

~~Р 51~~
~~58-8~~

С. И. Родионов

Читальный зал

ГАШЕНИЕ ВОЛН СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ

✓

25.10.58

ИЗДАТЕЛЬСТВО

„Морской транспорт“

МОСКВА - 1958

С. И. РОДИОНОВ
КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Читальный зал

ГАШЕНИЕ ВОЛН СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ

(пневматические волноломы)

СИГНАЛЬНЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«МОРСКОЙ ТРАНСПОРТ»
МОСКВА — 1958

ГОС. НАУЧ. БИБЛИОТ. ЧИТАЛ.
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР

3377 6
59

11
11490

В брошюре даются краткие сведения по образованию и распространению ветровых волн и меры борьбы с волнением, проникшим на акваторию порта. Излагаются сущность нового способа гашения волн сжатым воздухом и произведенные исследования его как в СССР, так и за рубежом. Приводятся теоретическое обоснование гашения волн сжатым воздухом, а также соображения об экономической целесообразности использования этого способа гашения волн. Описывается возможность применения пневматического волнолома на водном транспорте и в других отраслях хозяйства.

Брошюра рассчитана на научных работников, проектировщиков и производственников.

~~РЗ1
58-8~~

ВВЕДЕНИЕ

Волны, возникающие на поверхности морей, озер, водохранилищ, приносят огромные убытки народному хозяйству своими разрушительными действиями.

Защита от волнения представляет очень сложную задачу. Трудность ее решения объясняется прежде всего тем, что сущность самого явления морских волн и их природа до настоящего времени изучены еще недостаточно. Установлено, что в ряде случаев существующие внешние оградительные сооружения портов не обеспечивают защиты от волнения вследствие неудачного расположения этих сооружений в плане.

Обычными способами защиты от волнений являются сооружения, осуществляемые в виде молов или волноломов, представляющие собой массивные инженерные сооружения. Для возведения этих сооружений требуется много времени и большие капиталовложения. Наряду с указанными сооружениями, предназначенными для защиты от волн, были выдвинуты новые в виде плавучих и качающихся волноломов, донных прорезей и др. Однако эти новые защитные сооружения не получили практического применения из-за несовершенства конструкций и их малой изученности. Возникла новая идея гашения волн при помощи сжатого воздуха (пневматические волноломы).

Сущность пневматического волнолома состоит в том, что в массу воды, охваченную волнением, сжатый воздух непрерывно вводят по трубам, уложенным по дну водного бассейна. Воздух, выходящий из отверстий труб, поднимается вверх в виде множества пузырьков и образует род вертикальной воздушной завесы, которая нарушает правильный ритм волнового движения воды и способствует прекращению волнения или его уменьшению на том участке акватории, где создана такая завеса.

Пневматический волнолом подвергался многим лабораторным исследованиям и испытаниям в натуре. Опыты полностью подтвердили, что этим способом при помощи пневматического волнолома можно в известной мере погасить волнение в акватории. Однако внедрение пневматического волнолома в практику задер-

живается, так как среди ученых имеются существенные разногласия по его конструкции. Кроме того, ставится под сомнение экономичность сооружения пневматического волнолома.

Задача настоящей работы — критически рассмотреть весь имеющийся по этому вопросу материал, полученный в результате проведенных лабораторных и натурных испытаний как в Советском Союзе, так и за рубежом, осветить состояние исследовательских работ в настоящее время, а также дать рекомендации по практическому использованию пневматического волнолома. Однако эти рекомендации не претендуют на полное разрешение всех вопросов, связанных с пневматическим гашением волн. Требуется дальнейшее изучение действия пневматических волноломов и усовершенствование их конструкций.

ОБРАЗОВАНИЕ ВОЛН И МЕРЫ БОРЬБЫ С ВОЛНЕНИЕМ

Основной причиной образования волн на море, озере и крупных водохранилищах является ветер.

Ветровые волны по своей форме большей частью короткие, высокие, крутые, короткогребневые, а волны зыби — длинные, низкие, пологие и длинногребневые. В зависимости от различия в формах волн отдельных систем может возникнуть интерференция, т. е. наложение волн одной системы на волны других систем. Такое явление носит название толчеи. Толчея часто возникает в результате отражения волн от берегов и гидротехнических сооружений. В открытом море для развития волнения большое значение имеет сила ветра, а в прибрежных районах — его направление.

Глубина моря оказывает влияние на размеры волн, поэтому на характеристике поверхностей волны сказывается влияние дна, особенно при резком изменении глубин. В тех случаях, когда наблюдается постепенное уменьшение глубин и дно представляет собой плоскость с малым углом наклона к горизонту, заметное влияние дна начинает обнаруживаться при глубине, равной длине волны. Уменьшение глубины сказывается прежде всего на уменьшении скорости перемещения волны. В то же время наблюдается некоторое увеличение высоты волны, которое может быть объяснено передачей энергии от волны больших объемов к меньшим.

При распространении волны в сторону берега с выходом ее на еще меньшие глубины характер волны продолжает меняться. Волна становится круче, гребни ее заостряются и постепенно приобретают несимметричное очертание, как при вынужденной волне. Передний склон гребня волны становится круче, а задний — положе. Гребни волны перемещаются быстрее впадин, и, наконец, происходит обрушение гребня. Это явление может быть объяснено, как указывает проф. Божич, значительным сопротивлением,

которое оказывает дно продвижению волны. Тормозящее влияние дна, приложенное в нижней части волны, и инерционные силы, приложенные в верхней части волны, являются причиной обрушения волны.

Заход волн в порт через его ворота, их распространение и перестроирование на внутривортовой акватории происходят таким образом, что волна, проникающая через сравнительно узкие портовые входы в огражденную акваторию, расширяясь по всей ее ширине, уменьшается по высоте. Интенсивность этого уменьшения зависит от расположения оградительных акваторий в плане, типа оградительных сооружений и характера изменения глубины и ширины в пределах порта.

Одним из основных условий гашения энергии волны в портовой акватории являются размеры волны и прежде всего расстояние причальных линий от ворот входа в порт. Большой пробег волны вызывает большие потери ее энергии в пути. При этом надо учитывать волногасящие свойства сооружений, к которым подходит волна. Форма сооружений, ограждающих акваторию, играет значительную роль в состоянии волнового режима.

Опыт показывает, что в ряде портов построенные оградительные сооружения часто не оправдывают своего назначения вследствие неудачного их расположения.

В таких случаях волны проникают на акваторию порта и вызывают большие затруднения в погрузочно-разгрузочных операциях.

Можно привести пример неудачного расположения оградительных сооружений и входных ворот, например, в одном из портов, расположенном на побережье Черного моря, без всякой естественной защиты, вблизи больших глубин. Развивающееся в открытом море сильное волнение подкатывается к порту почти без всякой потери первоначальной энергии. Вход в порт обращен к востоку. Наиболее часто повторяющееся волнение наблюдается от востока к юго-востоку. Поэтому толчея в порту наблюдается так же часто, как и волнение на море. В этом порту наблюдается настолько сильное волнение, что часто ни у одного причала не обеспечивается спокойная стоянка судов.

Ученые давно работают над тем, чтобы изыскать новые способы защиты от волн портовых акваторий, которые обеспечили бы нормальную работу портов. В этом направлении проделана значительная работа. Остановимся вкратце на основных предложениях, разработанных в последнее время.

Сквозные волноломы [13], идея которых заключается в устройстве отдельных опор, перекрываемых пролетным строением (рис. 1). Крупных сооружений этого типа осуществлено очень немного.

Сооружение сквозного волнолома может быть целесообразным при следующих условиях: большие глубины или слабые прунты в основаниях при сравнительно слабом волнении. Эти

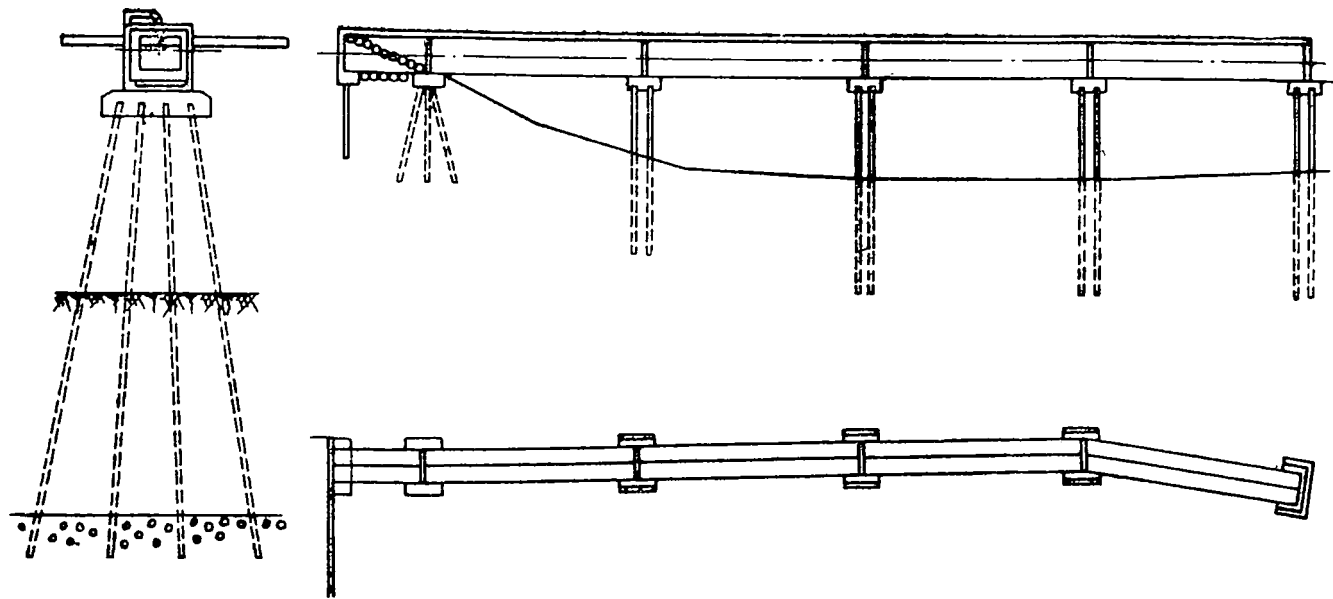


Рис. 1. Сквозной волнолом

условия соблюдаются на озерах, больших водохранилищах и озеровидных бьефах больших шлюзованных рек, где и могут найти себе применение сквозные волноломы для создания защищенных рейдов озерных и речных портов, портов-убежищ и т. п. Большим недостатком этой конструкции является то, что при больших колебаниях горизонта воды необходимо предусматривать ледозащитное устройство.

Плавающие волноломы. Сущность этой конструкции [13] состоит в том, что из отдельных плавающих секций, закрепленных на якорях, образуется волнолом (рис. 2). Секции соединяются между собой посредством гибких связей. Конструкция каждой секции должна отвечать условиям прочности, устойчивости и надежного закрепления на назначенном месте.

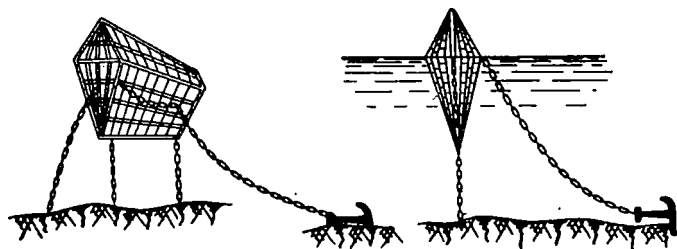


Рис. 2. Плавающий морской волнолом-гаситель

В 1940—1941 гг. Всесоюзное научно-инженерно-техническое общество водного транспорта провело открытый конкурс на лучшее решение задачи по созданию плавающих оградительных сооружений. Однако из 28 представленных проектов были присуждены третьи премии только 6 из них. Отсутствие проектов, премированных первой и второй премиями, объясняется сложностью решения задачи в части якорного закрепления и взаимной связи секций.

Качающиеся волноломы. Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева разработал новый тип морского оградительного сооружения — так называемый качающийся волнолом [6]. Основные возможные схемы волноломов этого типа показаны на рис. 3. Корпус качающегося волнолома представляет собой пустотелую железобетонную или металлическую конструкцию, разделенную продольными и поперечными перегородками на ряд отсеков. Длина каждой секции определяется технико-экономическими соображениями.

Как утверждают исследователи этой конструкции, опыты показали принципиальную возможность применения подобных сооружений для защиты от действия волн со стороны моря, а также берегов на водохранилищах. Этот тип сооружения заслуживает дальнейшей экспериментальной и теоретической разработки.

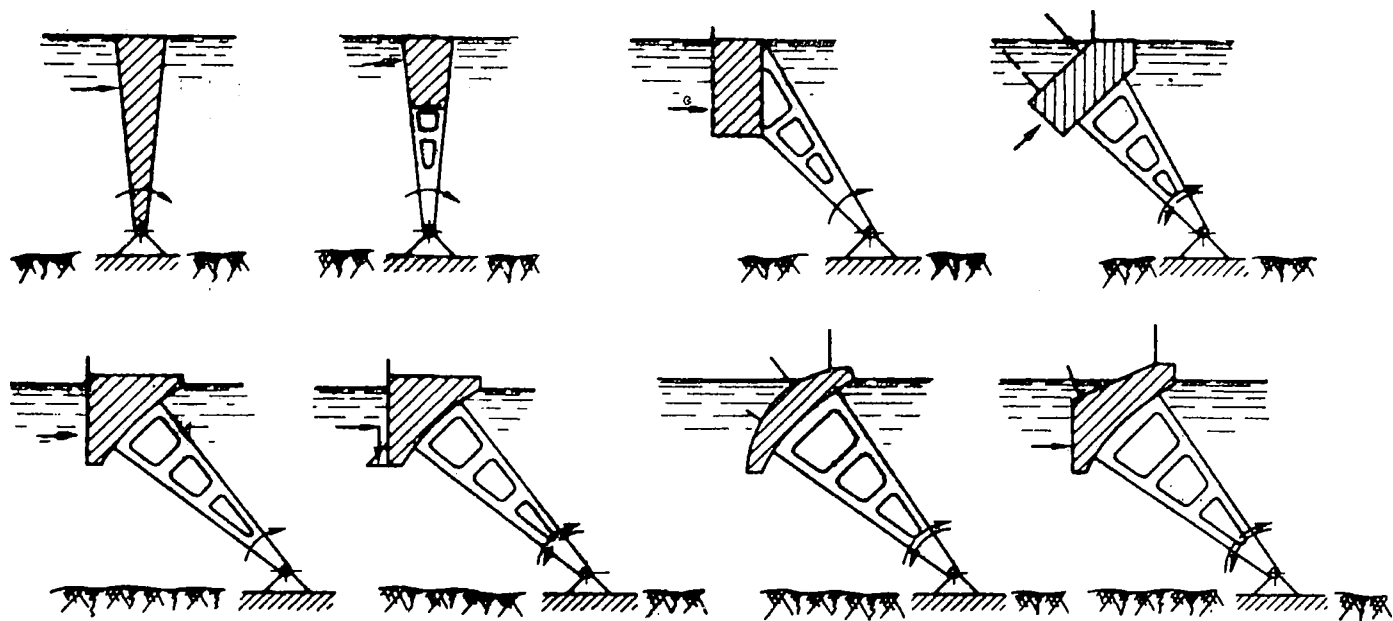


Рис. 3. Качающиеся волноломы

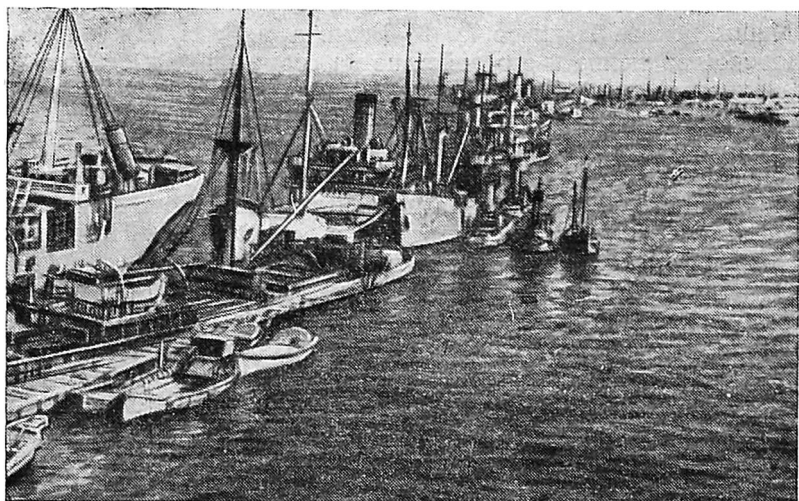


Рис. 4. Ограждение из затопленных судов

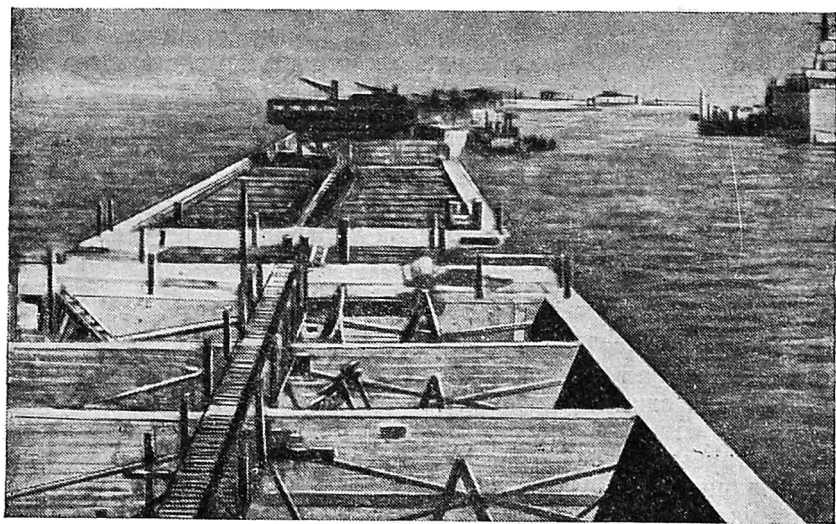


Рис. 5. Ограждение из полых массивов

Донные прорези, сущность которых состоит в том, что поперек перемещения волн устраивается ров шириной около полудлины волны. В книге П. К. Божича и Н. Н. Джунковского «Морское волнение и его действие на сооружение и берега» рассматривается этот вопрос и дается определение прорезям как волногасящим устройствам.

Такие прорези можно устраивать в воротах порта. Стоимость их определяется объемом землечерпательных работ, а эксплуатационные расходы будут незначительными. Этот новый способ, по нашему мнению, таит в себе большие возможности. Но для подтверждения необходимо провести опыты в натуре.

Имеются и другие виды временных ограждающих сооружений при специальных назначениях, как это имело место при высадке десанта на берег Франции во вторую мировую войну. Эти ограждения состояли из судов или полых железобетонных массивов (рис. 4, 5). Но этот вид ограждения не является новым, до этого случая в советских условиях применялись массивы-гиганты и буксировка их производилась на определенное расстояние от места изготовления.

ГАШЕНИЕ ВОЛН СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ

Наиболее надежным типом волнозащитных сооружений являются гравитационные конструкции, однако, как показал опыт, очертание этих сооружений в плане не всегда удавалось запроектировать правильно, что приводило к их переустройству. Это переустройство выражалось в удлинении молов и волноломов, изменении месторасположения входов в порт и т. д., что приводило к дополнительным большим затратам средств на эти работы. Однако и после переустройства не всегда достигалась желаемая цель. В ряде случаев применение гравитационных сооружений становилось невозможным из-за выхода на большие глубины и наличия слабых грунтов. Все это привело ученых к изысканиям новых видов волнозащитных устройств. В этом направлении проделана известная работа, и особый интерес представляет новый тип волнолома, который назван в соответствии с принципом его действия пневматическим волноломом (гашение волны при помощи сжатого воздуха).

Конструкция пневматического волнолома состоит из металлической трубы, имеющей мелкие отверстия, часто расположенные по ее длине, из которых воздух непрерывно поступает в воду. Труба укладывается по дну или близ дна на подставках; в некоторых случаях она может быть уложена на поплавках, которые закорячиваются.

Действие пневматического волнолома состоит в том, что в массу воды, охваченную волнением, непрерывно вводят сжатый воздух по трубам. Воздух, выходя из отверстий трубы в виде множества пузырьков, поднимаясь вверх и постепенно расши-

ряясь, образует род вертикальной воздушной завесы, которая способствует прекращению или уменьшению волнения на участке, где создана такая завеса. Схема действия воздуха показана на рис. 6. К трубе в одном или нескольких местах присоединяют воздухопровод, по которому сжатый воздух поступает от компрессора в трубу волнолома (рис. 7).

Пневматический волнолом указанной конструкции подвергался лабораторным и опытным исследованиям как в СССР, так и за рубежом.

Первые сведения о пневматических волноломах появились в 1907 г. в статье Брешера. По-видимому, этот автор впервые сформулировал принцип воздействия сжатого воздуха на волны. В 1915 г. была другая статья по этому же вопросу под названием «Пневматический волнолом Брешера». Почти одновременно появилась статья Роберта Скаретта под названием «Вступайте в

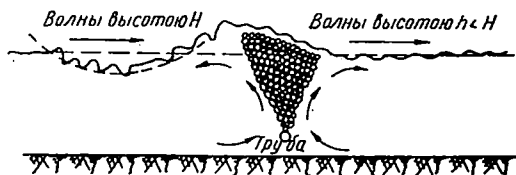


Рис. 6. Схема пневматического волнолома

единоборство с морской стихией, мобилизовав для этого сжатый воздух».

В 1921 г. в немецком журнале опубликована статья Висселинга «Сжатый воздух в роли волнолома».

Неоднократные попытки осуществить на практике принцип применения сжатого воздуха в качестве волнолома делались в СССР. Опыты по применению пневматических волноломов проводились в 1930 г. в районе порта Махачкала на Каспийском море, в порту Туапсе на Черном море, а также во Владивостоке.

И. А. Боголепов сообщает, что первая серия лабораторных опытов не только доказала возможность борьбы с разрушительной силой волны при помощи сжатого воздуха, но дала также возможность создать гипотезы, объясняющие это явление.

Исследования проводились в бассейне шириной 6,7 м, длиной свыше 100 м и глубиной 3,5 м.

Модель пневматического волнолома представляла собой металлическую трубку диаметром 50 мм. Выпускные отверстия для воздуха имели в диаметре 2, 3, 4 и 6 мм. Расстояния между этими отверстиями колебались в пределах от 5 до 40 см.

Во время испытаний трубки пневматических волноломов размещались в один, два и три ряда.

Воздух под давлением до 6 атм подавался компрессором производительностью 2,2 м³/мин.

Наилучший результат, т. е. полное успокоение волн высотой 22 см за 15—20 сек., был достигнут при применении однотрубного волнолома при погружении трубки на глубину 2,8 м с повернутыми книзу воздушными отверстиями. Диаметр этих отверстий равнялся 2 мм, расстояние между ними составляло 50 мм.

Опытами было выявлено важное значение более глубокого опускания труб волнолома. При опускании труб на большую глубину получались лучшие результаты.

В 1947 г. в лаборатории Московского отделения Центрального научно-исследовательского института речного флота под руководством проф. П. К. Божича были проведены опыты, имевшие целью

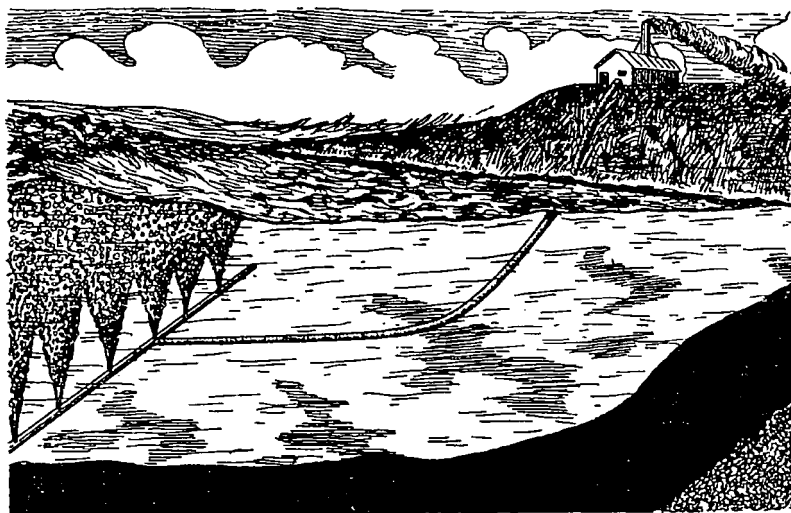


Рис. 7. Схема пневматического волнолома в натуре

проверить данные о возможности в лабораторных условиях гасить волны с помощью пневматического волногасителя, а также выявить в первом приближении влияние на эффективность пневматического гашения волн двух важных факторов: удельного расхода воздуха и избыточного давления в волногасителе.

На основании анализа проведенных опытов были сделаны следующие выводы: возможности гашения волн с помощью сжатого воздуха довольно широки, а именно: в опытах удалось достигнуть гашения волны по ее высоте на 74% и по энергии на 93%; отношение длины волны к ее высоте равнялось 11—15.

Конструкция пневматического волнолома, несмотря на всю видимую ее простоту, тем не менее сильно влияет на эффективность его действия. Например, частая перфорация $d=2$ мм через 50 мм обеспечила более лучшее гашение волн, чем крупная редкая перфорация $d=4$ мм через 100 мм, несмотря на то что во

В установке были использованы два компрессора общей производительностью $1,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ и максимальным давлением до 12 атм . От компрессоров сжатый воздух подавался по воздухопроводу диаметром в один дюйм в уравнивательный бак (ресивер), при помощи которого выравнивалась подача воздуха в коллектор. Емкость ресивера $4,5 \text{ м}^3$. От ресивера по воздухопроводу диаметром $1,5$ дюйма сжатый воздух направлялся к дроссельному прибору, посредством которого определялась величина расхода воздуха.

От дроссельного прибора сжатый воздух следовал по прорезиненному шлангу к распределителю, а затем в коллектор, который устанавливался в волновом лотке. Для равномерного распределения расхода воздуха по длине коллектора питание последнего производилось в четырех точках.

Коллектор погружался на 16 см в масштабе $1:50$, что соответствует натуре — 8 м , затем пускался воздух.

Испытание производилось при четырех различных величинах расхода и давления. Перед дроссельным прибором установилось давление, соответственно равное $0,5$; $1,0$; $1,5$ и $2,0 \text{ атм}$. Изменение величины давления P_1 вызывало изменение величины расхода воздуха Q_1 через диафрагму. Величину расхода воздуха Q_1 определяли с помощью тарировочных кривых по перепаду давления (в мм) ртутного столба дифференциального манометра.

Давление воздуха на выходе его из коллектора в воду замерялось с помощью двух точных металлических манометров, связанных прорезиненными шлангами с концами коллектора. В расчет принималось среднее арифметическое из показания обоих манометров.

Испытывавшиеся коллекторы имели диаметр отверстий 2 мм , шаг отверстий — 25 мм и один ряд отверстий.

Отверстия располагались по верхней образующей коллектора.

В процессе проведения опытов потребовалось выявить влияние направления скорости выхода воздуха на коэффициент гашения и влияние глубины погружения коллектора на эффект гашения. Направление отверстий у коллекторов было: навстречу движению волны, по движению волны, вверх и под углом 45° к направлению движения волны. Опыты по направлению вниз не проводились, так как по условиям исследования труба должна была находиться на дне моря у входа в порт.

Первичная обработка опытных данных состояла в построении графиков $k=f(Q)$, $k=f(P)$ и $v=\varphi(P)$ для всех серий опытов. В пределах каждой серии такие графики строились для каждого типа коллектора, т. е. для всевозможных размеров и схем расположения выходных отверстий — в один, два и три ряда, при различной степени сгущения отверстий.

Комплект графиков и послужил основным исходным материалом для последующей обработки, анализа опытных данных и выводов.

Основным показателем, характеризующим эффективность действия пневматического волногасителя любого типа, является расход энергии, затрачиваемой на единицу длины коллектора.

При подаче воздуха сила будет определяться произведением давления на площадь потока PF , а путь в единицу времени — скоростью потока V , откуда переданная воздуху мощность

$$N = P \cdot F \cdot V \approx PQ,$$

$$P \text{ в } \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}; \quad Q \text{ в } \frac{\text{м}^3}{\text{сек}}; \quad N \text{ в } \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}}$$

$$N \text{ квт} \approx \frac{QP}{102}.$$

Для получения сопоставимых данных характеристика мощности воздушного потока должна исчисляться относительно сечений, совпадающих с выходными отверстиями перфорированных труб, т. е. без учета потерь напора, а следовательно, и мощности в воздухопроводной системе и компрессорной установке, поскольку эти потери будут в каждом отдельном случае определяться конкретными условиями, присущими данной установке. Определение этих потерь не представляет никаких трудностей и при проектировании той или иной установки должно проводиться по обычной методике гидравлического расчета воздухопроводных систем. При наших исследованиях характеристики $k=f_1(QP)$ были необходимы для следующих трех основных целей:

1) нахождения оптимальной рабочей точки для каждого типа коллектора при заданном волновом режиме;

2) сравнения между собой эффективности действия коллекторов различных типов в пределах каждой серии опытов и сопоставления расхода мощности для отдельных серий при работе установок на оптимальных режимах; установленных для каждой серии;

3) получения исходных данных по расходу мощности при различных волновых режимах, которые в дальнейшем могли бы быть использованы при расчете и проектировании установок в натуре.

При наличии исходных графиков $k=f(Q)$ и $Q=\psi(P)$ построение энергетических кривых $k=f_1(QP)$ не представляло никаких затруднений и значения искомых ординат получались путем перемножения значений соответствующих ординат Q и P , взятых с исходных графиков.

Для удобства сопоставления эффективности действия коллекторов различных типов кривые $k=f_1(QP)$, полученные для отдельных коллекторов в пределах одной серии, совмещались на одном графике (рис. 9).

Рассмотрение кривых $k=f_1(QP)$, полученных в пределах одной серии опытов (для данного волнового режима) для различных диаметров и шага отверстий, позволяет убедиться в том,

что при прочих равных условиях удельный расход мощности будет тем меньше, чем больше размер отверстий, и что более редкое расположение крупных отверстий более выгодно, чем частое расположение относительно мелких отверстий. Для достижения одного и того же значения коэффициента гашения расход энергии воздушной струи при крупных отверстиях оказывается меньшим, чем при часто расположенных мелких отверстиях. Эта общая закономерность, судя по графикам $k=f_1(QP)$, имеет свои исключения; последние, однако, являются немногочисленными и объясняются, по-видимому, случайными обстоятельствами. Уве-

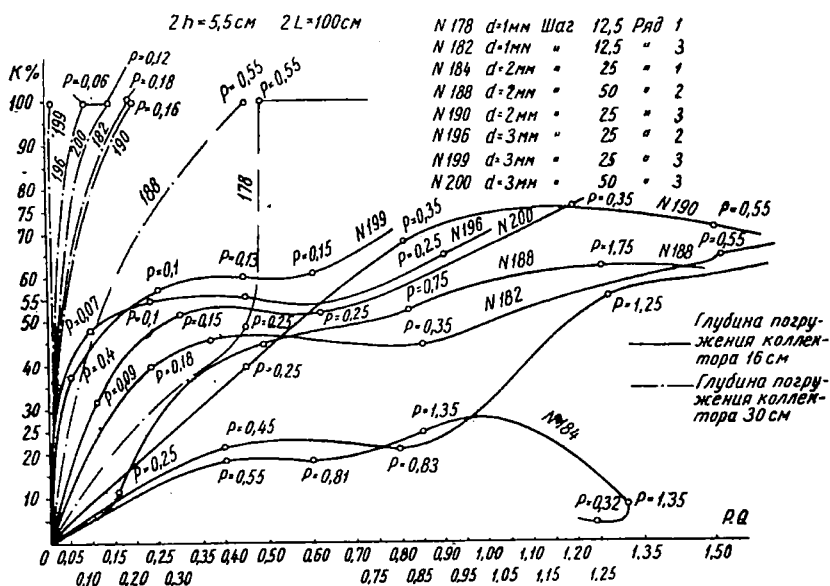


Рис. 9. Обобщенный график зависимости коэффициента гашения $k=f(QP)$

личение расхода энергии при мелких отверстиях объясняется, несомненно, увеличением гидравлических сопротивлений при соответственном уменьшении гидравлического радиуса.

Одним из наиболее спорных вопросов, возникших в процессе ранее проводившихся исследований, являлся вопрос о наиболее выгодном режиме работы пневматического волнолома в отношении действующего напора воздуха.

При рассмотрении энергетических кривых $k=f_1(QP)$ почти во всех случаях обнаруживается наличие ясно выраженного перелома, после которого увеличение мощности не сопровождается сколько-нибудь существенным повышением значения коэффициента гашения. Это изменение в характере кривой $k=f_1(QP)$ обуславливается в основном характером зависимости $k=\varphi(P)$. Увеличение напора сверх определенного довольно низкого предела нецелесообразно, так как кривая $k=f(Q)$ резко меняет свое

положение и становится почти параллельной оси абсцисс. Этот перелом кривых $k = \varphi(P)$ и находит соответствующее отражение в характере результирующих энергетических кривых $k = f_1(QP)$. Иными словами, чрезмерное увеличение напора и соответствующее ему увеличение расхода воздуха снижают общую эффективность действия воздушной струи, которая при большом избыточном напоре пробивает водяную подушку и безрезультатно рассеивается в атмосфере.

Очевидно, что давление воздуха должно быть во всяком случае достаточным для того, чтобы преодолеть давление столба воды, расположенного выше перфорированной трубы. При этом необходимо учитывать возвышение гребня волны над спокойным уровнем при максимальной высоте волны, возможной в данном районе, а также обеспечить (не свыше 0,3—0,5 атм) избыточный напор воздуха.

По этим соображениям и учитывая, что основной запас энергии колеблющейся жидкости заключен в верхних слоях ее, при значительной глубине, следует полагать целесообразным ограничить глубину погружения перфорированной трубы, с тем чтобы сократить противодействие столба, а вместе с тем и величину рабочего давления.

При определении влияния направления скорости выхода воздуха на коэффициент гашения следует различать два случая.

1. Истечение воздуха из коллектора в воду происходит при давлении, незначительно превышающем статический напор воды над плоскостью отверстий коллектора. При этом пузырьки воздуха поднимаются под действием собственной подъемной силы.

Результаты опытов показывают, что в этом случае направление скорости выхода воздуха не влияет на эффект гашения.

2. Истечение воздуха из коллектора в воду происходит под давлением 0,5—1,0, 1,5—2,0 атм. Здесь направление скорости выхода воздуха уже имеет значение. Наилучшие результаты получились при истечении воздуха навстречу распространению волны; это может быть объяснено тем, что при таком положении энергии воздушного потока расходуется в значительно большей степени на нарушение орбитального движения частиц воды, чем при выпуске вверх, когда часть энергии воздушного потока, прорывающегося через толщу воды, рассеивается в атмосфере.

При разработке методики пересчета результатов исследования моделей пневматических волноломов в целях практического использования этих результатов при проектировании опытной установки в натуральном масштабе было принято следующее.

Если обозначить энергию исходной волны через $\mathcal{E}_{исх}$, то можно предположить наличие равенства

$$\mathcal{E}_{исх} = \mathcal{E}_{отр} + \mathcal{E}_{гаш} + \mathcal{E}_{ост},$$

где $\mathcal{E}_{отр}$ — часть энергии, отраженная воздушной завесой;

$\mathcal{E}_{гаш}$ — часть энергии, погашенная при взаимодействии двух сред;

$\mathcal{E}_{ост}$ — часть энергии, распространяющаяся сквозь воздушную завесу.

Следует ожидать, что при прочих равных условиях значение $\mathcal{E}_{гаш}$ волны будет находиться в прямой зависимости от энергии, заключенной в воздушном потоке, исходящем из перфорированных труб пневматического волнолома. Если принять эту гипотезу подобия, то для суждения о законе моделирования взаимодействия волны и воздушного потока можно предположить наличие зависимости

$$\frac{\mathcal{E}_{гаш}}{mQP} \approx e \quad (\text{const} < 1,0),$$

где Q — расход воздуха;

P — давление воздуха у выхода из коллектора;

m — постоянный коэффициент, учитывающий соотношение размерностей.

Известно, что энергия волны, отнесенная к единице площади волновой поверхности, составляет

$$\mathcal{E} = 0,5 \rho g h^2 \left[1 - 2\pi^2 \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right],$$

где ρ — плотность жидкости (морской воды);

h — половина высоты волны;

l — половина длины волны.

Так как при обычных соотношениях

$$\frac{2h}{2L} \cdot 2\pi \left(\frac{h}{l} \right)^2$$

составляет малую долю единицы, то для приближенного значения $\mathcal{E}$ можно принять

$$\mathcal{E} = 0,5 \rho g h^2.$$

Тогда при одинаковой степени гашения волны, характеризваемой коэффициентом гашения K , получим следующие соотношения расходов мощности в натуре и на модели:

$$\frac{mQP_{нат}}{mQP_{мод}} = \frac{\Delta (c\rho g h^2)}{\Delta (c\rho g h^2)},$$

или

$$\frac{mQP_{нат}}{mQP_{мод}} = \lambda^2 \quad (1)$$

где λ — линейный масштабный коэффициент, определяемый соотношением размеров волны в натуре и на модели.

Пользуясь предложенной зависимостью (1), получим следующие характеристики расхода воздуха, давления на выходе из пер-

форированной трубы и затраты мощности воздушного потока (без учета потерь напора и мощности в воздухопроводах, компрессорах и т. д.) для различных волновых режимов в натуре. Эти данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

Серия опытов	$2h$	$2L$	Расход * воздуха на 1 пог. м Q_2 , м ³ /сек	Давление на выходе из трубы P_2 , атм	Мощность воздушного потока на выходе, квт на пог м.	Коэффициент гашения, %
VIII	2,75	50	2,5	1,5	3,5	95
VII	3,0	40	5,0	1,5	5,5	90
IV	5,0	50	7,5	1,7	8,0	45
VI	5,0	90	6,0	1,7	6,5	30

* Расходы воздуха даны при атмосферном давлении.

Приведенные в табл. 1 данные соответствуют упомянутым выше оптимальным рабочим точкам характеристик $k=f_1(QP)$, полученных опытным путем.

Приведенные выше теоретические соображения в известной мере подтверждаются результатами проведенных опытов по определению Q и P при различных масштабах моделирования и одинаковых типах перфорированных труб, коэффициентах гашения и очертаниях исходной волны. Следует иметь в виду, что эти опыты (серии IV — VIII) охватывают очень малый диапазон изменения масштабов (при значениях λ не свыше 2), обусловливаемый техническими возможностями волнового лотка. Кроме того, в ряде случаев наблюдались значительные отклонения от предполагаемой квадратичной зависимости, преимущественно в сторону уменьшения показателя степени.

По этой причине предлагаемую методику пересчета следует рассматривать как ориентировочную, так как она нуждается в дальнейшем экспериментальном подтверждении путем проведения опытов при значительно больших интервалах значения.

Из этих опытов можно сделать вывод, что исходная волна зыби частично отражается от воздушной завесы, частично гасится в процессе взаимодействия с воздушной завесой. При этом установлено, что уменьшение высоты волны позади пневматического волнолома сопровождается увеличением амплитуды исходной волны перед воздушной завесой.

Потребный расход воздуха, соответствующий оптимальному режиму эксплуатации, установленному лабораторными исследованиями, может быть найден делением произведения QP на величину P .

Рабочее давление на выходе из перфорированной трубы (без учета потерь в компрессорах и подводящей сети) определяется по следующей зависимости:

$$P = H + h + \Delta h_0 + \Delta p, \quad (2)$$

где P — рабочее давление (избыточное — сверх атмосферного) в м вод. ст.;

H — глубина погружения трубопровода ниже спокойного уровня воды в м;

$h + \Delta h_0$ — повышение гребня волны над спокойным уровнем;

Δp — избыточное давление, составляющее 2—5 м вод. ст., в зависимости от масштаба установки и абсолютного значения P .

Увеличение давления сверх пределов, обусловливаемых высотой столба жидкости, равной глубине погружения трубопровода с учетом возвышения гребня волны над уровнем спокойного горизонта и необходимого избыточного напора, нежелательно.

Мощность установки для достижения одного и того же коэффициента гашения увеличивается с увеличением размеров волны. При сохранении соотношений размеров элементов высоты волны и ее длины расход мощности установки на 1 пог. м трубы будет увеличиваться примерно пропорционально квадрату увеличения линейных размеров. При одинаковой высоте волны длинную волну гасить труднее, чем короткую. Для определения потребной мощности установки предлагается следующая зависимость

$$QP_{\text{нат}} = \lambda^2 (QP) \text{ мод (в расчете на 1 м)}. \quad (3)$$

В качестве отправных данных для расчета пневматических волноломов могут быть в первом приближении использованы оптимальные рабочие точки характеристик $K = f_1(QP)$, приведенные в табл. 1. Расход мощности на 1 пог. м может быть при этом получен пересчетом по формуле (3).

Максимальная эффективность действия пневматического гашения волн должна достигаться при выпуске воздуха не через отдельные отверстия, а через сплошную щель переменного сечения. Практически по конструктивным соображениям сплошную щель возможно заменить рядом сравнительно коротких прорезей, постепенно увеличивающихся по ширине по мере удаления из точки подвода воздуха, как показано на рис. 10.

Опытная установка в натуре по испытанию действия сжатого воздуха на гашение волн была проведена Центральным научно-исследовательским институтом водного транспорта в одной из бухт на Черном море.

Установка состояла из линии труб волнолома, силовой (компрессорной) станции, уравнильного резервуара и щита с контрольно-измерительными приборами.

Волнолом состоял из двух линий труб общей длиной 100 м, расположенных в плане на расстоянии 25 м одна от другой на

глубине 10 м. По длине каждая линия труб состояла из семи звеньев. Среднее звено длиной 30 м, два звена по обе стороны от среднего были по 15 м, а 4 крайних по 10 м каждое.

В поперечном сечении трубы располагались одна над другой по вертикали: нижняя рабочая труба — для выпуска воздуха в воду, верхняя — распределительная труба (рис. 11).

Для подвода воздуха с берега к распределительной трубе на половине длины волнолома (до середины средней секции) была уложена третья подводящая труба.

Рабочая труба внутренним диаметром 50 мм имела по длине отверстия диаметром 4 мм через 100 мм. Для выпуска сжатого воздуха отверстия были направлены вниз.

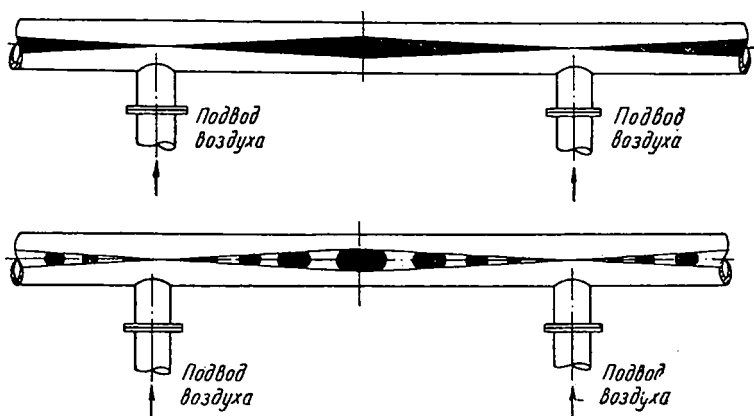


Рис. 10. Теоретически наилучшие очертания отверстий пневматического волнолома

Распределительная труба внутренним диаметром 75 мм соединялась с рабочей особыми трубками. Подводящая труба диаметром 100 мм соединялась с береговой воздухоподводящей магистралью посредством шланга диаметром 125 мм.

Для удобства монтажа установки волнолом, как указано выше, был разбит по длине на семь отдельных секций. Каждая секция включала рабочую, распределительную и подводящую трубы и монтировалась полностью на берегу.

По высоте трубы соединялись между собой двойными хомутами. Эти хомуты не только обеспечивали жесткость секции, но и служили местом прикрепления: в верхней части — буюв, поддерживавших секцию волнолома на плаву, в нижней части — стального троса, соединявшего секцию с железобетонным якорем, опущенным на дно моря.

В качестве уравнильного воздушного резервуара был использован паровой котел емкостью 15 м³. Необходимость в уравнильном резервуаре обусловлена, с одной стороны, разнотип-

ностью и различной мощностью компрессоров, с другой — вообще недостаточной мощностью всей компрессорной установки.

Силовая станция состояла из шести компрессоров с двигателями внутреннего сгорания. Общая мощность компрессорной установки не превышала $30 \text{ м}^3/\text{мин}$, тогда как по предварительному проекту требовалось не менее $120 \text{ м}^3/\text{мин}$. Контрольно-измерительные приборы были смонтированы для удобства наблюдения в одном пункте.

Давление в компрессорах измерялось пружинным манометром, давление в трубах волнолома — водолазным манометром, а давление в уравнительном резервуаре — самопишущим манометром Ришера. Количество воздуха, поступившее из уравнительного резервуара в трубы волнолома, измерялось с помощью нормальной диафрагмы и трубки Пито, установленной в подводящей магистрали.

Для измерения элементов волны за и перед волноломом использовались волномерные веи и буйки, установленные на определенных расстояниях друг от друга.

Действие опытной установки сводилось к следующему. Сжатый воздух под давлением $6\text{--}7 \text{ атм}$ поступал в уравнительный резервуар, откуда через подводящую трубу направлялся к середине распределительной трубы; из этой трубы воздух через патрубки поступал в рабочую трубу и далее через отверстия выходил в воду.

При установлении методики экспериментирования были использованы опыты, проведенные в лабораториях. На основе этих опытов удалось установить основные параметры натурного пневматического волнолома, давление воздуха, размеры выходных отверстий и расстояние между ними, а также глубины погружения трубы.

Первые же опыты в натуре подтвердили результаты лабораторных исследований в том, что степень ташения волн находится в прямой зависимости от величины расхода и давления воздуха. В этих опытах минимальное давление воздуха, при котором гасились волны высотой от $0,7\text{--}1,5 \text{ м}$, равнялось 6 атм .

Наиболее сильное волнение в бухте в период проведения опытов характеризовалось следующими данными: сила волнения 4 балла, высота волны $1,5 \text{ м}$, длина волны 12 м , период волны $3\text{--}4 \text{ сек}$. При работе одной линии волнолома, равной 50 м , расход воздуха составлял 25 л/сек. пог. м ($1,5 \text{ м}^3/\text{мин}$).

Начальное давление воздуха было $7,5 \text{ атм}$. При этом волна за линией действия волнолома оставалась высотой $0,2 \text{ м}$.

Опыты в натуре показали, что при уменьшении расхода и падения давления до $3\text{--}4 \text{ атм}$, эффект гашения волны резко снижается.

Кроме определения количества расхода воздуха и величины давления воздуха, в этих исследованиях были определены скорости течения воды под действием движущегося в ней воздуха,

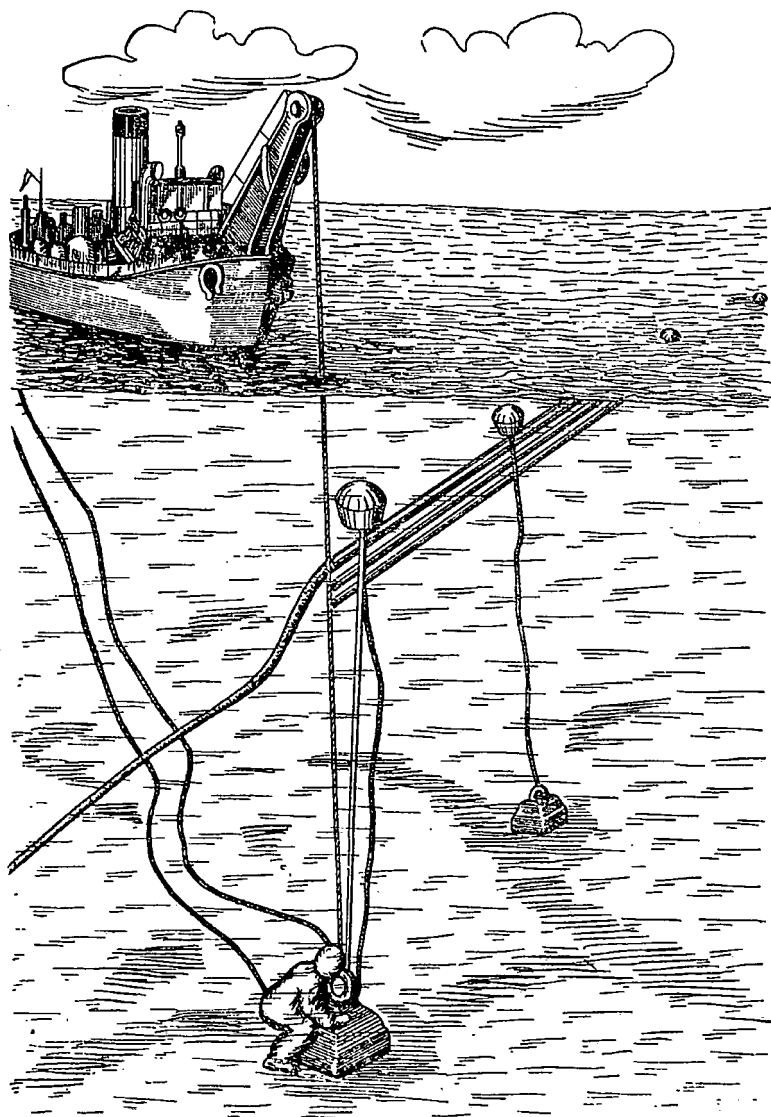


Рис. 11. Опытная установка в натуре

направления этих течений. Определялись скорость в зависимости от величины расхода и давления воздуха, диаметр выходных отверстий, расстояние между отверстиями, глубины заложения трубы.

Эти опыты показали полную возможность гашения волн, а также дали большое количество материала для объяснения процесса, происходящего в воде при взаимодействии ее со сжатым воздухом.

Опыты в бухте позволили установить величину расхода воздуха в 25—30 л/сек на 1 пог. м волнолома при давлении 8 атм.

В части конструкции волнолома можно сказать следующее.

Подводящая магистраль должна иметь площадь поперечного сечения большую, чем суммарная площадь сечения выходных отверстий, расположенных на том участке трубы, который она снабжает воздухом.

Величина площади сечения перфорированной трубы должна быть равной площади сечения подводящей трубы и определяться диаметром в зависимости также от диаметра трубы действующего волнолома.

Наиболее оптимальный размер выходного отверстия установлен равным $d = 1,5—2$ мм.

Расстояния между выходными отверстиями должны быть 100—150 мм.

Глубина погружения труб должна быть равной глубине распространения волнения. Глубина, при которой производились настоящие эксперименты, не превышала 10 м.

Опыты, проведенные в бухте, имели серьезные недостатки. Главный из них — отсутствие мощного компрессора.

Вместо требуемого компрессора мощностью 120 м³/мин, использовался компрессор 30 м³/мин, а поэтому не было возможности осуществить бесперебойную работу экспериментального волнолома.

Сами авторы признают, что результаты данных опытов не могут быть распространены на нормальные производственные условия и не являются исходным материалом для проектирования пневматических волноломов. Эта работа может рассматриваться лишь как промежуточный этап в изучении работы волнолома, подтвердивший принципиальную возможность гашения волн сжатым воздухом.

Испытание пневматического волнолома в натуре производилось и на Каспийском море в районе Махачкала.

Этот опыт, предпринятый по инициативе Дагестанского рыбного треста и осуществленный на практике Таралинским институтом рыбного хозяйства, имел целью доказать возможность охраны рыбы от выбрасывания ее из сетей волнами, с одной стороны, и предохранения сетей от разрывов и повреждений в плохую погоду — с другой.

За границей проводились исследования пневматического волнолома как в лабораторных условиях, так и в натуре.

Определенная часть исследований заканчивалась неудачно, поэтому на некоторое время интерес к пневматическому волнолому ослаб. Но после большой серии опытов, проведенных в СССР и за рубежом, интерес к пневматическому волнолому снова стал возрастать. Об этом можно судить по целому ряду работ, опубликованных в голландских, английских, шведских, немецких, а также и американских журналах, с описанием проведенных опытов по применению пневматических волноломов. В Швеции инж. Плетцер произвел лабораторные опыты с целью дать приближенную оценку экономической целесообразности применения пневматического волнолома. В своих выводах он указывает, что пневматический волнолом работает с большой эффективностью за счет количества воздуха, т. е. за счет увеличения размера отверстий и уменьшения расстояния между ними, а не за счет повышения давления.

Плетцер считает, что причиной гашения волн является не сам воздух, а масса воды, которая, поднимаясь вслед за пузырьками, прерывает равномерное колебательное движение частиц жидкости.

В Голландии лабораторные исследования были проведены инж. Схейфом. В задачу этих исследований входило установление количественных данных, на основе которых можно было бы вывести зависимость между размерами волн и расходом воздуха, необходимого для их гашения.

В результате наблюдений Схейф считает, что причиной гашения волн является то, что поднимающийся воздух создает над трубой столб воды с большой примесью воздуха. Незначительная плотность этой смеси вызывает местное повышение уровня воды и ее циркуляцию, заключающуюся в том, что по обеим сторонам воздушного экрана возникают токи: у поверхности воды они имеют направление от экрана, а на дне — к экрану. У поверхности воды ток, идущий навстречу волнам, замедляет их скорость и делает их более высокими и стабильными. Как только это явление усиливается, волна гасится.

По Схейфу, количество потребного воздуха для гашения волны на 75% по высоте определяется зависимостью

$$q = \alpha \lambda d^{\frac{1}{2}}$$

или

$$q = 0,275 \lambda d^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где q — в см^3 на 1 см длины в 1 сек.;

α — постоянный коэффициент, равный 0,275;

λ — длина волны;

d — глубина заложения трубы волнолома.

Согласно формуле (4), при заложении трубы 10 м ($d = 1000$ см) и длине волны 40 м ($\lambda = 4000$ см) потребный расход воздуха будет 3,5 м³/сек на 1 пог. м, т. е. 210 м³/мин на 1 пог. м. Чтобы нагнетать такое количество воздуха на глубину 10 м, надо иметь мощность установки 320 л. с. на 1 пог. м. Эта мощность явно завышена. Схейф признает, что расчет по его формуле дает превышение по крайней мере в несколько десятков раз, и считает, что коэффициент 0,275 не является постоянным, а зависит от одной из определяющих величин, например глубины.

Вывод Схейфа о независимости количества потребного воздуха от высоты волны не подтверждается убедительно его же опытами.

Объяснения механизма гашения волн не являются новыми, а повторяются выводы ранних советских исследований.

В порту Дувр (Англия) необходимо было произвести капитальный ремонт внешних ворот, защищающих причал. При отсутствии внешних ворот внутренние ворота становятся уязвимыми для волн в момент открытия и закрытия ворот.

В целях обеспечения нормальных условий для транспортных перевозок в любую погоду на время ремонта внешних ворот перед их входом был установлен пневматический волнолом для гашения волн. Монтаж пневматического волнолома сделан в течение месяца.

Подробного описания этой установки не дается. Упоминается лишь, что трубы укладывались на дно моря с учетом отливов. Сжатый воздух подавался газотурбинным компрессором, который считался особенно пригодным для подачи большого количества воздуха.

Эта пневматическая установка себя оправдала и рекомендуется к использованию в тех случаях, когда нарушается нормальная эксплуатация дока или шлюза.

Для характеристики проводившихся за границей опытов в натуре приведем еще несколько примеров.

В США было использовано пневматическое гашение волн для защиты от прибоев дамбы Атлантик-Сити.

В бухте штата Массачусетс в США был применен пневматический волнолом для спасения судна. Длина труб 30 м, диаметр труб 100 мм, диаметр отверстий 6 мм, расстояние между отверстиями 150 мм. Работали три компрессора. Волны, проходившие через судно до пуска в действие компрессоров, были высотой от 4 до 6 м. После пуска воздуха волны превратились в низкие «медленно катящиеся валы».

В одном из французских журналов есть упоминание о практическом применении пневматического волнолома в качестве ограждения от волнения гавани строящегося порта во Франции. Акватория гавани была опраждена трубами, уложенными под водой на глубине, обеспечивающей свободный проход судна

в любую погоду. В период волнений в трубы подавался сжатый воздух, который, выходя через отверстия трубы, образовывал воздушную завесу по линии ограждения, препятствуя распространению волнения в акваторию тавани. Пневматический волнолом оправдал свое назначение.

В журнале «Док энд Харбор» № 416 от июня 1955 г. приведена работа с описанием опытов, проведенных немецкими экспериментаторами на моделях пневматических волноломов.

В указанной работе отмечается, что масштаб модели и закон подобия испытания волны на модели не может быть применен к условиям пневматического волнолома в натуре. Это объясняется тем, что удельные веса смеси воды и воздуха, размер и распределение воздушных пузырьков в лабораторных и натуральных условиях не находятся в определенной и известной зависимости. Таким образом, лабораторные опыты с моделью не могут обеспечить получения надежных данных относительно количества воздуха, требуемого для уменьшения волны в натуральных условиях.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГАШЕНИЯ ВОЛН СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ

При проведении экспериментальных работ по пневматическому гашению волн исследователи не могли обойти вопрос теории. Это и понятно, так как без теоретического обоснования гашения волн сжатым воздухом нельзя воспользоваться им для практических целей. Взаимодействие воздушных пузырьков с частицами воды представляет собой сложное физическое явление. В связи с этим ученые, проводившие исследования, высказали ряд гипотез по теоретическому обоснованию этого явления.

При предварительной обработке своих опытных лабораторных данных И. А. Боголепов сделал предположение, что вводимый воздух нарушает ритм колебательного движения волн, но не дал объяснения, каким образом это происходит.

В своей работе [12] Н. Д. Логинов указывает, что пузырьки воздуха под действием разности давления внутри и вне их расширяются, вызывая вихреобразование в окружающей среде. По его мнению, уничтожение волнения происходит тогда, когда сжатый воздух на всем протяжении своего движения в воде будет содержать известный запас внутреннего избыточного давления. Пузырьки воздуха, поднимаясь вверх, увлекают за собой массы воды и образуют вертикальные токи, которые в свою очередь создают горизонтальные поверхностные течения, направленные в обе стороны от волнолома. Горизонтальные течения, сталкиваясь со встречными волнами, порождают большое вихре-

образование, которое является также фактором гашения волн. В. Я. Керман [7] высказал мнение, что пузырьки воздуха, выходящие в большом количестве из отверстий трубы волнолома, нарушают сплошность массы воды и ее орбитального движения и создают на линии уложенных под водой труб волнолома зону пониженного гидростатического давления, способствующего образованию вертикальных токов воды, которое и является основной причиной разрушения волны.

В работе В. М. Лаврентьева и А. М. Басина «О принципе действия пневматического волнолома» (часть первая — «О движении пузырька воздуха в воде») рассматриваются вопросы движения пузырька воздуха в воде, пульсации пузырька и влияния давления на скорость движения. Очевидно, что вследствие ничтожной массы пузырька воздуха по сравнению с массой соответствующего объема воды он мгновенно будет терять свою скорость по выходе в воду, и, следовательно, начальная скорость пузырька, определяемая давлением в трубе, практически не оказывает влияния на скорость его последующего движения.

Скорость подъема пузырьков воздуха в воде — весьма существенная характеристика работы волнолома (как будет видно из дальнейшего).

Для пузырьков диаметром до 15 мм на основании ряда работ по сопротивлению твердых шариков приводим формулу

$$F = k\pi R^2 \frac{w^2}{2}, \quad (5)$$

где $k=0,4 \div 0,5$ — коэффициент обтекания при турбулентном режиме в момент подъема пузырьков.

При дальнейшем увеличении диаметра пузырьков меняется их форма, возникают пульсации, и приведенная формула перестает давать верные результаты.

Вследствие более сильного, чем по формуле, возрастания сопротивления при дальнейшем увеличении радиуса пузырьков скорость стремится к постоянной предельной величине.

Как уже было сказано выше, Схейф [17] высказал гипотезу. Столб воды с большой примесью воздуха, образующийся над перфорированной трубой, имеет малую плотность этой смеси, которая вызывает местное повышение уровня воды и, следовательно, циркуляцию воды, заключающуюся в том, что по обеим сторонам воздушного экрана возникают токи; у поверхности воды они имеют направление от воздушной завесы, а на дне — к воздушной завесе. Течение у поверхности воды, идущей навстречу волнам, замедляет их скорость. При усилении этого явления волна гасится. Однако с указанным выводом согласиться нельзя, так как большинство исследований подтверждает, что гашение волны происходит не на каком-то расстоянии от воздушной завесы, а у экрана.

Исследования Лаури [10] привели к выводу, что основным условием гашения волн является нарушение гармонического движения в вертикальной плоскости, за которую волны не могут пройти. Однако доказательства этого положения не подтверждены расчетами.

Основываясь на лабораторных опытах, проф. Н. Н. Джунковский пришел к заключению, что основной и важный фактор гашения волн — это отражение волны от воздушной завесы.

Придерживаясь точки зрения Н. Н. Джунковского, автор данной работы совместно с кандидатом физико-математических наук В. А. Смирновым пришли к следующей гипотезе, объясняющей явление отраженной волны при работе пневматического волнолома.

Механизм пневматического гашения волн либо отражает набегающие на него волны, либо способствует рассеянию их энергии. В зависимости от конструкции волнолома преобладающим является тот или иной из этих двух факторов.

В отношении пневматического волнолома до недавнего времени существовало убеждение, что его работа целиком обусловлена рассеянием энергии набегающих волн. Однако опыты с пневматическим волногашением, проведенные в 1948 и в 1950 гг. в экспериментальном лотке Московского инженерно-строительного института имени В. В. Куйбышева, убедительно показали, что при работе пневматического волнолома существует отраженная волна.

Поток пузырьков воздуха, отходящий от трубы волнолома, имеет чрезвычайно неустойчивый характер. Размеры поднимающихся пузырьков различны, по пути к поверхности воды они пульсируют, сливаются и вновь раздробляются. Благодаря этому при включении волнолома при спокойной поверхности воды от его факела волны расходятся. Однако вследствие малых периодов пульсации пузырьков воздуха в восходящем потоке, эти волны короткие и неупорядоченные, их периоды намного меньше периодов набегающих волн. Известно, что заметная интерференция возможна лишь между волнами, близкими по величине периода. Таким образом, рассмотрение работы пневматического волнолома на спокойной воде не может дать объяснение увеличению высоты набегающих волн. Очевидно, причина кроется во взаимодействии волн с факелом волнолома. Чтобы выяснить это, проследим за тем, как поднимаются пузырьки воздуха от трубы волнолома к поверхности воды при волнении.

Рассмотрим конкретный случай: длина волны $\lambda = 60$ м, высота волны $2h = 4$ м, глубина моря $H = 10$ м, глубина заложения трубы волнолома $H = 10$ м.

Примем, что скорость подъема пузырьков воздуха $V = 1,5$ м/сек.

Эта скорость будет практически постоянна на всем пути от трубы волнолома до поверхности воды. Вследствие своей ничтожной массы пузырек почти сразу по выходе из трубы приобретает ту скорость, при которой его сопротивление уравновесит силу его водоизмещения.

По известным формулам теории волн и жидкости конечной глубины получим [8] профиль волны

$$\zeta = h \cos(kx - \sigma t), \quad (6)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; $\sigma = \frac{2\pi}{\tau}$;

τ — период волны;

$$\tau = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g} \cdot \frac{1}{\tanh kH}}.$$

Для взятого примера $\tau = 7,4$ сек.

Скорости частиц в волне:

$$V_x = \frac{ghk}{\sigma} \cdot \frac{chk(z+H)}{chkH} \cos(kx - \sigma t), \quad (7)$$

$$V_z = \frac{ghk}{\sigma} \cdot \frac{shk(z+H)}{chkH} \sin(kx - \sigma t). \quad (7')$$

На рис. 12, а в масштабе изображены орбиты отдельных частиц в волне, подсчитанные по приведенным формулам (6) и (7).

Проследим за пузырьком воздуха, выходящим из трубы волнолома в тот момент, когда на поверхности над трубой волнолома проходит гребень волны. Скорость частиц волны в этот момент направлена в сторону распространения волны, слева направо, и по величине равна $V_x = 1,44$ м/сек (на глубине $H = 10$ м). Таким образом, пузырек воздуха, вышедший из трубы, помимо своей вертикальной скорости $V = 1,5$ м/сек, будет сноситься волной в горизонтальном направлении со скоростью $V = 1,44$ м/сек. В следующие за прохождением гребня волны моменты горизонтальная скорость частиц волны у дна будет уменьшаться и через четверть периода обратится в нуль. За это время ($\frac{\tau}{4} = 1,8$ сек.) рассматриваемый пузырек воздуха пройдет по вертикали 2,7 м, а по горизонтали отклонится вправо на 1,8 м. Пузырьки, вышедшие следом за ним, расположатся, как показано на рис. 12, б кривая 1. В течение следующей четверти периода над трубой волнолома пройдут точки от нисходящего узла волны до ее впадины, скорость частиц в волне направлена справа налево и возрастает от нуля до максимума. За эту четверть периода пузырьки, располагавшиеся ранее по кривой 1, поднимутся на $2,3 \div 2,7$ м и будут отнесены налево на $1,8 \div 2,0$ м. В результате пузырьки, находящиеся в положении 1, к концу

второй четверти периода займут положение 1 а, а вышедшие за эту четверть периода — положение 2 (см. рис. 12, б). Подобным образом можно проследить за движением пузырьков вплоть до поверхности воды. Кривые, дающие форму факела в четыре последовательных момента, отделенные друг от друга промежуток времени $\frac{\tau}{4}$, даны на рис. 12, в, где 1 — форма факела в момент, когда на поверхности над трубой волнолома проходит гребень волны, 2 — нисходящий узел, 3 — впадина волны, 4 — восходящий узел.

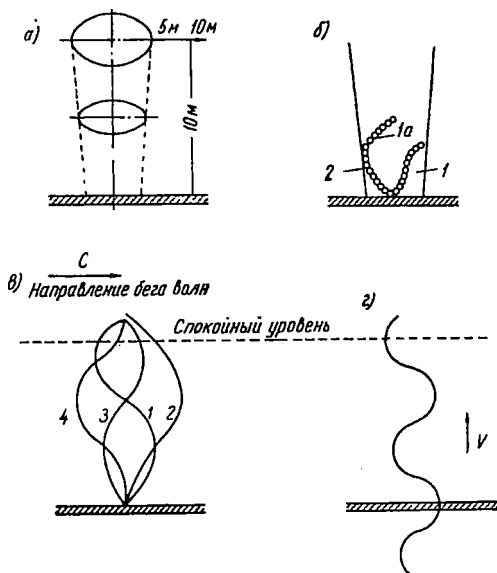


Рис. 12. Схема действия пузырька воздуха в воде по выходе из трубы

Форма факела волнолома в различные моменты времени (кривые, изображенные на рис. 12, в) может быть получена аналитически. Теория волн на поверхности жидкости конечной глубины дает для координат частиц в волне формулы:

$$x = x_0 - h \frac{ch k (z_0 + H)}{sh k H} \sin (k x_0 - \sigma t), \quad (8)$$

$$z = z_0 + h \frac{sh k (z_0 + H)}{sh k H} \cos (k x_0 - \sigma t), \quad (8')$$

где x_0 и z_0 — координаты рассматриваемой частицы в равновесном состоянии (при спокойной воде).

Для пузырька воздуха, выходящего из трубы волнолома и поднимающегося вверх со скоростью V , будет

$$x_0 = 0; \quad z_0 = -H + Vt$$

и, следовательно,

$$x = h \frac{chkv t}{shkH} \sin \sigma t, \quad (9)$$

$$z = -H + vt + h \frac{shkv t}{shkH} \cos \sigma t. \quad (9')$$

Формулы (9) и (9') дают в параметрическом виде траекторию пузырька воздуха, вышедшего из трубы в момент $t=0$, т. е. в момент прохождения над трубой гребня волны. Легко убедиться, что эти уравнения дают в то же время и форму факела волнолома для момента, когда над трубой проходит гребень волны, т. е. дают кривую I (см. рис. 12, в).

Для взятого численного примера

$$h=2 \text{ м}; k=\frac{2\pi}{\lambda}=0,105; \tau=7,2 \text{ сек}$$

$$\sigma=\frac{2\pi}{\tau}=0,0875 \text{ радиан/сек}=0,875 \cdot 57,3^\circ \frac{1}{\text{сек}}=50^\circ \frac{1}{\text{сек}};$$

$$kH=1,05; sh \cdot 1,05=1,21; V=1,5 \text{ м/сек};$$

$$kV=0,15 \frac{1}{\text{сек}} \cdot \frac{h}{shkH} = \frac{2}{1,21}=1,65 \text{ м.}$$

Формулы принимают вид:

$$x = 1,65 ch 0,15 t \sin 50^\circ t, \quad (10)$$

$$z = -10 + 1,5 t + 1,65 sh 0,15 t \cos 50^\circ t. \quad (10')$$

Рассчитанные по формулам (10) и (10') точки кривой I (см. рис. 12, в) даны в табл. 2.

Таблица 2

t	$sh 0,15 t$	$ch 0,15 t$	$\sin 50^\circ t$	$\cos 50^\circ t$	x	z
0	0,	1	0	1	0	-10
1	0,15	1,01	0,76	0,64	1,27	-8,35
2	0,305	1,045	0,98	-0,17	1,7	-7,1
3	0,465	1,1	0,5	-0,87	0,91	-6,1
4	0,64	1,186	-0,34	-0,94	-0,66	-4,6
5	0,82	1,3	-0,94	-0,34	-2,0	-2,8
6	1,025	1,43	-0,87	0,5	-2,06	-0,5
7	1,25	1,6	-0,17	0,8	-0,43	+1,7

Форма факела волнолома в любой момент времени определяется формулами:

$$x = h \frac{chkv t}{shkH} \sin \sigma (t + t_1), \quad (11)$$

$$z = -H + vt + h \frac{shkv t}{shkH} \cos \sigma (t + t_1), \quad (11')$$

Кривая 1 на рис. 12, в соответствует $t_1=0$; кривая 2 — $t_1=\frac{\tau}{4}$; кривая 3 — $t_1=\frac{\tau}{2}$ и кривая 4 — $t_1=\frac{3\tau}{4}$.

Факел волнолома под влиянием волнения принимает форму несколько искаженной синусоиды, амплитуда которой приблизительно равна высоте волны и которая перемещается вверх со скоростью V (скорость подъема пузырьков воздуха). Естественно, что вертикальное перемещение такой воздушной пелены, синусоидальной по профилю и увлекающей за собой значительные массы воды, вызывает появление на поверхности воды волн. Эти волны и наблюдаются в опытах в виде отраженных волн.

Таким образом, объяснение наблюдаемого в опытах явления отражения волны факелом волнолома заключается в том, что под влиянием волнения факел волнолома искривляется и подъем искривленной в виде синусоиды пелены воздуха вызывает на поверхности появление новых «отраженных» волн, интерферирующих с волнами, набегающими по обе стороны волнолома.

Для определения высоты возбуждаемых волн рассмотрим работу факела волнолома как волнопродуктора.

Пузырьки воздуха, выходящие из трубы волнолома, оказывают на окружающую жидкость воздействие, величина которого определяется законом Архимеда, т. е. равна водоизмещению пузырька воздуха. Время подъема пузырьков воздуха от трубы волнолома до поверхности $t = \frac{H}{V}$.

Если секундный расход воздуха из трубы волнолома, приведенный к нормальному давлению, равен Q м³/сек на 1 пог. м., то вследствие возрастания гидростатического давления с глубиной и соответственного уменьшения объема через сечение факела волнолома на глубине z будет проходить ежесекундно $Q \frac{10}{10-z}$ м³ на 1 пог. м.

Это выражение следует из того, что, если воздух занимает объем Q м³ при атмосферном давлении P_0 , то, будучи помещен на глубину Z под воду, он займет меньший объем Q_z . Объем этот определится по закону состояния газа при изотермическом процессе, а именно

$$Q_p = \text{const.}$$

Для рассматриваемого случая должно быть

$$Q_{P_0} = Q_z (P_0 - \gamma Z),$$

где Z — отрицательно под водой. Так как атмосферное давление равно давлению столба воды высотой 10 м, т. е.

$$P_0 = \gamma \cdot 10,$$

то

$$Q_{\gamma} \cdot 10 = Q_z (\gamma 10 - \gamma Z), \text{ или} \\ Q_z = \frac{10 Q}{10 - Z}. \quad (12)$$

Всего над трубой волнолома будет находиться воздуха на 1 пог. м

$$\frac{Q}{v} \int_{-H}^0 \frac{10}{10 - z} dz = \frac{Q}{v} 10 \ln \left(1 + \frac{H}{10} \right). \quad (13)$$

Сила вертикально направленного воздействия этой массы воздуха F равна

$$F = 10 \gamma \frac{Q}{v} \ln \left(1 + \frac{H}{10} \right). \quad (14)$$

Мощность воздействия воздуха на воду

$$W = 10 \gamma Q \ln \left(1 + \frac{H}{10} \right). \quad (15)$$

Для обычных волнопродукторов известно, что почти вся их мощность тратится на волнообразование, т. е. на трение и вихреобразование в жидкости энергия почти не расходуется. Пневматический волнопродуктор затрачивает, как можно предполагать, имея в виду характер воздушного потока, значительную часть энергии на трение и вихреобразование. Предположим, что вся мощность восходящего потока тратится на волнообразование. Мощность, уносимая волнами, отходящими в обе стороны от пневматического волнолома, равна

$$W_b = \frac{1}{2} \gamma c h^2 = \frac{1,25}{2} \gamma h^2 \sqrt{\lambda}, \quad (16)$$

где

$$c = 1,25 \sqrt{\lambda}.$$

Приравнивая это выражение на основании вышесказанного к мощности воздушного потока, получим

$$\frac{1,25}{2} \gamma h^2 \sqrt{\lambda} = 10 \gamma Q \ln \left(1 + \frac{H}{10} \right)$$

и, следовательно, для высоты отраженных волн

$$h_{отр} = 4 \sqrt{\frac{Q}{\gamma \lambda} \ln \left(1 + \frac{H}{10} \right)}, \quad (17)$$

где λ — длина набегающих волн,

Выше указывалось, что на спокойной воде «отраженных», т. е. возбуждаемых факелом волнолома, волн практически нет и они появляются только от воздействия на факел волнолома набегающих волн. Этот недостаток обусловлен приближенным характером приведенных энергетических соображений, а именно, что вся энергия поднимающейся воздушной пелены идет на образование волн. Очевидно, что, чем более пологой будет синусоида, изображенная на рис. 12, г, тем меньшая часть энергии воздушной пелены пойдет на образование волн. Из предыдущего следует, что крутизна этой синусоиды прямо пропорциональна высоте набегающих волн.

Следовательно, в формулу (17) нужно ввести множителем коэффициент k , зависящий от высоты набегающих волн и обращающийся в нуль при $h=0$,

$$h_{omp} = 4k \sqrt{\frac{Q}{V\lambda} \ln \left(1 + \frac{H}{10}\right)}. \quad (18)$$

Величину этого коэффициента можно получить теоретически, решая гидродинамическую задачу о волнах, возбуждаемых синусоидальной поверхностью (см. рис. 12, г), поднимающейся вверх с постоянной скоростью.

Получение такого решения не представляет принципиальных затруднений, однако оно выходит из рамок настоящей работы, которая претендует на установление лишь основных, качественных черт теории действия пневматического волнолома.

Заметим, что для представляющих интерес обычных прибрежных волн с отношением $\frac{2h}{\lambda}$ порядка 1/10—1/20 величина k будет заключена предположительно в интервале значений 0,4 ÷ 0,6.

Из предыдущего следует, что воздушная завеса, поднимающаяся от трубы волнолома, во взаимодействии с набегающими волнами становится генератором новых, отраженных волн, которые интерферируют с набегающими.

Результат интерференции набегающих и отраженных волн будет зависеть от сдвига фаз между этими двумя волновыми движениями. Из рассмотрения рис. 12, г следует, что волны, образуемые воздушной завесой и отходящие от нее в обе стороны, будут в противоположных фазах. Например, когда справа от завесы образуется гребень, слева будет образовываться впадина, и наоборот. Следовательно, если, например, перед волноломом набегающая и отраженная волны складываются (т. е. находятся в одной и той же фазе; сдвиг фаз — нуль), то за волноломом набегающая и отраженная волны будут вычитаться (т. е. находиться в противоположных фазах; сдвиг фаз — полпериода волны). Поэтому, если отражение волны есть единственная причина эффективности действия пневматического волнолома, то

должно соблюдаться равенство между приращением мощности волны до волнолома и убылью мощности волны за волноломом. Пусть высота волны без волнолома h , после его включения перед волноломом h_1 , а позади его h_2 .

В рассмотренном выше случае, когда отраженная волна находится в одинаковой фазе с набегающей до волнолома и в противоположной — после него, приращение энергии волны перед волноломом будет

$$\Delta W_1 = \frac{1,25}{2} \gamma \sqrt{\lambda} (h_1^2 - h^2). \quad (19)$$

Соответственно убыль энергии волны за волноломом

$$\Delta W_2 = 0,625 \gamma \sqrt{\lambda} (h^2 - h_2^2). \quad (20)$$

Сравнивая эти два равенства, получим, что если отражение волн есть единственная причина эффективности действия волнолома, то должно соблюдаться равенство

$$h_1^2 - h^2 = h^2 - h_2^2 \text{ или } h_1^2 + h_2^2 = 2h^2. \quad (21)$$

Это условие относится только к выбранному случаю сдвига фаз между набегающей и отраженной волнами. Однако, поскольку, как будет показано далее, в большей части имеющихся модельных экспериментов имел место именно этот случай, он приобретает особенно важное значение.

Экспериментальная проверка соотношения (21) позволит выяснить очень важный вопрос: какая доля в волногасящем действии волноломов обусловлена явлением отражения волн воздушной завесой, а какая должна быть отнесена за счет действия иных причин.

В случае иного соотношения фаз набегающей и отраженной волны формула (21) должна быть заменена иной, более сложной, учитывающей величины сдвига фаз. Эта общая формула легко может быть получена из теории интерференции двух волновых движений.

Посмотрим, от каких параметров зависит величина сдвига фаз между набегающими и отраженными волнами.

Рассмотрим сначала случай длинных волн по сравнению с глубиной заложения трубы волнолома.

Период поднимающейся вверх воздушной пелены равен периоду τ набегающих волн. Длина одного колебания воздушной пелены составляет $V\tau$. Для определения фазы отраженных волн отметим следующее обстоятельство: выходя на поверхность воды (рис. 12, г), какой-либо элемент воздушной пелены посылает навстречу набегающим волнам ту часть отраженной волны (а в противоположном направлении — противоположную), которая была в набегающей волне над трубой волнолома в момент

выхода из нее этого элемента воздушной пелены. Например, элемент воздушной пелены, вышедший из трубы в момент прохождения над ней гребня набегающей волны, выйдя на поверхность, пошлет навстречу набегающим волнам гребень отраженной волны, а в противоположном направлении — впадину.

Часть отраженной волны, которую порождает элемент воздушной пелены, выходя на поверхность, зависит только от наклона этого элемента. Наклон же в свою очередь определяется тем, какая часть набегающей волны проходила над трубой в момент выхода из нее этого элемента пелены.

От глубины заложения зависит сдвиг фаз отраженной и набегающей волн, что и выражено в приведенных формулах (22) и (23).

Из сказанного следует, что сдвиг фаз отраженной волны по отношению к набегающей будет перед волноломом

$$\sigma_1 = 2\pi \left(\frac{H}{V\tau} - n \right) \quad (22)$$

и после волнолома

$$\sigma_2 = 2\pi \left(\frac{H}{V\tau} + \frac{1}{2} - n \right), \quad (23)$$

где n — наибольшее целое число, не превосходящее для $\frac{H}{V\tau}$ величины σ , а для σ_2 — величины $\frac{H}{V\tau} + \frac{1}{2}$.

Наилучшим с точки зрения эффективности волнолома будет случай $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = \pi$, т. е. тогда, когда отраженная волна складывается с набегающей перед волноломом и вычитается из нее за волноломом. Из приведенных формул видно, что это возможно только при определенном соотношении между параметрами H , V и τ . При ином соотношении между этими параметрами возможны иные сдвиги фаз и, в частности, самый неблагоприятный: $\sigma_1 = \pi$, $\sigma_2 = 0$, т. е. случай, когда отраженная волна усиливает набегающую позади волнолома.

Приведенное рассмотрение относится к случаю длинных волн. Для волн коротких ($\lambda \leq 30$ м) траектория воздушной пелены может быть заключена в границах, изображенных на рис. 13.

Из рис. 13 следует, что первые 7—8 м от трубы волнолома воздушная пелена перемещается вертикально (волновое движение в случае коротких волн не доходит до этих глубин) и при-

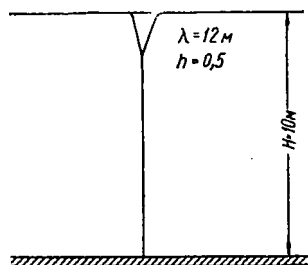


Рис. 13. Траектория воздушной пелены

обретает синусоидальную форму лишь вблизи свободной поверхности.

В заключение заметим, что в большей части модельных опытов глубины лотка были очень невелики (0,3—1,0 м). Вследствие этого были небольшие величины $\frac{H}{V\tau}$ и сдвиги фаз отраженной волны были близки к благоприятным.

Изложенные положения могут послужить также основанием для экспериментального изучения скорости подъема воздушной пелены. Действительно, измеряя длину l одного колебания синусоидальной пелены (по мгновенным фотографиям пелены) и зная период волны τ из соотношения $l = v\tau$, можно определить скорость подъема воздушной пелены.

Как уже указывалось, явление отражения волн факелом волнолома было обнаружено лишь в опытах МИСИ в 1948 г. До этого времени общепринятым было мнение, что гашение волн обусловлено рассеянием их энергии в факеле волнолома.

Если бы отражение волн было единственной причиной гашения, то невозможно было бы получить значения η больше единицы. Действительно, величина η в этом случае совпадала бы с колебанием синусоидальной пелены как волнопродуктора и, как для всякого волнопродуктора, не могла бы быть больше единицы. Практически в этом случае можно было бы рассчитывать на получение величины η порядка 0,2—0,5.

Если же эффект волнолома обусловлен не только отражением, но и гашением волны в факеле волнолома, то значения η могут быть значительно больше единицы.

В последнее время А. В. Тепловым [18] выполнена работа — «Научные основы применения пневматических волноломов», преследующая цель объяснить механизм взаимодействия воздушных пузырьков с частицами воды при работе пневматического волногашения.

Основываясь на данных теоретических работ предшествующих исследователей, автор использовал также выводы проф. Лойцянского, работу Шпольского, выполненную под руководством акад. В. В. Шулейкина, где констатировано, что часть волновой энергии во время работы пневматического волногасителя расходуется на сообщение ускоренного горизонтального движения пузырькам воздуха с присоединенной массой воды.

Автор принял, что основными факторами гашения волн являются: 1) отражение волн от воздушной завесы; 2) диссипация энергии частиц жидкости в сильно турбулизованной зоне над перфорированным трубопроводом; 3) расход волновой энергии на сообщение ускоренного горизонтального движения пузырькам воздуха вместе с присоединенной массой воды; 4) расход волновой энергии на сжатие пузырьков воздуха.

Для изучения механизма взаимодействия между частицами

воды с пузырьками воздуха в лаборатории Морского гидрофизического института Академии наук СССР им были проведены опыты.

На основании своих наблюдений А. В. Теплов приходит к такой гипотезе: «... работа, совершаемая частицами жидкости при воздействии на пузырьки воздуха, прямо пропорциональна перепаду давления частиц жидкости на пузырьки воздуха, площади проекции пузырьков воздуха на плоскость, перпендикулярную направлению распространения волн, и, наконец, прямо пропорциональна горизонтальной проекции пути, совершаемого частицами жидкости».

При этом делается оговорка, что при большом скоплении воздушных пузырьков они не будут находиться в полной мере под указанным воздействием частиц жидкости, поскольку частицы жидкости обладают только определенным количеством энергии. В связи с этим рекомендует вводить при вычислении энергии, расходуемой частицами жидкости, некоторый коэффициент, меньший единицы, который он назвал «коэффициентом полезного действия воздушных пузырьков» и обозначил его η . В соответствии с этой гипотезой им рассматриваются два случая гашения волн пневматическим волноломом: 1) при бесконечно большой глубине водоема; 2) при конечной глубине водоема.

Сделав необходимые математические вычисления, для первого случая выводит формулу

$$q = \frac{Am}{1-m} . \quad (24)$$

Во втором случае при конечной глубине водоема дается такая же формула:

$$q = \frac{Am}{1-m} , \quad (25)$$

где q — удельный расход;

m — отношение погашенной пневматическим волноломом энергии к энергии частиц воды, расположенных выше перфорированного трубопровода.

Количество, требуемое для гашения энергии частиц воды, расположенных выше перфорированной трубы, одинаково как для бесконечной, так и конечной глубин водоема.

Для практического применения формулы (25) необходимо знать численное значение коэффициента A . По опытам Боголепова с высотой волны $h=0,05$ м; Логинова — $h=0,18$ м, Кермана — h — от 0,17 до 0,40 м и опытам в натуре $h=1,5$ м А. В. Теплов вывел численное значение A равным $0,03 \text{ нм}^3/\text{мин. м}$ [15].

Таким образом, расход воздуха определяется формулой

$$q = \frac{0,03 m}{1-m} \text{ нм}^3/\text{мин. м}. \quad (26)$$

При практических подсчетах, упрощая это выражение, рекомендует пользоваться формулой

$$q = 0,03 \left(\frac{h^2}{h_0^2} - 1 \right), \quad (27)$$

где h — высота волны перед волноломом;

h_0 — то же, после волнолома.

В своей работе А. В. Теплов уделяет большое место вопросам гидравлического расчета воздухопроводов и отверстий перфорированного трубопровода пневматического волнолома.

Для расчета воздухопроводов рекомендует пользоваться формулой

$$Q_0 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{\frac{D^5}{6,24 \, l T}} \cdot \sqrt{P_1^2 - P_2^2}, \quad (28)$$

где Q_0 — расход воздуха в $\text{м}^3/\text{час}$;

P_1 и P_2 — давление в ата в начале и конце трубопровода;

T — абсолютная температура воздуха в трубопроводе;

D — внутренний диаметр трубопровода в мм ;

l — длина трубопровода в мм ;

λ — коэффициент сопротивления трения по длине.

Эта формула выведена в предположении наличия изотермичности процесса, но в условиях пневматического волнолома этого явления не будет. Поэтому эту формулу надо считать приближенной, а уточненное выражение необходимо получить из натуральных условий. Гидравлический расчет отверстий перфораций рекомендуется производить по формуле

$$Q = F \sqrt{P_1^2 - P_2^2}, \quad (29)$$

где Q — расход воздуха в $\text{м}^3/\text{мин}$;

F — площадь отверстий в см^2 ;

P_1 и P_2 — абсолютное давление внутри перфорированной трубы и снаружи в ата .

Последняя формула хорошо согласуется с опытами, и ее вполне можно принять для гидравлического расчета отверстий перфорации. Давление P_2 можно определять для практических целей по такому выражению:

$$P_2 = P_6 + \gamma H,$$

где P_6 — атмосферное (барометрическое) давление;

γ — удельный вес воды;

H — глубина погружения отверстий перфорированного трубопровода.

Давление воздуха в перфорированной трубе должно быть лишь немногим больше гидростатического, порядка $0,1 - 0,4 \text{ кг/см}^2$.

При установлении диаметра и шага отверстий перфорации рекомендует принимать 4—6 мм, а шаг отверстий брать 100—150 мм. Начертание в плане должно удовлетворять требованию, чтобы перфорированный трубопровод составлял более или менее замкнутый контур вокруг акватории, подлежащей ограждению от волнения, так как выявилась независимость его действия от угла, который составляет ось волнолома с направлением распространения волн.

Глубина укладки перфорированной трубы зависит от ряда факторов — глубины водоема, длины волны, эффекта гашения $h : h_0$, количества подаваемого воздуха и глубины для прохождения судов. Поскольку глубина водоема, длина волны и эффект волногашения являются заданными, глубина укладки зависит от количества подаваемого воздуха.

Отсюда ясно, что выбор глубины укладки перфорированной трубы может быть сделан после сопоставления ряда вариантов.

Работа А. В. Теплового по исследованию и решению проблемы пневматического волнолома в части теоретического обоснования, по нашему мнению, является шагом вперед в этой области.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВОЛНОЛОМА

Пневматический волнолом требует большого количества расхода воздуха, а для этого необходимо иметь большую силовую установку для выработки сжатого воздуха, что ведет к большим эксплуатационным расходам. В связи с этим многие исследователи считают, что пневматическое гашение волн не может быть экономически целесообразным не только в местах, где отсутствует электроэнергия, но даже при наличии ее на месте пневматических установок.

Такой вывод, по нашему мнению, делать преждевременно. Надо отметить, что, несмотря на большие проведенные опытные работы по испытанию волнолома в лабораторных условиях, до сих пор не проведены основательные экономические исследования пневматического гашения волн в натуре.

Сообщения заграничной печати о применении пневматических волноломов в натуре в большинстве содержат положительные отзывы.

В Советском Союзе первая попытка обосновать экономическую эффективность сооружения пневматического волнолома была сделана при проведении в 1935 г. опытов успокоения морского волнения сжатым воздухом в натуральных условиях в бухте на испытательной станции ЦНИИВТ. Авторы этих испытаний считали, что эффективность пневматической установки может рассматриваться только в конкретных условиях определенного порта, путем сравнения с существующими стационарными массивными волноломами.

В связи с этим был сделан расчет применительно к условиям одного порта, расположенного на побережье Черного моря. Оградительные сооружения в этом порту расположены так, что защита акватории порта от волнения проходит неудовлетворительно. Поэтому имеется настоятельная необходимость в устройстве дополнительного ограждения.

Для сравнения стоимости оградительного сооружения гравитационного типа с пневматическим волноломом был выбран молдлинной 408 м, ограждающий вход в порт. При расчетах принимали длину обоих типов сравниваемых волноломов — стационарного и пневматического — округленно в 400 м. Авторы этого расчета приводят следующие данные. Общая стоимость стационарного волнолома определена в 8 тыс. руб. за 1 пог. м. Расходы на содержание стационарного волнолома складываются из двух статей — амортизации и текущего ремонта. Эти расчеты исчисляются в процентах от строительной стоимости сооружения, исходя из следующих ежегодных затрат: амортизация — 2% и текущий ремонт — 0,5%. Эти расходы при общей стоимости волнолома длиной 400 м в 3200 тыс. руб. составят в год 80 тыс. руб.

Пневматический волнолом сравнивается со стационарным в трех вариантах: питание от существующих установок, питание от собственной дизельной установки и питание от ветросиловой установки. В условиях взятого порта такая установка должна работать в течение 110 дней в году, а остальное время энергия может быть направлена на другие цели.

Расход воздуха принят из данных опыта в натуральных условиях 25 л/сек при давлении до 10 атм. Общая потребная мощность определена в 7 тыс. квт.

Сравнение показателей обоих типов волноломов сведены в табл. 3 (в тыс. руб.).

Т а б л и ц а 3

Тип волнолома и вариант	Строительная стоимость		Эксплуатационные расходы	
	общие капитальные вложения	уменьшение капитальных вложений по сравнению со стационарным волноломом	общие издержки	увеличение издержек по сравнению со стационарным волноломом
Стационарный	3200	—	80	—
Пневматический (два ряда):				
I вариант	1783,5	—1416,5	1014,8	+934,8
II " 	1948,5	—1251,5	608,3	+528,3
III " 	2273,5	— 926,5	493,3	+413,3

Затраты на 1 пог. м волнолома приведены в табл. 4 (в тыс. руб.).

Т а б л и ц а 4

Тип волнолома и вариант	Строительная стоимость		Эксплуатационные расходы	
	общие капитальные вложения	уменьшение капитальных вложений по сравнению со стационар- ным волноломом	общие издержки	увеличение издержек по сравне- нию со стационар- ным волноломом
Стационарный	8000	—	0,20	—
Пневматический (два ряда):				
I вариант	4,46	—3,54	2,54	+2,34
II " 	4,87	—3,13	1,52	+1,32
III " 	5,68	—2,32	1,23	+1,03

Из этих данных следует, что стоимость пневматического волнолома при всех вариантах питания оказывается значительно меньше стационарного. Увеличение эксплуатационных расходов по содержанию пневматического волнолома сводит на нет экономию на капиталовложениях.

Высокие эксплуатационные издержки и значительные капиталовложения объясняются тем, что в пневматической установке принято два ряда волноломов. Эксплуатационные издержки могут быть значительно снижены за счет уменьшения расхода воздуха.

Большое значение при проектировании волнолома имеет наличие в районе дешевой электроэнергии. С увеличением глубин заложения стационарных волноломов возрастают преимущества пневматических волноломов.

Попытка экономического обоснования устройства пневматического волнолома была сделана А. В. Тепловым.

Для решения этого вопроса он предложил следующую методологию.

При определении затрат надо учитывать, кроме затрат на строительство сооружения, расходы на его эксплуатацию, при этом необходимо учитывать и рост производительности труда. Исходя из этих положений, для определения общих затрат труда рекомендуется формула

$$C = A + \frac{100 E}{P}, \quad (30)$$

где A — затраты труда на строительство;

E — эксплуатационные затраты труда, в течение года подсчитанные по нормам расхода труда, существовавшим в момент окончания строительства;

P — ежегодный рост производительности труда в %.

В целях доказательства целесообразности применения этой формулы приводится конкретный пример. Для одного водохранилища был составлен эскизный проект пневматического волнолома длиной около 600 м. Удельный расход воздуха был принят около $1,5 \text{ м}^3/\text{мин. м}$. Стоимость пневматического устройства определена около 6 млн. руб., т. е. 10 тыс. руб. за 1 пог. м.

Эксплуатационные расходы по пневмогасителю складываются из расходов по энергии, амортизации и текущему ремонту.

Принятая амортизационные ежегодные расходы — 5% от строительной стоимости, на текущий ремонт — 3%, когда эксплуатационные расходы на амортизацию и текущий ремонт составят 800 руб. на 1 пог. м. Расходы на электроэнергию зависят от стоимости 1 квт-ч и от продолжительности работы пневматического волнолома в течение года. В этом конкретном случае принято: стоимость 1 квт-ч 20 коп., продолжительность работы волнолома — 100 дней в году и общие затраты энергии — 4800 квт-ч. Ежегодные расходы на электроэнергию составят 960 руб.

Таким образом, общие затраты на эксплуатационные расходы составят 1760 руб. на 1 пог. м волнолома. Суммарные затраты на строительство и эксплуатацию составят

$$C = A + \frac{100 E}{P} = 10\,000 + \frac{100 \cdot 1760}{10} = 27\,600 \text{ руб.}$$

Далее определяется стоимость массивного опрадительного сооружения, по суммарным затратам эквивалентного пневматическому волнолому. Ежегодные эксплуатационные расходы по массивным оградительным сооружениям приняты 2% строительной стоимости. Обозначая строительную стоимость 1 пог. м массивного сооружения через x , получим:

$$27\,600 = x + \frac{100 \cdot 0,02 x}{10}; x = 23\,000 \text{ руб.}$$

Если затраты на 1 пог. м массивных сооружений будут составлять 23 тыс. руб., то пневматический волнолом будет экономичнее. В случае строительства опрадительных сооружений при больших глубинах и слабых грунтах, устройство пневматического волнолома будет, безусловно, выгоднее.

Нам представляется, что с этими выводами можно согласиться, хотя некоторые данные приняты недостаточно обоснованно, как, например, количество расхода воздуха.

Во всех случаях при подсчете экономичности расход воздуха был принят около $1,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ на 1 пог. м. Этот расход взят из данных, полученных в лабораторных условиях.

В последнее время экспериментаторы пневматического волнолома за границей пришли к заключению, что переход от модели к натуральному пневматическому волнолому требует наличия коэффициента, не зависящего от масштаба модели. Но этот коэффициент совершенно неизвестен и не может быть получен на основании лабораторных опытов.

В связи с этим нельзя переносить удельные расходы воздуха, полученные в условиях лаборатории, в натуру, так как в этом случае необходимо принимать во внимание не только силу тяжести и инерции, но и специфичность смеси воды и воздуха. Ни удельные веса этой смеси, ни размер и распределение воздушных пузырьков в лабораторных и натуральных условиях не находясь в определенном и известном отношении друг к другу. Таким образом, лабораторные опыты с моделью не могут обеспечить получения надежных данных относительно количества воздуха, требующегося для уменьшения волны в натуральных условиях.

Подсчеты показали, что количества воздуха в лабораторных условиях требуется в десятки раз больше, чем в натуральных условиях.

Лаури на основе собственного опыта отметил, что имеются возражения против целесообразности испытаний пневматического волнолома на моделях, так как имеется несоответствие потребной энергии в лабораторных и натурных условиях.

Указанное обстоятельство является очень важным выводом для экономической оценки пневматического волнолома.

Формулы, основанные на данных лабораторных опытов, которые пытались применять к натуральным условиям, дают очень большие величины расхода воздуха.

Вопрос об установлении расхода воздуха пневматических волноломов в естественных условиях является весьма важным вопросом, и, как было сказано выше, его необходимо решить в дальнейших исследованиях при опытах в натуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Лучше всего поддаются гашению волны крутые, короткие, хуже — волны средней крутизны и длины, совсем плохо — очень пологие, длинные.

2. Основными параметрами эффективности гашения волн сжатым воздухом являются удельный расход воздуха и избыточное давление. В лабораторных условиях расход воздуха определился в $1,2\text{--}1,5 \text{ м}^3/\text{сек}$ на 1 пог. м и выше.

Избыточное давление не должно превышать $0,2\text{--}0,3 \text{ атм}$ с учетом превышения гребня волны над волноломом.

3. В связи с указанным формулы А. В. Теплова по определению расхода воздуха, приведенные в настоящей работе, могут быть приемлемыми только как первое приближение для

расчета при проектировании пневматического волнолома, так как они основаны на лабораторных данных.

4. Опыты показали, что частое расположение отверстий малого диаметра на коллекторе нежелательно. Выгоднее, при прочих равных условиях, более редкое расположение отверстий большего диаметра. Наибольшая эффективность действия пневматического волнолома должна достигаться при выпуске воздуха не через специальные отверстия, а через сплошную щель переменного сечения. Отверстие щели при этом должно разбиваться таким образом, чтобы обеспечить постоянство расхода воздуха по всей длине участка труб между двумя точками подвода воздуха.

5. Сущность механизма гашения волн сжатым воздухом заключается в том, что при работе пневматического волнолома исходная волна зыби частично отражается от воздушной завесы, частично гасится в процессе взаимодействия с этой воздушной завесой. Уменьшение высоты волны позади пневматического волнолома сопровождается увеличением амплитуды исходной волны перед воздушной завесой.

6. Пневматический волнолом должен найти широкое применение на водном транспорте.

Он может быть использован от проникновения волн через ворота на акваторию порта путем укладки перфорированного трубопровода перед входом в порт.

Пневматический волнолом может быть использован как временное ограждение от волн при производстве гидротехнических работ. Он может оказаться хорошей защитой от волнения морских нефтяных сооружений, отдельных участков акватории нефтепромыслов. Пневматический волнолом — полезное сооружение для усовершенствования существующих портовых сооружений, прекращения волнения в заданном месте, ослабления воздействия волн на прибрежную полосу и для других целей.

7. Дальнейшие исследования работы пневматического волнолома в лабораторных условиях производить нецелесообразно, так как их проведено достаточно и вряд ли можно будет получить новые данные. Для выяснения главных вопросов — удельного расхода воздуха и избыточного давления — необходимо провести опыты в натурных условиях.

Целью опытов в натурных условиях должны быть: изучение влияния естественных факторов на эффект действия пневматического волнолома; исследование оптимального режима работы волнолома, в том числе зависимости волногасящего эффекта от удельного расхода сжатого воздуха; изучение гидромеханических явлений, возникающих в зоне действия волнолома и сопровождающих процесс гашения волн сжатым воздухом; исследование, связанное с разработкой методики теплового и гидравлического расчетов трубопровода волнолома; изучение вопросов эксплуатации и экономики его, а также теоретическое обобщение опытного материала для разработки общей теории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Божич П. К., Джунковский Н. Н. Морское волнение и его действие на сооружения и берега, Машстройиздат, М., 1949.
2. Боголепов И. А. Пневматический волнолом, Государственный гидрологический институт и Объединение научно-технических издательств, Наркомтяжпром СССР, Л., 1933.
3. Белова М. Н. Экспериментальное исследование некоторых вопросов, связанных с применением пневматических волноломов. Автореферат, М., 1954.
4. Гридель А. Опыт применения достижений волновой физики к исследованию явления распространения зыби. Перевод, Annales des Ponts. et Chaussies, 1946.
5. Гюнтер Ганс. Энергетика будущего. Перевод и редактирование проф. Я. Н. Шпильрейна, ОНТИ, Главная редакция научно-популярной и юношеской литературы, 1936.
6. Известия Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники, № 35, 1948, «Качающиеся волноломы».
7. Керман В. Я. Пневматический волнолом. Водный транспорт, № 6, 1937.
8. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика, ч. 1, изд. 4, Гостехиздат, 1948.
9. Кооль В. Пневматические волноломы. Перевод, De Ingenieur, № 36, 1936.
10. Лаури А. Немецкие испытания пневматических волноломов (критика результатов испытаний). Перевод, Dock and Harbour, 1952.
11. Ляхницкий В. Е. Морские порты, Гострансехиздат, 1938.
12. Логинов Н. Д. К вопросу о пневматическом волноломе. Водный транспорт, № 10, 1937.
13. Московский инженерно-строительный институт имени В. В. Куйбышева. Отчет «Сквозные и плавучие волноломы», 1946.
14. Никеров П. С. Исследование некоторых вопросов гашения волн сжатым воздухом. Автореферат, Одесса, 1955.
15. Платцер С. Пневматические волноломы. Перевод, Teknisk Tidskrift, 1938, М., т. 68, № 38, 1950.
16. Родионов С. И. Гашение волн сжатым воздухом — один из новых способов волнозащиты. Автореферат, М., 1956.
17. Схейф. Уничтожение волн нагнетанием воздуха. Перевод, 1955.
18. Теплов А. В. Научные основы применения пневматических волноломов. Автореферат, М., 1954.
19. Шийф. Критика результатов испытаний пневматических волноломов. Перевод, Dock and Harbour, 1955.
20. Шулейкин В. В. Физика моря, Издательство Академии наук СССР, 1941.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
Образование волн и меры борьбы с волнением	4
Гашение волн сжатым воздухом	10
Теоретическое обоснование гашения волн сжатым воздухом	27
Экономическая целесообразность использования пневматического вол- нолома	41
Заключение	45

Автор Семен Иванович Родионов

Редактор П. В. Сафонов

Техн. редактор Н. Б. Лавренова

Корректор А. В. Русакова

Т-00484. Сдано в производство 30/XI 1957 г. Подписано к печ. 3/III 1958 г.
 Бумага 60×92¹/₁₆ — 1,5 б. л., = 3 п. л., 2,72 уч.-изд. л. Тираж 2000 экз.
 Изд. № ПТ-760. Заказ № 24. Цена 1 р. 40 к.

7-я типография издательства «Морской транспорт».
 Ленинград, ул. К. Заслонова, 30.

1 р. 40 к.

2
Д1
11490

Читальный зал