75. Бровкин, Л.А. Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах: учеб. пособие / Л.А. Бровкин. – Иваново: ИЭИ, 1973. – 364 с.
76. Крылова, Л.С. Исследование сопряжённых температурных полей металла кладки и газа в промышленных печах: автореф. дис... канд. техн. наук / Крылова Людмила Сергеевна. – М., 1973. – 26 с.
77. Соколов, А.К. Моделирование и оптимизация режимов нагрева металла в промышленных печах: автореф. дис...

- канд. техн. наук / Соколов Анатолий Константинович. – Иваново, 1975. – 25 с.
78. Соколов, А.К. Комплекс программ БРАГГ для расчёта горения газа с использованием базы данных / А.К. Соколов. – Иваново: ИЭИ, 1982. – 82 с.
79. Соколов, А.К. Комплекс программ РАГГ для расчёта горения газа / А.К. Соколов. – Иваново: ИЭИ, 1982. – 69 с.
80. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. – М.: Мир; 1975. – 934 с.
81. Ключников, А.Д. Теплопередача излучением в огнетехнических установках / Ключников А.Д., Г.Л. Иванцов. – М.: Энергия, 1970. – 400 с.
82. Разработка мероприятий по совершенствованию теплового оборудования и энергоиспользования на ИСПО: отчёт по НИР/Иван. Энерг. Ин-т; Руководитель Л.С. Крылова; № 01840022388; Инв.№ 02870007932 – Иваново, 1986. – 149 с.
83. Расчёт нагревательных и термических печей / под ред. В.М. Тымчака и В.Л. Гусовского – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
84. Блох, А.Г. Основы теплообмена излучением / А.Г. Блох – М.Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 331 с.
85. Соколов, А.К. Комплекс программ. Расчёт теплообмена в рабочем пространстве пламенных печей / А.К. Соколов. – Иваново: ИЭИ, 1988. – 31 с.
86. Бровкин Л.А., Крылова Л.С. Решение задач теплопроводности дискретным удовлетворением граничных условий. - В кн. Вопросы теплообмена в промышленных установках. - Иваново: ИЭИ, 1971. С.56 - 60.
87. Крылова, Л.С. Огнетехнические установки и топливоснабжение: учеб. пособие / Л.С. Крылова, Л.А. Бровкин – Иваново: Ив. гос. университет, 1979. – 61 с.

88. Соколов, А.К. Таблицы специальных функций для расчёта нагрева и охлаждения: учеб. пособие / А.К. Соколов. – Иваново: ИЭИ, 1976. – 73 с.
89. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
90. Крылова, Л.С. Камерная пламенная печь: учеб. пособие. / Л.С. Крылова. – Иваново: Ив. гос. университет, 1980. – 47 с.
91. Соколов, А.К. Коэффициенты упрощающие расчёт теплопередачи через обмуровки печей/ А.К. Соколов. – Иваново, ИЭИ, 1981. - 9 с. – Деп. В ВИНТИ 06.09.81, № 1333.
92. Бровкин, Л.А. Расчётные формулы определения усреднённого коэффициента теплоотдачи конвекцией в камерных печах / Л.А. Бровкин, Б.Г. Коптев //Изв.вузов. Чёрная металлургия. – 1980. – №7. – С. 105 - 107.
93. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Паусниц, Т. Шервуд. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
94. Голубев, И.Ф. Вязкость газовых смесей / И.Ф. Голубев. – М.: Гос.издат: физико-математической литературы, 1959. – 375 с.
95. Бровкин, Л.А. Определение затрат энергии на ковку в условиях машиностроительного предприятия / Л.А. Бровкин, В.А. Горбунов, Л.С. Крылова //Кузнечно-штамповочное производство. – 1991. – №1. – С. 30 - 32.
96. Иссерлин, А.С. Основы сжигания газового топлива / А.С. Иссерлин. – Л.: Недра, 1987. – 336 с.
97. Тебеньков, Б.П. Рекуператоры для промышленных печей / Б.П. Тебеньков – М.: Металлургия, 1975. – 296 с.
98. Разработка технологии по повышению энергетической эффективности ГУБТ-25: Отчет по НИР/ Иван энерг. ин-т; Руководитель О. И. Горинов; Договор: № 190/04 от 1.07.2004 г – Иваново, 2005. – 72 с.

99. Правила безопасности в газовом хозяйстве металлургических и коксохимических предприятий и производств (ПБ 11-401-01). – М.: ПИООБТ, 2001. – 212 с.
100. Методические указания по прогнозированию удельных расходов топлива: РД 153-34.0-09.115-98. – М.: СПО ОРГРЭС, 1999. – 20 с.
101. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: РД 34.20.501-95. – М.: СПО ОРГРЭС, 1996. – 160 с.
102. Правила технической эксплуатации газового хозяйства газотурбинных и парогазовых установок тепловых электростанций: РД 153-34.1-30.106-00. – М.: СПО ОРГРЭС, 2000. – 39 с.
103. Эксплуатация газотурбинной расширительной станции №1. Технологическая инструкция ТИ-105-Э.02-02 – Череповец.: ОАО «Северсталь», 2002. – 29 с.
104. Временная техдокументация по эксплуатации и пуску ГУБТ-25 совместно с Д.П. №5 – СПб.: «ЭНЕРГОМЕТ», 2002. – 51 с.
105. Положение о нормативных энергетических характеристиках гидроагрегатов и гидроэлектростанций РД 153-34.0-09.161-97– М.: СПО ОРГРЭС, 1997. – 12 с.
106. Газовая утилизационная бескомпрессорная турбина ГУБТ - 25 Техническое описание и инструкции по эксплуатации 121-ТО – СПб.: ОАО «Невский завод», 2000. – 53 с.
107. Испытание теплотехнологического оборудования кузнечного цеха: Отчет по НИР/ Иван энерг. ин-т; - № гос. регистрации 01840022388, инвентарный № 0285. 0003065. Руководитель Л. С. Крылова Кн. 2. – Иваново, 1984. – 91 с.
108. Общемашиностроительные нормативы времени для технического нормирования работ по свободной ковке под молотами: Мелкосерийное и единичное производство. – М.: Машиностроение, 1967. – 123 с.

109. Крылова, Л.С. Проектирование и эксплуатация теплотехнологических установок кузнечно-термического производства машиностроительных заводов: учеб. пособие / Л.С. Крылова ; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». – Иваново, 2001. – 96 с.
110. Исаченко, В. П. Теплопередача: учебник для ВУЗов / В. П. Исаченко, В.А Осипова., А.С. Сукомел – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
111. Немзер, Г.Г. Тепловые процессы производства крупных поковок / Г.Г. Немзер – Л.: Машиностроение, ленингр. отделение, 1979. – 270 с.
112. Разработка мероприятий по совершенствованию теплового оборудования и энергоиспользования на ИСПО: Отчет по НИР/ Иван энерг. ин-т; Руководитель Л. С. Крылова; № 01840022388; инв. №02860004635 – Иваново, 1986. – 90 с.
113. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов / И. Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1980. – 976 с.
114. Кавадеров, А.В. Нагрев « тонких» тел одновременно излучением и конвекцией / А.В. Кавадеров, Ю.А. Самойлович // Инж.физич. журнал. – 1959. – №7. – С. 110 -113.
115. Тайц, Н.Ю. Технология нагрева стали / Н.Ю. Тайц. – М.: Металлургиздат, 1962. – 567 с.
116. Бровкин, Л.А. Совершенствование организации работы нагревательных печей в мелкосерийном и единичном производстве / Л.А. Бровкин, Л.С. Крылова, В.А. Горбунов //Кузнечно-штамп. производ. – 1991. – № 9. – С. 27 - 28.
117. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

118. Мезенцев, А.Л. Основы расчёта мероприятий по экономии тепловой энергии и топлива / А.Л. Мезенцев. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 120 с.
119. Определение производительности нагревательных печей при проектировании теплотехнологического оборудования единичного и мелкосерийного кузнечного производства / Л.А.Бровкин, В.А Горбунов, Л.С. Крылова, Н.П. Воронко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – №12. – С. 23 - 24.
120. Горбунов, В.А. Метод ускоренной оптимизации при определении производительности нагревательных печей. Энергосбережение и экология в теплотехнологических системах: межвузовский: сб. науч. тр. / под ред. А.Н. Коротина. – Иваново: ИГЭУ, 1999. – 164 с., С. 30 - 35.
121. Справочник сталей и сплавов / под общ. ред. Сорокина В.Г. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
122. Горбунов, В.А., Крылова, Л.С. Учет температурных напряжений в начальной стадии нагрева металла при организации работы нагревательных печей в мелкосерийном и единичном производстве. Энергосбережение и экология в теплотехнологических системах: межвузовский: сб. науч. тр./ под ред. А.Н. Коротина. – Иваново: ИГЭУ, 1999. – 164 с., С. 3 - 9.
123. Горбунов, В.А. Повышение энергетической эффективности оборудования кузнечного цеха дис... канд. техн. наук : 05.14.14 / Горбунов Владимир Александрович – Саратов: СПИ, 1990, – 310 с.
124. Горбунов, В.А., Сенюшкин, С.А. Математическая модель кузнечно-штамповочного производства на основании решения задачи двухуровневой оптимизации. Вопросы теплообмена, энергосбережения и экологии в теплотехнических процессах: сб. науч. тр./ под ред. Н.П. Гусенковой. – Иваново: ИГЭУ, 2003. – 156 с., С. 110 - 113.

125. Горбунов, В.А. Использование математического моделирования теплотехнологических установок для организации кузнечного производства: тез. докл. межд. науч.-техн. конф. "VIII Бенардосовские чтения" 4 - 6 июня. /Ивановский государственный энергетический университет – Иваново: ИГЭУ, 2003., С. 224.
126. Горбунов, В.А., Сеньюшкин, С.А. Решение задач энергосбережения в кузнечно-прессовых цехах машиностроительного производства на основе математического моделирования процессов нагрева и организации производства: тез. докл. науч.-техн. конф. XII Туполевских чтения: Международная молодёжная научная конференция, 10-11 ноября 2004 года / Материалы конференции. Том 1. Казань: Изд-во Казан. гос техн. университет, 2004. – 260 с., С 196 -197.
127. Лисиенко, В.Г. Оптимальный нагрев металла в камерных печах с минимальным расходом газа / В.Г. Лисиенко, В.Б. Ковалевский, Хо Жуйтиюань //Изв.вузов. Чёрная металлургия. – 1994. – №12. – С. 40 - 43.
128. Программирование нагрева металла по расходу топлива с учётом технологических ограничений / Е.А. Капустин [и др.] //Изв.вузов. Чёрная металлургия. – 1980. – №7. – С. 114 -118.
129. Трубицын, Г.В. Численное решение задачи оптимального нагрева металла в камерных печах с минимальным расходом топлива / Г.В Трубицын, Г.В. Сотников //Изв.вузов. Чёрная металлургия. – 1983. – №12. – С. 103 - 107.
130. Девочкина, С.И. Управление нагревом металла в камерных печах периодического действия / С.И. Девочкина, Е.В. Захарова, Г.Г. Кузнецов // Изв.вузов. Чёрная металлургия. – 1989. – №6. – С. 124 - 126.
131. Математическое моделирование и структурная оптимизация сложных технологических систем измельчения

/ В.П. Жуков [и др.] //Теоретические основы химической технологии. – 1998. – том 32. – №3. – С. 288 - 293.

132. Задачи двумерной упаковки: развитие генетических алгоритмов на базе смешанных процедур локального поиска оптимального решения / А.С. Мухачёва [и др.] //Прил. к журналу Информационные технологии. – 2001. – №9. – 24 с.

133. Горбунов В.А., Оптимальный нагрев металла с минимальным расходом топлива в камерной печи на основе “наследственного” алгоритма / В.А. Горбунов // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 2005. – №1. – С.57 - 60.

Приложения  
Приложение 1

Аналитическое решение задачи нагрева металла при граничных  
условиях первого рода

$$\bar{T}(x, \tau) := \left\{ \begin{array}{l} T_{\text{O}} \leftarrow 273.15 \\ T_{\text{II}} \leftarrow 1273 \\ R \leftarrow 0.1 \\ a \leftarrow 0.809 \cdot 10^{-5} \\ \theta \leftarrow \sum_{n=1}^{70} \left[ (-1)^{n+1} \cdot \frac{2}{\left[ (2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2} \right]} \cdot \cos \left[ \frac{x}{R} \cdot (2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2} \right] \cdot \exp \left[ - \left[ (2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2} \right]^2 \cdot \left( \frac{a}{R^2} \tau \right) \right] \right] \\ T_{\text{II}} + (T_{\text{O}} - T_{\text{II}}) \cdot \theta \end{array} \right.$$

## Приложение 2

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,08$  м,  $\tau=1000$  с

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 15   | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 15                          | 1197 | 1194 | 1192 | 1191 | 1189 | 1189 | 1188 | 1187 | 1187 | 1186 | 1186 |
|                             | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |
| 18                          | 1206 | 1203 | 1201 | 1200 | 1199 | 1198 | 1198 | 1197 | 1197 | 1196 | 1196 |
|                             | 7    | 7    | 8    | 10   | 11   | 12   | 14   | 15   | 16   | 16   | 18   |
| 21                          | 1211 | 1209 | 1207 | 1206 | 1205 | 1204 | 1204 | 1203 | 1203 | 1202 | 1202 |
|                             | 7    | 8    | 10   | 11   | 13   | 15   | 15   | 17   | 18   | 20   | 21   |
| 24                          | 1215 | 1213 | 1211 | 1210 | 1209 | 1208 | 1208 | 1207 | 1207 | 1206 | 1206 |
|                             | 8    | 10   | 12   | 14   | 15   | 16   | 18   | 19   | 23   | 24   | 25   |
| 27                          | 1217 | 1215 | 1214 | 1212 | 1212 | 1211 | 1210 | 1210 | 1209 | 1209 | 1209 |
|                             | 10   | 12   | 14   | 15   | 17   | 19   | 21   | 22   | 24   | 25   | 27   |
| 30                          | 1219 | 1217 | 1215 | 1214 | 1213 | 1213 | 1212 | 1212 | 1211 | 1211 | 1210 |
|                             | 11   | 13   | 15   | 16   | 18   | 20   | 23   | 24   | 26   | 28   | 31   |
| 33                          | 1220 | 1218 | 1217 | 1216 | 1215 | 1214 | 1213 | 1213 | 1212 | 1212 | 1212 |
|                             | 12   | 14   | 16   | 18   | 21   | 23   | 24   | 27   | 29   | 32   | 34   |
| 36                          | 1221 | 1219 | 1218 | 1217 | 1216 | 1215 | 1214 | 1214 | 1213 | 1213 | 1213 |
|                             | 13   | 15   | 17   | 20   | 23   | 25   | 27   | 30   | 33   | 34   | 37   |
| 39                          | 1222 | 1220 | 1219 | 1217 | 1216 | 1216 | 1215 | 1215 | 1214 | 1214 | 1214 |
|                             | 14   | 16   | 19   | 23   | 24   | 27   | 30   | 33   | 34   | 38   | 40   |
| 42                          | 1223 | 1221 | 1219 | 1218 | 1217 | 1216 | 1216 | 1215 | 1215 | 1215 | 1214 |
|                             | 15   | 19   | 21   | 24   | 26   | 29   | 33   | 34   | 38   | 41   | 44   |
| 45                          | 1223 | 1221 | 1220 | 1218 | 1218 | 1217 | 1216 | 1216 | 1215 | 1215 | 1215 |
|                             | 15   | 19   | 22   | 25   | 28   | 32   | 34   | 37   | 41   | 44   | 46   |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,08$  м,  $\tau=1000$  с

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 15   | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 15                          | 1,6  | 1,9  | 2,1  | 2,1  | 2,3  | 2,3  | 2,4  | 2,5  | 2,5  | 2,5  | 2,5  |
| 18                          | 0,9  | 1,2  | 1,3  | 1,4  | 1,5  | 1,6  | 1,6  | 1,6  | 1,6  | 1,7  | 1,7  |
| 21                          | 0,49 | 0,66 | 0,82 | 0,9  | 0,99 | 1,1  | 1,1  | 1,2  | 1,2  | 1,2  | 1,2  |
| 24                          | 0,16 | 0,33 | 0,49 | 0,58 | 0,66 | 0,74 | 0,74 | 0,82 | 0,82 | 0,9  | 0,9  |
| 27                          | 0    | 0,16 | 0,25 | 0,41 | 0,41 | 0,49 | 0,58 | 0,58 | 0,66 | 0,66 | 0,66 |
| 30                          | 0,16 | 0    | 0,16 | 0,25 | 0,33 | 0,33 | 0,41 | 0,41 | 0,49 | 0,49 | 0,58 |
| 33                          | 0,25 | 0,08 | 0    | 0,08 | 0,16 | 0,25 | 0,33 | 0,33 | 0,41 | 0,41 | 0,41 |
| 36                          | 0,33 | 0,16 | 0,08 | 0    | 0,08 | 0,16 | 0,25 | 0,25 | 0,33 | 0,33 | 0,33 |
| 39                          | 0,41 | 0,25 | 0,16 | 0    | 0,08 | 0,08 | 0,16 | 0,16 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 42                          | 0,49 | 0,33 | 0,16 | 0,08 | 0    | 0,08 | 0,08 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,25 |
| 45                          | 0,49 | 0,33 | 0,25 | 0,08 | 0,08 | 0    | 0,08 | 0,08 | 0,16 | 0,16 | 0,16 |

$T_{аналит} = 1217$  K

### Приложение 3

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,1 \text{ м}, \tau=1000 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 15   | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 15                                | 1072 | 1067 | 1063 | 1061 | 1059 | 1057 | 1056 | 1055 | 1054 | 1053 | 1053 |
|                                   | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 12   | 13   | 14   |
| 18                                | 1087 | 1083 | 1080 | 1077 | 1075 | 1074 | 1072 | 1071 | 1071 | 1070 | 1069 |
|                                   | 6    | 6    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 15   | 15   | 17   |
| 21                                | 1097 | 1093 | 1090 | 1087 | 1085 | 1084 | 1083 | 1082 | 1081 | 1080 | 1080 |
|                                   | 6    | 8    | 9    | 10   | 12   | 13   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   |
| 24                                | 1104 | 1099 | 1096 | 1094 | 1092 | 1091 | 1089 | 1088 | 1088 | 1087 | 1086 |
|                                   | 7    | 9    | 10   | 12   | 14   | 15   | 16   | 17   | 19   | 21   | 23   |
| 27                                | 1108 | 1104 | 1101 | 1098 | 1096 | 1095 | 1094 | 1093 | 1092 | 1091 | 1091 |
|                                   | 9    | 10   | 12   | 14   | 15   | 17   | 18   | 20   | 22   | 24   | 25   |
| 30                                | 1111 | 1107 | 1104 | 1101 | 1100 | 1098 | 1097 | 1096 | 1095 | 1094 | 1094 |
|                                   | 10   | 11   | 14   | 15   | 17   | 18   | 20   | 22   | 24   | 25   | 28   |
| 33                                | 1113 | 1109 | 1106 | 1103 | 1102 | 1100 | 1099 | 1098 | 1097 | 1097 | 1096 |
|                                   | 11   | 13   | 15   | 17   | 18   | 20   | 23   | 24   | 27   | 28   | 31   |
| 36                                | 1115 | 1110 | 1107 | 1105 | 1103 | 1102 | 1101 | 1100 | 1099 | 1098 | 1098 |
|                                   | 12   | 14   | 16   | 18   | 21   | 23   | 25   | 27   | 29   | 31   | 34   |
| 39                                | 1116 | 1112 | 1109 | 1106 | 1104 | 1103 | 1102 | 1101 | 1100 | 1099 | 1099 |
|                                   | 13   | 15   | 17   | 20   | 22   | 24   | 26   | 29   | 31   | 34   | 35   |
| 42                                | 1117 | 1112 | 1109 | 1107 | 1105 | 1104 | 1103 | 1102 | 1101 | 1100 | 1100 |
|                                   | 14   | 16   | 18   | 21   | 24   | 26   | 29   | 32   | 34   | 36   | 39   |
| 45                                | 1117 | 1113 | 1110 | 1108 | 1106 | 1105 | 1104 | 1103 | 1102 | 1101 | 1101 |
|                                   | 15   | 17   | 20   | 23   | 25   | 28   | 31   | 34   | 37   | 39   | 42   |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,1 \text{ м}, \tau=1000 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 15   | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 15                                | 2,5  | 3    | 3,4  | 3,5  | 3,7  | 3,9  | 4    | 4,1  | 4,2  | 4,3  | 4,3  |
| 18                                | 1,2  | 1,5  | 1,8  | 2,1  | 2,3  | 2,4  | 2,5  | 2,6  | 2,6  | 2,7  | 2,8  |
| 21                                | 0,27 | 0,6  | 0,9  | 1,2  | 1,4  | 1,45 | 1,54 | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,8  |
| 24                                | 0,36 | 0,09 | 0,36 | 0,54 | 0,73 | 0,82 | 1    | 1,1  | 1,1  | 1,2  | 1,3  |
| 27                                | 0,73 | 0,36 | 0,09 | 0,18 | 0,36 | 0,45 | 0,55 | 0,64 | 0,73 | 0,82 | 0,82 |
| 30                                | 1    | 0,64 | 0,36 | 0,09 | 0    | 0,18 | 0,27 | 0,36 | 0,45 | 0,55 | 0,55 |
| 33                                | 1,2  | 0,82 | 0,55 | 0,27 | 0,18 | 0    | 0,09 | 0,18 | 0,27 | 0,27 | 0,36 |
| 36                                | 1,4  | 0,9  | 0,64 | 0,45 | 0,27 | 0,18 | 0,09 | 0    | 0,09 | 0,18 | 0,18 |
| 39                                | 1,45 | 1,1  | 0,82 | 0,55 | 0,36 | 0,27 | 0,18 | 0,09 | 0    | 0,09 | 0,09 |
| 42                                | 1,55 | 1,1  | 0,82 | 0,64 | 0,45 | 0,36 | 0,27 | 0,18 | 0,09 | 0    | 0    |
| 45                                | 1,55 | 1,2  | 0,9  | 0,73 | 0,55 | 0,45 | 0,36 | 0,27 | 0,18 | 0,09 | 0,09 |

$T_{\text{аналит}}=1100 \text{ К.}$

## Приложение 4

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,2 \text{ м}, \tau=1000 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 15    | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 15                                | 492,5 | 487,1 | 483,4 | 480,7 | 478,7 | 477,1 | 475,8 | 474,8 | 473,9 | 473,2 | 472,5 |
|                                   | 5     | 6     | 6     | 8     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    |
| 18                                | 507,4 | 501,8 | 498   | 495,2 | 493,1 | 491,5 | 490,2 | 489,1 | 188,2 | 487,4 | 486,8 |
|                                   | 5     | 6     | 8     | 9     | 10    | 11    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    |
| 21                                | 516,9 | 511,2 | 507,4 | 504,6 | 502,4 | 500,8 | 499,4 | 498,3 | 497,4 | 496,6 | 495,9 |
|                                   | 6     | 8     | 9     | 11    | 12    | 13    | 15    | 15    | 17    | 18    | 20    |
| 24                                | 523   | 517,3 | 513,4 | 510,6 | 508,4 | 506,7 | 505,4 | 504,2 | 503,3 | 502,5 | 501,8 |
|                                   | 8     | 9     | 11    | 12    | 14    | 15    | 16    | 18    | 20    | 22    | 23    |
| 27                                | 527   | 521,3 | 517,3 | 514,5 | 512,3 | 510,6 | 509,2 | 508,1 | 507,2 | 506,4 | 505,7 |
|                                   | 9     | 11    | 12    | 14    | 15    | 17    | 19    | 20    | 23    | 24    | 25    |
| 30                                | 529,6 | 523,9 | 519,9 | 517   | 514,9 | 513,1 | 511,8 | 510,6 | 509,7 | 508,9 | 508,2 |
|                                   | 10    | 12    | 14    | 16    | 18    | 21    | 23    | 24    | 26    | 28    | 31    |
| 33                                | 531,3 | 525,6 | 521,6 | 518,7 | 516,5 | 514,8 | 513,4 | 512,3 | 511,3 | 510,5 | 509,8 |
|                                   | 12    | 14    | 16    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 30    | 32    | 34    |
| 36                                | 532,5 | 526,7 | 522,7 | 519,8 | 517,7 | 515,9 | 514,5 | 513,4 | 512,4 | 511,6 | 510,9 |
|                                   | 13    | 15    | 18    | 20    | 23    | 26    | 27    | 29    | 34    | 36    | 38    |
| 39                                | 533,3 | 527,5 | 523,5 | 520,6 | 518,4 | 516,7 | 515,3 | 514,1 | 513,2 | 512,4 | 511,7 |
|                                   | 15    | 17    | 20    | 23    | 24    | 26    | 29    | 32    | 35    | 37    | 39    |
| 42                                | 533,8 | 528   | 524   | 521,1 | 518,9 | 517,2 | 515,8 | 514,6 | 513,7 | 512,9 | 512,2 |
|                                   | 15    | 17    | 20    | 24    | 26    | 29    | 32    | 34    | 37    | 40    | 43    |
| 45                                | 534,2 | 528,4 | 524,4 | 521,5 | 519,3 | 517,5 | 516,1 | 515   | 514   | 513,2 | 512,5 |
|                                   | 16    | 19    | 22    | 25    | 28    | 31    | 34    | 36    | 40    | 43    | 46    |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,2 \text{ м}, \tau=1000 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 15  | 18   | 21  | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   |
|-----------------------------------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 15                                | 2,4 | 3,5  | 4,3 | 4,8  | 5,2  | 5,5  | 5,8  | 6,0  | 6,1  | 6,3  | 6,4  |
| 18                                | 0,5 | 0,61 | 1,4 | 1,9  | 2,3  | 2,6  | 2,9  | 3,1  | 3,3  | 3,5  | 3,6  |
| 21                                | 2,4 | 1,3  | 0,5 | 0,05 | 0,49 | 0,8  | 1,1  | 1,3  | 1,5  | 1,6  | 1,8  |
| 24                                | 3,6 | 2,5  | 1,7 | 1,1  | 0,7  | 0,36 | 0,11 | 0,13 | 0,31 | 0,47 | 0,61 |
| 27                                | 4,4 | 3,3  | 2,5 | 1,9  | 1,5  | 1,1  | 0,86 | 0,64 | 0,46 | 0,3  | 0,17 |
| 30                                | 4,9 | 3,8  | 3,0 | 2,4  | 2,0  | 1,6  | 1,4  | 1,1  | 0,96 | 0,8  | 0,66 |
| 33                                | 5,2 | 4,1  | 3,3 | 2,7  | 2,3  | 2,0  | 1,7  | 1,5  | 1,3  | 1,1  | 0,98 |
| 36                                | 5,5 | 4,3  | 3,5 | 3,0  | 2,5  | 2,2  | 1,9  | 1,7  | 1,5  | 1,3  | 1,2  |
| 39                                | 5,6 | 4,5  | 3,7 | 3,1  | 2,7  | 2,3  | 2,1  | 1,8  | 1,7  | 1,5  | 1,4  |
| 42                                | 5,7 | 4,6  | 3,8 | 3,2  | 2,8  | 2,4  | 2,2  | 1,9  | 1,8  | 1,6  | 1,5  |
| 45                                | 5,8 | 4,7  | 3,9 | 3,3  | 2,9  | 2,5  | 2,2  | 2,0  | 1,8  | 1,7  | 1,5  |

$T_{\text{аналит}}=504,864 \text{ K}$

## Приложение 5

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,25$  м,  $\tau=1000$  с

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18          | 21          | 24          | 27          | 30          | 33          | 36          | 39          | 42          | 45          | 48          |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 18                          | 374,1<br>7  | 371,4<br>8  | 369,5<br>10 | 368,1<br>11 | 367<br>12   | 366,1<br>14 | 365,4<br>15 | 364,8<br>15 | 364,3<br>17 | 363,9<br>18 | 363,5<br>20 |
| 21                          | 379,8<br>9  | 377,1<br>10 | 375,1<br>12 | 373,7<br>13 | 372,5<br>15 | 371,6<br>15 | 370,9<br>17 | 370,3<br>18 | 369,8<br>20 | 369,3<br>21 | 368,9<br>23 |
| 24                          | 383,5<br>10 | 380,7<br>12 | 378,7<br>13 | 377,2<br>15 | 376,1<br>17 | 375,2<br>19 | 374,4<br>19 | 373,8<br>21 | 373,3<br>23 | 372,8<br>24 | 372,4<br>26 |
| 27                          | 385,9<br>12 | 383,1<br>13 | 381<br>15   | 379,5<br>16 | 378,4<br>18 | 377,4<br>21 | 376,7<br>23 | 376<br>24   | 375,5<br>25 | 375<br>27   | 374,6<br>29 |
| 30                          | 387,4<br>13 | 384,6<br>15 | 382,5<br>16 | 381<br>19   | 379,8<br>21 | 378,9<br>23 | 378,1<br>25 | 377,4<br>26 | 376,9<br>29 | 376,4<br>31 | 376<br>33   |
| 33                          | 388,4<br>14 | 385,5<br>15 | 383,4<br>18 | 381,9<br>21 | 380,7<br>23 | 379,8<br>24 | 379<br>27   | 378,3<br>29 | 377,8<br>31 | 377,3<br>34 | 376,9<br>35 |
| 36                          | 389<br>15   | 386,1<br>18 | 384<br>20   | 382,5<br>22 | 381,3<br>24 | 380,3<br>27 | 379,5<br>30 | 378,9<br>32 | 378,3<br>34 | 377,9<br>36 | 377,5<br>39 |
| 39                          | 389,3<br>17 | 386,4<br>19 | 384,4<br>22 | 382,8<br>24 | 381,6<br>27 | 380,7<br>29 | 379,9<br>31 | 379,2<br>34 | 378,7<br>37 | 378,2<br>40 | 377,8<br>43 |
| 42                          | 389,5<br>18 | 386,6<br>20 | 384,6<br>24 | 383<br>27   | 381,8<br>29 | 380,9<br>32 | 380,1<br>35 | 379,4<br>37 | 378,9<br>40 | 378,4<br>44 | 378<br>45   |
| 45                          | 389,7<br>20 | 386,8<br>23 | 384,7<br>25 | 383,1<br>28 | 381,9<br>31 | 381<br>34   | 380,2<br>37 | 379,5<br>42 | 379<br>44   | 378,5<br>46 | 378,1<br>49 |
| 48                          | 389,7<br>21 | 386,8<br>24 | 384,8<br>27 | 383,2<br>31 | 382<br>34   | 381<br>37   | 380,2<br>41 | 379,6<br>44 | 379<br>46   | 378,6<br>50 | 378,2<br>53 |

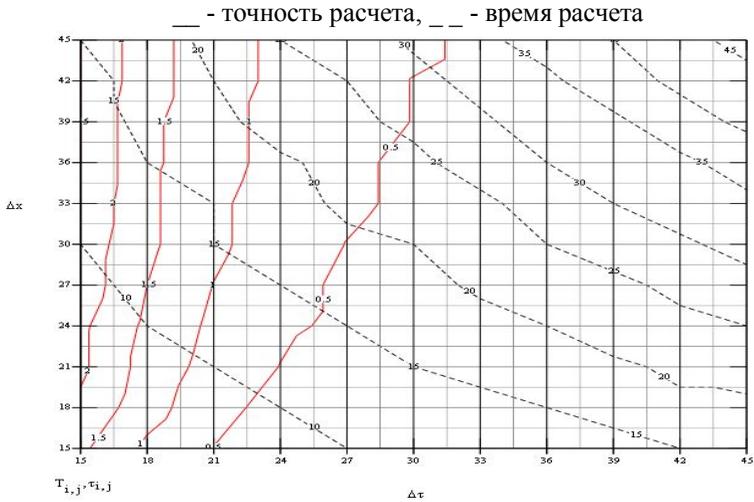
Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,25$  м,  $\tau=1000$  с

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18  | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|-----------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                          | 0,6 | 0,13 | 0,64 | 1,01 | 1,3  | 1,6  | 1,7  | 1,9  | 2,0  | 2,1  | 2,3  |
| 21                          | 2,1 | 1,4  | 0,87 | 0,49 | 0,17 | 0,07 | 0,26 | 0,42 | 0,56 | 0,69 | 0,8  |
| 24                          | 3,1 | 2,4  | 1,8  | 1,4  | 1,1  | 0,9  | 0,68 | 0,52 | 0,38 | 0,25 | 0,14 |
| 27                          | 3,8 | 3,0  | 2,5  | 2,1  | 1,8  | 1,5  | 1,3  | 1,1  | 0,98 | 0,84 | 0,73 |
| 30                          | 4,2 | 3,4  | 2,9  | 2,5  | 2,1  | 1,9  | 1,7  | 1,5  | 1,4  | 1,2  | 1,1  |
| 33                          | 4,4 | 3,7  | 3,1  | 2,7  | 2,4  | 2,1  | 1,9  | 1,7  | 1,6  | 1,5  | 1,4  |
| 36                          | 4,6 | 3,8  | 3,3  | 2,9  | 2,5  | 2,3  | 2,1  | 1,9  | 1,7  | 1,6  | 1,5  |
| 39                          | 4,7 | 3,9  | 3,4  | 2,9  | 2,6  | 2,4  | 2,2  | 2,0  | 1,8  | 1,7  | 1,6  |
| 42                          | 4,7 | 4,0  | 3,4  | 3,0  | 2,7  | 2,4  | 2,2  | 2,0  | 1,9  | 1,8  | 1,6  |
| 45                          | 4,8 | 4,0  | 3,4  | 3,0  | 2,7  | 2,5  | 2,2  | 2,1  | 1,9  | 1,8  | 1,7  |
| 48                          | 4,8 | 4,0  | 3,5  | 3,0  | 2,7  | 2,5  | 2,2  | 2,1  | 1,9  | 1,8  | 1,7  |

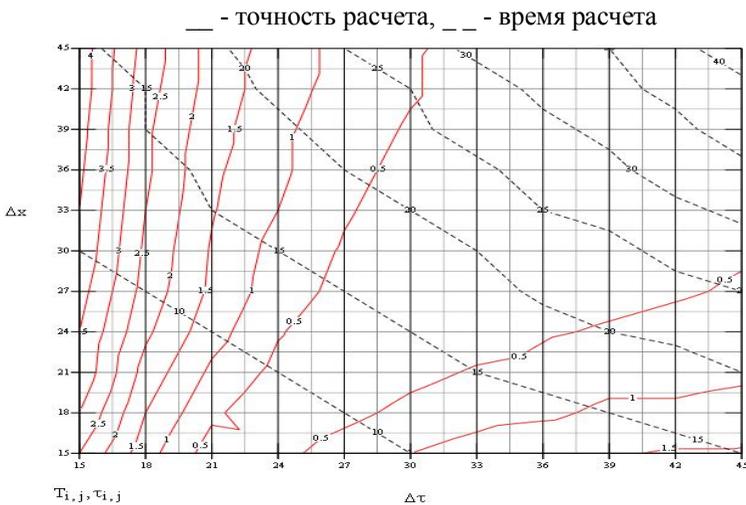
$T_{аналит} = 371,871$  K

## Приложение 6

Номограмма для определения точности расчета нагрева пластины металла в течение 1000 секунд при граничных условиях первого рода,  
 $R=0,08$  м:



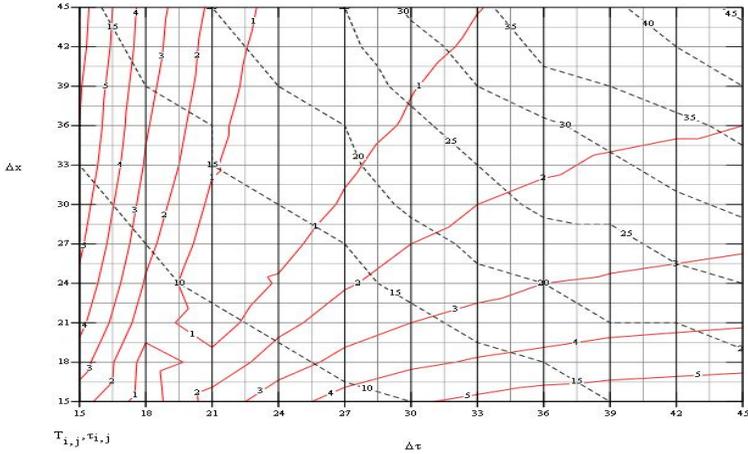
Номограмма для определения точности расчета нагрева пластины металла в течение 1000 секунд при граничных условиях первого рода,  
 $R=0,1$  м:



## Приложение 7

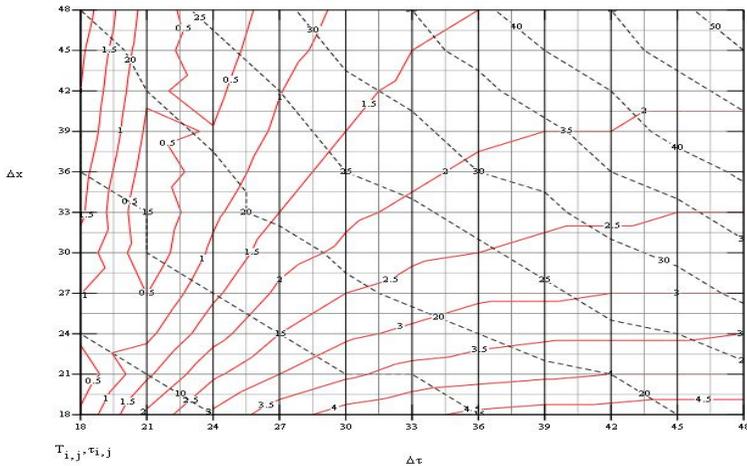
Номограмма для определения точности расчета нагрева пластины металла в течение 1000 секунд при граничных условиях первого рода,  $R=0,2$  м:

\_\_\_ - точность расчета, \_\_\_ - время расчета



Номограмма для определения точности расчета нагрева пластины металла в течение 1000 секунд при граничных условиях первого рода,  $R=0,25$  м:

\_\_\_ - точность расчета, \_\_\_ - время расчета



## Приложение 8

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,08$  м,  $\tau=250$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20          | 70          | 120          | 170           | 220           | 270           | 320             | 370           | 420           |
|-----------------------------------|-------------|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| 20                                | 707,4<br>6  | 688,8<br>31 | 685,8<br>54  | 684,6<br>76   | 683,9<br>99   | 683,5<br>120  | 683,2683<br>137 | 683<br>159    | 682,9<br>181  |
| 70                                | 713,4<br>6  | 694,5<br>25 | 691,6<br>178 | 690,3<br>255  | 689,7<br>331  | 689,2<br>407  | 688,9<br>495    | 688,7<br>560  | 688,6<br>637  |
| 120                               | 714,3<br>7  | 695,5<br>27 | 692,6<br>305 | 691,3<br>436  | 690,6<br>566  | 690,2<br>701  | 689,9<br>827    | 689,7<br>961  | 689,6<br>1090 |
| 170                               | 714,6<br>7  | 695,9<br>29 | 693<br>367   | 691,7<br>607  | 691,1<br>793  | 690,6<br>995  | 690,3<br>1177   | 690,1<br>1340 | 690<br>1524   |
| 220                               | 714,8<br>8  | 696,1<br>34 | 693,2<br>206 | 692<br>783    | 691,3<br>996  | 690,8<br>1225 | 690,6<br>1450   | 690,3<br>1684 | 690,2<br>1908 |
| 270                               | 714,8<br>9  | 696,2<br>35 | 693,3<br>74  | 692,1<br>965  | 691,4<br>1221 | 691<br>1575   | 690,7<br>1792   | 690,5<br>2075 | 690,3<br>2354 |
| 320                               | 714,8<br>10 | 696,3<br>38 | 693,3<br>78  | 692,2<br>1148 | 691,5<br>1497 | 691,1<br>1791 | 690,8<br>2182   | 690,6<br>2458 | 690,4<br>2763 |
| 370                               | 714,7<br>10 | 696,3<br>38 | 693,4<br>71  | 692,3<br>1295 | 691,6<br>1677 | 691,2<br>2108 | 690,9<br>2437   | 690,7<br>2812 | 690,5<br>3195 |
| 420                               | 714,9<br>10 | 696,3<br>40 | 693,4<br>72  | 692,3<br>1456 | 691,6<br>1904 | 691,2<br>2327 | 690,9<br>2776   | 690,7<br>3215 | 690,5<br>3600 |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,08$  м,  $\tau=250$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20  | 70  | 120 | 170  | 220  | 270  | 320  | 370  | 420  |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| 20                                | 2,6 | 0,1 | 0,6 | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 0,9  | 1,0  | 1,0  |
| 70                                | 3,4 | 0,7 | 0,3 | 0,09 | 0,01 | 0,07 | 0,1  | 0,1  | 0,2  |
| 120                               | 3,6 | 0,8 | 0,4 | 0,2  | 0,1  | 0,08 | 0,04 | 0,01 | 0,01 |
| 170                               | 3,6 | 0,9 | 0,5 | 0,3  | 0,2  | 0,1  | 0,09 | 0,06 | 0,05 |
| 220                               | 3,6 | 0,9 | 0,5 | 0,3  | 0,2  | 0,2  | 0,1  | 0,09 | 0,08 |
| 270                               | 3,6 | 0,9 | 0,5 | 0,4  | 0,3  | 0,2  | 0,2  | 0,1  | 0,09 |
| 320                               | 3,6 | 1,0 | 0,5 | 0,4  | 0,3  | 0,2  | 0,2  | 0,1  | 0,1  |
| 370                               | 3,6 | 1,0 | 0,5 | 0,4  | 0,3  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,1  |
| 420                               | 3,7 | 1,0 | 0,5 | 0,4  | 0,3  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,1  |

$T_{\text{аналит}}=689,654$  K

## Приложение 9

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,1 \text{ м}$ ,  $\tau=250 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20    | 70    | 120   | 170   | 220   | 270   | 320   | 370   | 420   |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20                                | 524,4 | 508,7 | 506,3 | 505,3 | 504,8 | 504,4 | 504,2 | 504   | 503,9 |
|                                   | 6     | 24    | 49    | 69    | 91    | 111   | 133   | 154   | 186   |
| 70                                | 526,3 | 510,3 | 507,8 | 506,8 | 506,3 | 505,9 | 505,7 | 505,5 | 505,4 |
|                                   | 6     | 26    | 173   | 247   | 320   | 393   | 468   | 543   | 619   |
| 120                               | 526,5 | 510,5 | 508,1 | 507,1 | 506,6 | 506,2 | 506   | 505,8 | 505,7 |
|                                   | 6     | 27    | 164   | 426   | 554   | 674   | 806   | 938   | 1063  |
| 170                               | 526,6 | 510,6 | 508,2 | 507,2 | 506,7 | 506,3 | 506,1 | 505,9 | 505,8 |
|                                   | 7     | 30    | 59    | 596   | 954   | 947   | 1127  | 1301  | 1477  |
| 220                               | 526,6 | 510,7 | 508,3 | 507,3 | 506,8 | 506,4 | 506,2 | 506   | 505,9 |
|                                   | 8     | 31    | 60    | 761   | 996   | 1226  | 1447  | 1676  | 1921  |
| 270                               | 526,5 | 510,7 | 508,3 | 507,3 | 506,8 | 506,4 | 506,2 | 506   | 505,9 |
|                                   | 8     | 34    | 60    | 941   | 1273  | 1490  | 1765  | 2042  | 2334  |
| 320                               | 526,4 | 510,7 | 508,3 | 507,4 | 506,8 | 506,5 | 506,2 | 506,1 | 505,9 |
|                                   | 9     | 35    | 67    | 1109  | 1444  | 1775  | 2104  | 2445  | 2773  |
| 370                               | 526,4 | 510,7 | 508,3 | 507,4 | 506,8 | 506,5 | 506,3 | 506,1 | 506   |
|                                   | 11    | 43    | 76    | 1230  | 1752  | 2129  | 2515  | 2917  | 3336  |
| 420                               | 526,5 | 510,7 | 508,3 | 507,4 | 506,9 | 506,5 | 506,3 | 506,1 | 506   |
|                                   | 11    | 40    | 82    | 881   | 1931  | 2435  | 2884  | 3334  | 3660  |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,1 \text{ м}$ ,  $\tau=250 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20  | 70  | 120 | 170  | 220  | 270  | 320 | 370 | 420 |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|
| 20                                | 3,9 | 0,8 | 0,3 | 0,09 | 0,01 | 0,09 | 0,1 | 0,2 | 0,2 |
| 70                                | 4,2 | 1,1 | 0,6 | 0,4  | 0,3  | 0,2  | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| 120                               | 4,3 | 1,1 | 0,6 | 0,4  | 0,3  | 0,3  | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 170                               | 4,3 | 1,1 | 0,7 | 0,5  | 0,4  | 0,3  | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 220                               | 4,3 | 1,2 | 0,7 | 0,5  | 0,4  | 0,3  | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 270                               | 4,3 | 1,2 | 0,7 | 0,5  | 0,4  | 0,3  | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 320                               | 4,3 | 1,2 | 0,7 | 0,5  | 0,4  | 0,3  | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 370                               | 4,3 | 1,2 | 0,7 | 0,5  | 0,4  | 0,3  | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 420                               | 4,3 | 1,2 | 0,7 | 0,5  | 0,4  | 0,3  | 0,3 | 0,2 | 0,2 |

$T_{\text{аналит}}=504,864 \text{ K}$

## Приложение 10

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,2 \text{ м}$ ,  $\tau=250 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20    | 70    | 120   | 170   | 220   | 270   | 320   | 370   | 420   |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20                                | 280   | 278,3 | 278,1 | 278   | 278   | 278   | 278   | 278   | 278   |
|                                   | 6     | 23    | 50    | 71    | 93    | 115   | 137   | 158   | 179   |
| 70                                | 278,7 | 277,2 | 277   | 277   | 276,9 | 276,9 | 276,9 | 276,9 | 276,9 |
|                                   | 6     | 24    | 45    | 235   | 328   | 405   | 480   | 559   | 635   |
| 120                               | 278,5 | 277   | 276,8 | 276,8 | 276,8 | 276,7 | 276,7 | 276,7 | 276,7 |
|                                   | 6     | 26    | 48    | 82    | 544   | 707   | 829   | 963   | 1094  |
| 170                               | 278,4 | 276,9 | 276,8 | 276,7 | 276,7 | 276,7 | 276,6 | 276,6 | 276,6 |
|                                   | 7     | 29    | 54    | 80    | 690   | 930   | 1116  | 1295  | 1466  |
| 220                               | 278,4 | 276,9 | 276,7 | 276,7 | 276,6 | 276,6 | 276,6 | 276,6 | 276,6 |
|                                   | 7     | 30    | 54    | 81    | 736   | 1188  | 1438  | 1681  | 1877  |
| 270                               | 278,3 | 276,9 | 276,7 | 276,6 | 276,6 | 276,6 | 276,6 | 276,6 | 276,6 |
|                                   | 9     | 34    | 63    | 97    | 287   | 1414  | 1730  | 2108  | 2345  |
| 320                               | 278,3 | 276,8 | 276,7 | 276,6 | 276,6 | 276,6 | 276,6 | 276,6 | 276,5 |
|                                   | 9     | 34    | 63    | 90    | 127   | 1597  | 2049  | 2437  | 2778  |
| 370                               | 278,3 | 276,8 | 276,7 | 276,6 | 276,6 | 276,6 | 276,5 | 276,5 | 276,5 |
|                                   | 11    | 40    | 73    | 105   | 143   | 1773  | 2465  | 2910  | 3314  |
| 420                               | 278,3 | 276,8 | 276,7 | 276,6 | 276,6 | 276,6 | 276,5 | 276,5 | 276,5 |
|                                   | 10    | 39    | 73    | 106   | 144   | 1970  | 2675  | 3219  | 3660  |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,2 \text{ м}$ ,  $\tau=250 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20  | 70  | 120  | 170  | 220  | 270  | 320  | 370  | 420  |
|-----------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 20                                | 1,3 | 0,7 | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  |
| 70                                | 0,8 | 0,3 | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  |
| 120                               | 0,7 | 0,2 | 0,1  | 0,1  | 0,1  | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 170                               | 0,7 | 0,2 | 0,1  | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 220                               | 0,7 | 0,2 | 0,08 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 270                               | 0,7 | 0,2 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 320                               | 0,7 | 0,1 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,01 |
| 370                               | 0,7 | 0,1 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 420                               | 0,7 | 0,1 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

$$T_{\text{аналит}} = 276,475 \text{ K}$$

## Приложение 11

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,25$  м,  $\tau=250$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20    | 70    | 120   | 170   | 220   | 270   | 320   | 370   | 420   |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20                                | 273,8 | 273,5 | 273,5 | 273,5 | 273,4 | 273,4 | 273,4 | 273,4 | 273,4 |
|                                   | 6     | 25    | 51    | 79    | 98    | 119   | 136   | 156   | 180   |
| 70                                | 273,5 | 273,3 | 273,3 | 273,3 | 273,3 | 273,3 | 273,3 | 273,2 | 273,2 |
|                                   | 6     | 27    | 44    | 80    | 311   | 403   | 476   | 551   | 624   |
| 120                               | 273,5 | 273,3 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 |
|                                   | 6     | 27    | 52    | 70    | 392   | 670   | 823   | 953   | 1073  |
| 170                               | 273,5 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 |
|                                   | 7     | 28    | 54    | 77    | 164   | 816   | 1144  | 1380  | 1553  |
| 220                               | 273,4 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 |
|                                   | 7     | 30    | 55    | 79    | 109   | 1027  | 1382  | 1632  | 1903  |
| 270                               | 273,4 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 |
|                                   | 8     | 32    | 61    | 87    | 118   | 1054  | 1616  | 2075  | 2318  |
| 320                               | 273,4 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 |
|                                   | 8     | 33    | 61    | 89    | 120   | 582   | 1833  | 2383  | 2739  |
| 370                               | 273,4 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 |
|                                   | 9     | 35    | 64    | 94    | 132   | 175   | 2070  | 2673  | 3135  |
| 420                               | 273,4 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 | 273,2 |
|                                   | 10    | 41    | 71    | 110   | 141   | 177   | 2138  | 3009  | 3600  |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,25$  м,  $\tau=250$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20   | 70   | 120  | 170  | 220  | 270  | 320  | 370  | 420  |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20                                | 0,2  | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| 70                                | 0,07 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,04 |
| 120                               | 0,07 | 0,01 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 170                               | 0,07 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 220                               | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 270                               | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 320                               | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 370                               | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 420                               | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |

$T_{\text{аналит}}=273,319$  K

## Приложение 12

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,08$  м,  $\tau=500$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20         | 70          | 120         | 170          | 220          | 270          | 320          | 370          | 420          |
|-----------------------------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 20                                | 1012<br>8  | 995,1<br>29 | 992,4<br>49 | 991,3<br>69  | 990,7<br>90  | 990,3<br>110 | 990<br>131   | 989,8<br>151 | 989,7<br>172 |
| 70                                | 1024<br>11 | 1007<br>66  | 1005<br>173 | 1003<br>245  | 1003<br>318  | 1002<br>389  | 1002<br>462  | 1002<br>538  | 1002<br>609  |
| 120                               | 1025<br>12 | 1009<br>48  | 1006<br>299 | 1005<br>432  | 1005<br>547  | 1004<br>670  | 1004<br>798  | 1004<br>928  | 1004<br>1071 |
| 170                               | 1026<br>14 | 1010<br>53  | 1007<br>447 | 1006<br>596  | 1006<br>774  | 1005<br>944  | 1005<br>1123 | 1005<br>1335 | 1005<br>1468 |
| 220                               | 1026<br>14 | 1010<br>54  | 1008<br>376 | 1007<br>775  | 1006<br>998  | 1006<br>1262 | 1005<br>1462 | 1005<br>1727 | 1005<br>1913 |
| 270                               | 1027<br>14 | 1011<br>55  | 1008<br>665 | 1007<br>948  | 1006<br>1361 | 1006<br>1595 | 1006<br>1835 | 1005<br>2104 | 1005<br>2357 |
| 320                               | 1027<br>14 | 1011<br>58  | 1008<br>769 | 1007<br>1117 | 1006<br>1448 | 1006<br>1773 | 1006<br>2109 | 1006<br>2467 | 1005<br>2792 |
| 370                               | 1027<br>15 | 1011<br>58  | 1008<br>801 | 1007<br>1297 | 1006<br>1714 | 1006<br>2048 | 1006<br>2545 | 1006<br>2881 | 1006<br>3214 |
| 420                               | 1027<br>15 | 1011<br>58  | 1008<br>803 | 1007<br>1483 | 1007<br>2063 | 1006<br>2323 | 1006<br>2797 | 1006<br>3236 | 1006<br>3600 |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,08$  м,  $\tau=500$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20  | 70  | 120 | 170 | 220 | 270 | 320 | 370 | 420 |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 20                                | 0,7 | 1,0 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| 70                                | 1,9 | 0,2 | 0   | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 120                               | 2,0 | 0,4 | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 170                               | 2,1 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 220                               | 2,1 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0   | 0   | 0   |
| 270                               | 2,2 | 0,6 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0   | 0   |
| 320                               | 2,2 | 0,6 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0   |
| 370                               | 2,2 | 0,6 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 420                               | 2,2 | 0,6 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |

$$T_{\text{аналит}}=1005 \text{ K}$$

## Приложение 13

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,1 \text{ м}$ ,  $\tau=500 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20    | 70    | 120   | 170   | 220   | 270   | 320   | 370   | 420   |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20                                | 817,9 | 799   | 795,9 | 794,7 | 794   | 793,6 | 793,3 | 793,1 | 792,9 |
|                                   | 9     | 32    | 54    | 72    | 94    | 115   | 136   | 156   | 178   |
| 70                                | 827,1 | 808,1 | 805   | 803,7 | 803,1 | 802,6 | 802,3 | 802,1 | 801,9 |
|                                   | 13    | 50    | 182   | 255   | 330   | 405   | 482   | 554   | 633   |
| 120                               | 828,4 | 809,4 | 806,4 | 805,1 | 804,4 | 804   | 803,7 | 803,5 | 803,3 |
|                                   | 13    | 53    | 312   | 441   | 568   | 695   | 824   | 954   | 1084  |
| 170                               | 828,8 | 809,9 | 807   | 805,7 | 805   | 804,5 | 804,3 | 804   | 803,9 |
|                                   | 14    | 59    | 458   | 617   | 794   | 976   | 1156  | 1333  | 1514  |
| 220                               | 829   | 810,2 | 807,3 | 806   | 805,3 | 804,9 | 804,6 | 804,3 | 804,2 |
|                                   | 14    | 59    | 494   | 799   | 1030  | 1269  | 1494  | 1738  | 1962  |
| 270                               | 829,1 | 810,3 | 807,5 | 806,2 | 805,5 | 805,1 | 804,8 | 804,5 | 804,4 |
|                                   | 14    | 59    | 361   | 982   | 1272  | 1562  | 1849  | 2125  | 2423  |
| 320                               | 829,1 | 810,5 | 807,6 | 806,3 | 805,6 | 805,2 | 804,9 | 804,7 | 804,5 |
|                                   | 15    | 59    | 133   | 1164  | 1511  | 1896  | 2192  | 2524  | 2913  |
| 370                               | 829,1 | 810,5 | 807,6 | 806,4 | 805,7 | 805,3 | 805   | 804,8 | 804,6 |
|                                   | 15    | 63    | 115   | 1312  | 1714  | 2104  | 2485  | 2875  | 3286  |
| 420                               | 829,1 | 810,6 | 807,6 | 806,5 | 805,8 | 805,4 | 805,1 | 804,8 | 804,7 |
|                                   | 15    | 63    | 116   | 1510  | 1958  | 2398  | 2850  | 3299  | 3780  |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,1 \text{ м}$ ,  $\tau=500 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20  | 70  | 120 | 170   | 220  | 270  | 320  | 370  | 420  |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-------|------|------|------|------|------|
| 20                                | 1,8 | 0,6 | 1,0 | 1,1   | 1,2  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,4  |
| 70                                | 2,9 | 0,5 | 0,1 | 0,001 | 0,1  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  |
| 120                               | 3,1 | 0,7 | 0,3 | 0,2   | 0,07 | 0,02 | 0,01 | 0,04 | 0,06 |
| 170                               | 3,1 | 0,8 | 0,4 | 0,2   | 0,1  | 0,08 | 0,06 | 0,02 | 0,01 |
| 220                               | 3,1 | 0,8 | 0,4 | 0,3   | 0,2  | 0,1  | 0,1  | 0,06 | 0,05 |
| 270                               | 3,1 | 0,8 | 0,4 | 0,3   | 0,2  | 0,2  | 0,1  | 0,08 | 0,07 |
| 320                               | 3,1 | 0,8 | 0,5 | 0,3   | 0,2  | 0,2  | 0,1  | 0,1  | 0,08 |
| 370                               | 3,1 | 0,8 | 0,5 | 0,3   | 0,2  | 0,2  | 0,1  | 0,1  | 0,1  |
| 420                               | 3,1 | 0,8 | 0,5 | 0,3   | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,1  | 0,1  |

$T_{\text{аналит}}=803,817 \text{ K}$

## Приложение 14

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,2 \text{ м}$ ,  $\tau=500 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                   | 20    | 70    | 120   | 170   | 220   | 270   | 320   | 370   | 420   |
| 20                                | 338,9 | 331,1 | 330   | 329,6 | 329,4 | 329,2 | 329,1 | 329   | 329   |
|                                   | 8     | 30    | 51    | 71    | 93    | 113   | 135   | 154   | 176   |
| 70                                | 337,1 | 329,2 | 328,1 | 327,7 | 327,4 | 327,3 | 327,2 | 327,1 | 327,1 |
|                                   | 13    | 50    | 96    | 250   | 323   | 399   | 469   | 542   | 624   |
| 120                               | 336,6 | 328,8 | 327,7 | 327,3 | 327   | 326,9 | 326,8 | 326,7 | 326,7 |
|                                   | 13    | 50    | 91    | 422   | 560   | 683   | 809   | 935   | 1064  |
| 170                               | 336,4 | 328,6 | 327,5 | 327,1 | 326,9 | 326,7 | 326,6 | 326,5 | 326,5 |
|                                   | 13    | 53    | 91    | 553   | 803   | 972   | 1214  | 1343  | 1516  |
| 220                               | 336,2 | 328,5 | 327,4 | 327   | 326,8 | 326,6 | 326,5 | 326,4 | 326,4 |
|                                   | 13    | 54    | 94    | 254   | 1014  | 1276  | 1518  | 1749  | 2058  |
| 270                               | 336,1 | 328,4 | 327,3 | 326,9 | 326,7 | 326,6 | 326,5 | 326,4 | 326,3 |
|                                   | 14    | 56    | 102   | 154   | 1278  | 1551  | 1858  | 2122  | 2420  |
| 320                               | 336   | 328,3 | 327,3 | 326,9 | 326,7 | 326,5 | 326,4 | 326,3 | 326,3 |
|                                   | 14    | 56    | 102   | 161   | 1442  | 1832  | 2184  | 2523  | 2870  |
| 370                               | 336   | 328,3 | 327,2 | 326,8 | 326,6 | 326,5 | 326,4 | 326,3 | 326,3 |
|                                   | 15    | 58    | 110   | 162   | 1638  | 2164  | 2523  | 2914  | 3345  |
| 420                               | 335,9 | 328,3 | 327,2 | 326,8 | 326,6 | 326,5 | 326,4 | 326,3 | 326,2 |
|                                   | 16    | 63    | 115   | 166   | 1737  | 2392  | 2890  | 3317  | 3780  |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,2 \text{ м}$ ,  $\tau=500 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                   | 20  | 70  | 120 | 170 | 220 | 270 | 320 | 370 | 420 |
| 20                                | 4,1 | 1,7 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |
| 70                                | 3,6 | 1,1 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| 120                               | 3,4 | 1,0 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 170                               | 3,4 | 1,0 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 220                               | 3,3 | 0,9 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 270                               | 3,3 | 0,9 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 |
| 320                               | 3,2 | 0,9 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 370                               | 3,2 | 0,9 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 420                               | 3,2 | 0,9 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |

$T_{\text{аналит}}=325,494 \text{ K}$

## Приложение 15

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,25$  м,  $\tau=500$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20    | 70    | 120   | 170   | 220   | 270   | 320   | 370   | 420   |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20                                | 290,6 | 287,3 | 286,9 | 286,8 | 286,7 | 286,6 | 286,6 | 286,6 | 286,5 |
|                                   | 10    | 33    | 56    | 76    | 97    | 116   | 136   | 158   | 179   |
| 70                                | 288,8 | 285,7 | 285,3 | 285,1 | 285,1 | 285   | 285   | 285   | 284,9 |
|                                   | 13    | 48    | 89    | 252   | 330   | 408   | 481   | 564   | 630   |
| 120                               | 288,5 | 285,3 | 285   | 284,8 | 284,7 | 284,7 | 284,7 | 284,6 | 284,6 |
|                                   | 13    | 49    | 90    | 358   | 583   | 693   | 827   | 955   | 1077  |
| 170                               | 288,3 | 285,2 | 284,8 | 284,7 | 284,6 | 284,6 | 284,5 | 284,5 | 284,5 |
|                                   | 14    | 53    | 91    | 143   | 772   | 972   | 1164  | 1336  | 1562  |
| 220                               | 288,2 | 285,1 | 284,7 | 284,6 | 284,5 | 284,5 | 284,5 | 284,4 | 284,4 |
|                                   | 15    | 58    | 95    | 149   | 986   | 1263  | 1499  | 1759  | 2016  |
| 270                               | 288,1 | 285,1 | 284,7 | 284,6 | 284,5 | 284,4 | 284,4 | 284,4 | 284,4 |
|                                   | 15    | 58    | 98    | 149   | 1085  | 1519  | 1852  | 2133  | 2415  |
| 320                               | 288,1 | 285   | 284,7 | 284,5 | 284,5 | 284,4 | 284,4 | 284,4 | 284,3 |
|                                   | 15    | 58    | 100   | 150   | 483   | 1768  | 2153  | 2532  | 2901  |
| 370                               | 288   | 285   | 284,6 | 284,5 | 284,4 | 284,4 | 284,4 | 284,3 | 284,3 |
|                                   | 15    | 58    | 105   | 158   | 225   | 2035  | 2604  | 2963  | 3289  |
| 420                               | 288   | 285   | 284,6 | 284,5 | 284,4 | 284,4 | 284,3 | 284,3 | 284,3 |
|                                   | 16    | 63    | 107   | 160   | 228   | 2258  | 2794  | 3258  | 3720  |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,25$  м,  $\tau=500$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20  | 70  | 120 | 170 | 220 | 270 | 320  | 370  | 420  |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| 20                                | 2,3 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9  | 0,9  | 0,9  |
| 70                                | 1,7 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3  | 0,3  | 0,3  |
| 120                               | 1,6 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2  | 0,2  | 0,2  |
| 170                               | 1,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2  | 0,2  | 0,2  |
| 220                               | 1,5 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2  | 0,1  | 0,1  |
| 270                               | 1,4 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1  | 0,1  | 0,1  |
| 320                               | 1,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1  | 0,1  | 0,09 |
| 370                               | 1,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1  | 0,09 | 0,09 |
| 420                               | 1,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |

$T_{\text{аналит}}=284,037$  K

## Приложение 16

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,08$  м,  $\tau=1000$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20   | 70   | 120  | 170  | 220  | 270  | 320  | 370  | 420  |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20                                | 1206 | 1198 | 1197 | 1197 | 1196 | 1196 | 1196 | 1196 | 1196 |
|                                   | 9    | 30   | 51   | 71   | 93   | 113  | 135  | 155  | 177  |
| 70                                | 1222 | 1216 | 1214 | 1214 | 1214 | 1214 | 1213 | 1213 | 1213 |
|                                   | 22   | 104  | 179  | 253  | 324  | 400  | 472  | 546  | 619  |
| 120                               | 1224 | 1217 | 1216 | 1216 | 1215 | 1215 | 1215 | 1215 | 1215 |
|                                   | 25   | 156  | 309  | 435  | 561  | 583  | 814  | 940  | 1060 |
| 170                               | 1224 | 1218 | 1217 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 |
|                                   | 25   | 178  | 437  | 618  | 798  | 978  | 1151 | 1335 | 1514 |
| 220                               | 1224 | 1218 | 1217 | 1217 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 |
|                                   | 25   | 111  | 570  | 804  | 1064 | 1272 | 1527 | 1740 | 1998 |
| 270                               | 1224 | 1218 | 1217 | 1217 | 1217 | 1216 | 1216 | 1216 | 1216 |
|                                   | 25   | 99   | 706  | 991  | 1288 | 1577 | 1875 | 2147 | 2391 |
| 320                               | 1224 | 1218 | 1217 | 1217 | 1217 | 1217 | 1216 | 1216 | 1216 |
|                                   | 25   | 104  | 836  | 1172 | 1531 | 1968 | 2198 | 2570 | 2836 |
| 370                               | 1224 | 1218 | 1218 | 1217 | 1217 | 1217 | 1217 | 1216 | 1216 |
|                                   | 26   | 106  | 976  | 1343 | 1722 | 2174 | 2501 | 2821 | 3248 |
| 420                               | 1224 | 1219 | 1218 | 1217 | 1217 | 1217 | 1217 | 1217 | 1217 |
|                                   | 26   | 106  | 1077 | 1523 | 1968 | 2448 | 2762 | 3192 | 3720 |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,08$  м,  $\tau=1000$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20  | 70   | 120  | 170  | 220  | 270  | 320  | 370  | 420  |
|-----------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20                                | 0,9 | 1,6  | 1,6  | 1,6  | 1,7  | 1,7  | 1,7  | 1,7  | 1,7  |
| 70                                | 0,4 | 0,08 | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,3  | 0,3  | 0,3  |
| 120                               | 0,6 | 0    | 0,08 | 0,08 | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  |
| 170                               | 0,6 | 0,08 | 0    | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 220                               | 0,6 | 0,08 | 0    | 0    | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 270                               | 0,6 | 0,08 | 0    | 0    | 0    | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 320                               | 0,6 | 0,08 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 370                               | 0,6 | 0,08 | 0,08 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,08 | 0,08 |
| 420                               | 0,6 | 0,2  | 0,08 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

$$T_{\text{аналит}} = 1217 \text{ K}$$

## Приложение 17

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,1$  м,  $\tau=1000$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20   | 70   | 120  | 170  | 220  | 270  | 320  | 370  | 420  |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20                                | 1088 | 1074 | 1071 | 1070 | 1070 | 1069 | 1069 | 1069 | 1069 |
|                                   | 9    | 30   | 52   | 72   | 93   | 114  | 135  | 156  | 177  |
| 70                                | 1114 | 1101 | 1098 | 1097 | 1097 | 1097 | 1096 | 1096 | 1096 |
|                                   | 25   | 106  | 190  | 265  | 326  | 399  | 474  | 546  | 624  |
| 120                               | 1116 | 1103 | 1100 | 1099 | 1099 | 1099 | 1098 | 1098 | 1098 |
|                                   | 25   | 107  | 308  | 436  | 565  | 690  | 820  | 940  | 1064 |
| 170                               | 1116 | 1103 | 1101 | 1100 | 1100 | 1099 | 1099 | 1099 | 1099 |
|                                   | 25   | 107  | 439  | 624  | 797  | 969  | 1143 | 1320 | 1509 |
| 220                               | 1117 | 1104 | 1102 | 1101 | 1100 | 1100 | 1100 | 1100 | 1099 |
|                                   | 25   | 93   | 558  | 788  | 1050 | 1250 | 1474 | 1728 | 1940 |
| 270                               | 1117 | 1104 | 1102 | 1101 | 1101 | 1100 | 1100 | 1100 | 1100 |
|                                   | 25   | 93   | 689  | 975  | 1250 | 1542 | 1870 | 2152 | 2424 |
| 320                               | 1117 | 1104 | 1102 | 1101 | 1101 | 1100 | 1100 | 1100 | 1100 |
|                                   | 25   | 100  | 824  | 1185 | 1577 | 1817 | 2216 | 2492 | 2808 |
| 370                               | 1117 | 1104 | 1102 | 1101 | 1101 | 1101 | 1100 | 1100 | 1100 |
|                                   | 25   | 100  | 936  | 1326 | 1726 | 2105 | 2486 | 2902 | 3308 |
| 420                               | 1117 | 1104 | 1102 | 1102 | 1101 | 1101 | 1100 | 1100 | 1100 |
|                                   | 25   | 100  | 1041 | 1519 | 2012 | 2406 | 2825 | 3270 | 3600 |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,1$  м,  $\tau=1000$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20  | 70   | 120  | 170  | 220  | 270  | 320  | 370  | 420  |
|-----------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20                                | 1,1 | 2,4  | 2,6  | 2,7  | 2,7  | 2,8  | 2,8  | 2,8  | 2,8  |
| 70                                | 1,3 | 0,09 | 0,2  | 0,3  | 0,3  | 0,3  | 0,4  | 0,4  | 0,4  |
| 120                               | 1,4 | 0,3  | 0    | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,2  | 0,2  | 0,2  |
| 170                               | 1,4 | 0,3  | 0,09 | 0    | 0    | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| 220                               | 1,5 | 0,4  | 0,2  | 0,09 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,09 |
| 270                               | 1,5 | 0,4  | 0,2  | 0,09 | 0,09 | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 320                               | 1,5 | 0,4  | 0,2  | 0,09 | 0,09 | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 370                               | 1,5 | 0,4  | 0,2  | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0    | 0    | 0    |
| 420                               | 1,5 | 0,4  | 0,2  | 0,2  | 0,09 | 0,09 | 0    | 0    | 0    |

$T_{\text{аналит}}=1100$  K

## Приложение 18

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,2 \text{ м}, \tau=1000 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20    | 70    | 120   | 170   | 220   | 270   | 320   | 370   | 420   |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20                                | 505,8 | 490,4 | 488   | 487,1 | 486,6 | 486,2 | 486   | 485,9 | 485,7 |
|                                   | 9     | 30    | 51    | 72    | 93    | 114   | 135   | 155   | 177   |
| 70                                | 526,3 | 510,3 | 507,8 | 506,8 | 506,3 | 505,9 | 505,7 | 505,5 | 505,4 |
|                                   | 24    | 94    | 179   | 253   | 326   | 399   | 474   | 546   | 619   |
| 120                               | 526,5 | 510,5 | 508,1 | 507,1 | 506,6 | 506,2 | 506   | 505,8 | 505,7 |
|                                   | 23    | 94    | 221   | 435   | 561   | 690   | 813   | 937   | 1065  |
| 170                               | 526,5 | 510,6 | 508,2 | 507,2 | 506,7 | 506,3 | 506,1 | 505,9 | 505,8 |
|                                   | 23    | 94    | 174   | 616   | 797   | 975   | 1155  | 1337  | 1578  |
| 220                               | 526,4 | 510,6 | 508,2 | 507,3 | 506,7 | 506,4 | 506,2 | 506   | 505,9 |
|                                   | 23    | 94    | 173   | 838   | 1085  | 1259  | 1487  | 1776  | 1945  |
| 270                               | 526,3 | 510,6 | 508,2 | 507,3 | 506,8 | 506,4 | 506,2 | 506   | 505,9 |
|                                   | 23    | 94    | 173   | 971   | 1267  | 1570  | 1839  | 2113  | 2409  |
| 320                               | 526,3 | 510,6 | 508,3 | 507,4 | 506,8 | 506,5 | 506,2 | 506,1 | 505,9 |
|                                   | 23    | 94    | 173   | 1138  | 1490  | 1829  | 2165  | 2477  | 2878  |
| 370                               | 526,2 | 510,6 | 508,3 | 507,4 | 506,8 | 506,5 | 506,3 | 506,1 | 506   |
|                                   | 23    | 94    | 173   | 1144  | 1727  | 2114  | 2493  | 2895  | 3272  |
| 420                               | 526,1 | 510,6 | 508,2 | 507,4 | 506,9 | 506,5 | 506,3 | 506,1 | 506   |
|                                   | 23    | 94    | 173   | 1144  | 1964  | 2415  | 2844  | 3298  | 3600  |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,2 \text{ м}, \tau=1000 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20  | 70  | 120 | 170 | 220 | 270 | 320 | 370 | 420 |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 20                                | 0,2 | 2,9 | 3,3 | 3,5 | 3,6 | 3,7 | 3,7 | 3,8 | 3,8 |
| 70                                | 4,2 | 1,1 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| 120                               | 4,3 | 1,1 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 170                               | 4,3 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 220                               | 4,3 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 270                               | 4,2 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 320                               | 4,2 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 370                               | 4,2 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 420                               | 4,2 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |

$T_{\text{аналит}}=504,864 \text{ K}$

## Приложение 19

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,25$  м,  $\tau=1000$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20    | 70    | 120   | 170   | 220   | 270   | 320   | 370   | 420   |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20                                | 376,3 | 366   | 364,5 | 363,9 | 363,6 | 363,4 | 363,3 | 363,2 | 363,1 |
|                                   | 8     | 30    | 51    | 72    | 93    | 113   | 134   | 155   | 176   |
| 70                                | 387,5 | 376,5 | 374,9 | 374,3 | 373,9 | 373,7 | 373,6 | 373,5 | 373,4 |
|                                   | 23    | 89    | 178   | 252   | 325   | 398   | 472   | 545   | 657   |
| 120                               | 387,1 | 376,2 | 374,6 | 374   | 373,7 | 373,4 | 373,3 | 373,2 | 373,1 |
|                                   | 23    | 89    | 178   | 447   | 560   | 687   | 821   | 948   | 1102  |
| 170                               | 387   | 376,1 | 374,5 | 373,9 | 373,5 | 373,3 | 373,2 | 373,1 | 373   |
|                                   | 23    | 89    | 178   | 605   | 805   | 987   | 1172  | 1353  | 1524  |
| 220                               | 386,8 | 376   | 374,4 | 373,8 | 373,5 | 373,3 | 373,1 | 373   | 372,9 |
|                                   | 23    | 89    | 178   | 705   | 1102  | 1248  | 1487  | 1779  | 2001  |
| 270                               | 386,7 | 375,9 | 374,4 | 373,8 | 373,4 | 373,2 | 373,1 | 373   | 372,9 |
|                                   | 23    | 89    | 178   | 394   | 1271  | 1556  | 1861  | 2126  | 2444  |
| 320                               | 386,6 | 375,9 | 374,3 | 373,7 | 373,4 | 373,2 | 373   | 372,9 | 372,9 |
|                                   | 23    | 89    | 178   | 268   | 1483  | 1908  | 2177  | 2506  | 2839  |
| 370                               | 386,5 | 375,8 | 374,3 | 373,7 | 373,4 | 373,2 | 373   | 372,9 | 372,8 |
|                                   | 23    | 89    | 178   | 271   | 1678  | 2118  | 2637  | 2906  | 3286  |
| 420                               | 386,4 | 375,8 | 374,3 | 373,7 | 373,4 | 373,2 | 373   | 372,9 | 372,8 |
|                                   | 23    | 91    | 180   | 271   | 1944  | 2410  | 2878  | 3307  | 3720  |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,25$  м,  $\tau=1000$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20  | 70  | 120 | 170 | 220 | 270 | 320 | 370 | 420 |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 20                                | 1,2 | 1,6 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,4 |
| 70                                | 4,2 | 1,2 | 0,8 | 0,7 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 |
| 120                               | 4,1 | 1,2 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 |
| 170                               | 4,1 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 |
| 220                               | 4,0 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 270                               | 4,0 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 320                               | 4,0 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 370                               | 3,9 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2 |
| 420                               | 3,9 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2 |

$$T_{\text{аналит}} = 371,871 \text{ K}$$

## Приложение 20

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,08$  м,  $\tau=1500$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20         | 70          | 120          | 170          | 220          | 270          | 320          | 370          | 420          |
|-----------------------------------|------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 20                                | 1250<br>9  | 1246<br>30  | 1245<br>52   | 1245<br>72   | 1245<br>92   | 1245<br>113  | 1245<br>134  | 1245<br>156  | 1245<br>177  |
| 70                                | 1262<br>29 | 1260<br>106 | 1260<br>178  | 1260<br>252  | 1260<br>327  | 1259<br>400  | 1259<br>490  | 1259<br>562  | 1259<br>623  |
| 120                               | 1263<br>30 | 1261<br>178 | 1261<br>309  | 1260<br>435  | 1260<br>564  | 1260<br>691  | 1260<br>816  | 1260<br>939  | 1260<br>1070 |
| 170                               | 1263<br>31 | 1261<br>246 | 1261<br>440  | 1261<br>619  | 1261<br>799  | 1261<br>979  | 1261<br>1162 | 1261<br>1349 | 1261<br>1523 |
| 220                               | 1263<br>30 | 1261<br>250 | 1261<br>581  | 1261<br>808  | 1261<br>1043 | 1261<br>1277 | 1261<br>1502 | 1261<br>1728 | 1261<br>1933 |
| 270                               | 1263<br>30 | 1262<br>302 | 1261<br>695  | 1261<br>973  | 1261<br>1202 | 1261<br>1526 | 1261<br>1774 | 1261<br>2127 | 1261<br>2235 |
| 320                               | 1263<br>30 | 1262<br>200 | 1261<br>826  | 1261<br>1196 | 1261<br>1449 | 1261<br>1848 | 1261<br>2184 | 1261<br>2333 | 1261<br>2633 |
| 370                               | 1263<br>30 | 1262<br>178 | 1261<br>963  | 1261<br>1350 | 1261<br>1740 | 1261<br>2145 | 1261<br>2484 | 1261<br>2705 | 1261<br>3354 |
| 420                               | 1263<br>30 | 1262<br>121 | 1261<br>1093 | 1261<br>1541 | 1261<br>1988 | 1261<br>2410 | 1261<br>2925 | 1261<br>3290 | 1261<br>3660 |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,08$  м,  $\tau=1500$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20   | 70   | 120  | 170  | 220  | 270  | 320  | 370  | 420  |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20                                | 0,9  | 1,2  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,3  |
| 70                                | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  |
| 120                               | 0,2  | 0    | 0    | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 170                               | 0,2  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 220                               | 0,2  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 270                               | 0,2  | 0,08 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 320                               | 0,2  | 0,08 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 370                               | 0,2  | 0,08 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 420                               | 0,2  | 0,08 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

$$T_{\text{аналит}}=1261 \text{ K}$$

## Приложение 21

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,1 \text{ м}$ ,  $\tau=1500 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20         | 70          | 120          | 170          | 220          | 270          | 320          | 370          | 420          |
|-----------------------------------|------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 20                                | 1180<br>9  | 1171<br>30  | 1169<br>51   | 1168<br>72   | 1168<br>93   | 1168<br>114  | 1168<br>135  | 1167<br>156  | 1167<br>177  |
| 70                                | 1215<br>30 | 1208<br>106 | 1207<br>180  | 1206<br>254  | 1206<br>328  | 1206<br>402  | 1206<br>478  | 1206<br>553  | 1206<br>624  |
| 120                               | 1217<br>32 | 1210<br>155 | 1209<br>310  | 1208<br>439  | 1208<br>564  | 1208<br>693  | 1208<br>828  | 1207<br>950  | 1207<br>1074 |
| 170                               | 1217<br>32 | 1211<br>192 | 1209<br>441  | 1209<br>619  | 1209<br>801  | 1208<br>989  | 1208<br>1171 | 1208<br>1349 | 1208<br>1527 |
| 220                               | 1218<br>32 | 1211<br>192 | 1210<br>572  | 1209<br>808  | 1209<br>1041 | 1209<br>1282 | 1209<br>1514 | 1209<br>1745 | 1208<br>1997 |
| 270                               | 1218<br>32 | 1211<br>151 | 1210<br>714  | 1209<br>996  | 1209<br>1286 | 1209<br>1564 | 1209<br>1855 | 1209<br>2156 | 1209<br>2650 |
| 320                               | 1218<br>32 | 1211<br>129 | 1210<br>836  | 1210<br>1184 | 1209<br>1530 | 1209<br>1891 | 1209<br>2272 | 1209<br>2577 | 1209<br>2939 |
| 370                               | 1218<br>32 | 1211<br>129 | 1210<br>976  | 1210<br>1383 | 1209<br>1784 | 1209<br>2182 | 1209<br>2585 | 1209<br>2920 | 1209<br>3403 |
| 420                               | 1218<br>32 | 1211<br>129 | 1210<br>1107 | 1210<br>1572 | 1210<br>2025 | 1209<br>2487 | 1209<br>2930 | 1209<br>3348 | 1209<br>3780 |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,1 \text{ м}$ ,  $\tau=1500 \text{ с}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20  | 70   | 120  | 170  | 220  | 270  | 320  | 370  | 420  |
|-----------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20                                | 2,4 | 3,1  | 3,3  | 3,4  | 3,4  | 3,4  | 3,4  | 3,5  | 3,5  |
| 70                                | 0,5 | 0,08 | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  |
| 120                               | 0,7 | 0,08 | 0    | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,2  | 0,2  |
| 170                               | 0,7 | 0,2  | 0    | 0    | 0    | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 220                               | 0,7 | 0,2  | 0,08 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,08 |
| 270                               | 0,7 | 0,2  | 0,08 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 320                               | 0,7 | 0,2  | 0,08 | 0,08 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 370                               | 0,7 | 0,2  | 0,08 | 0,08 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 420                               | 0,7 | 0,2  | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0    | 0    | 0    | 0    |

$$T_{\text{аналит}} = 1209 \text{ K}$$

## Приложение 22

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,2$  м,  $\tau=1500$  с

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 20    | 70    | 120   | 170   | 220   | 270   | 320   | 370   | 420   |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20                          | 627,7 | 609,7 | 606,9 | 605,7 | 605,1 | 604,7 | 604,4 | 604,2 | 604,1 |
|                             | 9     | 34    | 59    | 82    | 100   | 127   | 139   | 161   | 181   |
| 70                          | 694,9 | 676   | 672,9 | 671,7 | 671,1 | 670,6 | 670,4 | 670,1 | 670   |
|                             | 32    | 108   | 183   | 260   | 334   | 411   | 489   | 560   | 636   |
| 120                         | 695,9 | 677,2 | 674,3 | 673,1 | 672,4 | 672   | 671,7 | 671,5 | 671,4 |
|                             | 34    | 143   | 317   | 445   | 578   | 701   | 838   | 964   | 1094  |
| 170                         | 696,1 | 677,6 | 674,7 | 673,5 | 672,8 | 672,4 | 672,1 | 671,9 | 671,8 |
|                             | 34    | 143   | 384   | 630   | 824   | 1009  | 1178  | 1396  | 1580  |
| 220                         | 696,2 | 677,7 | 674,9 | 673,7 | 673   | 672,6 | 672,3 | 672,1 | 672   |
|                             | 34    | 128   | 279   | 811   | 1042  | 1280  | 1528  | 1700  | 1990  |
| 270                         | 696,2 | 677,8 | 675   | 673,8 | 673,2 | 672,8 | 672,5 | 672,3 | 672,1 |
|                             | 34    | 128   | 258   | 984   | 1336  | 1577  | 1879  | 2158  | 2540  |
| 320                         | 696,1 | 677,9 | 675   | 673,9 | 673,3 | 672,8 | 672,6 | 672,3 | 672,2 |
|                             | 34    | 131   | 258   | 1175  | 1530  | 1873  | 2278  | 2579  | 2906  |
| 370                         | 696   | 677,9 | 675,1 | 674   | 673,3 | 672,9 | 672,6 | 672,4 | 672,3 |
|                             | 34    | 131   | 258   | 1394  | 1787  | 2181  | 2569  | 2985  | 3382  |
| 420                         | 695,9 | 677,9 | 675,1 | 674   | 673,4 | 673   | 672,7 | 672,5 | 672,3 |
|                             | 34    | 131   | 254   | 1535  | 2014  | 2473  | 2945  | 3383  | 3900  |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,2$  м,  $\tau=1500$  с

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 20  | 70  | 120 | 170  | 220  | 270 | 320  | 370  | 420  |
|-----------------------------|-----|-----|-----|------|------|-----|------|------|------|
| 20                          | 6,5 | 9,2 | 9,6 | 9,8  | 9,9  | 9,9 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| 70                          | 3,5 | 0,7 | 0,2 | 0,06 | 0,03 | 0,1 | 0,1  | 0,2  | 0,2  |
| 120                         | 3,7 | 0,9 | 0,4 | 0,3  | 0,2  | 0,1 | 0,06 | 0,03 | 0,02 |
| 170                         | 3,7 | 0,9 | 0,5 | 0,3  | 0,2  | 0,2 | 0,1  | 0,09 | 0,08 |
| 220                         | 3,7 | 1,0 | 0,5 | 0,4  | 0,3  | 0,2 | 0,2  | 0,1  | 0,1  |
| 270                         | 3,7 | 1,0 | 0,6 | 0,4  | 0,3  | 0,2 | 0,2  | 0,2  | 0,1  |
| 320                         | 3,7 | 1,0 | 0,6 | 0,4  | 0,3  | 0,2 | 0,2  | 0,2  | 0,1  |
| 370                         | 3,7 | 1,0 | 0,6 | 0,4  | 0,3  | 0,2 | 0,2  | 0,2  | 0,2  |
| 420                         | 3,7 | 1,0 | 0,6 | 0,4  | 0,3  | 0,2 | 0,2  | 0,2  | 0,2  |

$$T_{\text{аналит}}=671,284 \text{ K}$$

## Приложение 23

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры центра пластины в конце нагрева ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ )  $R=0,25$  м,  $\tau=1500$  с

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20    | 70    | 120   | 170   | 220   | 270   | 320   | 370   | 420   |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20                                | 460   | 446   | 443,8 | 443   | 442,5 | 442,2 | 442   | 441,9 | 441,8 |
|                                   | 9     | 30    | 52    | 73    | 95    | 116   | 138   | 159   | 181   |
| 70                                | 511,1 | 495,3 | 492,9 | 491,9 | 491,4 | 491   | 490,8 | 490,6 | 490,5 |
|                                   | 32    | 107   | 181   | 260   | 335   | 411   | 488   | 561   | 638   |
| 120                               | 511,4 | 495,8 | 493,5 | 492,5 | 491,9 | 491,6 | 491,4 | 491,2 | 491,1 |
|                                   | 34    | 135   | 293   | 446   | 576   | 710   | 837   | 965   | 1096  |
| 170                               | 511,3 | 495,8 | 493,5 | 492,6 | 492   | 491,7 | 491,5 | 491,3 | 491,2 |
|                                   | 34    | 129   | 264   | 629   | 820   | 1003  | 1190  | 1373  | 1566  |
| 220                               | 511,3 | 495,9 | 493,5 | 492,6 | 492,1 | 491,8 | 491,5 | 491,4 | 491,2 |
|                                   | 34    | 131   | 248   | 811   | 1065  | 1311  | 1541  | 1792  | 1995  |
| 270                               | 511,2 | 495,9 | 493,5 | 492,7 | 492,1 | 491,8 | 491,6 | 491,4 | 491,3 |
|                                   | 34    | 131   | 248   | 984   | 1287  | 1582  | 1868  | 2167  | 2452  |
| 320                               | 511,1 | 495,8 | 493,5 | 492,7 | 492,1 | 491,8 | 491,6 | 491,4 | 491,3 |
|                                   | 34    | 131   | 248   | 1111  | 1530  | 1881  | 2220  | 2561  | 2916  |
| 370                               | 510,9 | 495,8 | 493,5 | 492,7 | 492,2 | 491,8 | 491,6 | 491,4 | 491,4 |
|                                   | 34    | 133   | 248   | 1365  | 1718  | 2156  | 2485  | 2878  | 3340  |
| 420                               | 510,8 | 495,8 | 493,5 | 492,7 | 492,2 | 491,8 | 491,6 | 491,4 | 491,3 |
|                                   | 34    | 138   | 248   | 1498  | 2105  | 2376  | 2830  | 3273  | 3660  |

Относительная погрешность вычисления температуры центра пластины в конце нагрева по сравнению с аналитическим решением (%)  $R=0,25$  м,  $\tau=1500$  с

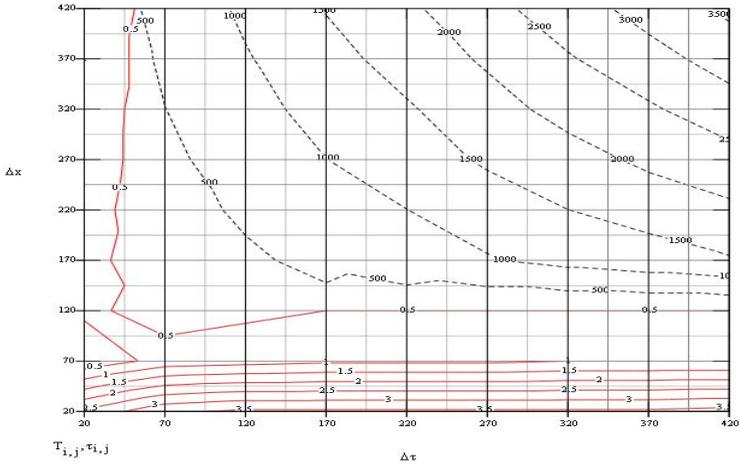
| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 20  | 70  | 120 | 170 | 220 | 270 | 320 | 370  | 420  |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| 20                                | 6,2 | 9,0 | 9,5 | 9,6 | 9,7 | 9,8 | 9,8 | 9,9  | 9,9  |
| 70                                | 4,3 | 1,0 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,08 | 0,06 |
| 120                               | 4,3 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2  | 0,2  |
| 170                               | 4,3 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2  | 0,2  |
| 220                               | 4,3 | 1,2 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2  | 0,2  |
| 270                               | 4,3 | 1,2 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2  | 0,2  |
| 320                               | 4,3 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2  | 0,2  |
| 370                               | 4,2 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2  | 0,2  |
| 420                               | 4,2 | 1,1 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2  | 0,2  |

$$T_{\text{аналит}} = 490,216 \text{ K}$$

## Приложение 24

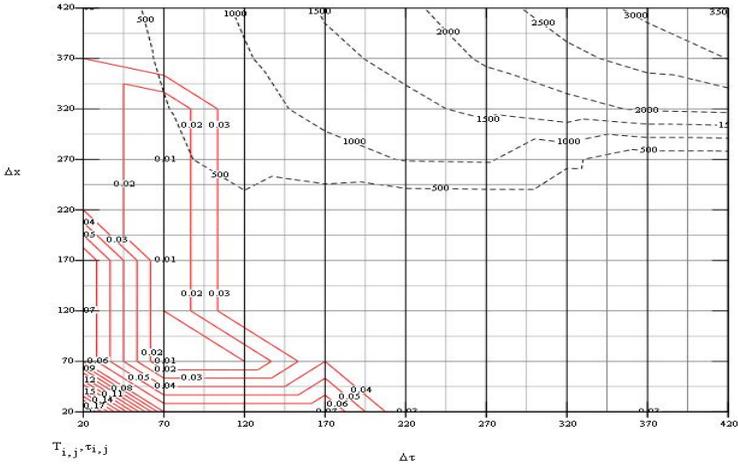
Номограмма для определения точности расчета нагрева пластины металла в течение 250 секунд при граничных условиях первого рода,  
 $R=0,08$  м:

\_\_\_ - точность расчета, \_\_\_ - время расчета



Номограмма для определения точности расчета нагрева пластины металла в течение 250 секунд при граничных условиях первого рода,  
 $R=0,25$  м:

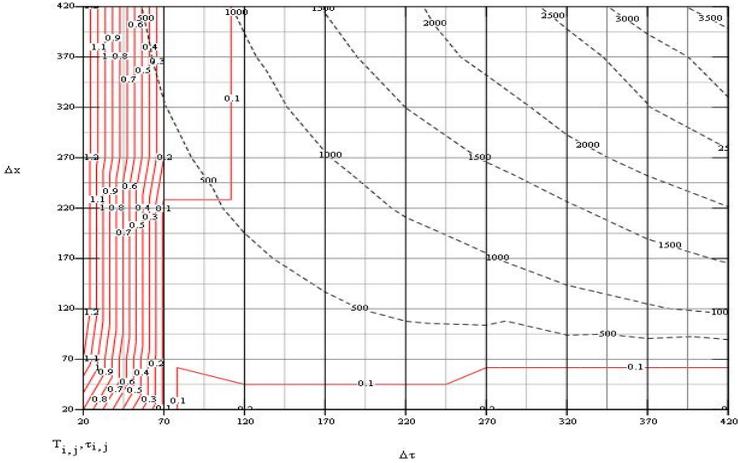
\_\_\_ - точность расчета, \_\_\_ - время расчета



## Приложение 25

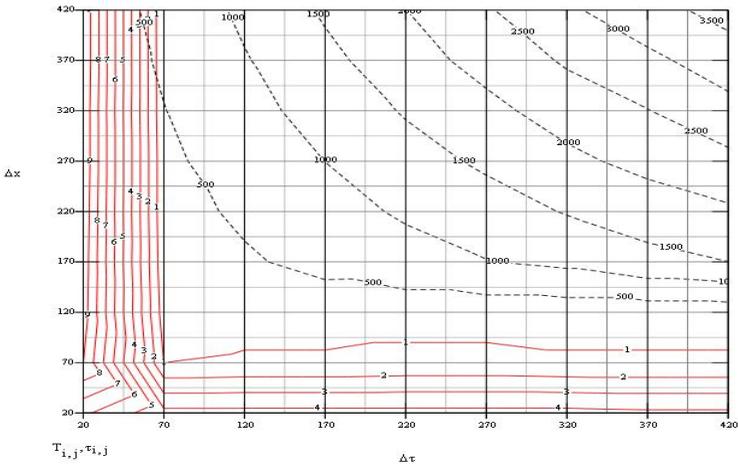
Номограмма для определения точности расчета нагрева пластины  
металла в течение 1500 секунд  
при граничных условиях первого рода,  
 $R=0,08$  м:

\_\_\_ - точность расчета, \_\_\_ - время расчета



Номограмма для определения точности расчета нагрева пластины  
металла в течение 1500 секунд при граничных условиях первого рода,  
 $R=0,25$  м:

\_\_\_ - точность расчета, \_\_\_ - время расчета



**Аналитическое решение задачи нагрева металла при граничных  
условиях второго рода**

$$T(x, \tau) := \left[ \begin{array}{l} T_0 \leftarrow 273 \\ q \leftarrow 146000 \\ \lambda \leftarrow 38.67 \\ R \leftarrow 0.1 \\ a \leftarrow 0.809 \cdot 10^{-5} \\ Fo \leftarrow \frac{a \cdot \tau}{R^2} \\ \theta \leftarrow \frac{q \cdot R}{2 \cdot \lambda} \cdot \left[ 2 \cdot Fo + \left( \frac{x}{R} \right)^2 - \frac{1}{3} + 1 \cdot \sum_{n=1}^{20} \left[ \frac{4 \cdot (-1)^{n+1}}{(\pi \cdot n)^2} \cdot \cos \left( \frac{x}{R} \cdot \pi \cdot n \right) \cdot \exp \left[ -(\pi \cdot n)^2 \cdot Fo \right] \right] \right] \\ T_0 + \theta \end{array} \right]$$

## Приложение 27

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры поверхности пластины, температурного перепада ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ ) при  $\tau=1000$  с.

Для  $R=0,08$  м

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 726,6 | 726,9 | 727,1 | 727,3 | 727,4 | 727,5 | 727,6 | 727,7 | 727,8 | 727,8 | 727,9 |
|                             | 143,6 | 144,7 | 145,5 | 146,1 | 146,6 | 147,0 | 147,3 | 147,6 | 147,9 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 15    | 17    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 32    | 34    | 36    |
| 21                          | 736,3 | 736,5 | 736,7 | 736,9 | 737,0 | 737,1 | 737,2 | 737,3 | 737,3 | 737,4 | 737,4 |
|                             | 143,7 | 144,6 | 145,5 | 146,1 | 146,6 | 147,0 | 147,4 | 147,7 | 147,9 | 148,1 | 148,2 |
|                             | 18    | 20    | 23    | 25    | 27    | 30    | 33    | 36    | 38    | 40    | 42    |
| 24                          | 742,4 | 742,7 | 742,9 | 743,1 | 743,2 | 743,3 | 743,3 | 743,4 | 743,4 | 743,5 | 743,6 |
|                             | 143,6 | 144,7 | 145,5 | 146,1 | 146,7 | 147,1 | 147,3 | 147,6 | 147,8 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 20    | 23    | 26    | 28    | 31    | 34    | 37    | 39    | 42    | 45    | 49    |
| 27                          | 746,4 | 746,7 | 746,9 | 747,0 | 747,1 | 747,2 | 747,3 | 747,4 | 747,4 | 747,5 | 747,5 |
|                             | 143,6 | 144,7 | 145,6 | 146,1 | 146,6 | 147,0 | 147,4 | 147,7 | 147,8 | 148,1 | 148,2 |
|                             | 23    | 26    | 29    | 32    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    | 51    | 56    |
| 30                          | 749,0 | 749,2 | 749,4 | 749,6 | 749,7 | 749,8 | 749,9 | 749,9 | 750,0 | 750,0 | 750,1 |
|                             | 143,7 | 144,7 | 145,5 | 146,1 | 146,6 | 147,0 | 147,4 | 147,6 | 147,9 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 26    | 29    | 32    | 36    | 40    | 43    | 47    | 49    | 52    | 56    | 62    |
| 33                          | 750,7 | 750,9 | 751,1 | 751,2 | 751,3 | 751,4 | 751,5 | 751,6 | 751,6 | 751,7 | 751,7 |
|                             | 143,7 | 144,7 | 145,5 | 146,1 | 146,6 | 147,0 | 147,4 | 147,7 | 147,8 | 148,1 | 148,2 |
|                             | 29    | 32    | 35    | 40    | 44    | 47    | 50    | 53    | 56    | 61    | 68    |
| 36                          | 751,7 | 752,0 | 752,2 | 752,3 | 752,4 | 752,5 | 752,6 | 752,7 | 752,7 | 652,8 | 752,8 |
|                             | 143,6 | 144,7 | 145,6 | 146,1 | 146,6 | 147,0 | 147,4 | 147,7 | 147,9 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 30    | 34    | 38    | 44    | 47    | 51    | 55    | 58    | 62    | 67    | 72    |
| 39                          | 752,4 | 752,7 | 752,9 | 753,0 | 753,1 | 753,2 | 753,3 | 753,4 | 753,4 | 753,5 | 753,5 |
|                             | 143,6 | 144,8 | 145,6 | 146,1 | 146,6 | 147,0 | 147,4 | 147,7 | 147,9 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 32    | 37    | 42    | 48    | 52    | 55    | 60    | 64    | 69    | 73    | 78    |
| 42                          | 752,9 | 753,1 | 753,3 | 753,4 | 753,6 | 753,7 | 753,7 | 753,8 | 753,9 | 753,9 | 753,9 |
|                             | 143,7 | 144,7 | 145,5 | 146,1 | 146,7 | 147,1 | 147,3 | 147,6 | 147,9 | 148,1 | 148,2 |
|                             | 34    | 41    | 46    | 52    | 56    | 60    | 64    | 69    | 73    | 78    | 84    |
| 45                          | 753,2 | 753,4 | 753,6 | 753,7 | 753,9 | 754,0 | 754,0 | 754,1 | 754,1 | 754,2 | 754,2 |
|                             | 143,7 | 144,6 | 145,5 | 146,1 | 146,7 | 147,0 | 147,3 | 147,6 | 147,8 | 148,1 | 148,2 |
|                             | 38    | 44    | 50    | 56    | 60    | 65    | 69    | 74    | 79    | 84    | 91    |
| 48                          | 753,4 | 753,6 | 753,8 | 753,9 | 754,0 | 754,1 | 754,2 | 754,3 | 754,3 | 754,4 | 754,4 |
|                             | 143,7 | 144,7 | 145,5 | 146,1 | 146,6 | 147,0 | 147,4 | 147,7 | 147,9 | 148,2 | 148,3 |
|                             | 41    | 45    | 52    | 58    | 62    | 68    | 72    | 77    | 82    | 88    | 95    |

Аналитическое решение

| Температура поверхности | Температурный перепад |
|-------------------------|-----------------------|
| 755,5                   | 151,0                 |

Для  $R=0,1 \text{ м}$

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 678,2 | 678,8 | 679,3 | 679,7 | 680,0 | 680,2 | 680,4 | 680,6 | 680,8 | 681,0 | 681,0 |
|                             | 179,4 | 180,7 | 181,7 | 182,5 | 183,1 | 183,5 | 183,9 | 184,3 | 184,6 | 184,9 | 185,1 |
|                             | 17    | 20    | 22    | 23    | 29    | 33    | 36    | 39    | 42    | 48    | 51    |
| 21                          | 685,9 | 686,5 | 687,0 | 687,4 | 687,6 | 687,9 | 688,1 | 688,3 | 688,5 | 688,6 | 688,7 |
|                             | 179,4 | 180,7 | 181,7 | 182,5 | 183,0 | 183,6 | 184,0 | 184,4 | 184,8 | 185,0 | 185,2 |
|                             | 18    | 21    | 23    | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    | 49    | 53    | 55    |
| 24                          | 690,8 | 691,5 | 691,9 | 692,3 | 692,6 | 692,8 | 693,0 | 693,2 | 693,4 | 693,5 | 693,6 |
|                             | 179,4 | 180,8 | 181,7 | 182,5 | 183,1 | 183,5 | 184,0 | 184,4 | 184,7 | 185,0 | 185,2 |
|                             | 22    | 25    | 26    | 31    | 32    | 37    | 42    | 47    | 52    | 55    | 58    |
| 27                          | 694,0 | 694,7 | 695,1 | 695,5 | 695,7 | 696,0 | 696,2 | 696,4 | 696,6 | 696,7 | 696,8 |
|                             | 179,4 | 180,8 | 181,7 | 182,5 | 183,0 | 183,6 | 184,0 | 184,4 | 184,8 | 185,0 | 185,2 |
|                             | 23    | 28    | 30    | 33    | 36    | 41    | 45    | 50    | 54    | 57    | 61    |
| 30                          | 696,1 | 696,7 | 697,2 | 697,5 | 697,8 | 698,1 | 698,3 | 698,4 | 698,6 | 698,7 | 698,8 |
|                             | 179,4 | 180,8 | 181,8 | 182,5 | 183,1 | 183,7 | 184,1 | 184,4 | 184,7 | 185,0 | 185,2 |
|                             | 26    | 30    | 33    | 37    | 41    | 45    | 49    | 53    | 56    | 60    | 64    |
| 33                          | 697,4 | 698,1 | 698,5 | 698,9 | 699,2 | 699,4 | 699,6 | 699,8 | 699,9 | 700,0 | 700,1 |
|                             | 179,4 | 180,8 | 181,8 | 182,6 | 183,2 | 183,7 | 184,1 | 184,5 | 184,8 | 185,0 | 185,2 |
|                             | 28    | 32    | 37    | 41    | 45    | 49    | 53    | 58    | 61    | 65    | 69    |
| 36                          | 698,3 | 698,9 | 699,4 | 699,7 | 700,0 | 700,3 | 700,5 | 700,6 | 700,8 | 700,9 | 701,0 |
|                             | 179,5 | 180,8 | 181,8 | 182,5 | 183,1 | 183,7 | 184,1 | 184,4 | 184,8 | 185,0 | 185,2 |
|                             | 31    | 35    | 41    | 45    | 49    | 53    | 56    | 60    | 65    | 70    | 74    |
| 39                          | 698,8 | 699,5 | 699,9 | 700,3 | 700,6 | 700,8 | 700,9 | 701,0 | 701,3 | 701,5 | 701,6 |
|                             | 179,4 | 180,8 | 181,7 | 182,6 | 183,2 | 183,7 | 184,0 | 184,3 | 184,7 | 185,2 | 185,3 |
|                             | 34    | 39    | 44    | 48    | 53    | 59    | 62    | 65    | 70    | 75    | 78    |
| 42                          | 699,2 | 699,8 | 700,3 | 700,6 | 700,9 | 701,1 | 701,4 | 701,5 | 701,7 | 701,8 | 701,9 |
|                             | 179,5 | 180,7 | 181,8 | 182,5 | 183,1 | 183,6 | 184,1 | 184,4 | 184,8 | 185,0 | 185,2 |
|                             | 38    | 43    | 49    | 53    | 58    | 64    | 67    | 69    | 76    | 83    | 87    |
| 45                          | 699,4 | 700,1 | 700,5 | 700,9 | 701,2 | 701,4 | 701,6 | 701,8 | 701,9 | 702,0 | 702,2 |
|                             | 179,4 | 180,8 | 181,7 | 182,6 | 183,2 | 183,7 | 184,1 | 184,5 | 184,7 | 185,0 | 185,3 |
|                             | 40    | 46    | 51    | 56    | 61    | 69    | 74    | 79    | 81    | 87    | 92    |
| 48                          | 699,6 | 700,2 | 700,7 | 701,0 | 701,3 | 701,6 | 701,8 | 701,9 | 702,1 | 702,2 | 702,3 |
|                             | 179,5 | 180,8 | 181,8 | 182,5 | 183,1 | 183,7 | 184,1 | 184,4 | 184,8 | 185,0 | 185,2 |
|                             | 43    | 48    | 54    | 59    | 64    | 71    | 77    | 82    | 87    | 92    | 97    |

Аналитическое решение

| Температура поверхности | Температурный перепад |
|-------------------------|-----------------------|
| 704,3                   | 188,8                 |

Для  $R=0,2 \text{ м}$

| $\frac{\Delta x}{\Delta r}$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 627,7 | 629,6 | 631,1 | 632,2 | 633,0 | 633,8 | 634,4 | 634,9 | 635,3 | 635,7 | 636,1 |
|                             | 310,7 | 313,0 | 314,8 | 316,1 | 317,0 | 317,9 | 318,6 | 319,2 | 319,7 | 320,2 | 320,6 |
|                             | 17    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 33    | 36    | 39    |
| 21                          | 632,8 | 634,7 | 636,1 | 637,2 | 638,1 | 638,9 | 639,5 | 640,0 | 640,4 | 640,8 | 641,1 |
|                             | 313,2 | 315,5 | 317,1 | 318,5 | 319,5 | 320,4 | 321,2 | 321,7 | 322,2 | 322,7 | 323,1 |
|                             | 19    | 21    | 24    | 27    | 29    | 31    | 33    | 35    | 38    | 41    | 43    |
| 24                          | 636,1 | 638,0 | 639,4 | 640,5 | 641,4 | 642,1 | 642,7 | 643,3 | 643,7 | 644,1 | 644,4 |
|                             | 314,8 | 317,1 | 318,8 | 320,1 | 321,2 | 322,0 | 322,7 | 323,4 | 323,9 | 324,3 | 324,7 |
|                             | 20    | 23    | 26    | 29    | 32    | 35    | 38    | 41    | 44    | 47    | 50    |
| 27                          | 638,2 | 640,1 | 641,5 | 642,7 | 643,5 | 644,3 | 644,9 | 645,4 | 645,8 | 646,2 | 646,5 |
|                             | 315,8 | 318,1 | 319,8 | 321,2 | 322,2 | 323,1 | 323,9 | 324,4 | 324,9 | 325,4 | 325,8 |
|                             | 23    | 27    | 30    | 33    | 36    | 40    | 44    | 47    | 50    | 53    | 56    |
| 30                          | 639,6 | 641,5 | 642,9 | 644,9 | 645,3 | 645,7 | 646,3 | 646,8 | 647,2 | 647,6 | 647,9 |
|                             | 316,6 | 318,9 | 320,5 | 321,9 | 323,4 | 323,9 | 324,6 | 325,2 | 325,7 | 326,1 | 326,5 |
|                             | 26    | 30    | 34    | 41    | 43    | 46    | 49    | 52    | 55    | 59    | 61    |
| 33                          | 640,6 | 642,4 | 643,9 | 645,0 | 645,9 | 646,6 | 647,2 | 647,7 | 648,1 | 648,5 | 648,9 |
|                             | 317,2 | 319,4 | 321,1 | 322,5 | 323,5 | 324,4 | 325,1 | 325,7 | 326,2 | 326,6 | 327,1 |
|                             | 29    | 32    | 37    | 41    | 46    | 50    | 54    | 58    | 62    | 66    | 68    |
| 36                          | 641,2 | 643,1 | 644,5 | 645,6 | 646,5 | 647,2 | 647,8 | 648,3 | 648,8 | 649,2 | 649,5 |
|                             | 317,5 | 319,8 | 321,5 | 322,8 | 323,9 | 324,7 | 325,5 | 326,1 | 326,6 | 327,1 | 327,5 |
|                             | 32    | 35    | 40    | 45    | 50    | 54    | 58    | 63    | 67    | 71    | 75    |
| 39                          | 641,6 | 643,5 | 644,9 | 646,0 | 646,9 | 647,6 | 648,0 | 648,8 | 649,2 | 649,6 | 649,9 |
|                             | 317,8 | 320,1 | 321,8 | 323,1 | 324,2 | 325,0 | 325,5 | 326,4 | 326,9 | 327,4 | 327,7 |
|                             | 32    | 37    | 41    | 46    | 51    | 56    | 62    | 65    | 70    | 74    | 79    |
| 42                          | 641,9 | 643,8 | 645,2 | 646,3 | 647,2 | 647,9 | 648,5 | 649,0 | 649,5 | 649,9 | 650,2 |
|                             | 318,0 | 320,3 | 322,0 | 323,3 | 324,4 | 325,2 | 326,0 | 326,6 | 327,1 | 327,6 | 328,0 |
|                             | 34    | 40    | 45    | 50    | 55    | 60    | 65    | 70    | 75    | 80    | 85    |
| 45                          | 642,1 | 644,0 | 645,4 | 646,5 | 647,4 | 648,1 | 648,7 | 649,2 | 649,7 | 650,1 | 650,4 |
|                             | 318,2 | 320,5 | 322,2 | 323,5 | 324,6 | 325,4 | 326,1 | 326,7 | 327,3 | 327,8 | 328,1 |
|                             | 37    | 42    | 48    | 54    | 60    | 65    | 70    | 75    | 80    | 86    | 91    |
| 48                          | 642,2 | 644,1 | 645,5 | 646,7 | 647,6 | 648,3 | 648,9 | 649,4 | 649,8 | 650,2 | 650,6 |
|                             | 318,3 | 320,6 | 322,2 | 323,7 | 324,8 | 325,6 | 326,3 | 326,9 | 327,4 | 327,9 | 328,3 |
|                             | 40    | 46    | 53    | 60    | 65    | 71    | 76    | 81    | 87    | 93    | 98    |

Аналитическое решение

| Температура поверхности | Температурный перепад |
|-------------------------|-----------------------|
| 656,6                   | 336,0                 |

Для  $R=0,25 \text{ м}$

| $\frac{\Delta x}{\Delta r}$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 623,9 | 626,3 | 628,1 | 629,5 | 630,6 | 631,5 | 632,2 | 632,9 | 633,4 | 633,9 | 634,3 |
|                             | 333,9 | 336,6 | 338,5 | 340,0 | 341,2 | 342,2 | 343,0 | 343,7 | 344,3 | 344,8 | 345,2 |
|                             | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 32    | 34    | 37    |
| 21                          | 628,9 | 631,3 | 633,1 | 634,5 | 635,5 | 636,5 | 637,3 | 637,9 | 638,5 | 638,9 | 639,4 |
|                             | 337,6 | 340,3 | 342,3 | 343,8 | 344,9 | 346,0 | 346,8 | 347,5 | 348,1 | 348,6 | 349,1 |
|                             | 18    | 20    | 23    | 25    | 27    | 30    | 33    | 35    | 37    | 39    | 42    |
| 24                          | 632,2 | 634,5 | 636,3 | 637,7 | 638,8 | 639,7 | 640,5 | 641,1 | 641,7 | 642,2 | 642,6 |
|                             | 340,1 | 342,7 | 344,6 | 346,2 | 347,4 | 348,4 | 349,2 | 349,9 | 350,5 | 351,1 | 351,5 |
|                             | 20    | 23    | 26    | 28    | 30    | 34    | 37    | 40    | 42    | 45    | 48    |
| 27                          | 634,3 | 636,6 | 638,4 | 639,8 | 640,9 | 641,9 | 642,6 | 643,2 | 643,8 | 644,3 | 644,7 |
|                             | 341,7 | 344,3 | 346,2 | 347,8 | 349,0 | 350,1 | 350,8 | 351,5 | 352,1 | 352,7 | 353,1 |
|                             | 23    | 26    | 29    | 31    | 34    | 38    | 41    | 44    | 47    | 50    | 54    |
| 30                          | 635,7 | 638,0 | 639,8 | 641,2 | 642,3 | 643,2 | 644,0 | 644,6 | 645,2 | 645,7 | 646,1 |
|                             | 342,8 | 345,4 | 347,3 | 348,9 | 350,1 | 351,1 | 351,9 | 352,6 | 353,2 | 353,8 | 354,2 |
|                             | 26    | 29    | 31    | 35    | 39    | 43    | 46    | 50    | 53    | 56    | 61    |
| 33                          | 636,6 | 639,0 | 640,7 | 642,1 | 643,3 | 644,1 | 644,9 | 645,5 | 646,1 | 646,6 | 647,0 |
|                             | 343,5 | 346,2 | 348,1 | 349,6 | 350,9 | 351,8 | 352,7 | 353,3 | 354,0 | 354,5 | 355,0 |
|                             | 29    | 33    | 36    | 41    | 44    | 48    | 51    | 56    | 59    | 62    | 68    |
| 36                          | 637,2 | 639,6 | 641,4 | 642,8 | 643,9 | 644,8 | 645,5 | 646,2 | 646,8 | 647,2 | 647,7 |
|                             | 344,0 | 346,7 | 348,7 | 350,2 | 351,4 | 352,4 | 353,2 | 353,9 | 354,6 | 355,0 | 355,6 |
|                             | 32    | 35    | 40    | 45    | 48    | 52    | 56    | 61    | 65    | 69    | 75    |
| 39                          | 637,6 | 640,0 | 641,8 | 643,2 | 644,3 | 645,2 | 646,0 | 646,6 | 647,2 | 647,6 | 648,1 |
|                             | 344,4 | 347,1 | 349,0 | 350,6 | 351,8 | 352,8 | 353,7 | 354,3 | 355,0 | 355,4 | 355,9 |
|                             | 34    | 39    | 44    | 49    | 53    | 57    | 61    | 66    | 71    | 75    | 81    |
| 42                          | 637,9 | 640,3 | 642,1 | 643,5 | 644,6 | 645,5 | 646,3 | 646,9 | 647,5 | 648,0 | 648,4 |
|                             | 344,7 | 347,4 | 349,3 | 350,9 | 352,1 | 353,1 | 353,9 | 354,6 | 355,3 | 355,8 | 356,2 |
|                             | 37    | 42    | 47    | 52    | 57    | 61    | 66    | 71    | 77    | 82    | 88    |
| 45                          | 638,1 | 640,5 | 642,3 | 643,7 | 644,8 | 645,7 | 646,5 | 647,1 | 647,7 | 648,2 | 648,6 |
|                             | 344,9 | 347,6 | 349,6 | 351,1 | 352,3 | 353,3 | 354,2 | 354,8 | 355,5 | 356,0 | 356,4 |
|                             | 40    | 45    | 51    | 56    | 61    | 66    | 71    | 76    | 83    | 88    | 95    |
| 48                          | 638,3 | 640,7 | 642,5 | 643,7 | 645,0 | 645,9 | 646,6 | 647,2 | 647,8 | 648,3 | 648,7 |
|                             | 345,1 | 347,8 | 349,8 | 351,1 | 352,5 | 353,5 | 354,3 | 354,9 | 355,6 | 356,1 | 356,6 |
|                             | 43    | 48    | 54    | 60    | 65    | 61    | 76    | 81    | 89    | 95    | 103   |

Аналитическое решение

| Температура поверхности | Температурный перепад |
|-------------------------|-----------------------|
| 656,2                   | 365,3                 |

## Приложение 28

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры поверхности пластины, температурного перепада ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ ) при  $\tau=250$  с.

Для  $R=0,08$  м

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 460,5 | 461,2 | 461,8 | 462,2 | 462,6 | 462,9 | 463,1 | 463,3 | 463,4 | 463,6 | 463,7 |
|                             | 137,3 | 138,2 | 139,0 | 139,6 | 140,1 | 140,5 | 140,8 | 141,0 | 141,2 | 141,4 | 141,6 |
|                             | 12    | 13    | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 30    | 32    |
| 21                          | 460,6 | 461,3 | 461,9 | 462,3 | 462,7 | 463,0 | 463,2 | 463,4 | 463,6 | 463,7 | 463,8 |
|                             | 137,5 | 138,4 | 139,2 | 139,8 | 140,3 | 140,7 | 141,0 | 141,2 | 141,5 | 141,6 | 141,8 |
|                             | 12    | 13    | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 30    | 32    |
| 24                          | 460,7 | 461,4 | 462,0 | 462,4 | 462,7 | 463,0 | 463,3 | 463,5 | 463,6 | 463,8 | 463,9 |
|                             | 137,7 | 138,6 | 139,4 | 140,0 | 140,4 | 140,8 | 141,1 | 141,4 | 141,6 | 141,8 | 141,9 |
|                             | 12    | 13    | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 30    | 32    |
| 27                          | 460,7 | 461,5 | 462,0 | 462,5 | 462,8 | 463,0 | 463,3 | 463,5 | 463,7 | 463,8 | 464,0 |
|                             | 137,7 | 138,8 | 139,5 | 140,1 | 140,5 | 140,8 | 141,2 | 141,5 | 141,7 | 141,9 | 142,1 |
|                             | 12    | 13    | 15    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 30    | 32    |       |
| 30                          | 460,8 | 461,6 | 462,1 | 462,5 | 462,8 | 463,1 | 463,4 | 463,6 | 463,7 | 463,9 | 464,0 |
|                             | 137,9 | 138,9 | 139,6 | 140,2 | 140,6 | 141,0 | 141,4 | 141,6 | 141,8 | 142,0 | 142,2 |
|                             | 12    | 13    | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 30    | 32    |
| 33                          | 460,8 | 461,6 | 462,1 | 462,5 | 462,9 | 463,2 | 463,4 | 463,6 | 463,8 | 463,9 | 464,1 |
|                             | 138,0 | 139,0 | 139,7 | 140,2 | 140,7 | 141,1 | 141,4 | 141,7 | 141,9 | 142,1 | 142,3 |
|                             | 12    | 13    | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 30    | 32    |
| 36                          | 460,8 | 461,6 | 462,1 | 462,5 | 462,9 | 463,2 | 463,4 | 463,6 | 463,8 | 464,0 | 464,1 |
|                             | 138,0 | 139,0 | 139,7 | 140,3 | 140,7 | 141,2 | 141,4 | 141,7 | 142,0 | 142,2 | 142,3 |
|                             | 12    | 13    | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 30    | 32    |
| 39                          | 460,9 | 461,7 | 462,2 | 462,5 | 462,9 | 463,2 | 463,5 | 463,7 | 463,8 | 464,0 | 464,1 |
|                             | 138,1 | 139,1 | 139,8 | 140,3 | 140,8 | 141,2 | 141,6 | 141,8 | 142,0 | 142,2 | 142,4 |
|                             | 12    | 13    | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 30    | 32    |
| 42                          | 460,9 | 461,6 | 462,2 | 462,6 | 463,0 | 463,3 | 463,5 | 463,7 | 463,9 | 464,0 | 464,1 |
|                             | 138,1 | 139,1 | 139,9 | 140,4 | 140,9 | 141,3 | 141,6 | 141,9 | 142,1 | 142,3 | 142,4 |
|                             | 12    | 13    | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 30    | 32    |
| 45                          | 460,9 | 461,6 | 462,2 | 462,6 | 463,0 | 463,3 | 463,5 | 463,7 | 463,9 | 464,0 | 464,2 |
|                             | 138,1 | 139,1 | 139,9 | 140,4 | 140,9 | 141,3 | 141,6 | 141,9 | 142,1 | 142,3 | 142,5 |
|                             | 12    | 13    | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 30    | 32    |
| 48                          | 460,9 | 461,6 | 462,2 | 462,6 | 463,1 | 463,3 | 463,5 | 463,7 | 463,9 | 464,1 | 464,2 |
|                             | 138,2 | 139,1 | 139,9 | 140,5 | 141,1 | 141,4 | 141,6 | 141,9 | 142,1 | 142,4 | 142,5 |
|                             | 13    | 14    | 16    | 18    | 20    | 21    | 23    | 25    | 27    | 30    | 32    |

Аналитическое решение

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| Температура поверхности | Температурный перепад |
| 466,4                   | 145,6                 |

Для  $R=0,1 \text{ м}$

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 457,0 | 457,9 | 458,6 | 459,2 | 459,6 | 460,0 | 460,3 | 460,6 | 460,8 | 461,0 | 461,1 |
|                             | 299,2 | 299,0 | 298,8 | 298,7 | 298,6 | 298,6 | 298,5 | 298,5 | 298,4 | 298,4 | 298,4 |
|                             | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 31    |
| 21                          | 457,1 | 458,0 | 458,8 | 459,4 | 459,8 | 460,2 | 460,5 | 460,7 | 460,9 | 461,1 | 461,3 |
|                             | 299,0 | 298,8 | 298,7 | 298,6 | 298,5 | 298,5 | 298,4 | 298,4 | 298,3 | 298,3 | 298,2 |
|                             | 13    | 15    | 17    | 19    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 31    |
| 24                          | 457,2 | 458,1 | 458,9 | 459,5 | 459,9 | 460,3 | 460,6 | 460,9 | 461,1 | 461,3 | 461,4 |
|                             | 298,9 | 298,7 | 298,6 | 298,5 | 298,4 | 298,3 | 298,2 | 298,2 | 298,1 | 298,1 | 298,1 |
|                             | 13    | 15    | 17    | 19    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 31    |
| 27                          | 457,3 | 458,3 | 459,0 | 459,6 | 460,0 | 460,4 | 460,7 | 460,9 | 461,1 | 461,3 | 461,5 |
|                             | 298,8 | 298,6 | 298,5 | 298,4 | 298,3 | 298,2 | 298,2 | 298,1 | 298,1 | 298,0 | 298,0 |
|                             | 13    | 15    | 17    | 19    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 31    |
| 30                          | 457,4 | 458,4 | 459,1 | 459,6 | 460,1 | 460,4 | 460,7 | 461,0 | 461,2 | 461,4 | 461,6 |
|                             | 298,7 | 298,5 | 298,4 | 298,3 | 298,2 | 298,2 | 298,1 | 298,1 | 298,0 | 298,0 | 297,9 |
|                             | 14    | 15    | 17    | 20    | 21    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 31    |
| 33                          | 457,5 | 458,5 | 459,1 | 459,6 | 460,1 | 460,5 | 460,8 | 461,1 | 461,3 | 461,5 | 461,6 |
|                             | 298,7 | 298,5 | 298,3 | 298,3 | 298,1 | 298,1 | 298,0 | 298,0 | 297,9 | 297,9 | 297,9 |
|                             | 14    | 15    | 17    | 20    | 21    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 31    |
| 36                          | 457,5 | 458,5 | 459,2 | 459,7 | 460,2 | 460,6 | 460,9 | 461,1 | 461,3 | 461,5 | 461,7 |
|                             | 298,6 | 298,4 | 298,3 | 298,2 | 298,1 | 298,1 | 298,0 | 298,0 | 297,9 | 297,9 | 297,8 |
|                             | 14    | 15    | 17    | 20    | 21    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 31    |
| 39                          | 457,5 | 458,5 | 459,2 | 459,7 | 460,2 | 460,6 | 460,9 | 461,2 | 461,4 | 461,6 | 461,7 |
|                             | 298,6 | 298,4 | 298,2 | 298,1 | 298,0 | 298,0 | 297,9 | 297,9 | 297,8 | 297,8 | 297,8 |
|                             | 15    | 16    | 18    | 21    | 22    | 23    | 25    | 27    | 29    | 31    | 32    |
| 42                          | 457,6 | 458,6 | 459,2 | 459,8 | 460,3 | 460,6 | 460,9 | 461,2 | 461,4 | 461,6 | 461,8 |
|                             | 298,5 | 298,3 | 298,2 | 298,1 | 298,0 | 297,9 | 297,9 | 297,8 | 297,8 | 297,7 | 297,7 |
|                             | 15    | 16    | 18    | 21    | 22    | 23    | 25    | 27    | 29    | 31    | 32    |
| 45                          | 457,6 | 458,6 | 459,3 | 459,8 | 460,3 | 460,7 | 461,0 | 461,2 | 461,4 | 461,6 | 461,8 |
|                             | 298,5 | 298,3 | 298,2 | 298,1 | 298,0 | 297,9 | 297,8 | 297,8 | 297,8 | 297,7 | 297,7 |
|                             | 15    | 16    | 18    | 21    | 22    | 23    | 25    | 27    | 29    | 31    | 32    |
| 48                          | 457,6 | 458,6 | 459,3 | 459,8 | 460,3 | 460,7 | 461,0 | 461,3 | 461,5 | 461,7 | 461,8 |
|                             | 298,5 | 298,3 | 298,1 | 298,0 | 297,9 | 297,8 | 297,8 | 297,8 | 297,7 | 297,7 | 297,7 |
|                             | 15    | 16    | 19    | 21    | 23    | 24    | 26    | 27    | 30    | 32    | 33    |

Аналитическое решение

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| Температура поверхности | Температурный перепад |
| 464,8                   | 168,0                 |

Для  $R=0,2$  м

| $\frac{\Delta x}{\Delta r}$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 449,8 | 451,7 | 453,2 | 454,3 | 455,2 | 455,9 | 456,5 | 457,0 | 457,5 | 457,9 | 458,2 |
|                             | 176,3 | 178,2 | 179,7 | 180,9 | 181,8 | 182,5 | 183,1 | 183,6 | 184,1 | 184,5 | 184,8 |
|                             | 11    | 13    | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 29    | 32    |
| 21                          | 450,0 | 451,9 | 453,4 | 454,5 | 455,4 | 456,1 | 456,7 | 457,2 | 457,7 | 458,1 | 458,4 |
|                             | 176,5 | 178,4 | 180,0 | 181,1 | 182,0 | 182,7 | 183,3 | 183,8 | 184,3 | 184,7 | 185,0 |
|                             | 11    | 13    | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 29    | 32    |
| 24                          | 450,2 | 452,1 | 453,5 | 454,6 | 455,5 | 456,2 | 456,8 | 457,3 | 457,8 | 458,2 | 458,5 |
|                             | 176,7 | 178,7 | 180,1 | 181,2 | 182,1 | 182,8 | 183,4 | 183,9 | 184,4 | 184,8 | 185,1 |
|                             | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 32    |
| 27                          | 450,3 | 452,2 | 453,6 | 454,7 | 455,6 | 456,3 | 456,9 | 457,4 | 457,9 | 458,3 | 458,6 |
|                             | 176,8 | 178,8 | 180,2 | 181,3 | 182,2 | 182,9 | 183,5 | 184,0 | 184,5 | 184,9 | 185,2 |
|                             | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 32    |
| 30                          | 450,3 | 452,3 | 453,7 | 454,8 | 455,7 | 456,4 | 457,0 | 457,5 | 458,0 | 458,4 | 458,7 |
|                             | 176,9 | 178,9 | 180,3 | 181,4 | 182,3 | 183,0 | 183,6 | 184,1 | 184,6 | 185,0 | 185,3 |
|                             | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 32    |
| 33                          | 450,3 | 452,3 | 453,7 | 454,8 | 455,7 | 456,4 | 457,1 | 457,6 | 458,1 | 458,5 | 458,8 |
|                             | 176,9 | 178,9 | 180,3 | 181,4 | 182,3 | 183,0 | 183,7 | 184,2 | 184,7 | 185,2 | 185,5 |
|                             | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 32    |
| 36                          | 450,4 | 452,3 | 453,8 | 454,9 | 455,8 | 456,5 | 457,1 | 457,6 | 458,1 | 458,5 | 458,8 |
|                             | 177,0 | 178,9 | 180,4 | 181,6 | 182,5 | 183,2 | 183,8 | 184,3 | 184,8 | 185,2 | 185,5 |
|                             | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 32    |
| 39                          | 450,5 | 452,4 | 453,8 | 454,9 | 455,8 | 456,5 | 457,2 | 457,7 | 458,2 | 458,6 | 458,9 |
|                             | 177,1 | 179,0 | 180,5 | 181,6 | 182,5 | 183,2 | 183,9 | 184,4 | 184,9 | 185,3 | 185,6 |
|                             | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 32    |
| 42                          | 450,5 | 452,4 | 453,8 | 454,9 | 455,8 | 456,6 | 457,3 | 457,8 | 458,2 | 458,6 | 458,9 |
|                             | 177,1 | 179,0 | 180,5 | 181,6 | 182,5 | 183,3 | 184,0 | 184,5 | 184,9 | 185,3 | 185,6 |
|                             | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 32    |
| 45                          | 450,5 | 452,5 | 453,9 | 455,0 | 455,9 | 456,6 | 457,3 | 457,8 | 458,2 | 458,6 | 459,0 |
|                             | 177,1 | 179,1 | 180,6 | 181,7 | 182,6 | 183,3 | 184,0 | 184,5 | 184,9 | 185,3 | 185,7 |
|                             | 13    | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 29    | 31    | 33    |
| 48                          | 450,6 | 452,5 | 453,9 | 455,0 | 455,9 | 456,7 | 457,3 | 457,8 | 458,3 | 458,6 | 459,0 |
|                             | 177,2 | 179,1 | 180,6 | 181,7 | 182,6 | 183,4 | 184,0 | 184,5 | 185,0 | 185,3 | 185,7 |
|                             | 13    | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 29    | 31    | 33    |

### Аналитическое решение

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| Температура поверхности | Температурный перепад |
| 464,6                   | 191,4                 |

Для  $R=0,25 \text{ м}$

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 446,5 | 448,9 | 450,7 | 452,1 | 453,2 | 454,1 | 454,8 | 455,5 | 456,0 | 456,5 | 456,9 |
|                             | 173,5 | 175,9 | 177,7 | 179,1 | 180,2 | 181,1 | 181,8 | 182,5 | 183,0 | 183,5 | 183,9 |
|                             | 11    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 25    | 27    | 29    |
| 21                          | 446,7 | 449,1 | 450,9 | 452,3 | 453,4 | 454,3 | 455,0 | 455,7 | 456,2 | 456,7 | 457,1 |
|                             | 173,7 | 176,1 | 177,9 | 179,3 | 180,4 | 181,3 | 182,0 | 182,7 | 183,2 | 183,7 | 184,1 |
|                             | 11    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 25    | 27    | 29    |
| 24                          | 446,8 | 449,2 | 451,0 | 452,4 | 453,5 | 454,4 | 455,1 | 455,8 | 456,3 | 456,8 | 457,3 |
|                             | 173,8 | 176,2 | 178,0 | 179,4 | 180,5 | 181,4 | 182,1 | 182,8 | 183,3 | 183,8 | 184,3 |
|                             | 11    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 25    | 27    | 29    |
| 27                          | 446,9 | 449,3 | 451,1 | 452,5 | 453,6 | 454,5 | 455,3 | 456,0 | 456,5 | 456,9 | 457,4 |
|                             | 173,9 | 176,3 | 178,1 | 179,5 | 180,6 | 181,5 | 182,3 | 183,0 | 183,5 | 183,9 | 184,4 |
|                             | 11    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 25    | 27    | 29    |
| 30                          | 447,0 | 449,4 | 451,2 | 452,6 | 453,7 | 454,6 | 455,3 | 456,0 | 456,5 | 457,0 | 457,4 |
|                             | 174,0 | 176,4 | 178,2 | 179,6 | 180,7 | 181,6 | 182,3 | 183,0 | 183,5 | 184,0 | 184,4 |
|                             | 11    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 25    | 27    | 29    |
| 33                          | 447,1 | 449,4 | 451,2 | 452,6 | 453,7 | 454,6 | 455,4 | 456,1 | 456,6 | 457,1 | 457,5 |
|                             | 174,1 | 176,4 | 178,2 | 179,6 | 180,7 | 181,6 | 182,4 | 183,1 | 183,6 | 184,1 | 184,5 |
|                             | 11    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 25    | 27    | 29    |
| 36                          | 447,1 | 449,5 | 451,3 | 452,7 | 453,8 | 454,7 | 455,5 | 456,2 | 456,7 | 457,2 | 457,6 |
|                             | 174,1 | 176,5 | 178,3 | 179,7 | 180,8 | 181,7 | 182,5 | 183,2 | 183,7 | 184,2 | 184,6 |
|                             | 11    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 25    | 27    | 29    |
| 39                          | 447,1 | 449,5 | 451,3 | 452,7 | 453,8 | 454,7 | 455,5 | 456,2 | 456,7 | 457,2 | 457,6 |
|                             | 174,1 | 176,5 | 178,3 | 179,7 | 180,8 | 181,7 | 182,5 | 183,2 | 183,7 | 184,2 | 184,6 |
|                             | 11    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 25    | 27    | 29    |
| 42                          | 447,2 | 449,6 | 451,4 | 452,7 | 453,9 | 454,8 | 455,5 | 456,2 | 456,8 | 457,2 | 457,7 |
|                             | 174,2 | 176,6 | 178,4 | 179,7 | 180,9 | 181,8 | 182,5 | 183,2 | 183,8 | 184,2 | 184,7 |
|                             | 11    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 25    | 27    | 29    |
| 45                          | 447,2 | 449,6 | 451,4 | 452,8 | 453,9 | 454,8 | 455,6 | 456,3 | 456,8 | 457,3 | 457,7 |
|                             | 174,2 | 176,6 | 178,4 | 179,8 | 180,9 | 181,8 | 182,6 | 183,3 | 183,8 | 184,3 | 184,7 |
|                             | 11    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 25    | 27    | 29    |
| 48                          | 447,2 | 449,6 | 451,4 | 452,8 | 453,9 | 454,8 | 455,6 | 456,3 | 456,8 | 457,3 | 457,7 |
|                             | 174,2 | 176,6 | 178,4 | 179,8 | 180,9 | 181,8 | 182,6 | 183,3 | 183,8 | 184,3 | 184,7 |
|                             | 11    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 25    | 27    | 29    |

## Аналитическое решение

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| Температура поверхности | Температурный перепад |
| 464,86                  | 191,6                 |

## Приложение 29

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры поверхности пластины, температурного перепада ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ ) при  $\tau=500$  с. Для  $R=0,08$  м

Аналитическое решение

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 559,2 | 559,7 | 560,2 | 560,5 | 560,8 | 561,0 | 561,2 | 561,4 | 561,5 | 561,6 | 561,7 |
|                             | 143,2 | 144,2 | 145,0 | 145,6 | 146,1 | 146,5 | 146,8 | 147,1 | 147,3 | 147,5 | 147,7 |
|                             | 15    | 17    | 19    | 21    | 24    | 26    | 28    | 30    | 32    | 34    | 37    |
| 21                          | 559,8 | 560,3 | 560,8 | 561,1 | 561,4 | 561,6 | 561,8 | 562,0 | 562,1 | 562,2 | 562,3 |
|                             | 143,3 | 144,2 | 145,1 | 145,7 | 146,2 | 145,6 | 146,9 | 147,2 | 147,4 | 147,6 | 147,8 |
|                             | 18    | 20    | 23    | 25    | 28    | 30    | 33    | 35    | 38    | 40    | 43    |
| 24                          | 560,0 | 560,5 | 561,0 | 561,4 | 561,7 | 561,9 | 562,1 | 562,2 | 562,4 | 562,5 | 562,6 |
|                             | 143,2 | 144,2 | 145,1 | 145,7 | 146,2 | 145,6 | 147,0 | 147,2 | 147,5 | 147,7 | 147,8 |
|                             | 20    | 23    | 26    | 28    | 31    | 34    | 37    | 39    | 43    | 46    | 49    |
| 27                          | 560,1 | 560,7 | 561,1 | 561,5 | 561,8 | 562,0 | 562,2 | 562,3 | 562,5 | 562,6 | 562,7 |
|                             | 143,2 | 144,3 | 145,0 | 145,7 | 146,2 | 145,6 | 147,0 | 147,2 | 147,5 | 147,7 | 147,9 |
|                             | 23    | 26    | 28    | 32    | 35    | 38    | 42    | 45    | 48    | 51    | 55    |
| 30                          | 560,2 | 560,8 | 561,2 | 561,5 | 561,8 | 562,0 | 562,2 | 562,4 | 562,5 | 562,7 | 562,8 |
|                             | 143,4 | 144,5 | 145,2 | 145,7 | 146,2 | 145,6 | 146,9 | 147,3 | 147,5 | 147,8 | 147,9 |
|                             | 23    | 28    | 31    | 35    | 39    | 43    | 47    | 50    | 54    | 57    | 61    |
| 33                          | 560,2 | 560,7 | 561,2 | 561,5 | 561,8 | 562,0 | 562,2 | 562,4 | 562,5 | 562,7 | 562,8 |
|                             | 143,4 | 144,3 | 145,2 | 145,7 | 146,2 | 145,6 | 146,9 | 147,3 | 147,5 | 147,8 | 147,9 |
|                             | 24    | 28    | 33    | 37    | 41    | 45    | 49    | 52    | 56    | 59    | 64    |
| 36                          | 560,2 | 560,7 | 561,2 | 561,5 | 561,8 | 562,1 | 562,2 | 562,4 | 562,5 | 562,7 | 562,8 |
|                             | 143,4 | 144,3 | 145,2 | 145,7 | 146,3 | 145,7 | 147,0 | 147,3 | 147,5 | 147,8 | 147,9 |
|                             | 24    | 28    | 33    | 37    | 41    | 45    | 49    | 52    | 56    | 59    | 64    |
| 39                          | 560,2 | 560,7 | 561,2 | 561,5 | 561,8 | 562,1 | 562,2 | 562,4 | 562,5 | 562,7 | 562,8 |
|                             | 143,4 | 144,3 | 145,2 | 145,8 | 146,3 | 145,7 | 147,0 | 147,3 | 147,5 | 147,8 | 148,0 |
|                             | 24    | 28    | 33    | 37    | 41    | 45    | 50    | 52    | 57    | 60    | 65    |
| 42                          | 560,2 | 560,7 | 561,2 | 561,5 | 561,8 | 562,1 | 562,2 | 562,4 | 562,6 | 562,7 | 562,8 |
|                             | 143,4 | 144,4 | 145,2 | 145,8 | 146,3 | 145,7 | 147,0 | 147,3 | 147,6 | 147,8 | 148,0 |
|                             | 25    | 28    | 33    | 37    | 41    | 45    | 50    | 52    | 57    | 60    | 65    |
| 45                          | 560,2 | 560,7 | 561,2 | 561,5 | 561,8 | 562,1 | 562,2 | 562,4 | 562,6 | 562,7 | 562,8 |
|                             | 143,4 | 144,4 | 145,2 | 145,8 | 146,3 | 145,7 | 147,0 | 147,3 | 147,6 | 147,8 | 148,0 |
|                             | 25    | 28    | 33    | 37    | 41    | 45    | 50    | 52    | 57    | 60    | 65    |
| 48                          | 560,2 | 560,7 | 561,2 | 561,5 | 561,8 | 562,1 | 562,2 | 562,4 | 562,6 | 562,7 | 562,8 |
|                             | 143,4 | 144,4 | 145,2 | 145,8 | 146,3 | 145,7 | 147,0 | 147,3 | 147,6 | 147,8 | 148,0 |
|                             | 25    | 28    | 33    | 37    | 41    | 45    | 50    | 52    | 57    | 60    | 65    |

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| Температура поверхности | Температурный перепад |
| 564,5                   | 150,8                 |

Для  $R=0,1 \text{ м}$

| $\frac{\Delta x}{\Delta r}$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 542,6 | 543,4 | 544,1 | 544,6 | 545,0 | 545,3 | 545,6 | 545,8 | 546,0 | 546,2 | 546,4 |
|                             | 175,8 | 177,1 | 178,0 | 178,7 | 179,3 | 179,8 | 180,2 | 180,5 | 180,8 | 181,1 | 181,3 |
|                             | 16    | 19    | 22    | 23    | 25    | 27    | 29    | 31    | 33    | 35    | 37    |
| 21                          | 543,1 | 543,9 | 544,6 | 545,1 | 545,6 | 545,9 | 546,2 | 546,4 | 546,6 | 546,8 | 546,9 |
|                             | 175,9 | 177,2 | 178,1 | 178,8 | 179,6 | 180,0 | 180,4 | 180,7 | 181,0 | 181,3 | 181,5 |
|                             | 18    | 21    | 24    | 26    | 28    | 30    | 32    | 34    | 37    | 40    | 43    |
| 24                          | 543,4 | 544,3 | 544,9 | 545,5 | 545,8 | 546,1 | 546,4 | 546,7 | 546,9 | 547,1 | 547,2 |
|                             | 176,1 | 177,5 | 178,3 | 179,1 | 179,6 | 180,0 | 180,5 | 180,9 | 181,2 | 181,5 | 181,7 |
|                             | 20    | 23    | 26    | 27    | 31    | 34    | 38    | 41    | 44    | 47    | 50    |
| 27                          | 543,5 | 544,4 | 545,0 | 545,6 | 546,0 | 546,3 | 546,6 | 546,8 | 547,0 | 547,2 | 547,3 |
|                             | 176,2 | 177,5 | 178,4 | 179,2 | 179,8 | 180,3 | 180,7 | 181,0 | 181,3 | 181,6 | 181,7 |
|                             | 23    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 46    | 50    | 53    | 56    |
| 30                          | 543,6 | 544,4 | 545,1 | 545,6 | 546,0 | 546,3 | 546,6 | 546,9 | 547,1 | 547,3 | 547,4 |
|                             | 176,3 | 177,5 | 178,5 | 179,2 | 179,8 | 180,3 | 180,7 | 181,1 | 181,4 | 181,7 | 181,8 |
|                             | 25    | 29    | 33    | 36    | 39    | 42    | 46    | 50    | 54    | 58    | 62    |
| 33                          | 543,6 | 544,5 | 545,1 | 545,6 | 546,1 | 546,4 | 546,7 | 546,9 | 547,1 | 547,3 | 547,5 |
|                             | 176,4 | 177,7 | 178,6 | 179,3 | 180,0 | 180,5 | 180,9 | 181,2 | 181,4 | 181,7 | 182,0 |
|                             | 26    | 29    | 32    | 36    | 40    | 45    | 49    | 53    | 57    | 62    | 67    |
| 36                          | 543,6 | 544,5 | 545,2 | 545,7 | 546,1 | 546,4 | 546,7 | 546,9 | 547,1 | 547,3 | 547,5 |
|                             | 176,4 | 177,7 | 178,7 | 179,4 | 180,0 | 180,5 | 180,9 | 181,2 | 181,5 | 181,8 | 182,0 |
|                             | 28    | 32    | 36    | 40    | 44    | 47    | 51    | 55    | 58    | 63    | 68    |
| 39                          | 543,6 | 544,5 | 545,2 | 545,7 | 546,1 | 546,4 | 546,7 | 547,0 | 547,2 | 547,3 | 547,5 |
|                             | 176,4 | 177,7 | 178,7 | 179,4 | 180,0 | 180,5 | 180,9 | 181,3 | 181,6 | 181,8 | 182,0 |
|                             | 30    | 33    | 38    | 43    | 46    | 49    | 53    | 57    | 60    | 65    | 69    |
| 42                          | 543,6 | 544,5 | 545,2 | 545,7 | 546,1 | 546,5 | 546,8 | 547,0 | 547,2 | 547,3 | 547,5 |
|                             | 176,5 | 177,8 | 178,8 | 179,4 | 180,0 | 180,6 | 181,0 | 181,3 | 181,6 | 181,8 | 182,1 |
|                             | 32    | 34    | 39    | 44    | 47    | 50    | 54    | 58    | 62    | 67    | 70    |
| 45                          | 543,7 | 544,5 | 545,2 | 545,7 | 546,1 | 546,5 | 546,8 | 547,0 | 547,2 | 547,3 | 547,5 |
|                             | 176,6 | 177,8 | 178,8 | 179,4 | 180,0 | 180,7 | 181,1 | 181,4 | 181,6 | 181,8 | 182,1 |
|                             | 34    | 36    | 41    | 45    | 48    | 51    | 55    | 59    | 64    | 69    | 72    |
| 48                          | 543,7 | 544,6 | 545,2 | 545,7 | 546,1 | 546,5 | 546,8 | 547,0 | 547,2 | 547,4 | 547,6 |
|                             | 176,5 | 177,9 | 178,8 | 179,4 | 180,0 | 180,7 | 181,1 | 181,4 | 181,7 | 181,9 | 182,2 |
|                             | 36    | 38    | 43    | 47    | 51    | 56    | 60    | 64    | 69    | 72    | 73    |

Аналитическое решение

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| Температура поверхности | Температурный перепад |
| 550,2                   | 186,0                 |

Для  $R=0,2 \text{ м}$

| $\frac{\Delta x}{\Delta r}$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 528,1 | 530,0 | 531,4 | 532,5 | 533,4 | 534,1 | 534,7 | 535,3 | 535,7 | 536,1 | 536,4 |
|                             | 247,1 | 249,2 | 250,7 | 251,8 | 252,8 | 253,5 | 254,2 | 254,8 | 255,2 | 255,6 | 255,9 |
|                             | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 27    | 29    | 32    | 34    | 36    | 38    |
| 21                          | 528,7 | 530,6 | 532,0 | 533,1 | 534,0 | 534,7 | 535,4 | 535,9 | 536,3 | 536,7 | 537,0 |
|                             | 247,8 | 249,8 | 251,3 | 252,5 | 253,4 | 254,1 | 254,9 | 255,4 | 255,9 | 256,3 | 256,6 |
|                             | 20    | 22    | 25    | 27    | 29    | 32    | 35    | 38    | 40    | 43    | 45    |
| 24                          | 529,0 | 530,9 | 532,4 | 533,5 | 534,4 | 535,1 | 535,7 | 536,2 | 536,7 | 537,1 | 537,4 |
|                             | 248,2 | 250,2 | 251,8 | 253,0 | 253,9 | 254,7 | 255,3 | 255,8 | 256,4 | 256,8 | 257,1 |
|                             | 20    | 22    | 25    | 27    | 29    | 32    | 35    | 38    | 40    | 43    | 45    |
| 27                          | 529,2 | 531,1 | 532,6 | 533,7 | 534,6 | 535,3 | 535,9 | 536,4 | 536,9 | 537,3 | 537,6 |
|                             | 248,5 | 250,5 | 252,1 | 253,2 | 254,2 | 254,9 | 255,6 | 256,1 | 256,6 | 257,1 | 257,4 |
|                             | 22    | 25    | 28    | 32    | 35    | 39    | 42    | 45    | 48    | 51    | 53    |
| 30                          | 529,3 | 531,3 | 532,7 | 533,8 | 534,7 | 535,4 | 536,1 | 536,6 | 537,0 | 537,4 | 537,7 |
|                             | 248,6 | 250,8 | 252,3 | 253,4 | 254,4 | 255,1 | 255,9 | 256,4 | 256,8 | 257,2 | 257,5 |
|                             | 22    | 25    | 28    | 32    | 36    | 40    | 43    | 47    | 50    | 53    | 55    |
| 33                          | 529,4 | 531,4 | 532,8 | 533,9 | 534,8 | 535,5 | 536,2 | 536,7 | 537,1 | 537,5 | 537,8 |
|                             | 248,8 | 250,9 | 252,4 | 253,6 | 254,6 | 255,3 | 256,0 | 256,6 | 257,0 | 257,4 | 257,7 |
|                             | 23    | 26    | 29    | 33    | 37    | 41    | 45    | 49    | 52    | 55    | 57    |
| 36                          | 529,5 | 531,4 | 532,9 | 534,0 | 534,9 | 535,6 | 536,2 | 536,8 | 537,2 | 537,6 | 537,9 |
|                             | 249,0 | 251,0 | 252,6 | 253,8 | 254,7 | 255,4 | 256,1 | 256,7 | 257,1 | 257,6 | 257,9 |
|                             | 23    | 26    | 29    | 33    | 37    | 41    | 45    | 49    | 52    | 55    | 57    |
| 39                          | 529,6 | 531,5 | 532,9 | 534,1 | 535,0 | 535,7 | 536,3 | 536,9 | 537,3 | 537,7 | 538,0 |
|                             | 249,1 | 251,1 | 252,6 | 253,9 | 254,9 | 255,6 | 256,2 | 256,9 | 257,3 | 257,7 | 258,0 |
|                             | 23    | 26    | 29    | 33    | 37    | 41    | 45    | 49    | 52    | 55    | 57    |
| 42                          | 529,6 | 531,5 | 533,0 | 534,1 | 535,0 | 535,8 | 536,4 | 536,9 | 537,3 | 537,7 | 538,1 |
|                             | 249,2 | 251,2 | 252,8 | 253,9 | 254,9 | 255,7 | 256,4 | 256,9 | 257,3 | 257,7 | 258,1 |
|                             | 23    | 26    | 29    | 33    | 37    | 41    | 45    | 49    | 52    | 55    | 57    |
| 45                          | 529,7 | 531,6 | 533,0 | 534,1 | 535,1 | 535,8 | 536,4 | 537,0 | 537,4 | 537,8 | 538,1 |
|                             | 249,3 | 251,3 | 252,8 | 254,0 | 255,0 | 255,8 | 256,4 | 257,0 | 257,5 | 257,9 | 258,2 |
|                             | 23    | 26    | 29    | 33    | 37    | 41    | 45    | 49    | 52    | 55    | 57    |
| 48                          | 529,7 | 531,6 | 533,1 | 534,2 | 535,1 | 535,8 | 536,5 | 537,0 | 537,4 | 537,8 | 538,1 |
|                             | 249,3 | 252,4 | 252,9 | 254,1 | 255,1 | 255,8 | 256,5 | 257,1 | 257,5 | 257,9 | 258,2 |
|                             | 23    | 26    | 29    | 33    | 37    | 41    | 45    | 49    | 52    | 55    | 57    |

Аналитическое решение

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| Температура поверхности | Температурный перепад |
| 534,9                   | 264,7                 |

Для  $R=0,25 \text{ м}$

| $\Delta x$<br>$\Delta r$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                       | 524,7 | 527,1 | 528,9 | 530,3 | 531,4 | 532,3 | 533,1 | 533,7 | 534,3 | 534,7 | 535,1 |
|                          | 249,8 | 252,3 | 254,1 | 255,6 | 256,7 | 257,6 | 258,4 | 259,0 | 259,6 | 260,0 | 260,5 |
|                          | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    | 30    | 33    | 35    | 38    |
| 21                       | 525,4 | 527,7 | 529,5 | 530,9 | 532,0 | 532,9 | 533,7 | 534,3 | 534,9 | 535,4 | 535,8 |
|                          | 250,6 | 252,9 | 254,8 | 256,2 | 257,3 | 258,2 | 259,1 | 259,7 | 260,3 | 260,8 | 261,2 |
|                          | 18    | 21    | 23    | 25    | 28    | 30    | 33    | 35    | 38    | 40    | 43    |
| 24                       | 525,7 | 528,1 | 529,9 | 531,3 | 532,4 | 533,3 | 534,1 | 534,7 | 535,2 | 535,7 | 536,1 |
|                          | 250,9 | 253,4 | 255,2 | 256,7 | 257,8 | 258,7 | 259,5 | 260,1 | 260,6 | 261,1 | 261,5 |
|                          | 20    | 23    | 26    | 29    | 31    | 34    | 37    | 40    | 43    | 46    | 49    |
| 27                       | 525,9 | 528,3 | 530,1 | 531,5 | 532,6 | 533,5 | 534,3 | 534,9 | 535,4 | 535,9 | 536,3 |
|                          | 251,2 | 253,6 | 255,5 | 256,9 | 258,0 | 258,9 | 259,7 | 260,4 | 260,9 | 261,4 | 261,8 |
|                          | 22    | 25    | 29    | 32    | 35    | 38    | 41    | 45    | 48    | 52    | 55    |
| 30                       | 526,0 | 528,4 | 530,2 | 531,6 | 532,7 | 533,6 | 534,4 | 535,0 | 535,6 | 536,1 | 536,5 |
|                          | 251,3 | 253,8 | 255,6 | 257,0 | 258,1 | 259,1 | 259,9 | 260,5 | 261,1 | 261,6 | 262,0 |
|                          | 22    | 25    | 29    | 32    | 35    | 39    | 42    | 46    | 50    | 54    | 57    |
| 33                       | 526,1 | 528,5 | 530,3 | 531,7 | 532,8 | 533,7 | 534,5 | 535,1 | 535,7 | 536,2 | 536,6 |
|                          | 251,4 | 253,9 | 255,7 | 257,2 | 258,3 | 259,2 | 260,0 | 260,6 | 261,2 | 261,7 | 262,1 |
|                          | 22    | 25    | 29    | 32    | 36    | 40    | 43    | 47    | 51    | 55    | 58    |
| 36                       | 526,2 | 528,6 | 530,4 | 531,8 | 532,9 | 533,8 | 534,6 | 535,2 | 535,8 | 536,2 | 536,7 |
|                          | 251,6 | 254,0 | 255,9 | 257,3 | 258,4 | 259,3 | 260,1 | 260,7 | 261,3 | 261,8 | 262,3 |
|                          | 22    | 25    | 29    | 32    | 36    | 40    | 43    | 47    | 51    | 55    | 58    |
| 39                       | 526,2 | 528,6 | 530,4 | 531,8 | 532,9 | 533,9 | 534,6 | 535,2 | 535,8 | 536,3 | 536,7 |
|                          | 251,6 | 254,1 | 255,9 | 257,3 | 258,4 | 259,4 | 260,2 | 260,8 | 261,4 | 261,9 | 262,3 |
|                          | 22    | 25    | 29    | 32    | 36    | 40    | 43    | 47    | 51    | 55    | 58    |
| 42                       | 526,3 | 528,7 | 530,5 | 531,9 | 533,0 | 533,9 | 534,7 | 535,3 | 535,9 | 536,4 | 536,8 |
|                          | 251,7 | 254,2 | 256,0 | 257,4 | 258,5 | 259,4 | 260,3 | 260,9 | 261,5 | 262,0 | 262,4 |
|                          | 22    | 25    | 29    | 32    | 36    | 40    | 43    | 47    | 51    | 55    | 58    |
| 45                       | 526,3 | 528,7 | 530,5 | 531,9 | 533,0 | 534,0 | 534,7 | 535,3 | 535,9 | 536,4 | 536,8 |
|                          | 251,7 | 254,2 | 256,0 | 257,4 | 258,5 | 259,6 | 260,3 | 260,9 | 261,5 | 262,0 | 262,4 |
|                          | 22    | 25    | 29    | 32    | 36    | 40    | 43    | 47    | 51    | 55    | 58    |
| 48                       | 526,4 | 528,8 | 530,6 | 532,0 | 533,1 | 534,0 | 534,8 | 535,4 | 536,0 | 536,5 | 536,9 |
|                          | 251,8 | 254,3 | 256,1 | 257,6 | 258,7 | 259,6 | 260,4 | 261,0 | 261,6 | 262,1 | 262,5 |
|                          | 22    | 25    | 29    | 32    | 36    | 40    | 43    | 47    | 51    | 55    | 58    |

Аналитическое решение

| Температура поверхности | Температурный перепад |
|-------------------------|-----------------------|
| 543,9                   | 269,8                 |

## Приложение 30

Влияние шага по пространству и по времени на значение температуры поверхности пластины, температурного перепада ( $K$ ) и время выполнения задачи ( $c$ ) при  $\tau=1500$  с.

Для  $R=0,08$  м

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 849,0 | 849,1 | 849,1 | 849,1 | 849,2 | 849,2 | 849,2 | 849,2 | 849,3 | 849,3 | 849,3 |
|                             | 143,7 | 144,8 | 145,5 | 146,1 | 146,7 | 147,0 | 147,3 | 147,6 | 147,9 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 15    | 17    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 30    | 33    | 35    | 37    |
| 21                          | 874,0 | 874,0 | 874,0 | 874,0 | 874,0 | 874,0 | 874,0 | 874,1 | 874,1 | 874,1 | 874,1 |
|                             | 143,7 | 144,6 | 145,5 | 146,1 | 146,6 | 147,0 | 147,3 | 147,6 | 147,9 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 18    | 20    | 23    | 25    | 28    | 30    | 32    | 34    | 37    | 39    | 41    |
| 24                          | 892,6 | 892,6 | 892,5 | 892,5 | 892,5 | 892,5 | 892,5 | 892,5 | 892,5 | 892,5 | 892,5 |
|                             | 143,7 | 144,8 | 145,5 | 146,1 | 146,6 | 147,0 | 147,3 | 147,6 | 147,9 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 20    | 23    | 25    | 28    | 31    | 34    | 36    | 38    | 42    | 44    | 47    |
| 27                          | 906,4 | 906,4 | 906,3 | 906,3 | 906,3 | 906,3 | 906,3 | 906,3 | 906,3 | 906,3 | 906,3 |
|                             | 143,6 | 144,8 | 145,5 | 146,1 | 146,6 | 147,0 | 147,4 | 147,7 | 147,9 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 23    | 26    | 28    | 32    | 35    | 38    | 41    | 43    | 47    | 49    | 53    |
| 30                          | 916,7 | 916,7 | 916,6 | 916,6 | 916,6 | 916,5 | 916,5 | 916,5 | 916,5 | 916,5 | 916,5 |
|                             | 143,6 | 144,8 | 145,5 | 146,1 | 146,7 | 147,0 | 147,3 | 147,6 | 147,9 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 25    | 29    | 32    | 36    | 39    | 42    | 46    | 49    | 53    | 55    | 59    |
| 33                          | 924,4 | 924,3 | 924,3 | 924,2 | 924,2 | 924,2 | 924,2 | 924,1 | 924,1 | 924,1 | 924,1 |
|                             | 143,7 | 144,7 | 145,6 | 146,1 | 146,6 | 147,0 | 147,4 | 147,6 | 147,9 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 28    | 32    | 36    | 40    | 43    | 47    | 51    | 54    | 58    | 61    | 65    |
| 36                          | 930,1 | 930,0 | 930,0 | 929,9 | 929,9 | 929,9 | 929,8 | 929,8 | 929,8 | 929,8 | 929,8 |
|                             | 143,6 | 144,5 | 145,5 | 146,1 | 146,6 | 147,1 | 147,3 | 147,6 | 147,9 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 30    | 34    | 38    | 43    | 47    | 52    | 55    | 59    | 63    | 67    | 72    |
| 39                          | 934,4 | 934,3 | 934,2 | 934,2 | 934,1 | 934,1 | 934,1 | 934,1 | 934,0 | 934,0 | 934,0 |
|                             | 143,7 | 144,7 | 145,5 | 146,2 | 146,6 | 147,0 | 147,4 | 147,7 | 147,8 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 33    | 37    | 42    | 47    | 51    | 56    | 60    | 64    | 69    | 74    | 79    |
| 42                          | 937,6 | 937,5 | 937,4 | 937,4 | 937,3 | 937,3 | 937,3 | 937,2 | 937,2 | 937,2 | 937,2 |
|                             | 143,7 | 144,7 | 145,5 | 146,2 | 146,6 | 147,0 | 147,4 | 147,8 | 147,9 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 36    | 40    | 45    | 50    | 55    | 60    | 65    | 70    | 75    | 80    | 86    |
| 45                          | 940,0 | 939,9 | 939,8 | 939,7 | 939,7 | 939,7 | 939,6 | 939,6 | 939,6 | 939,6 | 939,5 |
|                             | 143,7 | 144,8 | 145,5 | 146,1 | 146,6 | 147,1 | 147,3 | 147,6 | 147,9 | 148,1 | 148,2 |
|                             | 39    | 43    | 48    | 54    | 59    | 65    | 70    | 75    | 81    | 86    | 93    |
| 48                          | 941,8 | 941,6 | 941,6 | 941,5 | 941,5 | 941,4 | 941,4 | 941,4 | 941,3 | 941,3 | 941,3 |
|                             | 143,7 | 144,7 | 145,6 | 146,1 | 146,7 | 147,0 | 147,4 | 147,7 | 147,9 | 148,1 | 148,3 |
|                             | 41    | 46    | 52    | 58    | 63    | 69    | 75    | 80    | 86    | 92    | 99    |

Аналитическое решение

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| Температура поверхности | Температурный перепад |
| 946,4                   | 151,0                 |

Для  $R=0,1 \text{ м}$

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 776,2 | 776,6 | 777,0 | 777,3 | 777,5 | 777,7 | 777,8 | 777,9 | 778,1 | 778,2 | 778,2 |
|                             | 179,6 | 180,8 | 181,9 | 182,7 | 183,3 | 183,8 | 184,1 | 184,5 | 184,9 | 185,1 | 185,3 |
|                             | 16    | 19    | 21    | 23    | 25    | 27    | 29    | 31    | 33    | 35    | 37    |
| 21                          | 796,2 | 796,6 | 796,9 | 797,2 | 797,4 | 797,6 | 797,7 | 797,7 | 797,7 | 798,0 | 798,1 |
|                             | 179,6 | 180,9 | 181,9 | 182,7 | 183,3 | 183,8 | 184,2 | 184,4 | 184,6 | 185,1 | 185,3 |
|                             | 18    | 20    | 22    | 25    | 28    | 30    | 32    | 35    | 38    | 40    | 43    |
| 24                          | 811,0 | 811,4 | 811,7 | 812,0 | 812,2 | 812,4 | 812,5 | 812,6 | 812,7 | 812,7 | 812,8 |
|                             | 179,6 | 180,8 | 181,8 | 182,7 | 183,3 | 183,8 | 184,2 | 184,6 | 184,9 | 185,1 | 185,3 |
|                             | 20    | 23    | 26    | 28    | 32    | 35    | 38    | 41    | 44    | 46    | 49    |
| 27                          | 822,1 | 822,5 | 822,8 | 823,0 | 823,2 | 823,4 | 823,5 | 823,6 | 823,7 | 823,7 | 823,8 |
|                             | 179,6 | 180,9 | 181,9 | 182,6 | 183,3 | 183,8 | 184,2 | 184,6 | 184,9 | 185,1 | 185,3 |
|                             | 23    | 27    | 30    | 33    | 36    | 40    | 44    | 46    | 48    | 52    | 55    |
| 30                          | 830,4 | 830,7 | 831,0 | 831,2 | 831,4 | 831,6 | 831,7 | 831,8 | 831,9 | 831,9 | 832,0 |
|                             | 179,6 | 180,9 | 181,9 | 182,6 | 183,3 | 183,8 | 184,2 | 184,6 | 184,9 | 185,1 | 185,3 |
|                             | 26    | 30    | 34    | 38    | 42    | 45    | 48    | 52    | 56    | 58    | 61    |
| 33                          | 836,5 | 836,9 | 837,1 | 837,3 | 837,5 | 837,7 | 837,8 | 837,9 | 838,0 | 838,0 | 838,1 |
|                             | 179,6 | 180,9 | 181,8 | 182,5 | 183,3 | 183,8 | 184,2 | 184,6 | 184,9 | 185,1 | 185,3 |
|                             | 29    | 33    | 36    | 41    | 46    | 50    | 54    | 57    | 60    | 65    | 70    |
| 36                          | 841,1 | 841,4 | 841,7 | 841,9 | 842,1 | 842,2 | 842,3 | 842,4 | 842,5 | 842,5 | 842,6 |
|                             | 179,6 | 180,9 | 181,9 | 182,6 | 183,3 | 183,8 | 184,2 | 184,5 | 184,8 | 185,0 | 185,3 |
|                             | 31    | 35    | 41    | 46    | 51    | 55    | 59    | 63    | 67    | 72    | 77    |
| 39                          | 844,5 | 844,8 | 845,1 | 845,3 | 845,5 | 845,6 | 845,7 | 845,8 | 845,9 | 845,9 | 846,0 |
|                             | 179,6 | 180,8 | 181,9 | 182,6 | 183,3 | 183,8 | 184,2 | 184,5 | 184,8 | 185,0 | 185,3 |
|                             | 37    | 42    | 47    | 51    | 55    | 59    | 63    | 68    | 73    | 78    | 83    |
| 42                          | 847,1 | 847,4 | 847,6 | 847,8 | 848,0 | 848,2 | 848,3 | 848,3 | 848,4 | 848,5 | 848,6 |
|                             | 179,6 | 180,9 | 181,8 | 182,6 | 183,3 | 183,8 | 184,2 | 184,5 | 184,8 | 185,1 | 185,4 |
|                             | 39    | 44    | 49    | 53    | 57    | 63    | 68    | 73    | 78    | 85    | 91    |
| 45                          | 849,0 | 849,3 | 849,5 | 849,7 | 849,9 | 850,1 | 850,2 | 850,2 | 850,3 | 850,4 | 850,5 |
|                             | 179,6 | 180,9 | 181,8 | 182,6 | 183,3 | 183,8 | 184,2 | 184,5 | 184,8 | 185,1 | 185,4 |
|                             | 41    | 46    | 51    | 56    | 60    | 66    | 72    | 77    | 83    | 89    | 96    |
| 48                          | 850,4 | 850,7 | 851,0 | 851,2 | 851,3 | 851,5 | 851,6 | 851,6 | 851,7 | 851,8 | 851,9 |
|                             | 179,6 | 180,9 | 181,9 | 182,6 | 183,2 | 183,7 | 184,2 | 184,5 | 184,8 | 185,1 | 185,4 |
|                             | 43    | 48    | 53    | 58    | 62    | 68    | 74    | 79    | 85    | 91    | 99    |

Аналитическое решение

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| Температура поверхности | Температурный перепад |
| 857,0                   | 188,8                 |

Для  $R=0,2 \text{ м}$

| $\frac{\Delta x}{\Delta r}$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 687,9 | 689,8 | 691,2 | 692,3 | 693,2 | 693,9 | 694,5 | 695,0 | 695,4 | 695,8 | 696,1 |
|                             | 334,8 | 335,5 | 337,3 | 338,7 | 339,8 | 340,7 | 341,5 | 342,1 | 342,6 | 343,1 | 343,5 |
|                             | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 27    | 29    | 32    | 34    | 36    | 38    |
| 21                          | 699,5 | 701,3 | 702,7 | 703,8 | 704,7 | 705,4 | 706,0 | 706,5 | 706,9 | 707,3 | 707,7 |
|                             | 336,2 | 338,6 | 340,4 | 341,8 | 343,0 | 343,9 | 344,6 | 345,3 | 345,8 | 346,3 | 346,8 |
|                             | 19    | 21    | 24    | 27    | 29    | 31    | 33    | 35    | 38    | 41    | 43    |
| 24                          | 708,0 | 709,8 | 711,2 | 712,3 | 713,2 | 713,9 | 714,5 | 715,0 | 715,4 | 715,8 | 716,1 |
|                             | 338,3 | 340,7 | 342,5 | 344,0 | 345,1 | 346,0 | 346,8 | 347,4 | 348,0 | 348,5 | 348,9 |
|                             | 22    | 24    | 27    | 31    | 33    | 35    | 38    | 40    | 43    | 46    | 48    |
| 27                          | 714,2 | 716,1 | 717,5 | 718,5 | 719,4 | 720,1 | 720,7 | 721,2 | 721,6 | 722,0 | 722,3 |
|                             | 339,7 | 342,2 | 344,1 | 345,4 | 346,5 | 347,5 | 348,3 | 348,9 | 349,4 | 349,9 | 350,3 |
|                             | 25    | 27    | 31    | 34    | 37    | 39    | 42    | 45    | 48    | 51    | 53    |
| 30                          | 718,9 | 720,7 | 722,1 | 723,2 | 724,0 | 724,8 | 725,3 | 725,8 | 726,3 | 726,7 | 727,0 |
|                             | 340,8 | 343,2 | 345,1 | 346,5 | 347,6 | 348,6 | 349,3 | 349,9 | 350,6 | 351,1 | 351,5 |
|                             | 27    | 29    | 33    | 36    | 40    | 43    | 45    | 48    | 52    | 55    | 59    |
| 33                          | 722,3 | 724,2 | 725,5 | 726,6 | 727,5 | 728,2 | 728,8 | 729,3 | 729,7 | 730,1 | 730,4 |
|                             | 341,5 | 344,0 | 345,8 | 347,2 | 348,4 | 349,3 | 350,1 | 350,8 | 351,3 | 351,8 | 352,2 |
|                             | 29    | 32    | 36    | 40    | 44    | 48    | 52    | 56    | 60    | 64    | 67    |
| 36                          | 724,9 | 726,7 | 728,1 | 729,2 | 730,1 | 730,8 | 731,4 | 731,9 | 732,3 | 732,7 | 733,0 |
|                             | 342,1 | 344,5 | 346,4 | 347,8 | 349,0 | 349,9 | 350,7 | 351,4 | 351,9 | 352,4 | 352,8 |
|                             | 30    | 34    | 39    | 44    | 48    | 52    | 56    | 60    | 65    | 70    | 74    |
| 39                          | 726,8 | 728,7 | 730,0 | 731,1 | 732,0 | 732,7 | 733,3 | 733,8 | 734,2 | 734,6 | 734,9 |
|                             | 342,5 | 345,1 | 346,8 | 348,3 | 349,4 | 350,4 | 351,2 | 351,8 | 352,4 | 352,9 | 353,3 |
|                             | 33    | 38    | 42    | 46    | 51    | 56    | 61    | 65    | 70    | 74    | 79    |
| 42                          | 728,3 | 730,1 | 731,5 | 732,6 | 733,4 | 734,1 | 734,7 | 735,2 | 735,6 | 736,0 | 736,3 |
|                             | 342,9 | 345,4 | 347,2 | 348,7 | 349,7 | 350,7 | 351,5 | 352,1 | 352,7 | 353,2 | 353,6 |
|                             | 36    | 41    | 46    | 52    | 57    | 62    | 67    | 72    | 77    | 82    | 87    |
| 45                          | 729,3 | 731,2 | 732,6 | 733,6 | 734,5 | 735,2 | 735,8 | 736,3 | 736,7 | 737,1 | 737,4 |
|                             | 343,1 | 345,6 | 347,5 | 348,8 | 350,0 | 351,0 | 351,7 | 352,3 | 352,9 | 353,4 | 353,8 |
|                             | 40    | 44    | 49    | 55    | 60    | 67    | 73    | 78    | 83    | 88    | 93    |
| 48                          | 730,2 | 732,0 | 733,4 | 734,5 | 735,3 | 736,0 | 736,6 | 737,1 | 737,5 | 737,9 | 738,2 |
|                             | 343,4 | 345,8 | 347,7 | 349,1 | 350,2 | 351,2 | 351,9 | 353,6 | 353,1 | 353,6 | 354,0 |
|                             | 42    | 47    | 53    | 59    | 65    | 72    | 79    | 84    | 89    | 95    | 100   |

Аналитическое решение

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| Температура поверхности | Температурный перепад |
| 746,1                   | 383,9                 |

Для  $R=0,25 \text{ м}$

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                          | 682,6 | 685,0 | 686,8 | 688,2 | 689,3 | 690,2 | 690,9 | 691,6 | 692,1 | 692,6 | 693,0 |
|                             | 372,1 | 374,9 | 376,9 | 378,5 | 379,8 | 380,8 | 381,6 | 382,4 | 383,0 | 383,6 | 384,0 |
|                             | 16    | 18    | 21    | 23    | 25    | 27    | 29    | 31    | 33    | 36    | 38    |
| 21                          | 693,7 | 696,0 | 697,8 | 699,2 | 700,3 | 701,2 | 702,0 | 702,6 | 703,2 | 703,7 | 704,1 |
|                             | 378,2 | 380,9 | 383,0 | 384,6 | 385,9 | 386,9 | 387,8 | 388,5 | 389,2 | 389,8 | 390,2 |
|                             | 19    | 21    | 24    | 26    | 29    | 31    | 33    | 36    | 39    | 42    | 44    |
| 24                          | 701,8 | 704,1 | 705,9 | 707,3 | 708,4 | 709,3 | 710,1 | 710,7 | 711,3 | 711,8 | 712,2 |
|                             | 382,4 | 385,1 | 387,2 | 388,9 | 390,2 | 391,2 | 392,1 | 392,8 | 383,5 | 394,1 | 394,5 |
|                             | 21    | 24    | 27    | 29    | 33    | 36    | 38    | 42    | 45    | 48    | 50    |
| 27                          | 707,7 | 710,1 | 711,9 | 713,2 | 714,4 | 715,3 | 716,0 | 716,6 | 717,2 | 717,7 | 718,1 |
|                             | 385,4 | 388,2 | 390,3 | 391,9 | 393,3 | 394,3 | 395,1 | 395,8 | 396,5 | 397,1 | 397,6 |
|                             | 24    | 27    | 31    | 34    | 38    | 41    | 43    | 47    | 51    | 54    | 57    |
| 30                          | 712,1 | 714,5 | 716,3 | 717,6 | 718,8 | 719,7 | 720,4 | 721,0 | 721,6 | 722,1 | 722,5 |
|                             | 387,6 | 390,4 | 392,5 | 394,1 | 395,5 | 396,5 | 397,4 | 398,1 | 398,8 | 399,4 | 399,8 |
|                             | 27    | 30    | 34    | 38    | 42    | 46    | 49    | 53    | 57    | 60    | 64    |
| 33                          | 715,4 | 717,8 | 719,5 | 720,9 | 722,0 | 722,9 | 723,7 | 724,3 | 724,9 | 725,4 | 725,8 |
|                             | 389,2 | 392,1 | 394,1 | 395,8 | 397,1 | 398,1 | 399,0 | 399,7 | 400,4 | 401,0 | 401,5 |
|                             | 30    | 33    | 38    | 42    | 47    | 51    | 54    | 58    | 63    | 66    | 70    |
| 36                          | 717,8 | 720,2 | 722,0 | 723,4 | 724,5 | 725,4 | 726,1 | 726,7 | 727,3 | 727,8 | 728,2 |
|                             | 390,4 | 393,2 | 395,4 | 397,0 | 398,3 | 399,4 | 400,2 | 400,9 | 401,6 | 402,2 | 402,7 |
|                             | 33    | 37    | 41    | 46    | 52    | 56    | 59    | 63    | 69    | 72    | 76    |
| 39                          | 719,7 | 722,0 | 723,8 | 725,2 | 726,3 | 727,2 | 728,0 | 728,6 | 729,2 | 729,7 | 730,1 |
|                             | 391,4 | 394,1 | 396,3 | 397,9 | 399,2 | 400,3 | 401,2 | 401,9 | 402,6 | 403,2 | 403,7 |
|                             | 36    | 41    | 45    | 50    | 56    | 61    | 64    | 68    | 75    | 78    | 83    |
| 42                          | 721,0 | 723,4 | 725,2 | 726,6 | 727,7 | 728,6 | 729,3 | 729,9 | 730,5 | 731,0 | 731,4 |
|                             | 392,0 | 394,9 | 397,0 | 398,7 | 400,0 | 401,0 | 401,9 | 402,6 | 403,3 | 403,9 | 404,3 |
|                             | 39    | 44    | 49    | 55    | 61    | 66    | 70    | 74    | 81    | 84    | 89    |
| 45                          | 722,1 | 724,4 | 726,2 | 727,6 | 728,7 | 729,6 | 730,4 | 731,0 | 731,6 | 732,0 | 732,5 |
|                             | 392,6 | 395,4 | 397,5 | 399,2 | 400,5 | 401,6 | 402,5 | 403,2 | 403,9 | 404,4 | 405,0 |
|                             | 41    | 46    | 52    | 59    | 65    | 70    | 75    | 79    | 87    | 90    | 95    |
| 48                          | 722,8 | 725,2 | 727,0 | 728,4 | 729,5 | 730,4 | 731,2 | 731,8 | 732,4 | 732,8 | 733,2 |
|                             | 392,9 | 395,8 | 398,0 | 399,6 | 400,9 | 402,0 | 402,9 | 403,6 | 404,3 | 404,8 | 405,3 |
|                             | 43    | 48    | 54    | 62    | 68    | 74    | 79    | 84    | 92    | 96    | 101   |

Аналитическое решение

| Температура поверхности | Температурный перепад |
|-------------------------|-----------------------|
| 742,7                   | 415,6                 |

## Приложение 31

Относительная погрешность(%) вычисления  
 температуры поверхности пластины и температурного  
 перепада по сравнению с аналитическим решением при  
 $\tau=1000$  с.  
 Для  $R=0,08$  м

| $\frac{\Delta x}{\Delta \tau}$ | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                             | 3,83 | 3,79 | 3,76 | 3,73 | 3,72 | 3,71 | 3,69 | 3,68 | 3,66 | 3,66 | 3,65 |
|                                | 4,90 | 4,17 | 3,64 | 3,25 | 2,91 | 2,65 | 2,45 | 2,25 | 2,05 | 1,92 | 1,79 |
| 21                             | 2,54 | 2,51 | 2,49 | 2,46 | 2,45 | 2,44 | 2,42 | 2,41 | 2,41 | 2,39 | 2,39 |
|                                | 4,83 | 4,24 | 3,64 | 3,25 | 2,91 | 2,65 | 2,38 | 2,19 | 2,05 | 1,92 | 1,85 |
| 24                             | 1,73 | 1,69 | 1,66 | 1,64 | 1,62 | 1,61 | 1,61 | 1,60 | 1,60 | 1,59 | 1,58 |
|                                | 4,90 | 4,17 | 3,64 | 3,25 | 2,85 | 2,58 | 2,45 | 2,25 | 2,12 | 1,92 | 1,79 |
| 27                             | 1,20 | 1,16 | 1,14 | 1,13 | 1,11 | 1,10 | 1,08 | 1,07 | 1,07 | 1,06 | 1,06 |
|                                | 4,90 | 4,17 | 3,58 | 3,25 | 2,91 | 2,65 | 2,38 | 2,19 | 2,12 | 1,92 | 1,85 |
| 30                             | 0,86 | 0,83 | 0,81 | 0,78 | 0,77 | 0,75 | 0,74 | 0,74 | 0,73 | 0,73 | 0,71 |
|                                | 4,83 | 4,17 | 3,64 | 3,25 | 2,91 | 2,65 | 2,38 | 2,25 | 2,05 | 1,92 | 1,79 |
| 33                             | 0,64 | 0,61 | 0,58 | 0,57 | 0,56 | 0,54 | 0,53 | 0,52 | 0,52 | 0,50 | 0,50 |
|                                | 4,83 | 4,17 | 3,64 | 3,25 | 2,91 | 2,65 | 2,38 | 2,19 | 2,12 | 1,92 | 1,85 |
| 36                             | 0,50 | 0,46 | 0,44 | 0,42 | 0,41 | 0,39 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,36 | 0,36 |
|                                | 4,90 | 4,17 | 3,58 | 3,25 | 2,91 | 2,65 | 2,38 | 2,19 | 2,05 | 1,92 | 1,79 |
| 39                             | 0,41 | 0,37 | 0,34 | 0,33 | 0,32 | 0,30 | 0,29 | 0,28 | 0,28 | 0,26 | 0,26 |
|                                | 4,90 | 4,11 | 3,58 | 3,25 | 2,91 | 2,65 | 2,38 | 2,19 | 2,05 | 1,92 | 1,79 |
| 42                             | 0,34 | 0,32 | 0,29 | 0,28 | 0,25 | 0,24 | 0,24 | 0,23 | 0,21 | 0,21 | 0,21 |
|                                | 4,83 | 4,17 | 3,64 | 3,25 | 2,85 | 2,58 | 2,45 | 2,25 | 2,05 | 1,92 | 1,85 |
| 45                             | 0,30 | 0,28 | 0,25 | 0,24 | 0,21 | 0,20 | 0,20 | 0,18 | 0,18 | 0,17 | 0,17 |
|                                | 4,83 | 4,24 | 3,64 | 3,25 | 2,85 | 2,65 | 2,45 | 2,25 | 2,12 | 1,92 | 1,85 |
| 48                             | 0,28 | 0,25 | 0,23 | 0,21 | 0,20 | 0,18 | 0,17 | 0,16 | 0,16 | 0,15 | 0,15 |
|                                | 4,83 | 4,17 | 3,64 | 3,25 | 2,91 | 2,65 | 2,38 | 2,19 | 2,05 | 1,85 | 1,79 |

Для R=0,1 м

| $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                          | 4,40 | 4,11 | 3,88 | 3,72 | 3,59 | 3,47 | 3,38 | 3,30 | 3,24 | 3,18 | 3,12 |
|                             | 7,53 | 6,85 | 6,31 | 5,92 | 5,65 | 5,39 | 5,18 | 5,00 | 4,85 | 4,70 | 4,58 |
| 21                          | 3,62 | 3,33 | 3,12 | 2,96 | 2,82 | 2,69 | 2,60 | 2,53 | 2,47 | 2,41 | 2,36 |
|                             | 6,79 | 6,10 | 5,63 | 5,21 | 4,91 | 4,64 | 4,40 | 4,26 | 4,11 | 3,96 | 3,84 |
| 24                          | 3,12 | 2,83 | 2,62 | 2,45 | 2,31 | 2,21 | 2,12 | 2,03 | 1,96 | 1,90 | 1,86 |
|                             | 6,31 | 5,63 | 5,12 | 4,73 | 4,40 | 4,17 | 3,96 | 3,75 | 3,60 | 3,48 | 3,36 |
| 27                          | 2,80 | 2,52 | 2,30 | 2,12 | 1,99 | 1,87 | 1,78 | 1,71 | 1,64 | 1,58 | 1,54 |
|                             | 6,01 | 5,33 | 4,82 | 4,40 | 4,11 | 3,84 | 3,60 | 3,45 | 3,30 | 3,15 | 3,04 |
| 30                          | 2,59 | 2,30 | 2,07 | 1,93 | 1,72 | 1,66 | 1,57 | 1,49 | 1,43 | 1,37 | 1,33 |
|                             | 5,77 | 5,09 | 4,61 | 4,20 | 3,75 | 3,60 | 3,39 | 3,21 | 3,06 | 2,95 | 2,83 |
| 33                          | 2,44 | 2,16 | 1,93 | 1,77 | 1,63 | 1,52 | 1,43 | 1,35 | 1,29 | 1,23 | 1,17 |
|                             | 5,59 | 4,94 | 4,43 | 4,02 | 3,72 | 3,45 | 3,24 | 3,06 | 2,92 | 2,80 | 2,65 |
| 36                          | 2,35 | 2,05 | 1,84 | 1,68 | 1,54 | 1,43 | 1,34 | 1,26 | 1,19 | 1,13 | 1,08 |
|                             | 5,51 | 4,82 | 4,32 | 3,93 | 3,60 | 3,36 | 3,13 | 2,95 | 2,80 | 2,65 | 2,53 |
| 39                          | 2,28 | 1,99 | 1,78 | 1,61 | 1,47 | 1,37 | 1,27 | 1,19 | 1,13 | 1,06 | 1,02 |
|                             | 5,42 | 4,73 | 4,23 | 3,84 | 3,51 | 3,27 | 3,13 | 2,86 | 2,71 | 2,56 | 2,47 |
| 42                          | 2,24 | 1,95 | 1,74 | 1,57 | 1,43 | 1,33 | 1,23 | 1,16 | 1,08 | 1,02 | 0,97 |
|                             | 5,36 | 4,67 | 4,17 | 3,78 | 3,45 | 3,21 | 2,98 | 2,80 | 2,65 | 2,50 | 2,38 |
| 45                          | 2,21 | 1,92 | 1,71 | 1,54 | 1,40 | 1,30 | 1,20 | 1,13 | 1,05 | 0,99 | 0,94 |
|                             | 5,30 | 4,61 | 4,11 | 3,72 | 3,39 | 3,15 | 2,95 | 2,77 | 2,59 | 2,44 | 2,35 |
| 48                          | 2,19 | 1,90 | 1,69 | 1,51 | 1,37 | 1,27 | 1,17 | 1,09 | 1,03 | 0,97 | 0,91 |
|                             | 5,27 | 4,58 | 4,11 | 3,66 | 3,33 | 3,09 | 2,89 | 2,72 | 2,56 | 2,41 | 2,29 |

Для  $R=0,2$  м

| $\Delta x$<br>$\Delta r$ | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                       | 4,92 | 4,56 | 4,28 | 4,07 | 3,90 | 3,76 | 3,66 | 3,55 | 3,47 | 3,40 | 3,34 |
|                          | 8,60 | 7,86 | 7,34 | 6,93 | 6,60 | 6,32 | 6,10 | 5,91 | 5,75 | 5,61 | 5,50 |
| 21                       | 4,16 | 3,79 | 3,52 | 3,31 | 3,15 | 3,00 | 2,88 | 2,79 | 2,70 | 2,64 | 2,56 |
|                          | 7,58 | 6,84 | 6,30 | 5,89 | 5,58 | 5,28 | 5,06 | 4,87 | 4,71 | 4,57 | 4,43 |
| 24                       | 3,76 | 3,31 | 3,03 | 2,82 | 2,65 | 2,51 | 2,39 | 2,30 | 2,21 | 2,13 | 2,07 |
|                          | 6,90 | 6,19 | 5,67 | 5,23 | 4,90 | 4,63 | 4,41 | 4,22 | 4,05 | 3,89 | 3,78 |
| 27                       | 3,34 | 2,99 | 2,71 | 2,50 | 2,33 | 2,18 | 2,07 | 1,98 | 1,89 | 1,81 | 1,75 |
|                          | 6,46 | 5,75 | 5,23 | 4,79 | 4,46 | 4,16 | 3,97 | 3,78 | 3,61 | 3,45 | 3,34 |
| 30                       | 3,12 | 2,77 | 2,50 | 2,29 | 2,12 | 1,98 | 1,86 | 1,77 | 1,68 | 1,60 | 1,54 |
|                          | 6,16 | 5,45 | 4,93 | 4,49 | 4,16 | 3,89 | 3,67 | 3,48 | 3,31 | 3,15 | 3,04 |
| 33                       | 2,99 | 2,62 | 2,36 | 2,15 | 1,97 | 1,85 | 1,72 | 1,63 | 1,54 | 1,46 | 1,40 |
|                          | 5,97 | 5,23 | 4,71 | 4,30 | 3,94 | 3,70 | 3,45 | 3,28 | 3,09 | 2,96 | 2,82 |
| 36                       | 2,90 | 2,53 | 2,26 | 2,04 | 1,87 | 1,74 | 1,63 | 1,52 | 1,43 | 1,37 | 1,30 |
|                          | 5,83 | 5,09 | 4,54 | 4,13 | 3,81 | 3,53 | 3,31 | 3,12 | 2,93 | 2,82 | 2,66 |
| 39                       | 2,83 | 2,47 | 2,19 | 1,98 | 1,81 | 1,68 | 1,55 | 1,46 | 1,37 | 1,31 | 1,23 |
|                          | 5,72 | 4,98 | 4,46 | 4,02 | 3,70 | 3,42 | 3,18 | 3,01 | 2,82 | 2,71 | 2,57 |
| 42                       | 2,79 | 2,42 | 2,15 | 1,94 | 1,77 | 1,63 | 1,51 | 1,42 | 1,33 | 1,25 | 1,19 |
|                          | 5,64 | 4,90 | 4,38 | 3,94 | 3,61 | 3,34 | 3,12 | 2,93 | 2,74 | 2,60 | 2,49 |
| 45                       | 2,76 | 2,39 | 2,12 | 1,90 | 1,74 | 1,60 | 1,48 | 1,39 | 1,30 | 1,22 | 1,16 |
|                          | 5,58 | 4,85 | 4,30 | 3,89 | 3,56 | 3,28 | 3,04 | 2,87 | 2,68 | 2,55 | 2,44 |
| 48                       | 2,73 | 2,36 | 2,09 | 1,90 | 1,71 | 1,57 | 1,46 | 1,37 | 1,28 | 1,20 | 1,14 |
|                          | 5,53 | 4,79 | 4,24 | 3,89 | 3,50 | 3,23 | 3,01 | 2,85 | 2,66 | 2,52 | 2,38 |

Для  $R=0,25$  м

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                          | 3,73 | 3,62 | 3,55 | 3,50 | 3,45 | 3,42 | 3,39 | 3,36 | 3,33 | 3,30 | 3,30 |
|                             | 4,98 | 4,29 | 3,76 | 3,34 | 3,02 | 2,81 | 2,60 | 2,38 | 2,22 | 2,07 | 1,96 |
| 21                          | 2,68 | 2,59 | 2,52 | 2,46 | 2,43 | 2,38 | 2,35 | 2,32 | 2,29 | 2,28 | 2,27 |
|                             | 4,98 | 4,29 | 3,76 | 3,34 | 3,07 | 2,75 | 2,54 | 2,33 | 2,12 | 2,01 | 1,91 |
| 24                          | 1,95 | 1,85 | 1,79 | 1,73 | 1,69 | 1,66 | 1,63 | 1,60 | 1,57 | 1,55 | 1,54 |
|                             | 4,98 | 4,24 | 3,76 | 3,34 | 3,02 | 2,81 | 2,54 | 2,33 | 2,17 | 2,01 | 1,91 |
| 27                          | 1,48 | 1,38 | 1,32 | 1,26 | 1,23 | 1,19 | 1,16 | 1,13 | 1,10 | 1,09 | 1,07 |
|                             | 4,98 | 4,24 | 3,76 | 3,34 | 3,07 | 2,75 | 2,54 | 2,33 | 2,12 | 2,01 | 1,91 |
| 30                          | 1,17 | 1,09 | 1,02 | 0,97 | 0,93 | 0,88 | 0,86 | 0,84 | 0,82 | 0,80 | 0,78 |
|                             | 4,98 | 4,24 | 3,71 | 3,34 | 3,02 | 2,70 | 2,49 | 2,33 | 2,17 | 2,01 | 1,91 |
| 33                          | 0,98 | 0,88 | 0,83 | 0,77 | 0,73 | 0,70 | 0,67 | 0,64 | 0,63 | 0,61 | 0,59 |
|                             | 4,98 | 4,24 | 3,71 | 3,28 | 2,97 | 2,70 | 2,49 | 2,28 | 2,12 | 2,01 | 1,91 |
| 36                          | 0,86 | 0,77 | 0,70 | 0,66 | 0,61 | 0,57 | 0,54 | 0,53 | 0,50 | 0,48 | 0,47 |
|                             | 4,93 | 4,24 | 3,71 | 3,34 | 2,97 | 2,70 | 2,49 | 2,33 | 2,12 | 2,01 | 1,91 |
| 39                          | 0,80 | 0,68 | 0,63 | 0,57 | 0,53 | 0,50 | 0,48 | 0,47 | 0,42 | 0,39 | 0,38 |
|                             | 4,98 | 4,24 | 3,76 | 3,28 | 2,97 | 2,70 | 2,54 | 2,38 | 2,17 | 1,91 | 1,85 |
| 42                          | 0,73 | 0,64 | 0,57 | 0,53 | 0,48 | 0,45 | 0,41 | 0,39 | 0,36 | 0,35 | 0,34 |
|                             | 4,93 | 4,29 | 3,71 | 3,34 | 2,97 | 2,75 | 2,49 | 2,33 | 2,12 | 2,01 | 1,91 |
| 45                          | 0,70 | 0,59 | 0,54 | 0,48 | 0,44 | 0,41 | 0,38 | 0,35 | 0,34 | 0,31 | 0,29 |
|                             | 4,98 | 4,24 | 3,76 | 3,28 | 2,97 | 2,70 | 2,49 | 2,28 | 2,17 | 2,01 | 1,85 |
| 48                          | 0,67 | 0,58 | 0,51 | 0,47 | 0,42 | 0,38 | 0,35 | 0,34 | 0,31 | 0,29 | 0,28 |
|                             | 4,93 | 4,24 | 3,71 | 3,34 | 2,97 | 2,70 | 2,49 | 2,33 | 2,12 | 2,01 | 1,91 |

## Приложение 32

Относительная погрешность (%) вычисления  
 температуры поверхности пластины и температурного  
 перепада по сравнению с аналитическим решением при  
 $\tau=250$  с.  
 Для  $R=0,08$  м

| $\frac{\Delta x}{\Delta \tau}$ | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                             | 1,27 | 1,11 | 0,99 | 0,90 | 0,81 | 0,75 | 0,70 | 0,66 | 0,64 | 0,60 | 0,58 |
|                                | 5,70 | 5,08 | 4,53 | 4,12 | 3,78 | 3,50 | 3,30 | 3,16 | 3,02 | 2,88 | 2,75 |
| 21                             | 1,24 | 1,09 | 0,96 | 0,88 | 0,79 | 0,73 | 0,68 | 0,64 | 0,60 | 0,58 | 0,56 |
|                                | 5,56 | 4,95 | 4,40 | 3,98 | 3,64 | 3,37 | 3,16 | 3,02 | 2,82 | 2,75 | 2,61 |
| 24                             | 1,22 | 1,07 | 0,94 | 0,86 | 0,79 | 0,73 | 0,66 | 0,62 | 0,60 | 0,56 | 0,54 |
|                                | 5,42 | 4,81 | 4,26 | 3,85 | 3,57 | 3,30 | 3,09 | 2,88 | 2,75 | 2,61 | 2,54 |
| 27                             | 1,22 | 1,05 | 0,94 | 0,84 | 0,77 | 0,73 | 0,66 | 0,62 | 0,58 | 0,56 | 0,51 |
|                                | 5,42 | 4,67 | 4,19 | 3,78 | 3,50 | 3,30 | 3,02 | 2,82 | 2,68 | 2,54 | 2,40 |
| 30                             | 1,20 | 1,03 | 0,92 | 0,84 | 0,77 | 0,70 | 0,64 | 0,60 | 0,58 | 0,54 | 0,51 |
|                                | 5,29 | 4,60 | 4,12 | 3,71 | 3,43 | 3,16 | 2,88 | 2,75 | 2,61 | 2,47 | 2,34 |
| 33                             | 1,20 | 1,03 | 0,92 | 0,84 | 0,75 | 0,68 | 0,64 | 0,60 | 0,56 | 0,54 | 0,49 |
|                                | 5,22 | 4,53 | 4,05 | 3,71 | 3,37 | 3,09 | 2,88 | 2,68 | 2,54 | 2,40 | 2,27 |
| 36                             | 1,20 | 1,03 | 0,92 | 0,84 | 0,75 | 0,68 | 0,64 | 0,60 | 0,56 | 0,51 | 0,49 |
|                                | 5,22 | 4,53 | 4,05 | 3,64 | 3,37 | 3,02 | 2,88 | 2,68 | 2,47 | 2,34 | 2,27 |
| 39                             | 1,18 | 1,00 | 0,90 | 0,84 | 0,75 | 0,68 | 0,62 | 0,58 | 0,56 | 0,51 | 0,49 |
|                                | 5,15 | 4,46 | 3,98 | 3,64 | 3,30 | 3,02 | 2,75 | 2,61 | 2,47 | 2,34 | 2,20 |
| 42                             | 1,18 | 1,03 | 0,90 | 0,81 | 0,73 | 0,66 | 0,62 | 0,58 | 0,54 | 0,51 | 0,49 |
|                                | 5,15 | 4,46 | 3,91 | 3,57 | 3,23 | 2,95 | 2,75 | 2,54 | 2,40 | 2,27 | 2,20 |
| 45                             | 1,18 | 1,03 | 0,90 | 0,81 | 0,73 | 0,66 | 0,62 | 0,58 | 0,54 | 0,51 | 0,47 |
|                                | 5,15 | 4,46 | 3,91 | 3,57 | 3,23 | 2,95 | 2,75 | 2,54 | 2,40 | 2,27 | 2,13 |
| 48                             | 1,18 | 1,03 | 0,90 | 0,81 | 0,70 | 0,66 | 0,62 | 0,58 | 0,54 | 0,49 | 0,47 |
|                                | 5,08 | 4,46 | 3,91 | 3,50 | 3,09 | 2,88 | 2,75 | 2,54 | 2,40 | 2,20 | 2,13 |

Для  $R=0,1$  м

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                                | 1,68 | 1,48 | 1,33 | 1,20 | 1,12 | 1,03 | 0,97 | 0,91 | 0,86 | 0,82 | 0,79 |
|                                   | 6,07 | 5,42 | 4,88 | 4,46 | 4,17 | 3,93 | 3,69 | 3,51 | 3,33 | 3,21 | 3,15 |
| 21                                | 1,66 | 1,46 | 1,29 | 1,16 | 1,08 | 0,99 | 0,93 | 0,88 | 0,84 | 0,79 | 0,75 |
|                                   | 5,89 | 5,24 | 4,70 | 4,29 | 3,99 | 3,75 | 3,51 | 3,39 | 3,21 | 3,09 | 2,92 |
| 24                                | 1,63 | 1,44 | 1,27 | 1,14 | 1,05 | 0,97 | 0,90 | 0,84 | 0,79 | 0,75 | 0,73 |
|                                   | 5,77 | 5,12 | 4,58 | 4,17 | 3,87 | 3,57 | 3,33 | 3,33 | 2,98 | 2,86 | 2,80 |
| 27                                | 1,61 | 1,42 | 1,25 | 1,12 | 1,03 | 0,95 | 0,88 | 0,84 | 0,79 | 0,75 | 0,71 |
|                                   | 5,65 | 4,94 | 4,44 | 4,05 | 3,75 | 3,45 | 3,27 | 3,09 | 2,98 | 2,80 | 2,68 |
| 30                                | 1,59 | 1,39 | 1,23 | 1,12 | 1,01 | 0,95 | 0,88 | 0,82 | 0,77 | 0,73 | 0,69 |
|                                   | 5,54 | 4,82 | 4,35 | 3,99 | 3,63 | 3,45 | 3,21 | 3,04 | 2,86 | 2,74 | 2,56 |
| 33                                | 1,57 | 1,36 | 1,23 | 1,12 | 1,01 | 0,93 | 0,86 | 0,79 | 0,75 | 0,71 | 0,69 |
|                                   | 5,48 | 4,76 | 4,29 | 3,99 | 3,57 | 3,33 | 3,09 | 2,92 | 2,74 | 2,62 | 2,56 |
| 36                                | 1,57 | 1,36 | 1,20 | 1,10 | 0,99 | 0,90 | 0,84 | 0,79 | 0,75 | 0,71 | 0,67 |
|                                   | 5,42 | 4,70 | 4,23 | 3,87 | 3,51 | 3,27 | 3,04 | 2,92 | 2,74 | 2,62 | 2,44 |
| 39                                | 1,57 | 1,36 | 1,20 | 1,10 | 0,99 | 0,90 | 0,84 | 0,77 | 0,73 | 0,69 | 0,67 |
|                                   | 5,42 | 4,70 | 4,17 | 3,81 | 3,45 | 3,21 | 2,98 | 2,80 | 2,62 | 2,50 | 2,44 |
| 42                                | 1,55 | 1,33 | 1,20 | 1,08 | 0,97 | 0,90 | 0,84 | 0,77 | 0,73 | 0,69 | 0,65 |
|                                   | 5,30 | 4,58 | 4,17 | 3,75 | 3,39 | 3,15 | 2,98 | 2,74 | 2,62 | 2,44 | 2,32 |
| 45                                | 1,55 | 1,33 | 1,18 | 1,08 | 0,97 | 0,88 | 0,82 | 0,77 | 0,73 | 0,69 | 0,65 |
|                                   | 5,30 | 4,58 | 4,11 | 3,75 | 3,39 | 3,09 | 2,86 | 2,74 | 2,62 | 2,44 | 2,32 |
| 48                                | 1,55 | 1,33 | 1,18 | 1,08 | 0,97 | 0,88 | 0,82 | 0,75 | 0,71 | 0,67 | 0,65 |
|                                   | 5,30 | 4,58 | 4,05 | 3,69 | 3,33 | 3,04 | 2,86 | 2,68 | 2,50 | 2,38 | 2,32 |

Для  $R=0,2 \text{ м}$

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                                | 3,18 | 2,78 | 2,45 | 2,22 | 2,03 | 1,87 | 1,74 | 1,64 | 1,53 | 1,44 | 1,38 |
|                                   | 7,89 | 6,90 | 6,11 | 5,49 | 5,02 | 4,65 | 4,34 | 4,08 | 3,81 | 3,61 | 3,45 |
| 21                                | 3,14 | 2,73 | 2,41 | 2,17 | 1,98 | 1,83 | 1,70 | 1,60 | 1,49 | 1,40 | 1,33 |
|                                   | 7,78 | 6,79 | 5,96 | 5,38 | 4,91 | 4,54 | 4,23 | 3,97 | 3,71 | 3,50 | 3,34 |
| 24                                | 3,10 | 2,69 | 2,39 | 2,15 | 1,96 | 1,81 | 1,68 | 1,57 | 1,46 | 1,38 | 1,31 |
|                                   | 7,68 | 6,64 | 5,90 | 5,33 | 4,86 | 4,49 | 4,18 | 3,92 | 3,66 | 3,45 | 3,29 |
| 27                                | 3,08 | 2,67 | 2,37 | 2,13 | 1,94 | 1,79 | 1,66 | 1,55 | 1,44 | 1,36 | 1,29 |
|                                   | 7,63 | 6,58 | 5,85 | 5,28 | 4,81 | 4,44 | 4,13 | 3,87 | 3,61 | 3,40 | 3,24 |
| 30                                | 3,08 | 2,65 | 2,35 | 2,11 | 1,91 | 1,76 | 1,64 | 1,53 | 1,42 | 1,33 | 1,27 |
|                                   | 7,58 | 6,53 | 5,80 | 5,22 | 4,75 | 4,39 | 4,08 | 3,81 | 3,55 | 3,34 | 3,19 |
| 33                                | 3,08 | 2,65 | 2,35 | 2,11 | 1,91 | 1,76 | 1,62 | 1,51 | 1,40 | 1,31 | 1,25 |
|                                   | 7,58 | 6,53 | 5,80 | 5,22 | 4,75 | 4,39 | 4,03 | 3,76 | 3,50 | 3,29 | 3,08 |
| 36                                | 3,06 | 2,65 | 2,32 | 2,09 | 1,89 | 1,74 | 1,62 | 1,51 | 1,40 | 1,31 | 1,25 |
|                                   | 7,52 | 6,53 | 5,75 | 5,12 | 4,65 | 4,28 | 3,97 | 3,71 | 3,45 | 3,29 | 3,08 |
| 39                                | 3,03 | 2,62 | 2,32 | 2,09 | 1,89 | 1,74 | 1,60 | 1,49 | 1,38 | 1,29 | 1,23 |
|                                   | 7,47 | 6,48 | 5,69 | 5,12 | 4,65 | 4,28 | 3,92 | 3,66 | 3,40 | 3,24 | 3,03 |
| 42                                | 3,03 | 2,62 | 2,32 | 2,09 | 1,89 | 1,72 | 1,57 | 1,46 | 1,38 | 1,29 | 1,23 |
|                                   | 7,47 | 6,48 | 5,69 | 5,12 | 4,65 | 4,23 | 3,87 | 3,61 | 3,40 | 3,24 | 3,03 |
| 45                                | 3,03 | 2,59 | 2,30 | 2,07 | 1,87 | 1,72 | 1,57 | 1,46 | 1,38 | 1,29 | 1,21 |
|                                   | 7,47 | 6,43 | 5,64 | 5,07 | 4,59 | 4,23 | 3,87 | 3,61 | 3,40 | 3,24 | 2,98 |
| 48                                | 3,01 | 2,59 | 2,30 | 2,07 | 1,87 | 1,70 | 1,57 | 1,46 | 1,36 | 1,29 | 1,21 |
|                                   | 7,42 | 6,43 | 5,64 | 5,07 | 4,59 | 4,18 | 3,87 | 3,61 | 3,34 | 3,24 | 2,98 |

Для  $R=0,25$  м

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                                | 3,90 | 3,38 | 2,99 | 2,69 | 2,45 | 2,26 | 2,11 | 1,96 | 1,85 | 1,74 | 1,66 |
|                                   | 9,45 | 8,19 | 7,25 | 6,52 | 5,95 | 5,48 | 5,11 | 4,75 | 4,49 | 4,23 | 4,02 |
| 21                                | 3,85 | 3,34 | 2,95 | 2,65 | 2,41 | 2,22 | 2,07 | 1,92 | 1,81 | 1,70 | 1,61 |
|                                   | 9,34 | 8,09 | 7,15 | 6,42 | 5,85 | 5,38 | 5,01 | 4,64 | 4,38 | 4,12 | 3,91 |
| 24                                | 3,83 | 3,32 | 2,93 | 2,62 | 2,39 | 2,20 | 2,05 | 1,89 | 1,78 | 1,68 | 1,57 |
|                                   | 9,29 | 8,04 | 7,10 | 6,37 | 5,80 | 5,32 | 4,96 | 4,59 | 4,33 | 4,07 | 3,81 |
| 27                                | 3,81 | 3,30 | 2,91 | 2,60 | 2,37 | 2,17 | 2,00 | 1,85 | 1,74 | 1,66 | 1,55 |
|                                   | 9,24 | 7,99 | 7,05 | 6,32 | 5,74 | 5,27 | 4,85 | 4,49 | 4,23 | 4,02 | 3,76 |
| 30                                | 3,79 | 3,27 | 2,89 | 2,58 | 2,35 | 2,15 | 2,00 | 1,85 | 1,74 | 1,63 | 1,55 |
|                                   | 9,19 | 7,93 | 7,00 | 6,26 | 5,69 | 5,22 | 4,85 | 4,49 | 4,23 | 3,96 | 3,76 |
| 33                                | 3,77 | 3,27 | 2,89 | 2,58 | 2,35 | 2,15 | 1,98 | 1,83 | 1,72 | 1,61 | 1,53 |
|                                   | 9,13 | 7,93 | 7,00 | 6,26 | 5,69 | 5,22 | 4,80 | 4,44 | 4,17 | 3,91 | 3,71 |
| 36                                | 3,77 | 3,25 | 2,86 | 2,56 | 2,33 | 2,13 | 1,96 | 1,81 | 1,70 | 1,59 | 1,51 |
|                                   | 9,13 | 7,88 | 6,94 | 6,21 | 5,64 | 5,17 | 4,75 | 4,38 | 4,12 | 3,86 | 3,65 |
| 39                                | 3,77 | 3,25 | 2,86 | 2,56 | 2,33 | 2,13 | 1,96 | 1,81 | 1,70 | 1,59 | 1,51 |
|                                   | 9,13 | 7,88 | 6,94 | 6,21 | 5,64 | 5,17 | 4,75 | 4,38 | 4,12 | 3,86 | 3,65 |
| 42                                | 3,75 | 3,23 | 2,84 | 2,56 | 2,30 | 2,11 | 1,96 | 1,81 | 1,68 | 1,59 | 1,49 |
|                                   | 9,08 | 7,82 | 6,89 | 6,21 | 5,58 | 5,11 | 4,75 | 4,38 | 4,07 | 3,86 | 3,60 |
| 45                                | 3,75 | 3,23 | 2,84 | 2,54 | 2,30 | 2,11 | 1,94 | 1,78 | 1,68 | 1,57 | 1,49 |
|                                   | 9,08 | 7,82 | 6,89 | 6,16 | 5,58 | 5,11 | 4,70 | 4,33 | 4,07 | 3,81 | 3,60 |
| 48                                | 3,75 | 3,23 | 2,84 | 2,54 | 2,30 | 2,11 | 1,94 | 1,78 | 1,68 | 1,57 | 1,49 |
|                                   | 9,08 | 7,82 | 6,89 | 6,16 | 5,58 | 5,11 | 4,70 | 4,33 | 4,07 | 3,81 | 3,60 |

## Приложение 33

Относительная погрешность(%) вычисления  
 температуры поверхности пластины и температурного  
 перепада  
 по сравнению с аналитическим решением при  $\tau=500$  с.  
 Для  $R=0,08$  м

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                          | 0,94 | 0,85 | 0,76 | 0,71 | 0,66 | 0,62 | 0,58 | 0,55 | 0,53 | 0,51 | 0,50 |
|                             | 5,04 | 4,38 | 3,85 | 3,45 | 3,12 | 2,85 | 2,65 | 2,45 | 2,32 | 2,19 | 2,06 |
| 21                          | 0,83 | 0,74 | 0,71 | 0,60 | 0,55 | 0,51 | 0,47 | 0,44 | 0,42 | 0,40 | 0,39 |
|                             | 4,97 | 4,38 | 3,78 | 3,38 | 3,05 | 2,79 | 2,59 | 2,38 | 2,26 | 2,13 | 1,99 |
| 24                          | 0,80 | 0,71 | 0,62 | 0,55 | 0,50 | 0,46 | 0,42 | 0,40 | 0,37 | 0,35 | 0,34 |
|                             | 5,04 | 4,38 | 3,78 | 3,38 | 3,05 | 2,79 | 2,52 | 2,38 | 2,19 | 2,06 | 1,99 |
| 27                          | 0,78 | 0,67 | 0,60 | 0,53 | 0,47 | 0,44 | 0,40 | 0,39 | 0,35 | 0,34 | 0,32 |
|                             | 5,04 | 4,31 | 3,85 | 3,38 | 3,05 | 2,79 | 2,52 | 2,38 | 2,19 | 2,06 | 1,92 |
| 30                          | 0,76 | 0,66 | 0,58 | 0,53 | 0,47 | 0,44 | 0,40 | 0,37 | 0,35 | 0,32 | 0,31 |
|                             | 4,91 | 4,18 | 3,71 | 3,38 | 3,05 | 2,79 | 2,59 | 2,32 | 2,19 | 1,99 | 1,92 |
| 33                          | 0,76 | 0,67 | 0,58 | 0,53 | 0,47 | 0,44 | 0,40 | 0,37 | 0,35 | 0,32 | 0,31 |
|                             | 4,91 | 4,31 | 3,71 | 3,38 | 3,05 | 2,79 | 2,59 | 2,32 | 2,19 | 1,99 | 1,92 |
| 36                          | 0,76 | 0,67 | 0,58 | 0,53 | 0,47 | 0,42 | 0,40 | 0,37 | 0,35 | 0,32 | 0,31 |
|                             | 4,91 | 4,31 | 3,71 | 3,38 | 2,98 | 2,72 | 2,52 | 2,32 | 2,19 | 1,99 | 1,92 |
| 39                          | 0,76 | 0,67 | 0,58 | 0,53 | 0,47 | 0,42 | 0,40 | 0,37 | 0,35 | 0,32 | 0,31 |
|                             | 4,91 | 4,31 | 3,71 | 3,32 | 2,98 | 2,72 | 2,52 | 2,32 | 2,19 | 1,99 | 1,86 |
| 42                          | 0,76 | 0,67 | 0,58 | 0,53 | 0,47 | 0,42 | 0,40 | 0,37 | 0,34 | 0,32 | 0,31 |
|                             | 4,91 | 4,24 | 3,71 | 3,32 | 2,98 | 2,72 | 2,52 | 2,32 | 2,12 | 1,99 | 1,86 |
| 45                          | 0,76 | 0,67 | 0,58 | 0,53 | 0,47 | 0,42 | 0,40 | 0,37 | 0,34 | 0,32 | 0,31 |
|                             | 4,91 | 4,24 | 3,71 | 3,32 | 2,98 | 2,72 | 2,52 | 2,32 | 2,12 | 1,99 | 1,86 |
| 48                          | 0,76 | 0,67 | 0,58 | 0,53 | 0,47 | 0,42 | 0,40 | 0,37 | 0,34 | 0,32 | 0,31 |
|                             | 4,91 | 4,24 | 3,71 | 3,32 | 2,98 | 2,72 | 2,52 | 2,32 | 2,12 | 1,99 | 1,86 |

Для  $R=0,1$  м

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                          | 1,38 | 1,24 | 1,11 | 1,02 | 0,95 | 0,89 | 0,84 | 0,80 | 0,77 | 0,73 | 0,69 |
|                             | 5,48 | 4,78 | 4,30 | 3,92 | 3,60 | 3,33 | 3,12 | 2,96 | 2,80 | 2,63 | 2,53 |
| 21                          | 1,29 | 1,15 | 1,02 | 0,93 | 0,87 | 0,84 | 0,73 | 0,69 | 0,65 | 0,62 | 0,60 |
|                             | 5,43 | 4,73 | 4,25 | 3,87 | 3,44 | 3,26 | 3,01 | 2,85 | 2,69 | 2,53 | 2,42 |
| 24                          | 1,24 | 1,08 | 0,96 | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,69 | 0,64 | 0,60 | 0,56 | 0,54 |
|                             | 5,32 | 4,57 | 4,14 | 3,71 | 3,44 | 3,26 | 2,96 | 2,74 | 2,58 | 2,42 | 2,31 |
| 27                          | 1,22 | 1,05 | 0,95 | 0,84 | 0,77 | 0,71 | 0,65 | 0,62 | 0,58 | 0,54 | 0,53 |
|                             | 5,27 | 4,57 | 4,09 | 3,66 | 3,33 | 3,06 | 2,85 | 2,69 | 2,53 | 2,37 | 2,31 |
| 30                          | 1,20 | 1,05 | 0,93 | 0,84 | 0,77 | 0,71 | 0,65 | 0,60 | 0,56 | 0,53 | 0,51 |
|                             | 5,22 | 4,57 | 4,03 | 3,66 | 3,33 | 3,06 | 2,85 | 2,63 | 2,47 | 2,31 | 2,26 |
| 33                          | 1,20 | 1,03 | 0,93 | 0,84 | 0,75 | 0,69 | 0,64 | 0,60 | 0,56 | 0,53 | 0,49 |
|                             | 5,16 | 4,46 | 3,98 | 3,60 | 3,26 | 2,96 | 2,74 | 2,58 | 2,47 | 2,31 | 2,15 |
| 36                          | 1,20 | 1,03 | 0,91 | 0,82 | 0,75 | 0,69 | 0,64 | 0,60 | 0,56 | 0,53 | 0,49 |
|                             | 5,16 | 4,46 | 3,92 | 3,55 | 3,26 | 2,96 | 2,74 | 2,58 | 2,42 | 2,26 | 2,15 |
| 39                          | 1,20 | 1,03 | 0,91 | 0,82 | 0,75 | 0,69 | 0,64 | 0,58 | 0,54 | 0,53 | 0,49 |
|                             | 5,16 | 4,46 | 3,92 | 3,55 | 3,26 | 2,96 | 2,74 | 2,53 | 2,37 | 2,26 | 2,15 |
| 42                          | 1,20 | 1,03 | 0,91 | 0,82 | 0,75 | 0,67 | 0,62 | 0,58 | 0,54 | 0,53 | 0,49 |
|                             | 5,11 | 4,41 | 3,87 | 3,55 | 3,26 | 2,90 | 2,69 | 2,53 | 2,37 | 2,26 | 2,10 |
| 45                          | 1,18 | 1,03 | 0,91 | 0,82 | 0,75 | 0,67 | 0,62 | 0,58 | 0,54 | 0,53 | 0,49 |
|                             | 5,05 | 4,41 | 3,87 | 3,55 | 3,26 | 2,85 | 2,63 | 2,47 | 2,37 | 2,26 | 2,10 |
| 48                          | 1,18 | 1,02 | 0,91 | 0,82 | 0,75 | 0,67 | 0,62 | 0,58 | 0,54 | 0,51 | 0,47 |
|                             | 5,05 | 4,35 | 3,87 | 3,55 | 3,26 | 2,85 | 2,63 | 2,47 | 2,31 | 2,20 | 2,04 |

Для  $R=0,2$  м

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                                | 2,99 | 2,56 | 2,30 | 2,10 | 1,93 | 1,80 | 1,69 | 1,58 | 1,50 | 1,43 | 1,38 |
|                                   | 6,65 | 5,86 | 5,29 | 4,87 | 4,50 | 4,23 | 3,97 | 3,74 | 3,59 | 3,44 | 3,32 |
| 21                                | 2,79 | 2,45 | 2,19 | 1,99 | 1,82 | 1,69 | 1,56 | 1,47 | 1,39 | 1,33 | 1,27 |
|                                   | 6,38 | 5,63 | 5,06 | 4,61 | 4,27 | 4,00 | 3,70 | 3,51 | 3,32 | 3,17 | 3,06 |
| 24                                | 2,74 | 2,39 | 2,11 | 1,91 | 1,75 | 1,62 | 1,50 | 1,41 | 1,33 | 1,25 | 1,20 |
|                                   | 6,23 | 5,48 | 4,87 | 4,42 | 4,08 | 3,78 | 3,55 | 3,36 | 3,13 | 2,98 | 2,87 |
| 27                                | 2,70 | 2,35 | 2,08 | 1,88 | 1,72 | 1,58 | 1,47 | 1,38 | 1,29 | 1,21 | 1,16 |
|                                   | 6,12 | 5,38 | 4,76 | 4,34 | 3,97 | 3,70 | 3,44 | 3,25 | 3,06 | 2,87 | 2,76 |
| 30                                | 2,68 | 2,32 | 2,06 | 1,86 | 1,69 | 1,56 | 1,44 | 1,35 | 1,27 | 1,20 | 1,14 |
|                                   | 6,08 | 5,25 | 4,68 | 4,27 | 3,90 | 3,62 | 3,32 | 3,13 | 2,98 | 2,83 | 2,72 |
| 33                                | 2,67 | 2,30 | 2,04 | 1,84 | 1,67 | 1,54 | 1,41 | 1,33 | 1,25 | 1,18 | 1,12 |
|                                   | 6,01 | 5,22 | 4,65 | 4,19 | 3,82 | 3,55 | 3,29 | 3,06 | 2,91 | 2,76 | 2,64 |
| 36                                | 2,65 | 2,30 | 2,02 | 1,82 | 1,65 | 1,52 | 1,41 | 1,31 | 1,23 | 1,16 | 1,10 |
|                                   | 5,93 | 5,18 | 4,57 | 4,12 | 3,78 | 3,51 | 3,25 | 3,02 | 2,87 | 2,68 | 2,57 |
| 39                                | 2,63 | 2,28 | 2,02 | 1,80 | 1,64 | 1,50 | 1,39 | 1,29 | 1,21 | 1,14 | 1,08 |
|                                   | 5,90 | 5,14 | 4,57 | 4,08 | 3,70 | 3,44 | 3,21 | 2,95 | 2,80 | 2,64 | 2,49 |
| 42                                | 2,63 | 2,28 | 2,00 | 1,80 | 1,64 | 1,49 | 1,38 | 1,29 | 1,21 | 1,14 | 1,07 |
|                                   | 5,86 | 5,10 | 4,50 | 4,08 | 3,70 | 3,40 | 3,13 | 2,95 | 2,80 | 2,64 | 2,49 |
| 45                                | 2,61 | 2,26 | 2,00 | 1,80 | 1,62 | 1,49 | 1,38 | 1,27 | 1,20 | 1,12 | 1,07 |
|                                   | 5,82 | 5,06 | 4,50 | 4,04 | 3,66 | 3,36 | 3,13 | 2,91 | 2,72 | 2,57 | 2,46 |
| 48                                | 2,61 | 2,26 | 1,99 | 1,78 | 1,62 | 1,49 | 1,36 | 1,27 | 1,20 | 1,12 | 1,07 |
|                                   | 5,82 | 5,02 | 4,46 | 4,00 | 3,62 | 3,36 | 3,10 | 2,87 | 2,72 | 2,57 | 2,46 |

Для  $R=0,25$  м

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                                | 3,66 | 3,09 | 2,76 | 2,50 | 2,30 | 2,13 | 1,99 | 1,88 | 1,77 | 1,69 | 1,62 |
|                                   | 7,41 | 6,49 | 5,82 | 5,26 | 4,86 | 4,52 | 4,23 | 4,00 | 3,78 | 3,63 | 3,45 |
| 21                                | 3,40 | 2,98 | 2,65 | 2,39 | 2,19 | 2,02 | 1,88 | 1,77 | 1,65 | 1,56 | 1,49 |
|                                   | 7,12 | 6,26 | 5,56 | 5,04 | 4,63 | 4,30 | 3,97 | 3,74 | 3,52 | 3,34 | 3,19 |
| 24                                | 3,35 | 2,90 | 2,57 | 2,32 | 2,11 | 1,95 | 1,80 | 1,69 | 1,60 | 1,51 | 1,43 |
|                                   | 7,01 | 6,08 | 5,41 | 4,86 | 4,45 | 4,11 | 3,82 | 3,60 | 3,41 | 3,22 | 3,08 |
| 27                                | 3,31 | 2,87 | 2,54 | 2,28 | 2,08 | 1,91 | 1,77 | 1,65 | 1,56 | 1,47 | 1,39 |
|                                   | 6,89 | 6,00 | 5,30 | 4,78 | 4,37 | 4,04 | 3,74 | 3,48 | 3,30 | 3,11 | 2,97 |
| 30                                | 3,29 | 2,85 | 2,52 | 2,26 | 2,06 | 1,89 | 1,75 | 1,63 | 1,53 | 1,44 | 1,36 |
|                                   | 6,86 | 5,93 | 5,26 | 4,74 | 4,34 | 3,97 | 3,67 | 3,45 | 3,22 | 3,04 | 2,89 |
| 33                                | 3,27 | 2,83 | 2,50 | 2,24 | 2,04 | 1,88 | 1,73 | 1,62 | 1,51 | 1,41 | 1,34 |
|                                   | 6,82 | 5,89 | 5,22 | 4,67 | 4,27 | 3,93 | 3,63 | 3,41 | 3,19 | 3,00 | 2,85 |
| 36                                | 3,25 | 2,81 | 2,48 | 2,22 | 2,02 | 1,86 | 1,71 | 1,60 | 1,49 | 1,41 | 1,32 |
|                                   | 6,75 | 5,82 | 5,15 | 4,63 | 4,23 | 3,89 | 3,60 | 3,37 | 3,15 | 2,97 | 2,78 |
| 39                                | 3,25 | 2,81 | 2,48 | 2,22 | 2,02 | 1,84 | 1,71 | 1,60 | 1,49 | 1,39 | 1,32 |
|                                   | 6,75 | 5,82 | 5,15 | 4,63 | 4,23 | 3,85 | 3,56 | 3,34 | 3,11 | 2,93 | 2,78 |
| 42                                | 3,23 | 2,79 | 2,46 | 2,21 | 2,00 | 1,84 | 1,69 | 1,58 | 1,47 | 1,38 | 1,30 |
|                                   | 6,71 | 5,78 | 5,11 | 4,60 | 4,19 | 3,85 | 3,52 | 3,30 | 3,07 | 2,89 | 2,74 |
| 45                                | 3,23 | 2,79 | 2,46 | 2,21 | 2,00 | 1,82 | 1,69 | 1,58 | 1,47 | 1,38 | 1,30 |
|                                   | 6,71 | 5,78 | 5,11 | 4,60 | 4,19 | 3,78 | 3,52 | 3,30 | 3,07 | 2,89 | 2,74 |
| 48                                | 3,21 | 2,77 | 2,44 | 2,19 | 1,99 | 1,82 | 1,67 | 1,56 | 1,45 | 1,36 | 1,29 |
|                                   | 6,67 | 5,74 | 5,08 | 4,52 | 4,11 | 3,78 | 3,48 | 3,26 | 3,04 | 2,85 | 2,71 |

## Приложение 34

Относительная погрешность(%) вычисления  
 температуры поверхности пластины и температурного  
 перепада по сравнению с аналитическим решением при  
 $\tau=1500$  с.  
 Для  $R=0,08$  м

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18            | 21            | 24            | 27            | 30            | 33            | 36            | 39            | 42            | 45            | 48            |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 18                          | 10,29<br>4,83 | 10,28<br>4,11 | 10,28<br>3,64 | 10,28<br>3,25 | 10,27<br>2,85 | 10,27<br>2,65 | 10,27<br>2,45 | 10,27<br>2,25 | 10,26<br>2,05 | 10,26<br>1,92 | 10,26<br>1,79 |
| 21                          | 7,65<br>4,83  | 7,65<br>4,24  | 7,65<br>3,64  | 7,65<br>3,25  | 7,65<br>2,91  | 7,65<br>2,65  | 7,65<br>2,45  | 7,64<br>2,25  | 7,64<br>2,05  | 7,64<br>1,92  | 7,64<br>1,79  |
| 24                          | 5,68<br>4,83  | 5,68<br>4,11  | 5,70<br>3,64  | 5,70<br>3,25  | 5,70<br>2,91  | 5,70<br>2,65  | 5,70<br>2,45  | 5,70<br>2,25  | 5,70<br>2,05  | 5,70<br>1,92  | 5,70<br>1,79  |
| 27                          | 4,23<br>4,90  | 4,23<br>4,11  | 4,24<br>3,64  | 4,24<br>3,25  | 4,24<br>2,91  | 4,24<br>2,65  | 4,24<br>2,38  | 4,24<br>2,19  | 4,24<br>2,05  | 4,24<br>1,92  | 4,24<br>1,79  |
| 30                          | 3,14<br>4,90  | 3,14<br>4,11  | 3,15<br>3,64  | 3,15<br>3,25  | 3,15<br>2,85  | 3,16<br>2,65  | 3,16<br>2,45  | 3,16<br>2,25  | 3,16<br>2,05  | 3,16<br>1,92  | 3,16<br>1,79  |
| 33                          | 2,32<br>4,83  | 2,33<br>4,17  | 2,33<br>3,58  | 2,35<br>3,25  | 2,35<br>2,91  | 2,35<br>2,65  | 2,35<br>2,38  | 2,36<br>2,25  | 2,36<br>2,05  | 2,36<br>1,92  | 2,36<br>1,79  |
| 36                          | 1,72<br>4,90  | 1,73<br>4,30  | 1,73<br>3,64  | 1,74<br>3,25  | 1,74<br>2,91  | 1,74<br>2,58  | 1,75<br>2,45  | 1,75<br>2,25  | 1,75<br>2,05  | 1,75<br>1,92  | 1,75<br>1,79  |
| 39                          | 1,27<br>4,83  | 1,28<br>4,17  | 1,29<br>3,64  | 1,29<br>3,18  | 1,30<br>2,91  | 1,30<br>2,65  | 1,30<br>2,38  | 1,30<br>2,19  | 1,31<br>2,12  | 1,31<br>1,92  | 1,31<br>1,79  |
| 42                          | 0,93<br>4,83  | 0,94<br>4,17  | 0,95<br>3,64  | 0,95<br>3,18  | 0,96<br>2,91  | 0,96<br>2,65  | 0,96<br>2,38  | 0,97<br>2,12  | 0,97<br>2,05  | 0,97<br>1,92  | 0,97<br>1,79  |
| 45                          | 0,68<br>4,83  | 0,69<br>4,11  | 0,70<br>3,64  | 0,71<br>3,25  | 0,71<br>2,91  | 0,71<br>2,58  | 0,72<br>2,45  | 0,72<br>2,25  | 0,72<br>2,05  | 0,72<br>1,92  | 0,73<br>1,85  |
| 48                          | 0,49<br>4,90  | 0,51<br>4,30  | 0,51<br>3,64  | 0,52<br>3,25  | 0,52<br>2,85  | 0,53<br>2,65  | 0,53<br>2,38  | 0,53<br>2,19  | 0,54<br>2,05  | 0,54<br>1,92  | 0,54<br>1,79  |

Для  $R=0,1$  м

| $\Delta x \backslash \Delta \tau$ | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                                | 9,43 | 9,38 | 9,33 | 9,30 | 9,28 | 9,25 | 9,24 | 9,23 | 9,21 | 9,19 | 9,19 |
|                                   | 4,87 | 4,24 | 3,65 | 3,23 | 2,91 | 2,65 | 2,49 | 2,28 | 2,07 | 1,96 | 1,85 |
| 21                                | 7,09 | 7,05 | 7,02 | 6,98 | 6,95 | 6,93 | 6,92 | 6,92 | 6,92 | 6,88 | 6,87 |
|                                   | 4,87 | 4,18 | 3,65 | 3,23 | 2,91 | 2,65 | 2,44 | 2,33 | 2,12 | 1,96 | 1,85 |
| 24                                | 5,37 | 5,32 | 5,28 | 5,25 | 5,22 | 5,20 | 5,19 | 5,18 | 5,17 | 5,17 | 5,16 |
|                                   | 4,93 | 4,24 | 3,71 | 3,23 | 2,91 | 2,65 | 2,44 | 2,22 | 2,07 | 1,96 | 1,85 |
| 27                                | 4,07 | 4,03 | 3,99 | 3,96 | 3,94 | 3,92 | 3,91 | 3,90 | 3,89 | 3,89 | 3,87 |
|                                   | 4,87 | 4,18 | 3,65 | 3,28 | 2,91 | 2,65 | 2,44 | 2,22 | 2,07 | 1,96 | 1,85 |
| 30                                | 3,10 | 3,06 | 3,03 | 3,01 | 2,99 | 2,96 | 2,95 | 2,94 | 2,93 | 2,93 | 2,92 |
|                                   | 4,87 | 4,18 | 3,65 | 3,28 | 2,91 | 2,65 | 2,44 | 2,22 | 2,07 | 1,96 | 1,85 |
| 33                                | 2,39 | 2,35 | 2,32 | 2,30 | 2,28 | 2,25 | 2,24 | 2,23 | 2,21 | 2,21 | 2,20 |
|                                   | 4,87 | 4,18 | 3,71 | 3,34 | 2,91 | 2,65 | 2,44 | 2,22 | 2,07 | 1,96 | 1,85 |
| 36                                | 1,86 | 1,82 | 1,79 | 1,76 | 1,74 | 1,73 | 1,72 | 1,70 | 1,69 | 1,69 | 1,68 |
|                                   | 4,87 | 4,18 | 3,65 | 3,28 | 2,91 | 2,65 | 2,44 | 2,28 | 2,12 | 2,01 | 1,85 |
| 39                                | 1,46 | 1,42 | 1,39 | 1,36 | 1,34 | 1,33 | 1,32 | 1,31 | 1,30 | 1,30 | 1,28 |
|                                   | 4,87 | 4,24 | 3,65 | 3,28 | 2,91 | 2,65 | 2,44 | 2,28 | 2,12 | 2,01 | 1,85 |
| 42                                | 1,16 | 1,12 | 1,09 | 1,07 | 1,05 | 1,03 | 1,01 | 1,01 | 1,00 | 0,99 | 0,98 |
|                                   | 4,87 | 4,18 | 3,71 | 3,28 | 2,91 | 2,65 | 2,44 | 2,28 | 2,12 | 1,96 | 1,80 |
| 45                                | 0,93 | 0,89 | 0,87 | 0,85 | 0,83 | 0,81 | 0,79 | 0,79 | 0,78 | 0,77 | 0,76 |
|                                   | 4,87 | 4,18 | 3,71 | 3,28 | 2,91 | 2,65 | 2,44 | 2,28 | 2,12 | 1,96 | 1,80 |
| 48                                | 0,77 | 0,73 | 0,70 | 0,68 | 0,66 | 0,64 | 0,63 | 0,63 | 0,62 | 0,61 | 0,60 |
|                                   | 4,87 | 4,18 | 3,65 | 3,28 | 2,97 | 2,70 | 2,44 | 2,28 | 2,12 | 1,96 | 1,80 |

Для  $R=0,2$  м

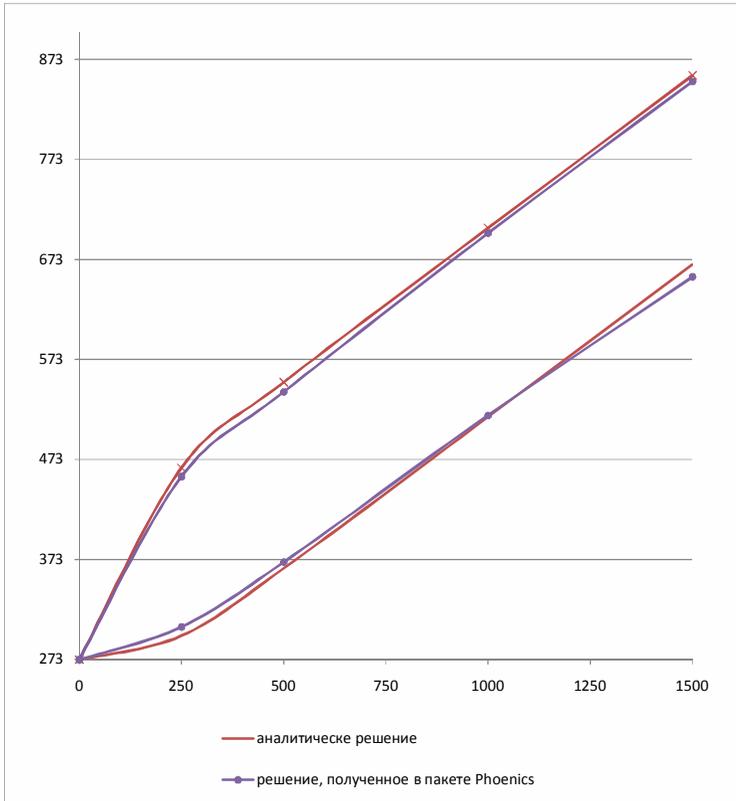
| $\Delta x$<br>$\Delta r$ | 18    | 21    | 24    | 27    | 30    | 33    | 36    | 39    | 42    | 45    | 48    |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18                       | 7,80  | 7,55  | 7,36  | 7,21  | 7,09  | 7,00  | 6,91  | 6,85  | 6,79  | 6,74  | 6,70  |
|                          | 12,79 | 12,61 | 12,14 | 11,77 | 11,49 | 11,25 | 11,04 | 10,89 | 10,76 | 10,63 | 10,52 |
| 21                       | 6,25  | 6,00  | 5,82  | 5,67  | 5,55  | 5,37  | 5,31  | 5,28  | 5,25  | 5,20  | 5,15  |
|                          | 12,43 | 11,80 | 11,33 | 10,97 | 10,65 | 10,42 | 10,24 | 10,05 | 9,92  | 9,79  | 9,66  |
| 24                       | 5,11  | 4,87  | 4,68  | 4,53  | 4,41  | 4,32  | 4,24  | 4,17  | 4,11  | 4,06  | 4,02  |
|                          | 11,88 | 11,25 | 10,78 | 10,39 | 10,11 | 9,87  | 9,66  | 9,51  | 9,35  | 9,22  | 9,12  |
| 27                       | 4,28  | 4,02  | 3,83  | 3,70  | 3,58  | 3,48  | 3,40  | 3,34  | 3,28  | 3,23  | 3,19  |
|                          | 11,51 | 10,86 | 10,37 | 10,03 | 9,74  | 9,48  | 9,27  | 9,12  | 8,99  | 8,86  | 8,75  |
| 30                       | 3,65  | 3,40  | 3,22  | 3,07  | 2,96  | 2,85  | 2,78  | 2,72  | 2,65  | 2,60  | 2,56  |
|                          | 11,23 | 10,60 | 10,11 | 9,74  | 9,45  | 9,19  | 9,01  | 8,86  | 8,67  | 8,54  | 8,44  |
| 33                       | 3,19  | 2,94  | 2,76  | 2,61  | 2,49  | 2,40  | 2,32  | 2,25  | 2,19  | 2,14  | 2,10  |
|                          | 11,04 | 10,39 | 9,92  | 9,56  | 9,25  | 9,01  | 8,80  | 8,62  | 8,49  | 8,36  | 8,26  |
| 36                       | 2,84  | 2,60  | 2,41  | 2,27  | 2,14  | 2,05  | 1,97  | 1,90  | 1,85  | 1,80  | 1,76  |
|                          | 10,89 | 10,27 | 9,77  | 9,40  | 9,09  | 8,86  | 8,65  | 8,46  | 8,34  | 8,21  | 8,11  |
| 39                       | 2,59  | 2,33  | 2,16  | 2,01  | 1,89  | 1,80  | 1,72  | 1,65  | 1,59  | 1,54  | 1,50  |
|                          | 10,78 | 10,11 | 9,66  | 9,27  | 8,99  | 8,73  | 8,51  | 8,36  | 8,21  | 8,08  | 7,98  |
| 42                       | 2,39  | 2,14  | 1,96  | 1,81  | 1,70  | 1,61  | 1,53  | 1,46  | 1,40  | 1,35  | 1,31  |
|                          | 10,68 | 10,03 | 9,56  | 9,17  | 8,91  | 8,65  | 8,44  | 8,28  | 8,13  | 8,01  | 7,91  |
| 45                       | 2,25  | 1,99  | 1,81  | 1,67  | 1,55  | 1,46  | 1,38  | 1,31  | 1,26  | 1,21  | 1,17  |
|                          | 10,63 | 9,98  | 9,48  | 9,15  | 8,83  | 8,57  | 8,39  | 8,23  | 8,08  | 7,96  | 7,86  |
| 48                       | 2,13  | 1,89  | 1,70  | 1,55  | 1,45  | 1,35  | 1,27  | 1,21  | 1,15  | 1,10  | 1,06  |
|                          | 10,55 | 9,92  | 9,43  | 9,06  | 8,78  | 8,51  | 8,34  | 8,16  | 8,02  | 7,91  | 7,79  |

Для  $R=0,25$  м

| $\Delta x$<br>$\Delta \tau$ | 18    | 21   | 24   | 27   | 30   | 33   | 36   | 39   | 42   | 45   | 48   |
|-----------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 18                          | 8,09  | 7,77 | 7,53 | 7,34 | 7,19 | 7,09 | 6,97 | 6,88 | 6,81 | 6,75 | 6,69 |
|                             | 10,47 | 9,79 | 9,31 | 8,93 | 8,61 | 8,37 | 8,18 | 7,99 | 7,84 | 7,70 | 7,60 |
| 21                          | 6,60  | 6,29 | 6,05 | 5,86 | 5,71 | 5,59 | 5,48 | 5,40 | 5,32 | 5,25 | 5,20 |
|                             | 9,00  | 8,35 | 7,84 | 7,46 | 7,15 | 6,91 | 6,69 | 6,52 | 6,35 | 6,21 | 6,11 |
| 24                          | 5,51  | 5,20 | 4,95 | 4,77 | 4,62 | 4,50 | 4,39 | 4,31 | 4,23 | 4,16 | 4,11 |
|                             | 7,99  | 7,34 | 6,83 | 6,42 | 6,11 | 5,87 | 5,65 | 5,49 | 5,32 | 5,17 | 5,08 |
| 27                          | 4,71  | 4,39 | 4,15 | 3,97 | 3,81 | 3,69 | 3,59 | 3,51 | 3,43 | 3,37 | 3,31 |
|                             | 7,27  | 6,59 | 6,09 | 5,70 | 5,37 | 5,13 | 4,93 | 4,76 | 4,60 | 4,45 | 4,33 |
| 30                          | 4,12  | 3,80 | 3,55 | 3,38 | 3,22 | 3,10 | 3,00 | 2,92 | 2,84 | 2,77 | 2,72 |
|                             | 6,74  | 6,06 | 5,56 | 5,17 | 4,84 | 4,60 | 4,38 | 4,21 | 4,04 | 3,90 | 3,80 |
| 33                          | 3,68  | 3,35 | 3,12 | 2,94 | 2,79 | 2,67 | 2,56 | 2,48 | 2,40 | 2,33 | 2,28 |
|                             | 6,35  | 5,65 | 5,17 | 4,76 | 4,45 | 4,21 | 3,99 | 3,86 | 3,66 | 3,51 | 3,39 |
| 36                          | 3,35  | 3,03 | 2,79 | 2,60 | 2,45 | 2,33 | 2,24 | 2,15 | 2,07 | 2,00 | 1,95 |
|                             | 6,06  | 5,39 | 4,86 | 4,48 | 4,16 | 3,90 | 3,71 | 3,54 | 3,37 | 3,22 | 3,10 |
| 39                          | 3,10  | 2,79 | 2,54 | 2,36 | 2,21 | 2,09 | 1,98 | 1,90 | 1,82 | 1,75 | 1,70 |
|                             | 5,82  | 5,17 | 4,64 | 4,26 | 3,95 | 3,68 | 3,46 | 3,30 | 3,13 | 2,98 | 2,86 |
| 42                          | 2,92  | 2,60 | 2,36 | 2,17 | 2,02 | 1,90 | 1,80 | 1,72 | 1,64 | 1,58 | 1,52 |
|                             | 5,68  | 4,98 | 4,48 | 4,07 | 3,75 | 3,51 | 3,30 | 3,13 | 2,96 | 2,81 | 2,72 |
| 45                          | 2,77  | 2,46 | 2,22 | 2,03 | 1,89 | 1,76 | 1,66 | 1,58 | 1,49 | 1,44 | 1,37 |
|                             | 5,53  | 4,86 | 4,36 | 3,95 | 3,63 | 3,37 | 3,15 | 2,98 | 2,81 | 2,69 | 2,55 |
| 48                          | 2,68  | 2,36 | 2,11 | 1,93 | 1,78 | 1,66 | 1,55 | 1,47 | 1,39 | 1,33 | 1,28 |
|                             | 5,46  | 4,76 | 4,23 | 3,85 | 3,54 | 3,27 | 3,06 | 2,89 | 2,72 | 2,60 | 2,48 |

## Приложение 35

График сравнительных характеристик результатов расчета задачи нагрева металла при граничных условиях второго рода

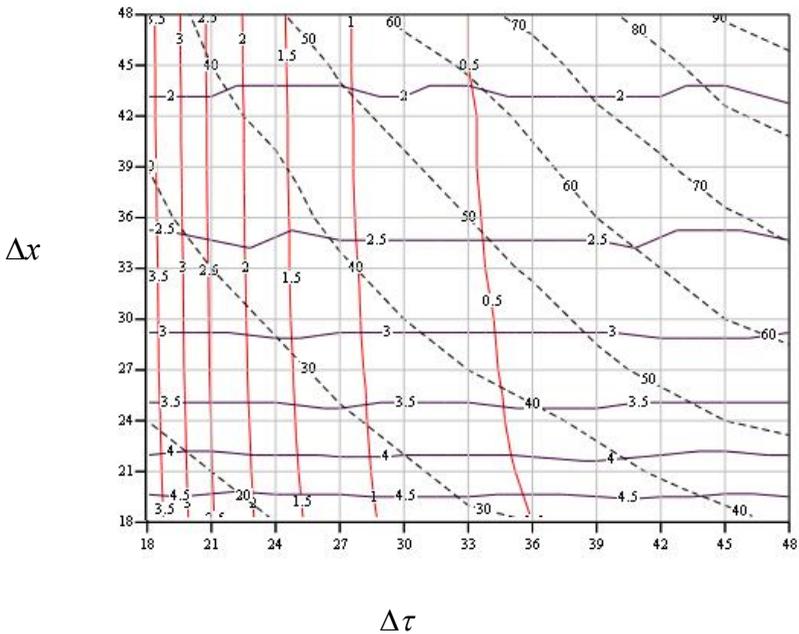


## Приложение 36

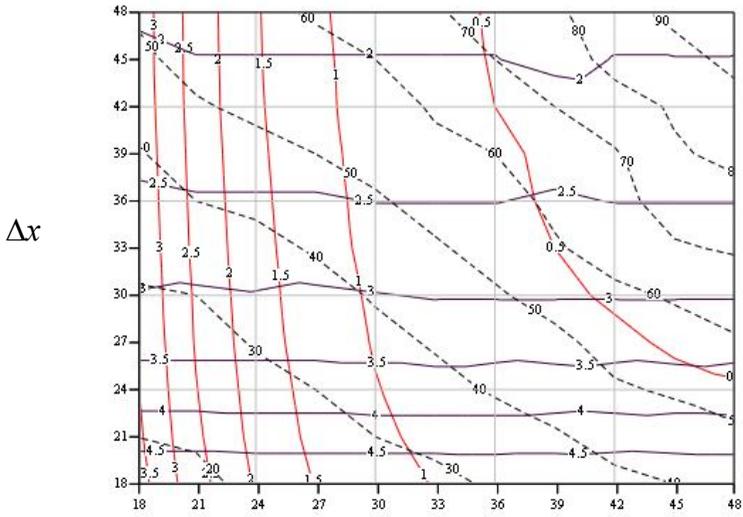
Номограммы для определения точности расчета нагрева пластины металла в течение 1000 секунд при граничных условиях второго рода.

- (красная линия) — точность расчета температуры поверхности
- (темно-синяя линия) — точность расчета температурного перепада
- - (серая линия) — время расчета

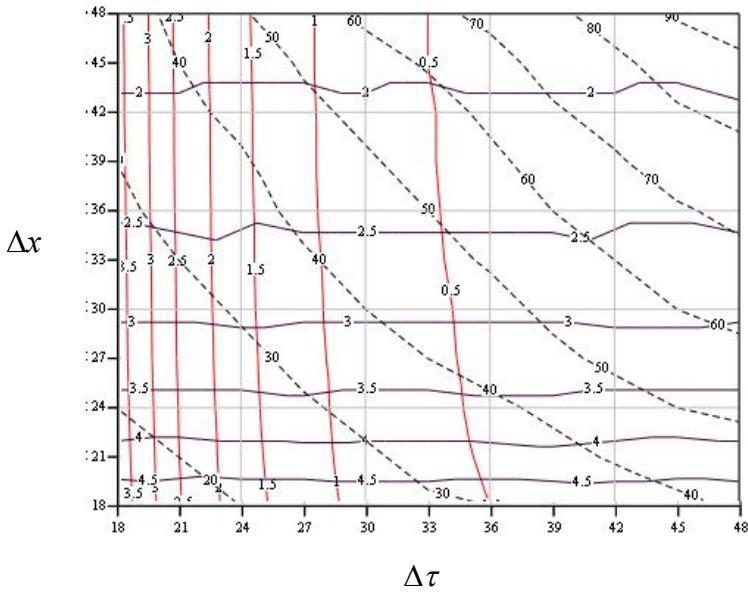
Для  $R=0,08$  м



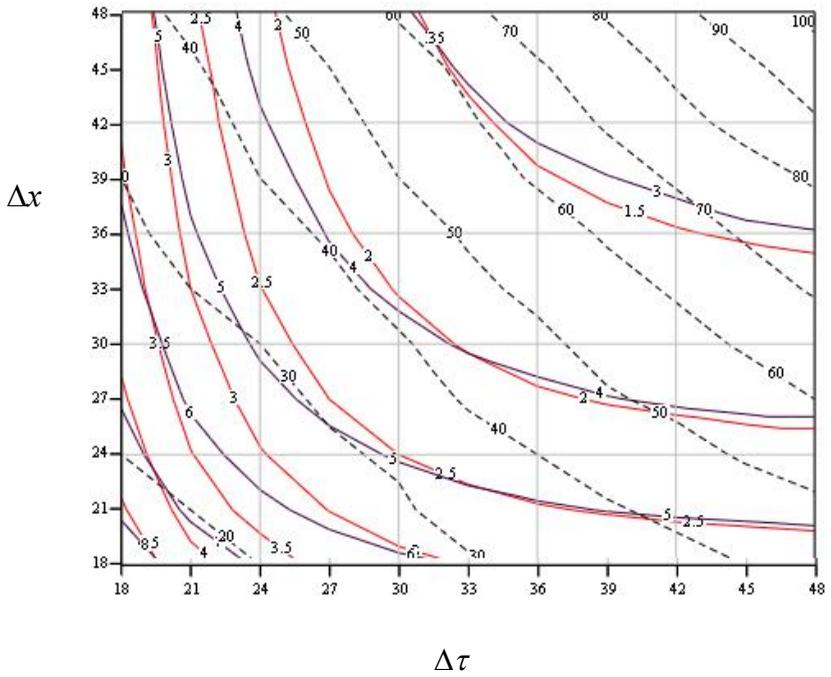
Для  $R=0,1$  м



Для  $R=0,2$  м



Для  $R=0,25$  м



## Вербальное описание сети Network18

Поля базы данных (исходные симптомы):

1\_1  
1\_2  
2\_1  
1\_3  
3\_1  
3\_2  
3\_3  
4\_1  
5\_1  
5\_2

Поля базы данных (конечные синдромы):

6

Предобработка входных полей БД для подачи сети:

1\_1=(1\_1-1250)/712  
1\_2=(1\_2-2875)/2125  
2\_1=(2\_1-425)/325  
1\_3=(1\_3-892,5)/179,5  
3\_1=(3\_1-3036)/2815  
3\_2=(3\_2-3281,5)/3260,5  
3\_3=(3\_3-1390)/40  
4\_1=(4\_1-1790)/1040  
5\_1=(5\_1-650)/550  
5\_2=(5\_2-1430)/1270

Функциональные преобразователи:

Сигмоида1(A)=A/(0,1+|A|)

Сигмоида2(A)=A/(0,1+|A|)

Сигмоида3(A)=A/(0,1+|A|)

Синдромы 1-го уровня:

Синдром1\_1=Сигмоида1(-  
0,04816936\*1\_1+0,1189812\*1\_2+0,07877628\*2\_1+  
0,167682\*1\_3+0,3975756\*3\_1+0,07109313\*3\_2+0,451448\*3\_3  
+0,2646086\*4\_1+0,02211121\*5\_1-0,1729587\*5\_2-0,2374441)  
Синдром1\_2=Сигмоида1(-0,2018509\*1\_1-0,1992084\*1\_2-  
0,1351101\*2\_1-0,03499014\*1\_3-  
0,04868349\*3\_1+0,04812786\*3\_2-  
0,122913\*3\_3+0,09974796\*4\_1+0,1337488\*5\_1-  
0,09731347\*5\_2-0,2045703)  
Синдром1\_3=Сигмоида1(0,08637279\*1\_1+0,02005417\*1\_2+0,  
03861208\*2\_1-0,2655519\*1\_3-  
0,05535201\*3\_1+0,265674\*3\_2-

0,08832116\*3\_3+0,07313495\*4\_1-  
 0,05126419\*5\_1+0,4372906\*5\_2+0,3425141)

Синдром1\_4=Сигмоида1( 0,01438232\*1\_1-0,02906558\*1\_2-  
 0,0130067\*2\_1+  
 0,2360928\*1\_3-  
 0,5218546\*3\_1+0,3967358\*3\_2+0,1831717\*3\_3-  
 0,05317055\*4\_1+  
 0,05465798\*5\_1-0,08915152\*5\_2+0,04318338 )

Синдром1\_5=Сигмоида1( 0,04604527\*1\_1+0,003401897\*1\_2+0,1007308\*2\_1-  
 0,02663691\*1\_3-  
 0,08646954\*3\_1+0,1380418\*3\_2+0,2091295\*3\_3-  
 0,08009829\*4\_1+  
 0,100016\*5\_1-0,286691\*5\_2-0,1459851 )

Синдром1\_6=Сигмоида1( 0,2081787\*1\_1+0,2669029\*1\_2+0,1282023\*2\_1-  
 0,1044145\*1\_3+0,2589834\*3\_1+0,56624\*3\_2+0,06040254\*3\_3  
 +0,511966\*4\_1+  
 0,02185771\*5\_1+0,01951517\*5\_2+0,1679969 )

Синдром1\_7=Сигмоида1( -  
 0,08177287\*1\_1+0,006012298\*1\_2-0,09776101\*2\_1-  
 0,1105131\*1\_3-0,2017791\*3\_1-0,1499638\*3\_2-  
 0,2490019\*3\_3-0,3090146\*4\_1+  
 0,2185054\*5\_1+0,1769931\*5\_2-0,1965776 )

Синдром1\_8=Сигмоида1( -0,09034039\*1\_1-  
 0,03626776\*1\_2-0,1112949\*2\_1+  
 0,3102951\*1\_3+0,1728468\*3\_1-  
 0,4645988\*3\_2+0,1944018\*3\_3-0,09412305\*4\_1-  
 0,090925\*5\_1-0,1010927\*5\_2+0,1247821 )

Синдромы 2-го уровня:  
 Синдром2\_1=Сигмоида2( 0,0063444458\*Синдром1\_1-  
 0,009881148\*Синдром1\_2+  
 0,07856519\*Синдром1\_3-0,2106596\*Синдром1\_4-  
 0,138929\*Синдром1\_5+  
 0,2117772\*Синдром1\_6-0,3473417\*Синдром1\_7-  
 0,3712775\*Синдром1\_8-0,08256616)

Синдром2\_2=Сигмоида2( 0,3869066\*Синдром1\_1+0,1752208\*Синдром1\_2+  
 0,406458\*Синдром1\_3-  
 0,4123129\*Синдром1\_4+0,6624426\*Синдром1\_5-  
 0,5362264\*Синдром1\_6+0,01778048\*Синдром1\_7+0,5779421\*С  
 индром1\_8-0,4321207)

Синдром2\_3=Сигмоида2( 0,1237896\*Синдром1\_1-  
 0,1131821\*Синдром1\_2+  
 0,09749679\*Синдром1\_3-  
 0,4290446\*Синдром1\_4+0,07776666\*Синдром1\_5+

$0,08725802 * \text{Синдром1\_6} -$   
 $0,1218649 * \text{Синдром1\_7} + 0,01015049 * \text{Синдром1\_8} + 0,01879446 )$   
 $\text{Синдром2\_4} = \text{Сигмоида2} ($   
 $0,306731 * \text{Синдром1\_1} + 0,07130643 * \text{Синдром1\_2} -$   
 $0,2591335 * \text{Синдром1\_3} + 0,08919316 * \text{Синдром1\_4} -$   
 $0,2420018 * \text{Синдром1\_5} + 0,1902656 * \text{Синдром1\_6}$   
 $- 0,02050479 * \text{Синдром1\_7} - 0,8888596 * \text{Синдром1\_8} -$   
 $0,231349)$   
 $\text{Синдром2\_5} = \text{Сигмоида2} ($   
 $0,2773974 * \text{Синдром1\_1} + 0,01796362 * \text{Синдром1\_2} -$   
 $0,0343491 * \text{Синдром1\_3} + 0,09472919 * \text{Синдром1\_4} -$   
 $0,09579101 * \text{Синдром1\_5} +$   
 $0,1581238 * \text{Синдром1\_6} - 0,2204121 * \text{Синдром1\_7} -$   
 $0,1880706 * \text{Синдром1\_8} - 0,1118037)$   
 $\text{Синдром2\_6} = \text{Сигмоида2} ( -$   
 $0,5146939 * \text{Синдром1\_1} + 0,1315127 * \text{Синдром1\_2} -$   
 $0,335341 * \text{Синдром1\_3} - 0,09267803 * \text{Синдром1\_4} -$   
 $0,08081326 * \text{Синдром1\_5} +$   
 $0,2933448 * \text{Синдром1\_6} + 0,09894907 * \text{Синдром1\_7} -$   
 $0,176656 * \text{Синдром1\_8} - 0,1370387)$   
 $\text{Синдром2\_7} = \text{Сигмоида2} ($   
 $0,09244384 * \text{Синдром1\_1} + 0,2691358 * \text{Синдром1\_2} -$   
 $0,03593606 * \text{Синдром1\_3} - 0,1574322 * \text{Синдром1\_4} -$   
 $0,09175999 * \text{Синдром1\_5} -$   
 $0,2142566 * \text{Синдром1\_6} -$   
 $0,4050245 * \text{Синдром1\_7} + 0,06625052 * \text{Синдром1\_8} + 0,1999692)$   
 $\text{Синдром2\_8} = \text{Сигмоида2} ($   
 $0,01497124 * \text{Синдром1\_1} + 0,1142732 * \text{Синдром1\_2} +$   
 $0,3982937 * \text{Синдром1\_3} + 0,2610648 * \text{Синдром1\_4} + 0,03800527 * \text{Синдром1\_5} +$   
 $0,006202944 * \text{Синдром1\_6} - 0,4686761 * \text{Синдром1\_7} -$   
 $0,3675291 * \text{Синдром1\_8} + 0,01135852 )$   
 $\text{Синдром2\_9} = \text{Сигмоида2} ( 0,2236896 * \text{Синдром1\_1} + 0,1201117 * \text{Синдром1\_2} -$   
 $0,3618819 * \text{Синдром1\_3} - 0,5116071 * \text{Синдром1\_4}$   
 $+ 0,01560986 * \text{Синдром1\_5} + 0,001671345 * \text{Синдром1\_6} + 0,428417$   
 $3 * \text{Синдром1\_7} + 0,3503356 * \text{Синдром1\_8} - 0,2280765)$

Синдромы 3-го уровня:

$\text{Синдром3\_1} = \text{Сигмоида3} ( 0,2573154 * \text{Синдром2\_1} -$   
 $0,1978768 * \text{Синдром2\_2} - 0,1465518 * \text{Синдром2\_3} -$   
 $0,335375 * \text{Синдром2\_4} - 0,2086371 * \text{Синдром2\_5} -$   
 $0,5393804 * \text{Синдром2\_6} -$   
 $0,3214413 * \text{Синдром2\_7} + 0,4141091 * \text{Синдром2\_8} +$   
 $0,5173212 * \text{Синдром2\_9} + 0,3715639 )$   
 $\text{Синдром3\_2} = \text{Сигмоида3} ( 0,1473207 * \text{Синдром2\_1} -$   
 $0,2977631 * \text{Синдром2\_2} +$   
 $0,02546388 * \text{Синдром2\_3} - 0,1769246 * \text{Синдром2\_4} -$   
 $0,05261194 * \text{Синдром2\_5} +$

0,2146922\*Синдром2\_6-  
 0,233501\*Синдром2\_7+0,165482\*Синдром2\_8-  
 0,4901374\*Синдром2\_9-0,1288438 )  
 Синдром3\_3=Сигмоида3 ( -0,01193896\*Синдром2\_1-  
 0,1301905\*Синдром2\_2+  
 0,05843284\*Синдром2\_3-  
 0,1865885\*Синдром2\_4+0,2044419\*Синдром2\_5-  
 0,03998429\*Синдром2\_6-0,1631256\*Синдром2\_7-  
 0,1729477\*Синдром2\_8-  
 0,09806628\*Синдром2\_9-0,07171183 )  
 Синдром3\_4=Сигмоида3 ( 0,1781617\*Синдром2\_1-  
 0,6887165\*Синдром2\_2-  
 0,1935019\*Синдром2\_3-0,01387521\*Синдром2\_4-  
 0,1116074\*Синдром2\_5+  
 0,005295027\*Синдром2\_6-0,08193539\*Синдром2\_7-  
 0,0357977\*Синдром2\_8+  
 0,001023268\*Синдром2\_9+0,07481384 )  
 Синдром3\_5=Сигмоида3 ( 0,2543527\*Синдром2\_1-  
 0,7227218\*Синдром2\_2-  
 0,4060162\*Синдром2\_3-0,9070691\*Синдром2\_4-  
 0,2169636\*Синдром2\_5-  
 0,02518443\*Синдром2\_6-  
 0,4941209\*Синдром2\_7+0,3285064\*Синдром2\_8+  
 0,2222955\*Синдром2\_9-0,3788701 )  
 Синдром3\_6=Сигмоида3 ( 0,07090247\*Синдром2\_1-  
 0,1188674\*Синдром2\_2-  
 0,03448777\*Синдром2\_3-0,6629391\*Синдром2\_4-  
 0,09766162\*Синдром2\_5+  
 0,04543343\*Синдром2\_6+0,09959193\*Синдром2\_7-  
 0,08291807\*Синдром2\_8-  
 0,1116699\*Синдром2\_9+0,1799003 )  
 Синдром3\_7=Сигмоида3 ( -  
 0,2892008\*Синдром2\_1+0,2947514\*Синдром2\_2+  
 0,1033911\*Синдром2\_3-  
 0,06469759\*Синдром2\_4+0,3377583\*Синдром2\_5+  
 0,3062595\*Синдром2\_6+0,24402\*Синдром2\_7-  
 0,1555926\*Синдром2\_8-  
 0,0003095554\*Синдром2\_9-0,05732972 )

Конечные синдромы:

6=Синдром3\_1-0,7847641\*Синдром3\_2-  
 0,4153274\*Синдром3\_3+  
 0,5216755\*Синдром3\_4+Синдром3\_5-  
 0,8507353\*Синдром3\_6-  
 0,746999\*Синдром3\_7-0,2910176

Постобработка конечных синдромов:

$6 = ((6 * 1) + 1) / 2$

!Program WistMat – программа на основании вербального описания

! ----- нейронной сети

Implicit Real (a-z)

Logical LogType

integer i,j

Real text(120),tex1(58)

42 format(58A1,f1 1.6)

43 format(58a1,f1 1.6,'|')

12 format(58A1,f1 1.3)

13 format(58a1,f1 1.3,'|')

22 format(58A1,f1 1.1)

23 format(58a1,f1 1.1,'|')

32 format(58A1,f1 1.5)

33 format(58a1,f1 1.5,'|')

55 format(70a1)

open (2,file='Wist\_in.txt',form='formatted',status='old')

open (3,file='Wist\_out.txt',form='formatted',status='old')

read (2,55)(text(i),i=1,70)

write(3,55)(text(i),i=1,70)

read (2,12)(TEX1(J),J=1,58),p1\_1

write(3,13)(TEX1(J),J=1,58),p1\_1

read (2,22)(TEX1(J),J=1,58),p1\_2

write(3,23)(TEX1(J),J=1,58),p1\_2

read (2,22)(TEX1(J),J=1,58),p2\_1

write(3,23)(TEX1(J),J=1,58),p2\_1

read (2,12)(TEX1(J),J=1,58),p1\_3

write(3,13)(TEX1(J),J=1,58),p1\_3

read (2,42)(TEX1(J),J=1,58),p3\_1

write(3,43)(TEX1(J),J=1,58),p3\_1

read (2,42)(TEX1(J),J=1,58),p3\_2

write(3,43)(TEX1(J),J=1,58),p3\_2

read (2,22)(TEX1(J),J=1,58),p3\_3

write(3,23)(TEX1(J),J=1,58),p3\_3

read (2,32)(TEX1(J),J=1,58),p4\_1

write(3,33)(TEX1(J),J=1,58),p4\_1

read (2,22)(TEX1(J),J=1,58),p5\_1

write(3,23)(TEX1(J),J=1,58),p5\_1

read (2,12)(TEX1(J),J=1,58),p5\_2

write(3,13)(TEX1(J),J=1,58),p5\_2

read (2,55)(text(i),i=1,70)

write(3,55)(text(i),i=1,70)

! Поля базы данных (исходные симптомы):

p1\_1=p1\_1\*1000

p1\_2=p1\_2\*10

p2\_1=p2\_1\*10

p1\_3=p1\_3\*1000

p3\_1=p3\_1\*1000000

p3\_2=p3\_2\*100000

p3\_3=p3\_3\*1

$p4\_1=p4\_1*100000$   
 $p5\_1=p5\_1*10$   
 $p5\_2=p5\_2*1000$

! Поля базы данных (конечные синдромы):

! p6

! Предобработка входных полей БД для подачи сети:

$p1\_1=(p1\_1-1250)/712$   
 $p1\_2=(p1\_2-2875)/2125$   
 $p2\_1=(p2\_1-425)/325$   
 $p1\_3=(p1\_3-892.5)/179.5$   
 $p3\_1=(p3\_1-3036)/2815$   
 $p3\_2=(p3\_2-3281.5)/3260.5$   
 $p3\_3=(p3\_3-1390)/40$   
 $p4\_1=(p4\_1-1790)/1040$   
 $p5\_1=(p5\_1-650)/550$   
 $p5\_2=(p5\_2-1430)/1270$

! Функциональные преобразователи:

! Сигмоида1(A)=A/(0.1+|A|)

! Сигмоида2(A)=A/(0.1+|A|)

! Сигмоида3(A)=A/(0.1+|A|)

! Синдромы 1-го уровня:

$Sindrom1\_1=Sigmoida(-0.04816936*p1\_1+0.1189812*p1\_2+$   
\*  $0.07877628*p2\_1+0.167682*p1\_3+0.3975756*p3\_1$   
\*  $+0.07109313*p3\_2+0.451448*p3\_3+0.2646086*p4\_1$   
\*  $+0.02211121*p5\_1-0.1729587*p5\_2-0.2374441)$

$Sindrom1\_2=Sigmoida(-0.2018509*p1\_1-0.1992084*p1\_2-$   
\*  $0.1351101*p2\_1-0.03499014*p1\_3-$   
\*  $0.04868349*p3\_1+0.04812786*p3\_2$   
\*  $-0.122913*p3\_3+0.09974796*p4\_1+$   
\*  $0.1337488*p5\_1-0.09731347*p5\_2-0.2045703)$

$Sindrom1\_3=Sigmoida(0.08637279*p1\_1+0.02005417*p1\_2+$   
\*  $0.03861208*p2\_1-0.2655519*p1\_3-0.05535201*p3\_1$   
\*  $+0.265674*p3\_2-0.08832116*p3\_3+0.07313495*p4\_1$   
\*  $-0.05126419*p5\_1+0.4372906*p5\_2+0.3425141)$

$Sindrom1\_4=Sigmoida(0.01438232*p1\_1-0.02906558*p1\_2-$   
\*  $0.0130067*p2\_1+0.2360928*p1\_3-0.5218546*p3\_1+$   
\*  $0.3967358*p3\_2+0.1831717*p3\_3-0.05317055*p4\_1$   
\*  $+0.05465798*p5\_1-0.08915152*p5\_2+0.04318338)$

$Sindrom1\_5=Sigmoida(0.04604527*p1\_1+0.003401897*p1\_2+$   
\*  $0.1007308*p2\_1-0.02663691*p1\_3-$   
\*  $0.08646954*p3\_1+0.1380418*p3\_2+0.2091295*p3\_3$   
\*  $-0.08009829*p4\_1+0.100016*p5\_1-0.286691*p5\_2$   
\*  $-0.1459851)$

$Sindrom1\_6=Sigmoida(0.2081787*p1\_1+0.2669029*p1\_2+0.1282023*p2\_1-$

$$\begin{aligned}
& * 0.1044145 * p_{1\_3} + 0.2589834 * p_{3\_1} + 0.56624 * p_{3\_2} + \\
& * 0.06040254 * p_{3\_3} + 0.511966 * p_{4\_1} + 0.02185771 * p_{5\_1} \\
& * + 0.01951517 * p_{5\_2} + 0.1679969)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Sindrom1\_7} = & \text{Sigmoida}(-0.08177287 * p_{1\_1} + 0.006012298 * p_{1\_2} - \\
& * 0.09776101 * p_{2\_1} - 0.1105131 * p_{1\_3} - 0.2017791 * p_{3\_1} \\
& * - 0.1499638 * p_{3\_2} - 0.2490019 * p_{3\_3} - 0.3090146 * p_{4\_1} + \\
& * 0.2185054 * p_{5\_1} + 0.1769931 * p_{5\_2} - 0.1965776)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Sindrom1\_8} = & \text{Sigmoida}(-0.09034039 * p_{1\_1} - 0.03626776 * p_{1\_2} - \\
& * 0.1112949 * p_{2\_1} + 0.3102951 * p_{1\_3} + 0.1728468 * p_{3\_1} \\
& * - 0.4645988 * p_{3\_2} + 0.1944018 * p_{3\_3} - 0.09412305 * p_{4\_1} \\
& * - 0.090925 * p_{5\_1} - 0.1010927 * p_{5\_2} + 0.1247821)
\end{aligned}$$

! Синдромы 2-го уровня:

$$\begin{aligned}
\text{Sindrom2\_1} = & \text{Sigmoida}(0.006344458 * \text{Sindrom1\_1} - 0.009881148 * \text{Sindrom1\_2} \\
& * + 0.07856519 * \text{Sindrom1\_3} - 0.2106596 * \text{Sindrom1\_4} - \\
& * 0.138929 * \text{Sindrom1\_5} + 0.2117772 * \text{Sindrom1\_6} - \\
& * 0.3473417 * \text{Sindrom1\_7} - 0.3712775 * \text{Sindrom1\_8} - \\
& * 0.08256616)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Sindrom2\_2} = & \text{Sigmoida}(0.3869066 * \text{Sindrom1\_1} + 0.1752208 * \text{Sindrom1\_2} + \\
& * 0.406458 * \text{Sindrom1\_3} - 0.4123129 * \text{Sindrom1\_4} + \\
& * 0.6624426 * \text{Sindrom1\_5} - 0.5362264 * \text{Sindrom1\_6} + \\
& * 0.01778048 * \text{Sindrom1\_7} + 0.5779421 * \text{Sindrom1\_8} - \\
& * 0.4321207)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Sindrom2\_3} = & \text{Sigmoida}(0.1237896 * \text{Sindrom1\_1} - 0.1131821 * \text{Sindrom1\_2} + \\
& * 0.09749679 * \text{Sindrom1\_3} - 0.4290446 * \text{Sindrom1\_4} + \\
& * 0.07776666 * \text{Sindrom1\_5} + 0.08725802 * \text{Sindrom1\_6} - \\
& * 0.1218649 * \text{Sindrom1\_7} + 0.01015049 * \text{Sindrom1\_8} + \\
& * 0.01879446)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Sindrom2\_4} = & \text{Sigmoida}(0.306731 * \text{Sindrom1\_1} + 0.07130643 * \text{Sindrom1\_2} - \\
& * 0.2591335 * \text{Sindrom1\_3} + 0.08919316 * \text{Sindrom1\_4} - \\
& * 0.2420018 * \text{Sindrom1\_5} + 0.1902656 * \text{Sindrom1\_6} - \\
& * 0.02050479 * \text{Sindrom1\_7} - 0.8888596 * \text{Sindrom1\_8} - \\
& * 0.231349)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Sindrom2\_5} = & \text{Sigmoida}(0.2773974 * \text{Sindrom1\_1} + 0.01796362 * \text{Sindrom1\_2} - \\
& * 0.0343491 * \text{Sindrom1\_3} + 0.09472919 * \text{Sindrom1\_4} - \\
& * 0.09579101 * \text{Sindrom1\_5} + 0.1581238 * \text{Sindrom1\_6} - \\
& * 0.2204121 * \text{Sindrom1\_7} - 0.1880706 * \text{Sindrom1\_8} - \\
& * 0.1118037)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Sindrom2\_6} = & \text{Sigmoida}(-0.5146939 * \text{Sindrom1\_1} + 0.1315127 * \text{Sindrom1\_2} - \\
& * 0.335341 * \text{Sindrom1\_3} - 0.09267803 * \text{Sindrom1\_4} - \\
& * 0.08081326 * \text{Sindrom1\_5} + 0.2933448 * \text{Sindrom1\_6} + \\
& * 0.09894907 * \text{Sindrom1\_7} - 0.176656 * \text{Sindrom1\_8} - \\
& * 0.1370387)
\end{aligned}$$

$$\text{Sindrom2\_7} = \text{Sigmoida}(0.09244384 * \text{Sindrom1\_1} + 0.2691358 * \text{Sindrom1\_2} -$$

\* 0.03593606\*Sindrom1\_3-0.1574322\*Sindrom1\_4-  
\* 0.09175999\*Sindrom1\_5-0.2142566\*Sindrom1\_6-  
\* 0.4050245\*Sindrom1\_7+0.06625052\*Sindrom1\_8+  
\* 0.1999692)

Sindrom2\_8=Sigmoida(0.01497124\*Sindrom1\_1+0.1142732\*Sindrom1\_2+  
\* 0.3982937\*Sindrom1\_3+0.2610648\*Sindrom1\_4+  
\* 0.03800527\*Sindrom1\_5+0.006202944\*Sindrom1\_6-  
\* 0.4686761\*Sindrom1\_7-0.3675291\*Sindrom1\_8+  
\* 0.01135852)

Sindrom2\_9=Sigmoida(0.2236896\*Sindrom1\_1+0.1201117\*Sindrom1\_2-  
\* 0.3618819\*Sindrom1\_3-0.5116071\*Sindrom1\_4+  
\* 0.01560986\*Sindrom1\_5+0.001671345\*Sindrom1\_6+  
\* 0.4284173\*Sindrom1\_7+0.3503356\*Sindrom1\_8-  
\* 0.2280765)

! Синдромы 3-го уровня:

Sindrom3\_1=Sigmoida(0.2573154\*Sindrom2\_1-0.1978768\*Sindrom2\_2-  
\* 0.1465518\*Sindrom2\_3-0.335375\*Sindrom2\_4-  
\* 0.2086371\*Sindrom2\_5-0.5393804\*Sindrom2\_6-  
\* 0.3214413\*Sindrom2\_7+0.4141091\*Sindrom2\_8+  
\* 0.5173212\*Sindrom2\_9+0.3715639)

Sindrom3\_2=Sigmoida(0.1473207\*Sindrom2\_1-0.2977631\*Sindrom2\_2+  
\* 0.02546388\*Sindrom2\_3-0.1769246\*Sindrom2\_4-  
\* 0.05261194\*Sindrom2\_5+0.2146922\*Sindrom2\_6-  
\* 0.233501\*Sindrom2\_7+0.165482\*Sindrom2\_8-  
\* 0.4901374\*Sindrom2\_9-0.1288438)

Sindrom3\_3=Sigmoida(-0.01193896\*Sindrom2\_1-0.1301905\*Sindrom2\_2+  
\* 0.05843284\*Sindrom2\_3-0.1865885\*Sindrom2\_4+  
\* 0.2044419\*Sindrom2\_5-0.03998429\*Sindrom2\_6-  
\* 0.1631256\*Sindrom2\_7-0.1729477\*Sindrom2\_8-  
\* 0.09806628\*Sindrom2\_9-0.07171183)

Sindrom3\_4=Sigmoida(0.1781617\*Sindrom2\_1-0.6887165\*Sindrom2\_2-  
\* 0.1935019\*Sindrom2\_3-0.01387521\*Sindrom2\_4-  
\* 0.1116074\*Sindrom2\_5+0.005295027\*Sindrom2\_6-  
\* 0.08193539\*Sindrom2\_7-0.0357977\*Sindrom2\_8+  
\* 0.001023268\*Sindrom2\_9+0.07481384)

Sindrom3\_5=Sigmoida(0.2543527\*Sindrom2\_1-0.7227218\*Sindrom2\_2-  
\* 0.4060162\*Sindrom2\_3-0.9070691\*Sindrom2\_4-  
\* 0.2169636\*Sindrom2\_5-0.02518443\*Sindrom2\_6-  
\* 0.4941209\*Sindrom2\_7+0.3285064\*Sindrom2\_8+  
\* 0.2222955\*Sindrom2\_9-0.3788701)

Sindrom3\_6=Sigmoida(0.07090247\*Sindrom2\_1-0.1188674\*Sindrom2\_2  
\* -0.03448777\*Sindrom2\_3-0.6629391\*Sindrom2\_4-  
\* 0.09766162\*Sindrom2\_5+0.04543343\*Sindrom2\_6+  
\* 0.09959193\*Sindrom2\_7-0.08291807\*Sindrom2\_8-

```

* 0.1116699*Sindrom2_9+0.1799003)
Sindrom3_7=Sigmoida(-0.2892008*Sindrom2_1+0.2947514*Sindrom2_2+
* 0.1033911*Sindrom2_3-0.06469759*Sindrom2_4+
* 0.3377583*Sindrom2_5+0.3062595*Sindrom2_6+
* 0.24402*Sindrom2_7-0.1555926*Sindrom2_8-
* 0.0003095554*Sindrom2_9-0.05732972)

```

! Конечные синдромы:

```

p6=Sindrom3_1-0.7847641*Sindrom3_2-0.4153274*Sindrom3_3+
*0.5216755*Sindrom3_4+Sindrom3_5-0.8507353*Sindrom3_6-
*0.746999*Sindrom3_7-0.2910176

```

! Постобработка конечных синдромов:

```

p6=(p6+1)/2

```

```

If(p6.GT.0.21).and.(p6.LT.0.79) then
Write (*,*) 'Error',p6
Write (3,*)' Превышение заданной погрешности !!!'
Write (3,*)' Решение не может быть принято !'
GoTo 69
End If
If(p6.LT.-0.21) then
Write (*,*) 'Error',p6
Write (3,*)' Превышение заданной погрешности !!!'
Write (3,*)' Установка рекуператора НЕ выгодна'
GoTo 69
End If
If(p6.GT.1.21) then
Write (*,*) 'Error',p6
Write (3,*)' Превышение заданной погрешности !!!'
Write (3,*)' Установка рекуператора ВЫГОДНА'
GoTo 69
End If

```

```

If(p6.LE.0.21) then
LogType=.false.
Write (3,*)' Установка рекуператора НЕ выгодна'
End If
If(p6.GE.0.79)then
LogType=.true.
Write (3,*)' Установка рекуператора ВЫГОДНА'
End If

```

```

Close (2)
Close (3)
Write (*,*) p6,LogType
Write (*,*)
Write (*,*) 'Ok !'
Write (*,*) 'Program has exited Successfully'
69 Pause 'Rezalts in "Wist_out.txt"'
Stop 'End of Program.'

```

END

! Функциональные преобразователи:

! Сигмоида  $1(A)=A/(0.1+|A|)$

Real\*8 Function Sigmoida(A)

Real A

Sigmoida=A/(0.1+abs(A))

Return

END

ГОРБУНОВ Владимир Александрович  
**Использование нейросетевых технологий для повышения  
энергетической эффективности теплотехнологических установок**  
Научное издание

Редактор Т.В. Соловьёва

Подписано в печать 10.10.11. Формат 60 x 84<sup>1</sup>/<sub>64</sub>

Печать плоская. Усл. печ. л. 29,75. Уч.-изд.л. 25. Тираж 200 экз. Заказ №  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

Типография «ПресСто»

153025. г. Иваново, ул. Дзержинского, 39