

В. И. Каштелян, И. И. Позняк, А. Я. Рывлин

Сопротивление льда движению судна

*Под научной редакцией
доктора техн. наук В. И. Неганова*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «СУДОСТРОЕНИЕ»
ЛЕНИНГРАД 1968

Книга посвящена современным методам расчета сопротивления льда движению судна. В ней обобщены результаты теоретических и экспериментальных работ в данной области.

Рассматриваются проблемы моделирования движения судна в сплошных и битых льдах, освещается методика и техника проведения испытаний моделей судов в опытовом ледовом бассейне. Особое внимание уделено изложению методов расчета ледового сопротивления. Расчетные зависимости, учитывающие влияние основных характеристик судна и параметров льда, приводятся применительно к движению судна в сплошных и битых льдах. Излагаются практические методы расчета скорости движения судна во льдах с учетом ряда природных характеристик ледяного покрова (торосистости, разрушенности), ледовой прочности корпуса судна и мощности его энергетической установки. Приведенные в книге методы расчета ледового сопротивления являются оригинальными и базируются на теоретических и экспериментальных исследованиях в натуральных условиях и в ледовом бассейне, проводившихся авторами на протяжении ряда лет.

В книге приводятся краткие сведения о ледоколах, транспортных судах ледового плавания, их ледовых качествах, а также сведения о морских льдах, их классификации и физико-механических свойствах. Даются рекомендации по проектированию формы обводов корпуса судов ледового плавания, выбору главных размерений и определению мощности энергетической установки.

Впервые в систематизированном виде освещается комплекс вопросов, связанных с плаванием судна в сплошных и битых льдах, позволяющих принимать обоснованные решения при выборе формы корпуса строящихся ледоколов и судов ледового плавания.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников судостроительной промышленности, а также может быть рекомендована студентам кораблестроительных вузов. В ней содержится 135 иллюстраций (графиков, схем и фотографий), 16 таблиц и библиография в количестве 110 наименований.

От авторов

Большинство морских путей Советского Союза в течение длительного времени покрыто льдом, что затрудняет их круглогодичное использование. Особой сложностью отличается плавание судов в морях Северного Ледовитого океана. Наличие мощных льдов на трассе Северного морского пути является серьезным препятствием для судоходства даже в летний период навигации. В связи с этим большое значение приобретают мероприятия, направленные на продление сроков навигации в замерзающих морях Советского Союза. В настоящее время суда ледового плавания являются основным средством поддержания навигации в замерзающих морях, поэтому продление ее сроков будет зависеть от количества и эффективного использования этих судов.

Для успешного решения задач, связанных с проектированием ледоколов и судов ледового плавания, а также планированием их работы во льдах, необходимо располагать методами, позволяющими определять сопротивление льда движению судна, а также скорость движения в зависимости от конструктивных элементов судна и ледовых условий.

Первые теоретические работы в области сопротивления льда движению судна принадлежали русским инженерам Р. И. Рунбергу и В. И. Афанасьеву. Большое влияние на развитие науки о ледопроеходимости судов оказали исследования адмирала С. О. Макарова, посвященные практическим вопросам ледоколостроения, и теоретические выводы, полученные А. Н. Крыловым на основе первого экспериментального исследования работы ледокола «Ермак» во льдах.

Крупный вклад в изучение сопротивления льда движению судна внесли советские ученые. Из теоретических исследований прежде всего следует отметить работы Ю. А. Шиманского и И. В. Виноградова. Физическая сторона движения судна во льдах наиболее полно изучена Л. М. Ногидом, который на основе теоретических и экспериментальных исследований впервые предложил идеализированную схему разрушения льда ледоколом, разделил на составляющие полное ледовое сопротивление и сформулировал основные условия подобия. Изучением законов движения судна во льдах занимались также В. И. Неганов, Н. А. Заботкин, А. В. Бронников, О. В. Дубровин и др.

Морской лед и его классификация. Ледовые качества судов

Большую роль в решении проблемы сопротивления льда движению судна сыграли натурные испытания ледоколов. Основываясь на материалах этих испытаний, В. И. Неганов, В. С. Назаров, В. В. Давыдов, А. Я. Сухоруков и другие создали ряд эмпирических формул для расчета сопротивления льда.

В настоящее время проблемы ходкости судна нельзя рассматривать без модельных экспериментов. Метод модельных испытаний во льдах, впервые созданный и осуществленный на практике в Советском Союзе, явился логическим завершением той большой работы, которая была проделана русскими учеными и инженерами по созданию науки о ледопроеходимости как нового раздела теории корабля. Основателями этого метода следует считать Л. М. Ногиду и Ю. А. Шиманского.

Практическое решение задач моделирования стало возможным после того, как В. В. Лавровым был открыт способ приготовления моделированного льда, пригодного для имитации натурального льда в лабораторных условиях.

В предлагаемой книге авторы сделали попытку изложить в систематизированном виде проблемы, связанные с сопротивлением льда движению судна.

В первой главе рассматриваются основные свойства льда как среды, преодолеваемой судном.

Главы II—VII посвящены описанию законов ледового сопротивления, базирующихся на результатах теоретических исследований, модельных и натуральных экспериментов. Впервые раздельно рассмотрены вопросы ходкости судна в сплошных и битых льдах, изложены основы метода моделирования движения судна во льдах, приводится методика модельных испытаний.

В главе VIII описываются методы изучения ледовой ходкости натурального судна. Затронуты вопросы проведения натуральных испытаний судов во льдах и практических расчетов скорости.

Глава IX посвящена некоторым особенностям проектирования судов ледового плавания. Авторы стремились показать, что на основании аналитических зависимостей ледового сопротивления и использования метода модельных испытаний может быть научно обоснован выбор мощности энергетической установки, главных размерений и формы обводов корпуса.

Главы II, IV, § 2, 11 и 35 написаны В. И. Каптеляном; § 8, 9, 10 и 37 — И. И. Позняком, главы V, VI и VII, § 1, 3, 26, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 36 и 38 — А. Я. Рылиным; § 27 и 29 написаны В. И. Каптеляном и А. Я. Рылиным.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность доктору техн. наук В. И. Неганову, взявшему на себя труд редактирования книги, а также рецензентам канд. техн. наук Ф. М. Кацману и доц. О. В. Дубровину за ценные замечания и советы.

Отзывы о книге просим направлять по адресу: Ленинград, Д-65, ул. Гоголя, 8, издательство «Судостроение».

§ 1. Общие сведения о морском льде и его классификация

Ледовая обстановка замерзающих морей характеризуется большим разнообразием льдов, их свойств и характеристик. Последнее обусловлено тем, что лед в процессе своего роста подвергается действию многочисленных природных факторов (ветер, дрейф, течения, перепады температур и т. п.). Эти механические и термические воздействия нарушают изотипичность условий таяния льда и способствуют увеличению неоднородности ледяного покрова в навигационные периоды.

Изучение сил сопротивления движению судна невозможно без знания свойств среды (т. е. ледяного покрова), поэтому ниже приводятся краткие сведения о морских льдах, их классификации и ледовой терминологии.

Общепринятой является классификация льдов, утвержденная междуведомственной ледовой комиссией [29], и в дальнейшем мы будем придерживаться этой классификации и ее терминологии.

Морские льды различают по возрасту, подвижности, строению, состоянию поверхности и стадиям таяния.

По возрасту различают следующие виды морского льда:

- начальные льды (ледяные иглы, сало, шуга и т. п.);
- ниласовые льды (блинчатый лед, склянка, нилас и т. д.) толщиной до 10 см;
- серые льды толщиной от 10 до 30 см;
- белый лед толщиной от 30 до 70 см;
- однолетний — годовалый лед, прошедший годовой цикл нарастания в минувшую зиму и сохранившийся до начала нового осеннего ледообразования;
- двухлетний лед, находящийся во втором годичном цикле нарастания;
- многолетний лед (пак) толщиной 2,5 м и более, просуществовавший более двух лет.

По динамическому признаку морские льды разделяются на две категории:

— неподвижный лед, основной формой которого является припай, — сплошной ледяной покров (рис. 1), связанный с берегом; протяженность припая может достигать нескольких сотен миль;

— дрейфующий лед — лед, не связанный с берегом и находящийся в движении под влиянием ветра и течения (рис. 2).

По горизонтальным размерам (протяженности) дрейфующий лед подразделяется на две основные группы: ледяные поля и битый лед, образующиеся в результате разрушения припая и последующего дробления более крупных форм дрейфующего льда, развития и нарастания ледяного покрова, смерзания мелких льдин любого возраста. По своим очертаниям поля и отдельные льдины бывают остроугольными и округлыми.

Ледяные поля — наиболее крупные образования дрейфующего льда — делятся на:

- обширные протяженностью свыше 10 км;
- большие протяженностью от 2 до 10 км;
- малые протяженностью от 0,5 до 2 км;
- обломки полей — льдины протяженностью 100—500 м.

Битый лед состоит из льдин различных размеров, но меньших, чем обломки полей. Различают следующие формы битого льда:

- крупнобитый — льдины, имеющие в поперечнике 20—100 м;
- мелкобитый — льдины протяженностью от 2 до 20 м;
- куски льда — льдины размером от 0,5 до 2 м.

Состояние дрейфующего льда характеризуется сплоченностью и сжатием. Сплоченность льда на наблюдаемом участке моря определяется отношением площади льдин к площади этого участка и оценивается по 10-балльной шкале. Например, при сплоченности льда 6 баллов — 60% площади участка моря покрыто льдом. Различают редкий лед, разреженный лед (рис. 3), сплоченный лед (рис. 4) и очень сплоченный лед.

Сжатие льда оценивается по трехбалльной шкале: 1 балл соответствует слабому сжатию, 3 балла — сильному.

Кроме перечисленных характеристик, морские льды различают по следующим признакам.

1. Строение ледяного покрова (ровный лед, наложенный лед, торосистый лед). Торосистый лед различают по возрасту: свежие торосы (рис. 5), старые и многолетние, — и разновидностям торосистых образований: подсов, ропак, торос, гряда торосов, беспорядочная торосистость, набивной лед и др. Торосистость ледяного покрова определяется по пятибалльной шкале, оценивающей отношение площади, покрытой торосами, к наблюдаемой площади.

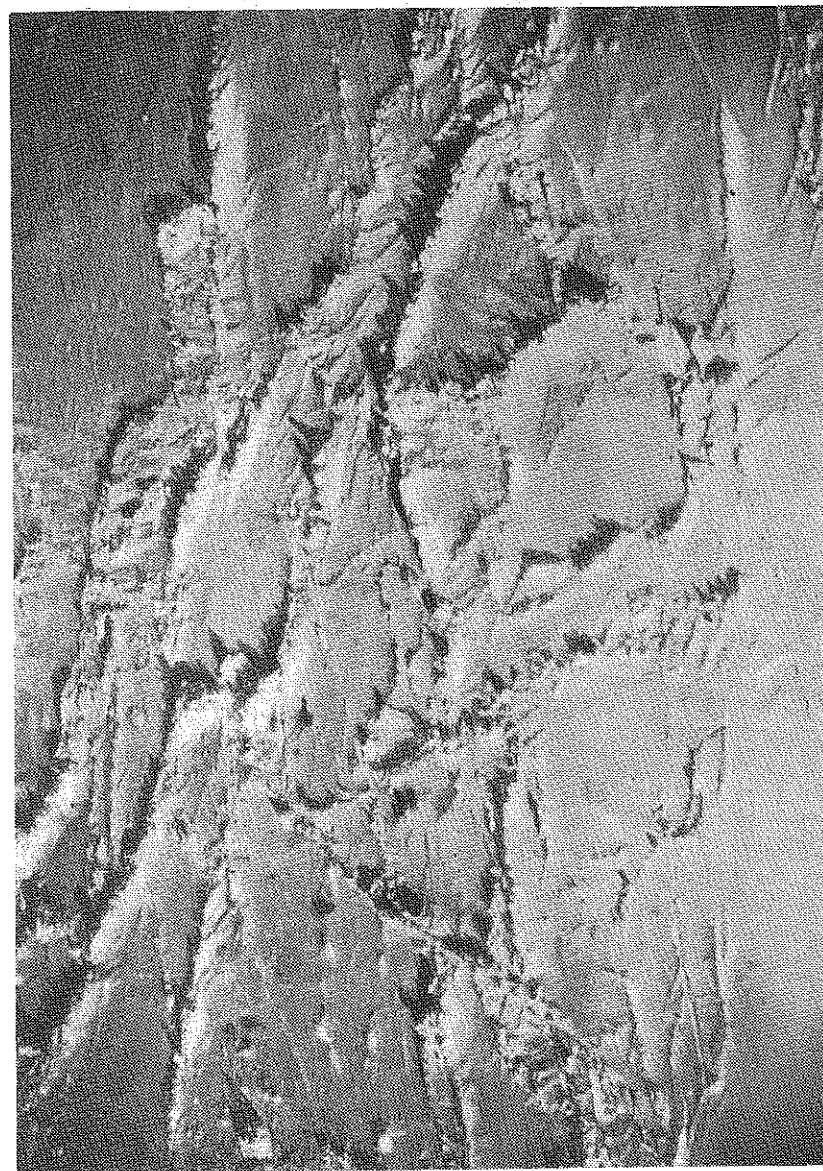


Рис. 1. Сплошной торосистый лед (вид с самолета).

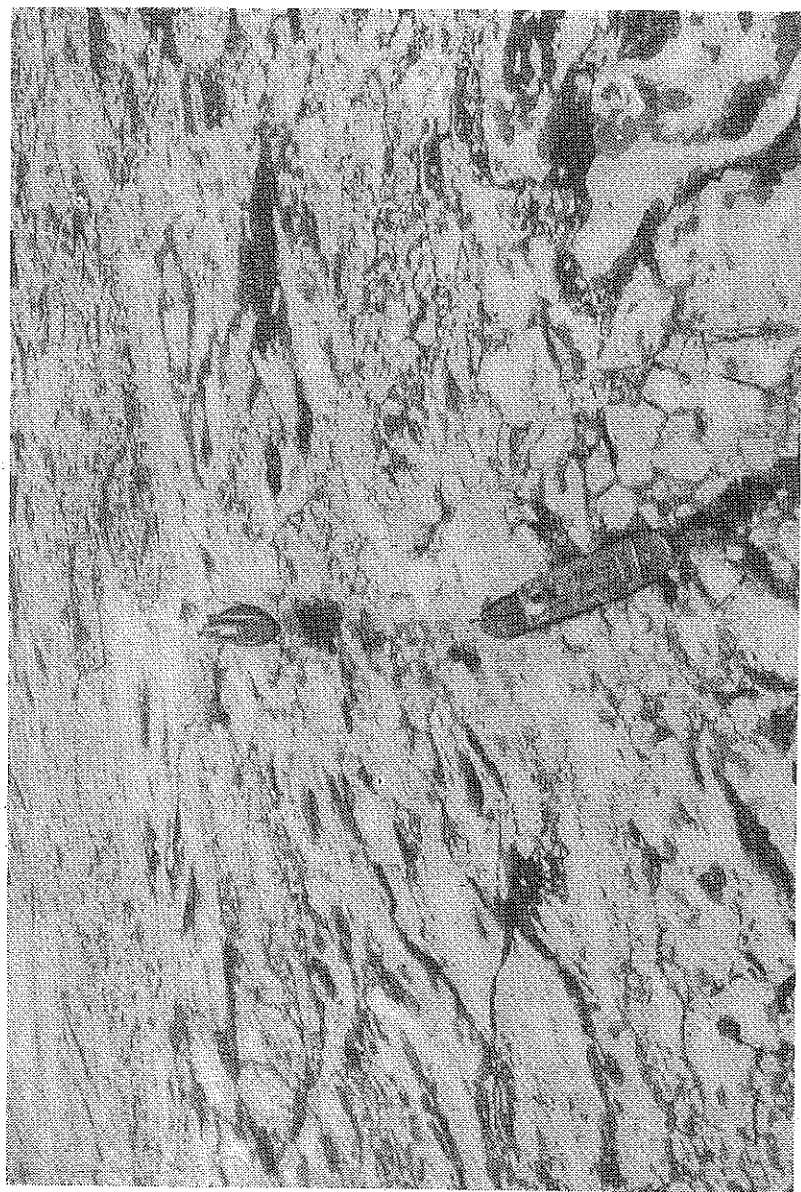


Рис. 2. Сплоченный дрейфующий лед (поля, обломки полей, крупно- и мелкобитый лед).

2. Состояние поверхности льда (заснеженность и загрязненность, оцениваемые по трехбалльной шкале).

3. Стадии таяния и разрушения. Разрушенность льда определяется по пятибалльной шкале на основании внешних признаков, характеризующих таяние льда: снежицы, лужи, озерки, проталины и т. п.

Для зимних периодов навигации наиболее характерными являются крупные формы льда (припай и большие поля). Весной преобладают большие и малые поля, крупнобитый лед. Наконец,



Рис. 3. Разреженный мелкобитый лед.

для летних периодов навигации характерны мелкие формы льда (малые поля, крупно- и мелкобитый лед). Однако в зависимости от географического района плавания различные виды льда могут встречаться во все периоды навигации. Преобладающими являются различные формы дрейфующего льда.

Из приведенной выше характеристики морских льдов следует, что ни один из видов льда нельзя определить каким-либо одним параметром. Многообразие факторов, определяющих состояние морского ледяного покрова, обуславливает сложность наблюдений за ледовой обстановкой. Эти затруднения усугубляются отсутствием инструментальных методов измерений многих характеристик льда. Большая часть наблюдений, осуществляемых с судов и с воздуха, носит визуальный характер. Исключение составляют лишь замеры толщины льда, выполняемые с борта ледокола ледомерными рейками, а также с помощью приборов, основанных на неконтактных методах



Рис. 4. Сплоченный мелкобитый лед.



Рис. 5. Торос.

измерения. Имеют место попытки инструментальных измерений сплоченности льда с применением дальномеров, аэрофото съемки и т. п.

Таким образом, в настоящее время качество проведения ледовых наблюдений в основном зависит от опытности и квалификации наблюдателя, что является большим недостатком, так как неизбежно вносит элементы субъективизма в результаты наблюдений.

Многообразию ледовых условий, в которых проходит плавание судов, чрезвычайно затрудняет создание единого метода расчета ледового сопротивления, поэтому для наиболее характерных ледовых условий должны быть разработаны отдельные частные методики, основанные на анализе процессов, происходящих при движении судна во льдах. Внешне эти процессы проявляются во взаимодействии корпуса судна со льдом. Проанализировав эти процессы и выявив основные особенности движения судна в конкретных видах льда, можно составить классификацию ледовых условий как среды, преодолеваемой судном (табл. 1). Эта классификация должна быть положена в основу разработки частных методик расчета ледового сопротивления.

Таблица 1

Классификация морского льда как среды, преодолеваемой судном

Размеры льдин в плане	Вид льда по ледовой классификации	Вид льда как среды, преодолеваемой судном	Основные процессы при взаимодействии корпуса со льдом	Характер движения судна во льду	Характеристики льда, оказывающие наибольшее влияние на сопротивление
Крупные	Припай и большие ледяные поля дрейфующего льда	Сплошной лед	Ломка льда корпусом	Преимущественно равномерный с дифференциальным на корму	Толщина, прочность, торосистость, разрушенность, заснеженность
Средние	Обломки полей, крупнобитый лед	Крупнобитый лед и обломки полей	Ломка и раздвижение льда корпусом	Неравномерный с переменным дифференциальным	Протяженность, толщина, прочность, сплоченность, сжатие, торосистость
Мелкие	Мелкобитый лед, куски льда, битый лед в канале за ледоколом	Мелкобитый	Раздвижение льда корпусом	Практически без дифференциала	Толщина, протяженность, сплоченность, сжатие, ширина канала, коэффициенты трения

Аналогичная классификация положена в основу создания методов расчета ледовых нагрузок, действующих на опоры гидротехнических сооружений [38].

Остановимся коротко на описании основных особенностей процесса движения судна в различных ледовых условиях*, а именно: в сплошных льдах, в мелкобитых льдах, в обломках полей и крупнобитых льдах.

Главной особенностью взаимодействия корпуса судна со льдом при движении в сплошных льдах является разрушение ледяного покрова носовой оконечностью судна. Поэтому среди составляющих сил сопротивления при движении судна в сплошных льдах основное значение принадлежит силам, затрачиваемым на разрушение (ломку) ледяного покрова, раздвигание и притапливание льдин, их уплотнение, трение о корпус и др. Наблюдения показывают, что наиболее существенное влияние на скорость движения судна в сплошных льдах оказывают толщина и прочностные характеристики ледяного покрова, его торосистость, разрушенность и заснеженность.

Другой типичный случай движения судна во льдах — плавание в мелкобитых льдах. В этих условиях наиболее характерным моментом является раздвигание льдин носовой оконечностью судна. Ломка льдин корпусом практически отсутствует.

Сопротивление судна при движении в мелкобитых льдах обуславливается в основном потерями кинетической энергии при ударах о льдины, а также работой, затраченной на раздвигание и притапливание льдин, преодоление сил трения льдин о корпус и т. п. Как показали наблюдения, наиболее существенное влияние на скорость движения судна (сопротивление) в мелкобитых льдах оказывают размеры (протяженность и толщина) льдин, их сплоченность и сжатие, а также ширина канала мелкобитого льда.

Движение судна в обломках полей и крупнобитых льдах характеризуется процессами, присущими обоим описанным выше случаям. Оно отличается наибольшей сложностью и многообразием происходящих процессов и носит ярко выраженный нестационарный характер.

Анализ взаимодействия корпуса со льдом в различных ледовых условиях указывает на целесообразность создания отдельных методик расчета сопротивления применительно к следующим трем видам ледовых условий: сплошные льды, мелкобитые льды, обломки полей и крупнобитые льды (по принятой нами терминологии).**

* Подробный анализ приводится в § 4 и 14.

** Морские ледоколы и транспортные суда ледового плавания имеют сходные формы форштевней и обводов носовых оконечностей. В первом приближении можно считать, что картина, наблюдаемая при ходе во льдах ледоколов и транспортных судов ледового плавания не имеет принципиального различия. Поэтому в дальнейшем разделение между ледоколами и судами ледового плавания не проводится, но по мере надобности особенности, обусловленные типом судна, будут специально оговариваться.

Необходимо отметить, что существующая ледовая классификация учитывает лишь часть параметров ледяного покрова, оказывающих влияние на сопротивление льда движению судна. К параметрам, которые должны быть дополнительно учтены при расчетах ледового сопротивления, следует отнести в первую очередь физико-механические свойства льда, а именно его прочностные и фрикционные характеристики.

§ 2. Физико-механические свойства льда

Знание физико-механических свойств среды, в которой происходит движение судна, имеет важное значение при решении задач, связанных с изучением ходкости судов во льдах. Одной из причин того, что существовавшие ранее методы расчета ледопроеходимости судна не находили широкого применения, являлось отсутствие надежных данных о физико-механических качествах ледяного покрова. В настоящее время, когда вопросы ходкости судов во льдах решаются на основе модельных испытаний в бассейне при соблюдении требований теории моделирования, знание физико-механических качеств натурального льда и его модели в лабораторных условиях приобретает особенно большое значение.

Лед представляет собой вещество, наделенное свойствами, присущими твердому кристаллическому телу.

Образование льда происходит в результате процессов теплообмена между водной средой и атмосферой. Основными факторами, влияющими на интенсивность роста ледяного покрова, являются метеорологическая обстановка и гидрологический режим водоема (скорость течения, глубина, условия перемешивания водных масс).

Структура льда определяется условиями возникновения и формирования кристаллов, которые первоначально образуются в тонком переохлажденном поверхностном слое воды. В процессе роста лед приобретает неоднородное блочное строение. По границам блоков кристаллов концентрируются посторонние примеси и соляной раствор (в морском льду).

В настоящее время известно много различных структурных типов льда, однако их физико-механические свойства еще недостаточно изучены.

С точки зрения механических качеств лед естественного образования можно принять за поликристаллическое тело. При этом, если в направлении, параллельном плоскости намерзания, ледяной покров можно рассматривать как изотропное тело, то в направлении, перпендикулярном плоскости намерзания, наблюдаются анизотропные свойства, обусловленные в основном температурным перепадом между верхними и нижними слоями льда, как тела, находящегося на границе двух сред с различными температурами.

Другая причина анизотропии свойств ледяного покрова по вертикали связана с его соленостью, которая определяется не только соленостью воды, но и скоростью роста льда: чем больше скорость намораживания, тем большее количество солей содержит лед.

Доказано, что с возрастом лед опресняется. Часть солей, находящаяся во льду в виде рассола, вследствие большего удельного веса последнего по сравнению с водой стекает из верхних слоев в нижние.

Удельный вес морского льда по литературным данным изменяется в зависимости от солености, температуры и возраста в пределах от 0,84 до 0,93 t/m^3 .

К числу наиболее важных физико-механических свойств ледяного покрова, влияющих на движение судна во льдах, относятся: прочность льда, его упруго-пластические и фрикционные характеристики.

Как известно, движение судна в сплошных и крупнобитых льдах сопровождается разрушением ледяного покрова, происходящим в основном за счет изгиба (хотя имеют место также деформации среза и смятия). Поэтому при определении сопротивления ледяного покрова движению судна наиболее важное значение имеют его прочностные характеристики: пределы прочности на изгиб, срез и смятие.

Изучением прочностных характеристик льда занимались многие исследователи [3], [10], [11], [30], [31], [38], [43], [67], [100] и др. В результате их работ было установлено, что основные прочностные свойства льда существенно изменяются с понижением температуры.

Известно, что в естественных условиях при отсутствии снега температура верхних слоев льда близка к температуре окружающего воздуха, а температура нижних — к температуре воды. Вследствие такого температурного перепада во льду образуются слои неодинаковой прочности. Наличие снега на ледяном покрове уменьшает температурный градиент внутри льда, поэтому разница в свойствах слоев заснеженного льда оказывается не такой значительной, как у бесснежного.

Прочность ледяного покрова в течение года не остается постоянной. И. С. Песчанским [63] показано, что в зимний период вследствие более низких температур поверхностные слои арктического льда оказываются более прочными, чем средние и нижние.

В весенний период происходит выравнивание прочности льда по толщине: прочность всех слоев близка к прочности нижних. В летний период наблюдается общее уменьшение прочности льда. В осенний период прочность верхних слоев льда увеличивается при общем увеличении прочности всей толщины льда.

Несмотря на то, что частные закономерности изменения проч-

ностных свойств льда можно считать установленными, вопросы общей прочности ледяного покрова в различные периоды его существования в настоящее время изучены еще сравнительно мало. Хотя слои имеют различные физико-механические свойства ледяной покров под нагрузкой работает как единое целое. В то же время прочность ледяного покрова не может быть представлена среднеарифметическим значением прочности образцов, приготовленных из различных слоев ледяного покрова.

Несмотря на большое количество проведенных исследований по прочности льда полученные результаты пока не удовлетворяют практическим требованиям. Обращает на себя внимание большое расхождение численных значений пределов прочности льда, что в известной мере определяется различием методов, применяемых при изучении прочности.

В настоящее время для оценки прочности ледяного покрова на изгиб используются следующие методы:

- испытания «малых» образцов, приготовленных из различных по высоте слоев ледяного покрова;
- испытания на плаву консолей (клавишей) и балок, вырезанных в ледяном поле на всю его толщину;
- испытание на плаву ледяных пластин.

При определении предела прочности на изгиб σ_p одного и того же льда указанными выше методами были получены различные значения σ_p , что объясняется в основном причинами методического характера (различием напряженных состояний, в которых находятся малые образцы, консоли, балки и пластины; несоблюдением идентичности внешних температурных условий при проведении экспериментов и т. д.).

Имеющиеся в литературе данные по пределу прочности льда на изгиб в большинстве случаев получены на основании испытаний малых образцов. Однако именно такой метод оценки прочности ледяного покрова наименее достоверен. Во-первых, как уже указывалось выше, слои льда отличаются друг от друга температурой, соленостью, структурой и, следовательно, прочностью. Во-вторых, техника испытаний малых образцов не позволяет сохранять неизменными до момента испытаний основные внешние условия, в которых находится ледяной покров, что и приводит к искажению получаемых данных. Надежной методики пересчета прочности малых образцов на прочность ледяного покрова до сих пор не создано, а имеющиеся методы пересчета (в том числе и наиболее удачный, предложенный В. В. Лавровым [43]), несовершенны. При изучении разрушения ледяного покрова ледоколом наиболее приемлемыми следует считать данные, получаемые при испытаниях ледяных пластин в естественных условиях. Однако такие испытания сложны и технически трудно осуществимы. Поэтому для оценки прочности ледяного покрова на изгиб при разрушении его ледоколом можно было бы рекомендо-

Таблица 2

Результаты определения предела прочности льда на изгиб
методом испытаний пластин, балок и консолей

Исследователь	Год	Испытываемый образец	Район испытания	Температура воздуха, °С	σ_p , кг/см ²
И. П. Трощинский	1939	Консоль	р. Луга	0	7,1
Ю. Н. Неронов	1943	»	р. Нева	0	4,0
Н. Д. Шишов	1939—1943	»	р. Северная Двина	—1	2,5
В. В. Лавров	1952	Балка	Ладожское озеро	(—2) ÷ (—9)	8,5
В. В. Лавров	1953	Консоль	То же	+2	3,1
К. Н. Коржавин, И. П. Бутягин	1952—1958	»	реки Сибири	0	4,3
И. П. Бутягин	1958	Балка	» »	0	7,8
И. П. Бутягин	1958	Пластина	» »	—(3 ÷ 8)	4,6
С. А. Шишопкил	1964	Консоль	» »	0	3,9
А. М. Баталин	1946	»	Амурский залив	0	4,3
И. И. Позняк и др.	1953	»	Цимлянское водохранилище	0	5,7
М. А. Игнатьев и др.	1955	»	Рижский залив	0	4,2
И. Г. Петров	1958	»	Куйбышевское водохранилище	—(2) ÷ (—8)	5,2
И. Г. Петров	1958	Балка	То же	—(2) ÷ (—8)	13,4
В. И. Каштелян, А. Я. Рывлин и др.	1965	Консоль	Море Лаптевых	—(4) ÷ (—30)	2,5
В. И. Каштелян, А. Я. Рывлин и др.	1966	»	Ладожское озеро	+2; —30	5,5

довать метод испытаний консолей. Значения σ_p , полученные с помощью этого метода, в наименьшей степени отличаются от результатов испытаний ледяных пластин [38], а техника испытаний более проста.

Следует помнить, что при испытании консолей внешнюю силу необходимо прикладывать «сверху вниз», так как в этом случае растяжению подвергаются верхние слои ледяного покрова, а сжатую — нижние. Это позволяет соблюсти аналогию в деформировании льда при его механических испытаниях и при разрушении корпусом ледокола.

В настоящее время в качестве расчетных целесообразно принимать значения пределов прочности льда на изгиб, получаемые при испытании на плаву балок на двух опорах. Это необходимо в целях соблюдения единой методики оценки прочности льда в натуре и в ледовом бассейне (при испытании моделей в ледовом бассейне принят метод испытаний балок на двух опорах). Если в ледовом бассейне окажется возможным перейти к методу испытаний консолей, то и в натуральных условиях для оценки прочности ледяного покрова также могут быть использованы данные по испытаниям консолей. В табл. 2 приведены результаты известных нам испытаний консолей, балок и пластин в естественных условиях.

Зная предел прочности на изгиб консолей, можно определить предел прочности на изгиб балок, используя поправочный коэффициент, примерно равный 1,5 [43].

Таким образом, в качестве расчетных значений σ_p могут быть приняты: для пресноводного льда $\sigma_p = 12,5 \text{ кг/см}^2$; для морского (соленого) льда $\sigma_p = 8 \text{ кг/см}^2$.

Что касается пределов прочности льда на смятие и срез, которые играют менее важную роль при разрушении ледяного покрова судном, то ограничимся цитированием расчетных значений этих параметров, рекомендуемых К. Н. Коржавиным [38] для пресноводного льда: предел прочности на смятие — 12,5—30 кг/см²; предел прочности на срез — 1,5—6,0 кг/см².

Известно, что материалы при температуре, близкой к их точкам плавления, в той или иной мере обладают пластичностью. Натурный лед как твердое тело в этом отношении не является исключением. Опыты показывают, что характер деформирования льда в значительной степени зависит от времени действия нагрузки. При длительном воздействии нагрузки появляется пластичность, которая может выражаться как в виде ползучести (увеличение деформации во времени при постоянной нагрузке), так и в виде релаксации (уменьшение прочности во времени при постоянной деформации).

На основании литературных данных можно сделать вывод, что при кратковременных нагрузках лед деформируется упруго. Это позволяет рассматривать ледяной покров водоемов как упру-

гую, изотропную в плане плиту, лежащую на упругом основании. Так, С. А. Бернштейн [6] считает, что хотя лед и не является абсолютно упругим телом, однако такие его свойства, как ползучесть и релаксация, играют второстепенную роль.

И. С. Песчанский [63] указывает, что лед работает упруго до разрушения, если период действия нагрузки не превышает $\frac{1}{2}$ —1 мин; в этом случае пластическая деформация не успевает развиться. Б. Д. Карташкин [30] пришел к выводу, что при изгибе и растяжении образцов речного и морского льда между напряжением и деформацией наблюдается линейная зависимость вплоть до момента разрушения. Опыты, проведенные П. П. Кобеко и др. [35], показали, что в зависимости от режима нагрузки лед как твердое тело может быть упругим или пластичным. При кратковременном действии больших нагрузок разрушение льда определяется в основном упругой деформацией, а для сравнительно малых, но длительных нагрузок характерно разрушение ледяного покрова с малой упругой и большой пластической деформацией. В то же время в литературе имеются данные, указывающие на то, что пластические деформации во льду появляются даже при незначительных напряжениях, вследствие чего зависимость между напряжениями и деформациями, особенно при малых скоростях нагружения, не будет линейной [14].

Упругие свойства льда обычно характеризуются модулем упругости E , который для материалов, подчиняющихся закону Гука, является коэффициентом пропорциональности между деформацией и напряжениями. Опытные данные показывают, что значение этой характеристики, зависящей от структурного строения льда и температуры, изменяется в довольно широких пределах. Используемые при практических расчетах численные значения E зависят также от методики определения этой величины. Так, динамические методы определения модуля упругости, основанные на замерах скорости распространения упругих колебаний во льду, дают большие значения по сравнению со статическим методом, базирующимся на замерах деформаций, возникающих в образцах или в ледяной пластине при статическом нагружении. Различия в численных значениях E объясняются тем, что при использовании статического метода деформация, отвечающая моменту разрушения, замеряется в упруго-пластической зоне и представляет собой сумму упругой и остаточной деформации, причем последняя зависит от скорости деформирования. Этим также объясняется тот факт, что при статическом методе определения E колебания этой величины более значительны, чем при динамическом методе, когда материал работает в зоне, где деформация не зависит от времени приложения нагрузки.

С физической точки зрения более правилен динамический способ определения модуля упругости. Недостатком этого метода, как указывал В. В. Лавров [43], является то, что он основан на допущении об изотропности льда.

Анализируя разрушение сплошного льда ледоколом с точки зрения упруго-пластических свойств ледяного покрова, отметим два обстоятельства.

С одной стороны, согласно данным натуральных испытаний ледоколов, время приложения разрушающих нагрузок сравнительно мало (не более 5 сек), поэтому следует ожидать, что пластичность льда за такой короткий промежуток времени не успеет проявить себя в значительной степени. С другой стороны, установлено, что при прочих равных условиях с изменением скорости движения ледокола картина разрушения льда существенно изменяется. С уменьшением скорости хода прогибы ледяного покрова и размеры обломанных льдин возрастают, а с увеличением скорости — уменьшаются. Указанное различие в характере разрушения ледяного покрова отчасти может быть объяснено тем, что в рассматриваемом случае лед работает за пределом упругости, когда его деформация зависит от режима нагрузки, т. е. от скорости продвижения ледокола.

В настоящее время оценить количественно степень проявления пластических свойств ледяного покрова во время его разрушения ледоколом не представляется возможным. При решении этого вопроса не могут быть также использованы имеющиеся в литературе данные о несущей способности ледяного покрова, поскольку в подавляющем большинстве они характеризуют пластичность льда при сравнительно длительном (часы, сутки) действии нагрузки. Однако есть основания полагать, что в рассматриваемом случае лед является упруго-пластическим материалом, у которого при достаточно больших скоростях приложения нагрузок зависимость между напряжениями и деформациями близка к линейной, вплоть до момента разрушения.

Для практических целей, связанных с движением судна во льдах, правильнее пользоваться значениями модуля упругости, полученными статическим методом. При этом, имея в виду, что модуль упругости сравнительно мало влияет на величину разрушающей нагрузки [63], можно рекомендовать для использования в практических расчетах следующие средние значения модуля упругости: для пресного льда от 35 000 до 62 000 $\kappa\Gamma/\text{см}^2$; для зимнего соленого льда — 30 000 $\kappa\Gamma/\text{см}^2$. Модуль сдвига G пресноводного льда К. Н. Коржавин рекомендует принимать равным 15 000—20 000 $\kappa\Gamma/\text{см}^2$.

По экспериментальным данным В. В. Богородского [7], отношение модулей упругости и сдвига для морского соленого льда, определенное по скорости распространения звука, может быть принято равным 2,66.

Как известно, для изотропных материалов, подчиняющихся закону Гука, упругие константы E , G и μ (μ — коэффициент Пуассона) связаны зависимостью

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1,$$

из которой с учетом вышесказанного следует, что коэффициент Пуассона для льда может быть принят 0,33. Это число достаточно

хорошо согласуется с непосредственными измерениями этой величины.

Внешнее трение льда является одним из важнейших факторов, обуславливающих процесс движения судна во льдах. В особенности это относится к плаванию судна в битых льдах, так как в этих условиях роль сил трения особенно велика. Существенное значение сил трения среди составляющих сил ледового сопротивления при движении судна во льдах единодушно признается всеми отечественными и иностранными исследователями, а некоторые из них (например, Ландтман [101] и Тиле [106]) считают силы трения наиболее существенными из числа этих составляющих. Несмотря на это, внешнее трение льда до настоящего времени изучено недостаточно; имеется небольшое число работ, посвященных этому вопросу, и опубликованные материалы носят неполный и противоречивый характер [1], [2], [36], [88], [60], [12], [9], [74], [93], [103], [99], [105] и [108].

По вопросу о природе сил трения до недавнего времени существовало несколько противоречащих друг другу гипотез. В частности, причина скользкости льда долгое время неправильно объяснялась понижением его температуры плавления под давлением (так называемой режеляцией). Истинные причины скользкости льда и закономерности, которым подчиняется трение льда, были впервые разъяснены в работах К. Б. Вейнберга [12] и Б. В. Дерягина и С. С. Будневича [9].

По современным представлениям трение льда — это трение с самосмазкой, возникающей в результате плавления льда. Причиной плавления является тепло, мгновенно возникающее в местах истинного (фактического) контакта, имеющего дискретный характер.

По мнению Б. В. Дерягина, механизм смазки льда водой основан на скольжении внутри смазочного слоя по определенным плоскостям скольжения. Образованию этих плоскостей способствует правильное расположение молекул воды, сохраняющееся и после плавления кристаллического льда. Отсутствие правильного расположения молекул в сравнительно толстых прослойках воды, по-видимому, затрудняет скольжение в тех случаях, когда трение по льду происходит по поверхности, покрытой водой.

В работах С. С. Будневича и Б. В. Дерягина показано, что трение льда подчиняется законам граничного трения (сила трения не зависит от скорости и пропорциональна нагрузке). Иными словами, к интересующим нас случаям трения льда применим закон Кулона—Амонтона, согласно которому сила трения

$$F = f_T N,$$

где f_T — коэффициент трения;
 N — действующая нормальная нагрузка.

Знание закономерностей трения льда имеет большое значение для моделирования движения судна во льдах.

Численные значения фрикционных характеристик льда, полученные разными авторами, отличаются неполнотой и разнозначностью. Так, значения динамического коэффициента трения стали по льду изменяются в пределах от 0,01 до 0,25. Столь значительные расхождения результатов экспериментальных исследований объясняются в основном причинами методического характера. Следует отметить, что большая часть данных получена в лабораторных условиях.

Для решения интересующих нас практических задач по определению ледового сопротивления судов необходимо знать реальные величины коэффициентов трения льда, соответствующие их натурным значениям. Вопрос о том, применимы ли для этой цели данные, полученные в лабораторных условиях (иными словами, отсутствует ли в этом случае масштабный эффект), до недавнего времени нельзя было считать решенным. Имелись серьезные основания полагать, что масштабный эффект в данном случае имеет место. Такое мнение было высказано рядом авторов, например, Л. М. Ногидом [54].

Действительно, поверхность натурального льда сильно отличается от лабораторного ввиду различия структуры, наличия микро- и макрошероховатостей, снегового покрова и т. п. Кроме того, стальная поверхность корпуса судна также значительно отличается от поверхности стали, применявшейся в лабораторных опытах. Для получения характеристик трения льда, которые можно использовать для расчетов ледового сопротивления судов, А. Я. Рывлин и Е. Ю. Петров провели специальные экспериментальные исследования трения льда в натуральных условиях [74]. Исследования проводились на пресном и морском льду по специально разработанной методике, направленной на максимально возможное приближение условий испытаний к натурным. Это требование распространялось на размеры образцов, коэффициенты взаимного перекрытия, удельные давления, скорости скольжения, контактные температуры, их градиенты по глубине и т. п. В результате были получены надежные данные по коэффициентам трения льда. Рекомендуемое среднее расчетное значение коэффициента динамического трения льда о судовую сталь и льда по льду может быть принято равным $f_T = 0,08 \div 0,13$.

Приведенные значения f_T охватывают практически весь диапазон изменения внешних условий (удельное давление, соленость льда, температура, скорость скольжения, наличие или отсутствие воды между бортом и льдом, шероховатость льда и его разрушенность), в которых протекает плавание судна во льдах.

Значительное отклонение величины коэффициента трения, выходящее за пределы указанных значений, имеет место лишь при изменении заснеженности льда, увеличение которой приводит

к возрастанию f_T в 1,5—2,5 раза. Диапазон изменения статического коэффициента трения несколько шире (от 0,2 до 0,8) и зависит от ряда специфических факторов, например, времени примерзания.

Указанные значения f_T хорошо согласуются с данными, приведенными в работах [11] и [105].

§ 3. Ледовые качества судов. Основные понятия и определения

Под ледовыми качествами принято понимать комплекс специальных качеств судна, зависящих от формы и прочности корпуса, мощности энергетической установки и наличия специальных систем и устройств, повышающих эффективность работы судна во льдах.

Ледовые качества судна определяются:

1. Ледовой ходкостью — свойством судна продвигаться во льдах (преодолевать ледовое сопротивление) с некоторой «достижимой» скоростью, обусловленной размерениями и формой обводов корпуса судна, мощностью его энергетической установки и характеристиками ледяного покрова.

2. Ледовой прочностью — свойством конструкций корпуса судна сохранять местную прочность (не получать повреждений) под действием ледовых нагрузок, возникающих при движениях судна во льдах и при ледовых сжатиях. Ледовая прочность судна определяется размерами, формой обводов, материалом и конструкцией корпуса, скоростью хода и ледовыми условиями плавания. Критерием безопасного плавания во льдах является некоторая предельная «допустимая» скорость, превышение которой может привести к ледовым повреждениям корпуса.

3. Маневренностью при работе во льдах — совокупностью качеств судна, от которых зависит его способность совершать маневрирование во льдах (повороты, реверсы, разбеги, околка судов, закальваемость в кромку и т. п.). Для ледоколов высокие маневренные качества особенно важны при проводке, околке и буксировке судов во льдах, а для транспортных судов ледового плавания — при движении в битых льдах и в канале за ледоколом. Маневренные качества судна при работе во льдах определяются в первую очередь соотношениями главных размерений судна, мощностью и маневренными характеристиками его энергетической установки, количеством и расположением рулей и гребных винтов, их параметрами при работе на передний и задний ход и ледовой защитой, наличием специальных подруливающих устройств.

4. Наличием специальных устройств и систем, предназначенных для повышения эффективности работы судна во льдах (гидроомывающее устройство, креновая и дифференциальная системы, буксирное устройство, вибрационная установка, посадочная площадка для вертолета с необходимым оборудованием).

5. Наличием систем и оборудования вспомогательного характера, предназначенных для плавания во льдах (ледовые ящики, система обогрева трюмов, оборудования и помещений; специальное навигационное оборудование; ледовые лаги; сигнальная и осветительная системы и т. д.).

6. Опытностью судоводительского состава и применяемыми ими тактическими средствами ледового плавания.

Приведенное разделение ледовых качеств судна на составные элементы не лишено известной условности, поскольку все эти качества тесно связаны друг с другом. Однако при анализе закономерностей сопротивления льда движению судна мы будем рассматривать ледовую ходкость изолированно от прочих ледовых качеств. Такой подход является общепринятым при изучении сложных и многообразных процессов. В необходимых случаях — в основном при практическом применении выведенных зависимостей — будут затронуты соответствующие смежные вопросы, относящиеся к другим ледовым качествам судна.

Останемся на критериях, применяемых для оценки ледовой ходкости судов.

Ледовая ходкость измеряется скоростью, которую судно способно развить в данных конкретных условиях при работе главных механизмов с заданной мощностью (иными словами, при заданной тяге, развиваемой гребными винтами). Скорость, определяемая из условий ледовой ходкости судна, носит, таким образом, характер достижимой, в отличие от допустимой по условиям ледовой прочности.

Общепринятым является термин «ледопроходимость», т. е. способность судна продвигаться в конкретных ледовых условиях. Мерой ледопроходимости судна в заданных ледовых условиях является скорость его движения, которая, вообще говоря, зависит от ледовой ходкости, ледовой прочности судна и ряда других факторов. Однако, как было оговорено выше, при анализе закономерностей сопротивления судна при движении во льдах мы будем полагать, что ледопроходимость определяется исключительно ледовой ходкостью судна. Следовательно, в этом узком аспекте мерой ледопроходимости будет служить скорость, названная нами достижимой.

В реальных условиях эксплуатации судов во льдах всегда имеет место ряд факторов технического и эксплуатационного характера, которые также оказывают влияние на ледопроходимость судна. Поэтому техническая или эксплуатационная ледопроходимость отличается от «чистой» ледопроходимости, о которой шла речь выше. Соответственно мерой технической и эксплуатационной ледопроходимости будет служить некоторая «техническая» или «эксплуатационная» скорость.

Необходимо особо подчеркнуть, что «ледопроходимость» судна определяется не только его ледовыми качествами, но и ледовыми

условиями плавания. Поэтому для одного и того же судна может быть определена ледопроездимость при ходе в сплошном льду, в мелкобитом и т. д.

В практике ледоколостроения для оценки ледовых качеств применяется показатель «предельная толщина» сплошного льда, которую судно при работе энергетической установки на полную мощность способно преодолевать непрерывным ходом. Этот показатель может служить эталоном при сравнении ледокольных качеств судов. Как правило, он применяется лишь при оценке ледовых качеств ледоколов и транспортных судов класса УЛ (Аркт.), поскольку транспортные суда других ледовых классов не предназначены для самостоятельного плавания в сплошных льдах (см. § 31).

Сопротивление сплошного льда движению судна

§ 4. Особенности движения судна в сплошных льдах и взаимодействие корпуса со льдом

Как известно, движение ледокола во льдах может происходить при непрерывном ходе или набегами.

Движение судна непрерывным ходом с установившейся скоростью возможно, если величина суммарной тяги, развиваемой гребными винтами, достаточна для преодоления ледового сопротивления. Такой способ продвижения во льдах наиболее эффективен и безопасен.

Если сила ледового сопротивления превышает величину тяги гребных винтов, то прибегают к работе набегами. В этом случае средняя скорость движения зависит не только от ледового сопротивления и характеристик судна (как это имеет место при непрерывном ходе во льдах), но и от маневренных качеств энергетической установки, тактических приемов, применяемых судоводителем, и т. п.

При работе набегами вспомогательные операции (реверсирование, отход назад, разгон) занимают сравнительно много времени. Так, ледокол типа «Добрыня Никитич» при прокладке канала набегами в сплошных льдах толщиной 1,3 м затрачивал в среднем: на отход назад — 120 сек, на реверс вперед — 6 сек, на разбег — 45 сек, непосредственно на продвижение во льду — 15 сек, на реверс назад — 25 сек (общее время одного цикла работы — 211 сек).

Таким образом, сложность решения задачи о работе ледокола набегами очевидна; она не может быть сведена только к расчету сил ледового сопротивления, и в настоящее время не существует методов ее практического решения. Поэтому в настоящей книге ограничимся рассмотрением только непрерывного движения судна.

Изучение сопротивления сплошного льда при непрерывном движении судна усугубляется многообразием сплошных льдов и сравнительно большим числом факторов, влияющих на проходимость судна, часть из которых в настоящее время не поддается строгому количественному учету (торосистость, разрушенность

и т. п). Анализ закономерностей ледового сопротивления и моделирование упрощаются, если рассматривать движение ледокола в ровных сплошных льдах. В этом случае характеристиками ледяного покрова, которые необходимо учитывать, являются лишь толщина льда и его прочность.

Ниже приведены особенности физической картины непрерывного движения судна в ровных сплошных льдах, которые положены в основу моделирования и теоретических расчетных методов.

Как показывает практика, скорость хода судна в сплошных льдах зависит от толщины и прочности ледяного покрова и составляет обычно от 0,5 до 10—12 узл. Преодоление сил сопротивления происходит как за счет тяги гребных винтов, так и за счет кинетической энергии массы судна.

При встрече ледокола с полем форштевень ударяется о лед и носовая часть судна налезает на ледяной покров, который не разрушается изгибом, а «прорезается» форштевнем. По мере продвижения судна вперед, во время которого его дифферент увеличивается на корму, в контакт со льдом вступают борта ледокола, разрушающие лед изгибом на отдельные секторы, располагающиеся в один, два и более рядов вдоль каждого борта. Неодновременность ломки льда различными участками бортов, а также отсутствие разрушения льда впереди форштевня приводит к тому, что в процессе движения носовая часть судна не опускается до первоначального положения. Таким образом, ледокол, преодолевая ровный сплошной лед, движется с практически постоянным дифферентом на корму, приобретенным в начальный период при налезании форштевня на лед. Величина этого дифферента, как показывают наблюдения, зависит от толщины и прочности льда, формы обводов корпуса и скорости. Имеют место лишь сравнительно небольшие изменения посадки, обусловленные разрушением ледяного покрова отдельными участками бортов, а также небольшое рыскание и изменение крена, связанные с неодновременностью ломки льда и левым и правым бортами.

Таким образом, в подавляющем большинстве случаев движение судна в сплошных льдах по своему характеру не является «периодическим» с ярко выраженной циклическостью, как это представлялось некоторым исследователям [54], [13].

Характер разрушения льда форштевнем судна в виде «прорезания» (без облома изгибом) может быть объяснен следующим образом. На наклонной грани форштевня происходит разложение контактного давления на горизонтальную и вертикальную составляющие, которые вызывают деформацию сжатия, среза и изгиба льда. Характер окончательного разрушения льда будет зависеть от того, какие из указанных выше деформаций (напряжений) раньше достигнут своего предельного значения.

Первоначально в районе форштевня со стороны бортов происходит местное смятие и скалывание льда. Затем если площади

контакта окажутся достаточными для восприятия вертикальной нагрузки, вообще говоря, может наступить разрушение льда от изгиба. Однако этого, как правило, не происходит, так как при прочих равных условиях сопротивление льда срезу меньше, чем изгибу. Случаи общего разрушения ледяного покрова носом судна сжатием (раздроблением) под действием горизонтальных усилий также крайне редки ввиду сравнительно малых углов

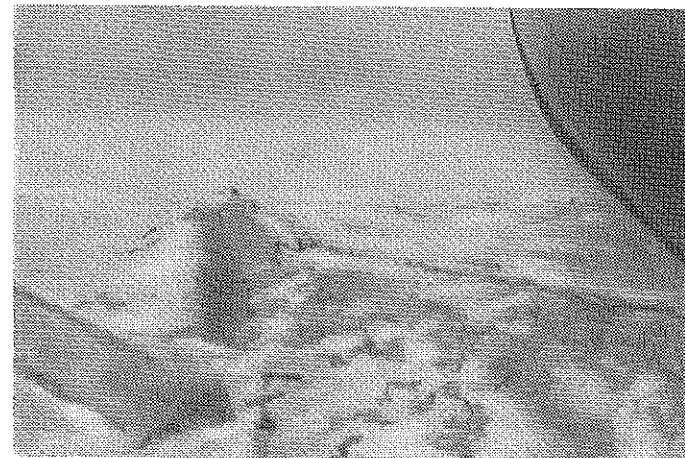


Рис. 6. Характер разрушения льда форштевнем ледокола.

наклона форштевня ледоколов, а также ввиду того, что предел прочности льда на сжатие больше, чем на изгиб и срез.

Типичная картина разрушения льда форштевнем ледокола при его движении в сплошном льду приведена на рис. 6. Из рисунка видно, что форштевень судна в процессе движения образует во льду прорезь. Снеговой покров и частично верхний слой льда оказываются выдавленными из этой прорези на ледяной покров и образуют снежный валок. Изгибные трещины впереди форштевня отсутствуют. Наблюдения показывают, что величина зоны прорезания льда форштевнем зависит от физико-механических качеств льда, скорости движения ледокола и формы носовой оконечности корпуса.

Иной характер носит разрушение льда бортами ледокола. Первоначально в районе контакта борта со льдом происходит местное смятие верхней кромки льда (рис. 7), которое продолжается вплоть до момента разрушения льда изгибом. Размеры указанных зон смятия кромки зависят от толщины, прочности льда, формы обводов корпуса и скорости движения судна.

Момент разрушения льда изгибом характеризуется появлением одной, двух и более концентрических трещин, образующихся в результате растяжения верхних слоев льда (рис. 8).

Обычно окончательный облом льда происходит по ближайшей к борту трещине, в то время как трещины II и III закрываются. Прилегающая к корпусу льдина притапливается. Если ширина зоны разрушенного льда в этом месте недостаточна для прохождения корпуса ледокола, то происходит притапливание льдины, расположенной между трещинами I и II, и т. д.

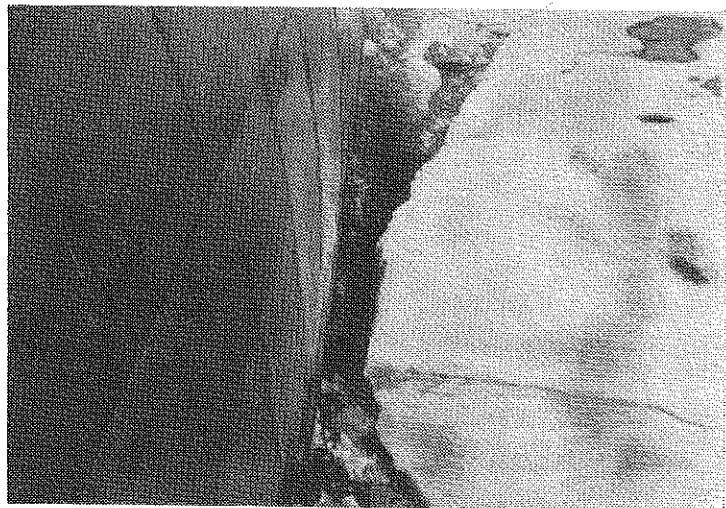


Рис. 7. Смятие верхней кромки льда бортом.

Как показывают наблюдения, число рядов секторов, выламываемых каждым бортом от форштевня до кромки неразрушенного ледяного покрова, а также абсолютные размеры этих секторов в основном зависят от толщины льда, скорости движения ледокола и его ширины. Отношение длины сектора к его ширине во всех случаях довольно стабильно и равно 3—5. При сравнительно небольших скоростях движения и предельных толщинах льда обычно наблюдается «однорядная», редко «двухрядная» ломка бортами. В случае однорядной ломки вслед за прорезанием льда форштевнем с каждого борта обламывается по одному большому сектору (сектор I на рис. 9), ширина которого оказывается больше половины ширины ледокола. Благодаря этому миделевая часть судна после притапливания сектора не соприкасается непосредственно с кромкой поля.

Длина секторов, выламываемых бортами ледокола при однорядной ломке, может достигать 50—80 м, при ширине 20 м.

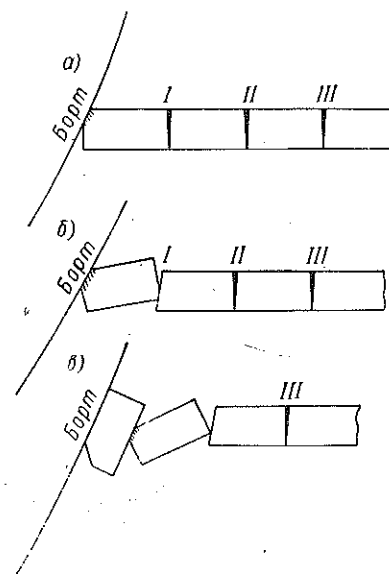
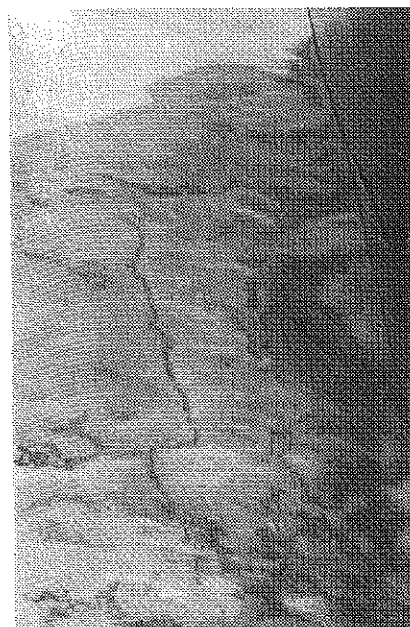


Рис. 8. Разрушение льда бортом: а — образование трещин; б — начало притапливания льдины, в — поворачивание льдины на ребро.

При двухрядной ломке льда с каждого борта поочередно обламываются два сектора (рис. 10). Сектор I, который следует непосредственно за зоной прорезания льда форштевнем, имеет сравнительно небольшие размеры; размеры сектора II, образующего кромку канала, в несколько раз больше. При увеличении

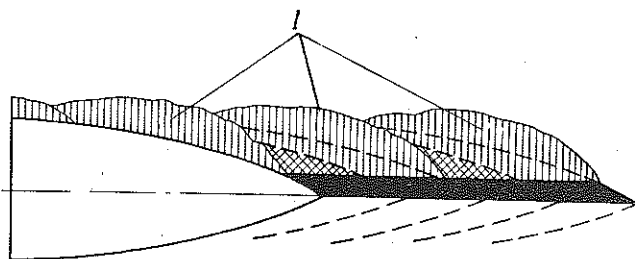


Рис. 9. Схема однорядной ломки льда.
I — сектор первого ряда.

скорости движения ледокола и уменьшении толщины льда число рядов секторов с каждого борта увеличивается до трех и более, но абсолютные размеры секторов уменьшаются. Иногда ледокол одновременно касается льда несколькими участками борта. В этом случае обламывается один сектор больших размеров.

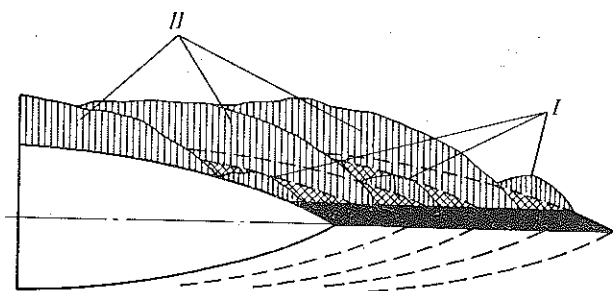


Рис. 10. Схема двухрядной ломки льда.
I — сектор первого ряда, II — сектор второго ряда.

Каждый сектор в процессе притапливания и поворачивания бортом разламывается на две-три части вдоль трещин, которые исходят из мест контакта борта со льдом (так называемые радиальные трещины). Часть льдин выталкивается на ненарушенный ледяной покров, а другая (большая) заполняет пространство между корпусом и кромкой льда (рис. 11).

Основная масса разрушенного льда полностью притапливается бортами ледокола, вследствие чего подводная часть корпуса облегаются битым льдом вплоть до днища. Частично притопленные

крупные льдины, расположенные между кромкой льда и корпусом, после прохождения средней наиболее широкой части судна вновь принимают горизонтальное положение. При этом сначала они несколько отходят от кромки льда, а за кормой под действием



Рис. 11. Расположение льдин вдоль корпуса судна.

струй, отбрасываемых винтами, снова поджимаются к неразрушенному ледяному покрову. В дальнейшем, по мере удаления от кормы, лед смыкается к центру канала (рис. 12). Непосредственно за кормой в зоне наиболее интенсивных струй образуется полоса воды (рис. 13).

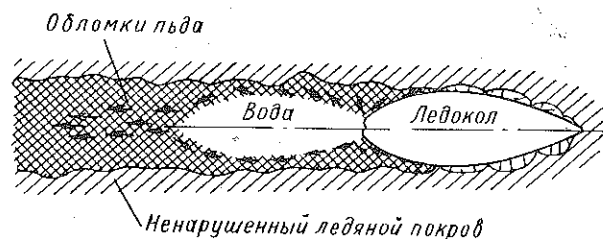


Рис. 12. Схема канала в сплошном льду (стрелками обозначены траектории движения льдин).

Таким образом, представляется следующая картина расположения битого льда в канале: в середине канала «ледяная каша», далее по направлению к кромкам мелкие и средние куски льда, а у краев — преимущественно крупные льдины (рис. 14).

Канал, образуемый ледоколом, играет важную роль в тактике проводки транспортных судов. Качество канала определяется его

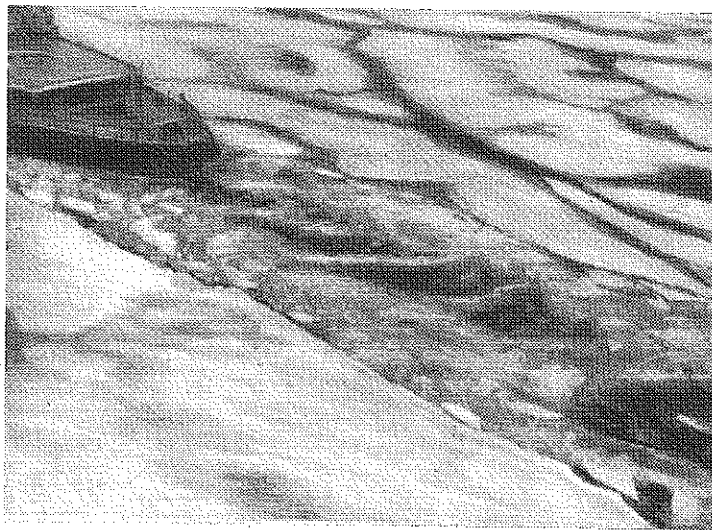


Рис. 13. Полоса воды за кормой судна.



Рис. 14. Расположение обломков льда после отхода ледокола.

шириной, сплоченностью в нем мелкобитого льда, размерами льдин и их относительным расположением, протяженностью участка чистой воды за кормой ледокола и т. д. Перечисленные характеристики находятся в прямой зависимости от характера разрушения льда корпусом ледокола, а также от количества винтов, величины и распределения мощности между винтами и т. д.

Сплоченность льда в канале, проложенном ледоколом в сплошном льду, составляет 9—10 баллов, при этом 10—30% площади канала занимают крупные льдины, 30% — средние, а 30—50% мелкие льдины и ледяная каша. В ровных льдах канал обычно прямолинеен; ширина его на 20—30% больше ширины ледокола; кромки канала сравнительно ровные, с небольшими выступами.

§ 5. Составляющие сил ледового сопротивления

На основании анализа взаимодействия корпуса ледокола с ледяным покровом полное сопротивление льда движению судна можно разделить на следующие составляющие:

- сопротивление ломки, обусловленное разрушением льда форштевнем и бортами судна;
- сопротивление притапливания разрушенного льда;
- сопротивление переворачивания льдин;
- сопротивление, связанное с потерями энергии при изменении посадки ледокола;
- сопротивление, обусловленное потерями энергии при соударениях корпуса ледокола с льдом;
- сопротивление раздвигания обломанных льдин;
- сопротивление трения льда о корпус и льда о лед;
- сопротивление воды движению ледокола.

Общепринятым является разделение полного ледового сопротивления $R_{\text{л}}$ на прямое (или статическое) и скоростное.

Прямое сопротивление $R_{\text{пр}}$ включает все виды сопротивления, не зависящие от скорости движения, т. е. сопротивление ломки льда, частично сопротивление притапливания и переворачивания разрушенного льда, сопротивление, связанное с изменением посадки судна, сопротивление трения льда.

Скоростное сопротивление $R_{\text{ск}}$ включает сопротивления, зависящие от скорости движения, а именно: сопротивление раздвигания разрушенного льда, сопротивление воды движению судна и льдин и т. п.

На рис. 15 приведена буксировочная кривая ледового сопротивления $R_{\text{л}} = f(v)$, типичная для движения судна в сплошном льду. Ордината этой кривой при $v = 0$ * представляет прямое

* Следует отметить, что практически определить сопротивление при скорости движения, равной нулю, не представляется возможным. Поэтому, учитывая характер кривых ледового сопротивления (рис. 15), с достаточной для практики точностью можно принимать за $R_{\text{пр}}$ сопротивление при малой скорости хода судна порядка 1—2 узл.

сопротивление $R_{пр}$, а скоростное сопротивление $R_{ск}$ равно разности $R_{л} - R_{пр}$ при значениях v , отличных от нуля. Полное ледовое сопротивление $R_{л}$, таким образом, равно сумме прямого и скоростного сопротивлений:

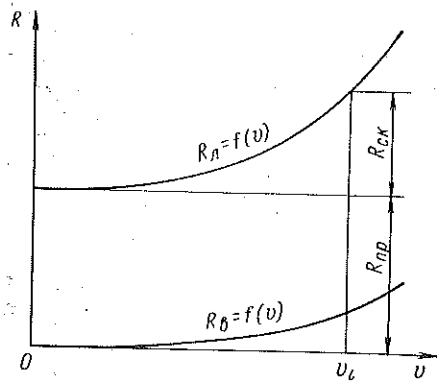


Рис. 15. Кривые буксировочного сопротивления судна в сплошном льду ($R_{л}$) и на свободной воде ($R_{в}$).

тивления при движении на свободной воде. Однако в рассматриваемом случае при сравнительно малых скоростях движения представляется возможным без особой погрешности определять сопротивление $R_{в}$ так же, как это делается для свободной воды (расчетным путем или с помощью эксперимента [15], [57]). Для проверки этого положения были проведены специальные испытания модели ледокола в бассейне ААНИИ на свободной воде. Модель испытывалась при ширине фарватера, равной ширине бассейна — 1,8 м, и в канале, пропиленном в сплошном льду. Ширина канала равнялась 54 см, а ширина модели — 43,5 см. Результаты испытаний приведены на рис. 16.

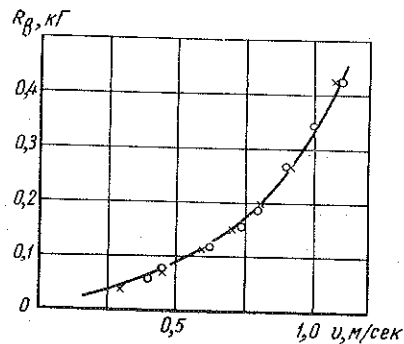


Рис. 16. Буксировочная кривая модели ледокола «Ермак» на свободной воде:

○ — неограниченный фарватер; × — в канале.

Как видно из рис. 16, буксировочное сопротивление модели при движении в канале и на неограниченном фарватере практически одинаково. Это дает основание определять составляющую $R_{в}$ общепринятым путем. (Сказанное справедливо в пределах чисел Фруда $Fr = 0,05 \div 0,2$, характерных для движения судов во льдах.) На рис. 17 и 18 приведены кривые буксировочного сопротивления на свободной

$$R_{л} = R_{пр} + R_{ск}. \quad (1)$$

Для решения ряда практических задач удобно пользоваться «чистым» ледовым сопротивлением $R_{лч}$, представляющим собой разность между полным ледовым сопротивлением и сопротивлением воды движению судна:

$$R_{лч} = R_{л} - R_{в}. \quad (2)$$

Строго говоря, сопротивление воды $R_{в}$ при движении судна в ледовых условиях, вызывающих стеснение потока, отличается от сопро-

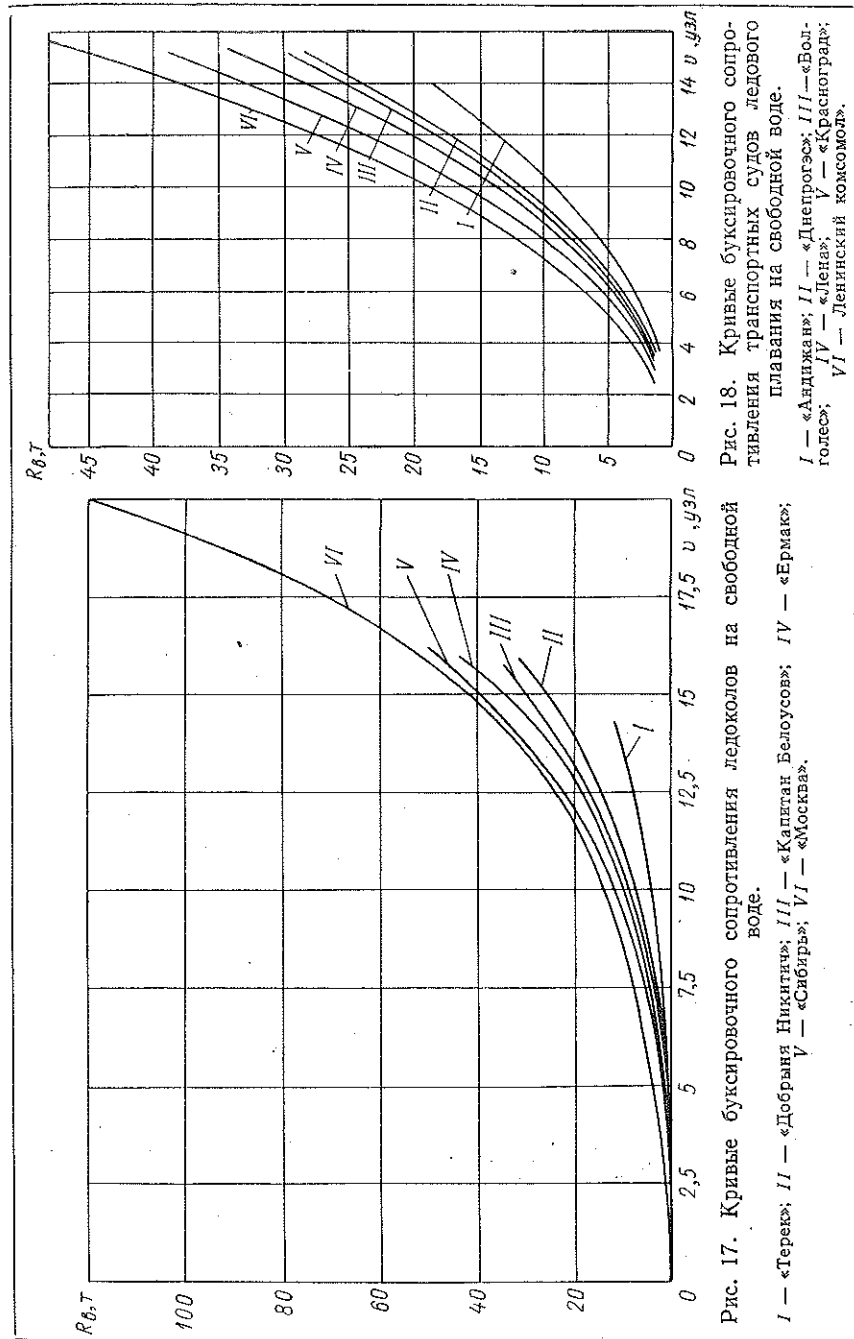


Рис. 18. Кривые буксировочного сопротивления транспортных судов ледового плавания на свободной воде. I — «Андрейан»; II — «Днепротэкс»; III — «Волгогос»; IV — «Лена»; V — «Красноград»; VI — Ленинский комсомолец.

Рис. 17. Кривые буксировочного сопротивления ледоколов на свободной воде. I — «Терек»; II — «Добрыня Никитич»; III — «Капитан Белоусов»; IV — «Ермак»; V — «Сабирь»; VI — «Москва».

воде $R_v = f(v)$ для основных типов отечественных ледоколов и судов ледового плавания, которые могут быть использованы при практических расчетах ледовой ходкости.

§ 6. Моделирование движения судна в сплошном льду

Трудности аналитического решения задачи по определению сопротивления судна в сплошном ледяном поле заставили обратиться к натурным и модельным экспериментам.

Впервые метод моделирования для изучения процесса движения судна в сплошных льдах был предложен Л. М. Ногидом. Практическое осуществление моделирования осложнялось трудностями выбора материала, который мог бы имитировать натуральный лед в лабораторных условиях. Опыты по движению моделей в парафиновых пластинах, впервые проведенные Л. М. Ногидом в 1939—1941 гг., показали нецелесообразность применения парафина в качестве модели ледяного поля вследствие большой пластичности этого материала.

К аналогичному выводу пришел А. Л. Костюков, который в это же время проводил эксперименты по разрушению на плаву парафиновых пластин моделями ледоколов «Ермак» и «Разведчик» в бассейне Одесского института инженеров водного транспорта. Позднее Л. М. Ногидом была сделана попытка воспроизвести ледяной покров с помощью пластин из смеси стеарина и говяжьего жира.

Зимой в 1940—1941 гг. В. И. Негановым были проведены испытания модели ледокола во льду, замороженном естественным образом в открытом водоеме. Такой лед даже при толщине 7—8 мм был очень прочным и модель вползала на ледяной покров, не разрушая его.

В послевоенные годы работы по моделированию движения судна в сплошных льдах были возобновлены. В 1946 г. Л. М. Ногид исходя из теории размерностей впервые сформулировал основные условия подобия, которые легли в основу постановки модельных экспериментов по изучению движения судна в сплошных льдах.

В 1948 г. В. В. Лавровым был предложен способ получения в лабораторных условиях однородного льда натурального состава пониженной прочности, который был назван моделированным льдом. Первые испытания моделей в таком льду, проведенные И. И. Позняком и В. В. Лавровым в шугоносном лотке Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники им. Веденеева, подтвердили перспективность метода модельных испытаний во льдах и доказали необходимость создания для этой цели специальной лабораторной базы — ледового бассейна.

В 1951 г. Ю. А. Шиманский и Л. М. Ногид разработали теоретические основы методики моделирования движения судна во

льдах как рабочей гипотезы, подлежащей экспериментальной проверке и дальнейшему теоретическому уточнению.

В 1955 г. вступил в строй первый в мире ледовый бассейн Арктического института, предназначенный для испытания в моделированном льду. Проведенные в ледовом бассейне исследования позволили усовершенствовать методику приготовления моделированного льда, отработать методику и технику модельных испытаний, а также провести экспериментальную проверку возможности выполнения в ледовом бассейне условий подобия.

При выводе условий подобия, которым должны удовлетворять при моделировании физические величины, обычно базируются на анализе размерностей физических величин, участвующих в данном явлении, или на уравнениях связи, описывающих это явление. Поскольку в настоящее время уравнений, достаточно строго описывающих движение судна в сплошных льдах, не имеется, при выводе условий моделирования приходится в основном использовать путь, связанный с анализом размерностей.

Как известно, явления могут считаться подобными, если величины, характеризующие одно явление, могут быть получены путем умножения соответствующих величин другого явления на постоянные множители. Различают геометрическое, кинематическое и динамическое подобие.

При геометрическом подобии пропорциональны сходственные линейные размеры природы и модели, т. е.

$$\frac{L_n}{L_m} = \lambda; \quad (3)$$

при кинематическом подобии пропорциональны скорости в сходственных точках природы и модели

$$\frac{v_n}{v_m} = k_v; \quad (4)$$

динамическое подобие подразумевает пропорциональность сил, действующих на сходственные элементы природы и модели,

$$\frac{Q_n}{Q_m} = k_k. \quad (5)$$

где L_n , v_n и Q_n — соответственно линейные размеры, скорости и силы природы;

L_m , v_m и Q_m — линейные размеры, скорости и силы модели;
 λ , k_v и k_k — коэффициенты соответственно геометрического, кинематического и динамического подобия.

Для каждой пары действующих сил можно написать свое условие подобия, которое называется условием частичного подобия. В случае выполнения всех частичных подобий имеет место полное динамическое подобие. В процессах, сопровождающих

движение судна в сплошных льдах, действуют различные по природе силы: силы тяжести (силы весового характера), силы инерции, силы упругости и силы трения.

Чтобы установить условия полного динамического подобия, рассмотрим сначала условия моделирования отдельных пар сил, а затем — вопрос о их совместном моделировании.

Проанализируем задачу об условиях подобия сил весового характера и сил инерции. Количественной характеристикой этих сил, не зависящей от произвольно выбранного объема, является удельный вес γ или плотность $\rho = \frac{\gamma}{g}$ (где g — ускорение силы тяжести).

Из числа составляющих сил сопротивления, возникающих при движении судна в сплошном ледяном поле, к силам весового характера относятся силы сопротивления, связанные с поворачиванием и притапливанием обломанных льдин, а также с изменениями посадки судна.

Условие подобия при наличии сил тяжести, как известно, заключается в соблюдении равенства

$$\frac{v_n}{\sqrt{gL_n}} = \frac{v_m}{\sqrt{gL_m}} \quad (6)$$

Условие (6) называется условием Фруда, а безразмерное выражение $\frac{v}{\sqrt{gL}}$ — числом Фруда. Физический смысл этого условия заключается в постоянстве отношения сил инерции к силам тяжести в соответствующих точках натуре и модели.

Отношение сил тяжести натуре P_n и модели P_m будет равно λ^3 , если удельные веса в соответствующих точках натуре и модели одинаковы:

$$\frac{P_n}{P_m} = \frac{\gamma_n}{\gamma_m} \frac{V_n}{V_m} = \frac{\gamma_n}{\gamma_m} \lambda^3 = \lambda^3; \quad \gamma_n = \gamma_m,$$

где V_n и V_m — объемы тел натуре и модели.

Для того чтобы отношение инерционных сил натуре F_n и модели F_m было равно λ^3 при условии $\gamma_n = \gamma_m$, необходимо обеспечить равенство ускорений натуре и модели a_n и a_m :

$$\frac{F_n}{F_m} = \frac{m_n a_n}{m_m a_m} = \lambda^3 \frac{a_n}{a_m} = \lambda^3; \quad a_n = a_m.$$

Из равенства ускорений можно получить масштаб времени

$$\frac{T_n}{T_m} = \sqrt{\frac{L_n}{L_m}} = \sqrt{\lambda}, \quad (7)$$

где T_n и T_m — время натуре и модели,

и отношение скоростей поступательного движения

$$\frac{v_n}{v_m} = \frac{L_n T_n}{L_m T_m} = \lambda \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\lambda}. \quad (8)$$

Следовательно, отношение сил инерции будет равно λ^3 , если скорости соответствующих точек натуре и модели будут относиться как $\sqrt{\lambda}$. Как и следовало ожидать, при этом будут автоматически выполняться условия равенства чисел Фруда (6), так как ускорение силы тяжести g у натуре и модели одинаково.

Таким образом, можно сделать вывод, что отношение сил инерции и сил весового характера будет равно λ^3 , если обеспечено равенство плотностей натуре и модели и соблюдены условия кинематического подобия.

При движении ледокола в сплошных льдах часть работы упора винтов расходуется на разрушение ледяного покрова. В общем случае деформирования льда как упруго-пластического материала роль внутренних сил сопротивления (восстанавливающих сил) играют силы упругости и силы вязкости (силы внутреннего трения). Принимая во внимание замечания, сделанные в § 2 в отношении упругих свойств льда, ограничимся рассмотрением случая, когда лед является абсолютно упругим телом.

Для вывода необходимых условий подобия сначала воспользуемся уравнением динамического равновесия тела, для которого уравнение проекций сил на ось Ox запишем в виде

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = X, \quad (9)$$

где σ_x , τ_{xy} и τ_{xz} — проекции напряжений на ось Ox ;
 u_x — проекция перемещения на ось Ox ;
 X — проекция объемных сил на ось Ox ;
 ρ — плотность материала.

Отдельные члены уравнения (9) могут быть представлены в виде

$$\frac{\sigma}{L}; \quad \rho \frac{L}{T^2} \quad \text{и} \quad \frac{Q}{L^3}. \quad (10)$$

Делением $\frac{Q}{L^3}$ на первые два комплекса можно получить условия подобия

$$\frac{Q}{\sigma L^2} \quad \text{и} \quad \frac{QT^2}{\rho L^4} = \frac{Q}{\rho v^2 L^2}, \quad (11)$$

последнее из которых является общим выражением для сил динамического характера [55].

Если восстанавливающими силами являются силы упругости, то два других условия подобия могут быть получены на основании закона Гука [62]:

$$\sigma_x = \frac{E}{2(1+\mu)} \left[u_{xx} + \frac{\mu}{1-2\mu} \theta \right], \quad (12)$$

где $\theta = u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}$ — объемная относительная деформация; u_{xx}, u_{yy}, u_{zz} — линейные (относительные) деформации по направлению соответствующих осей;

μ — коэффициент Пуассона.

В качестве условий подобия в данном случае можно выделить две безразмерные величины

$$\mu \text{ и } \frac{Q}{EL^2}. \quad (13)$$

Из (11) и (13) получаем соотношение

$$Ch = \rho \frac{v^2}{E}, \quad (14)$$

которое принято называть числом (условием) Коши. Условие Коши характеризует динамические явления в изотропных упругих телах и с физической точки зрения выражает постоянство отношения сил динамического характера к восстанавливающим силам упругости в соответствующих точках природы и модели.

Таким образом, окончательно для моделирования динамических явлений, в которых действуют силы упругости, необходимо в качестве критериев подобия принять следующие три безразмерных соотношения [55]

$$\mu; \rho \frac{v^2}{E}; \frac{Q}{EL^2}. \quad (15)$$

Если вместо сил динамического характера действуют объемные силы, которые, как указывалось выше, пропорциональны удельному весу $\gamma = \rho g$, то условиями подобия являются [55]

$$\mu; \gamma \frac{L}{E}; \frac{Q}{EL^2}. \quad (16)$$

Параметр $\gamma \frac{L}{E}$ указывает на постоянство отношения сил весового характера к силам упругости в соответствующих точках природы и модели.

Из выражения (12) видно, что при соблюдении геометрического подобия силы упругости в соответствующих точках природы и модели будут относиться как λ^3 , если коэффициенты Пуассона натурального льда и материала, имитирующего этот лед в лабораторных условиях, равны ($\mu_n = \mu_m$), а отношение моделей упругости равно

λ ($E_n/E_m = \lambda$). Отношение между напряжениями природы и модели в этом случае, как следует из выражения (12), будет также равно λ . Поскольку при движении ледокола в сплошных льдах происходит разрушение ледяного покрова, при моделировании этого процесса необходимо знать отношение между пределами прочности натурального льда и его модели. Очевидно, оно будет таким же, как и для напряжений

$$\frac{(\sigma_p)_n}{(\sigma_p)_m} = \lambda. \quad (17)$$

Из условия подобия Коши вытекают еще два случая, которые необходимо соблюдать при моделировании ломки льда ледоколом

$$\rho_n = \rho_m \text{ и } \frac{v_n}{v_m} = \sqrt{\lambda}.$$

Таким образом, требования в отношении материала и скоростей движения природы и модели, которые вытекают из условий подобия Фруда и Коши, совпадают. Это позволяет сделать вывод о возможности совместного моделирования сил весового характера, сил инерции и упругости.

Кроме рассмотренных выше сил, при движении судна в сплошных льдах имеют место следующие виды сил трения: так называемое «сухое» трение и гидродинамическое трение. Величина сил сухого трения не зависит от скорости и пропорциональна соответствующим контактным давлениям. Сухое трение возникает при взаимодействии (скольжении) корпуса со льдом и льдин между собой. Силы гидродинамического трения, обусловленные вязкостью воды, зависят от скорости движения. Они появляются при обтекании водой корпуса судна и льдин, а также при их раздвижении, притапливании и поворачивании.

Сухое трение льда относится к категории сил внешнего трения; для него справедлив закон Кулона—Амонтона (см. § 2). Очевидно, что силы сухого трения при моделировании процессов, подчиняющихся условию подобия Фруда, являются автомодельными при условии соблюдения равенства коэффициентов трения природы и модели:

$$(f_T)_n = (f_T)_m. \quad (18)$$

Гидродинамическое (или жидкостное) трение относится к категории сил внутреннего трения, так как скольжение в этом случае происходит внутри жидкости (воды) между ее слоями. Эти силы зависят от вязкости жидкости и скорости движения. Они моделируются по условию Рейнольдса Re , представляющему собой величину, пропорциональную отношению сил инерции к силам трения

$$Re = \frac{vL}{\nu},$$

где ν — коэффициент кинематической вязкости.

Совместное моделирование сил, подчиняющихся условиям подобия Фруда и Рейнольдса, связано с большими трудностями. Поэтому для целей практического моделирования следует оценить, какую роль играют силы сухого и гидродинамического трения в процессе движения судна во льдах и не приведет ли пренебрежение одной из них к существенным погрешностям при моделировании.

В свое время Л. М. Ногид высказал предположение, что при достаточно больших удельных давлениях, характерных для движения судна во льдах, силы трения второй категории (гидродинамическое трение льда о корпус) также можно рассматривать как не зависящие от скорости [54]. Это предположение было подтверждено экспериментально. Опытами, поставленными в натуральных условиях, было доказано, что трение льда о судовую сталь и льда о лед как при отсутствии жидкой смазки (воды) между трущимися поверхностями, так и в воде подчиняется законам граничного трения (трения при наличии тонкой смазочной прослойки), к которому применим закон Кулона—Амонтона. Сказанное распространяется практически на весь диапазон удельных давлений и скоростей скольжения, встречающихся при движении судна во льдах.

Таким образом, можно считать доказанным, что большая часть контактных сил трения, возникающих при взаимодействии корпуса со льдом и льдин между собой, может быть отнесена к категории сил, моделирующихся согласно условию подобия Фруда.

Силы трения, не совместимые с моделированием по условию Фруда, включают силы вязкостного сопротивления корпуса судна и трения льдин о воду. (Имеется в виду, что составляющие сопротивления воды, обусловленные волнообразованием, подчиняются условию подобия Фруда). Вязкостное сопротивление корпуса судна может не приниматься во внимание, когда речь идет о чистом ледовом сопротивлении $R_{лч}$. Вязкостное сопротивление льдин состоит из сопротивления трения и сопротивления формы (вихревого сопротивления). Первая из этих составляющих может моделироваться лишь по условию подобия Рейнольдса. Вторая — сопротивление формы — является частью составляющей гидродинамического давления, возникающего вследствие перераспределения давления, вызванного влиянием вязкости жидкости. Известно, что для удобообтекаемых тел с большим удлинением эта составляющая пересчитывается на натуру с так называемым остаточным сопротивлением согласно условию подобия Фруда. Однако обломки льдин следует отнести к плохообтекаемым телам. Скорости их перемещения сравнительно невелики, поэтому коэффициент сопротивления зависит от числа Рейнольдса Re . Следовательно, силы, обуславливающие сопротивление формы льдин, не моделируются по условию Фруда.

К прочим силам, возникающим при движении ледокола в сплошных льдах, следует отнести силы, связанные с раздвиганием и обусловленные нормальными давлениями жидкости.

Если движение каждой отдельной льдины рассматривать как движение взвешенной частицы в потоке жидкости, то уравнение ее движения можно записать в виде

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = P + P_1 + P_2 + P_3, \quad (19)$$

где P — сила веса, за вычетом архимедовой силы;

P_1 — сила сопротивления, пропорциональная разности скоростей льдины и потока;

P_2 — боковая (подъемная) сила, действующая на льдину вследствие возникновения циркуляции (при ее обтекании);

P_3 — сила воздействия на льдину со стороны поля давлений в потоке.

Анализ показывает, что из всех перечисленных сил силы P , P_2 и P_3 могут моделироваться по условию подобия Фруда, а сила P_1 — по условию Рейнольдса. Таким образом, силы, связанные с раздвиганием льдин, обусловленные нормальными давлениями, могут моделироваться по условию Фруда, за исключением одной составляющей, пропорциональной скорости в первой степени.

На основании проведенного анализа можно сделать следующее общее заключение о моделировании движения судна в сплошных льдах.

При выполнении равенств

$$\frac{L_n}{L_m} = \lambda, \quad \frac{v_n}{v_m} = \sqrt{\lambda} \quad \text{и} \quad \gamma_n = \gamma_m \quad (20)$$

соблюдаются условия геометрического и кинематического подобия, а отношение сил весового характера и сил инерции натуре и модели будет равно λ^3 . Тогда автоматически выполняется условие подобия Фруда. Если, кроме равенств (20), выполняются дополнительные условия для натурального и моделированного льда

$$\frac{h_n}{h_m} = \frac{E_n}{E_m} = \frac{(\sigma_p)_n}{(\sigma_p)_m} = \lambda \quad \text{и} \quad \mu_n = \mu_m, \quad (21)$$

то силы упругости при разрушении льда ледоколом и его моделью также будут моделироваться по условию Фруда. При этом удовлетворяется условие Коши.

Выполнение условий (20) и (21) приводит к соблюдению подобия геометрии ломки льда в плане (конфигурация льдин, расположение трещин и т. п.). Силы сухого трения льда о сталь (корпуса) и льда о лед моделируются по условию Фруда при выполнении условия (18)

$$(f_{т})_n = (f_{т})_m$$

Таким образом, силы сопротивления, не зависящие от скорости движения (прямое сопротивление), представляется возможным строго моделировать по условию Фруда. Не моделируются лишь силы, входящие в состав скоростного сопротивления, которые связаны с вязкостью жидкости. При рассмотрении чистого ледового сопротивления из этих сил остаются лишь те, которые связаны с трением льдин о воду.

§ 7. Анализ условий моделирования

Требования, которым должны удовлетворять модели судна и ледяного покрова при моделировании движения ледокола в сплошных льдах, вытекают из условий (20), (21) и (18). Точное выполнение этих условий в отношении модели судна привело бы к тому, что отношение масс геометрически подобных сходственных частей судна и его модели равнялось бы кубу линейного масштаба. Однако в этом случае необходимо не только воспроизвести в соответствующем масштабе форму подводной поверхности корпуса, но и полностью смоделировать конструкцию судна. Поскольку последнее практически неосуществимо, приходится соблюдать последнее практически неосуществимо, приходится соблюдать дополнительное условие о динамической эквивалентности модели судна и модели должны относиться как λ^3 , а моменты инерции масс — как λ^5 . Последнее достигается динамической тарировкой модели перед испытаниями.

На требования, предъявляемых теорией моделирования к модели ледяного поля, необходимо остановиться более подробно. Из условий (20), (21) и (18) следует, что при проведении модельного эксперимента, кроме выполнения требования геометрического подобия в отношении толщины натурального и моделированного льда, необходимо соблюсти подобие их физико-механических характеристик. Условие

$$\frac{E_n}{E_m} = \frac{(\sigma_p)_n}{(\sigma_p)_m} = \lambda$$

предполагает, что натуральный лед и его модель являются однородными изотропными материалами, деформация которых подчиняется закону Гука вплоть до момента разрушения. Однако известно, что большинство материалов является упруго-пластическими телами и подчиняется закону Гука до определенных пределов нагружения. Для упругого материала характерно, что напряжения определяются только величиной деформации и практически не зависят от времени приложения нагрузки, тогда как для упруго-пластического материала фактор времени влияет на величину деформаций и напряжений, которые зависят от скорости деформирования.

Различают два крайних случая поведения материала под нагрузкой:

- σ_p сильно, а деформация ϵ слабо зависят от времени приложения нагрузки T (рис. 19, а);
- σ_p слабо, а деформация ϵ сильно зависят от времени приложения нагрузки (рис. 19, б).

Моделирование движения ледокола в сплошном льду может оказаться практически невыполнимым, если натуральный лед и материал, из которого приготовлена его модель, будут обладать значительной пластичностью, т. е. σ_p и ϵ будут зависеть от времени. В этом случае масштаб времени, вытекающий из условий гравитационного подобия, может не совпадать с масштабом времени, получаемым при соблюдении требований в отношении прочностных характеристик льда.

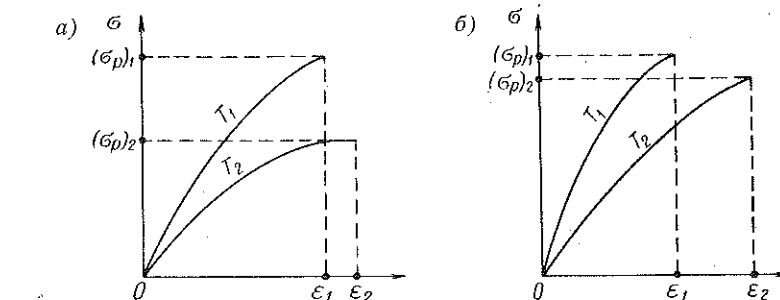


Рис. 19. Диаграмма разрушения материала: а — при $T_1 < T_2$, $(\sigma_p)_1 > (\sigma_p)_2$ и $\epsilon_1 \approx \epsilon_2$; б — при $T_1 < T_2$; $(\sigma_p)_1 \approx (\sigma_p)_2$ и $\epsilon_2 > \epsilon_1$.

Если исходить из того, что при моделировании разрушения льда ледоколом отношение работ деформаций упруго-пластического материала природы и модели должно равняться λ^4 или, что то же самое, отношение удельных работ деформаций должно равняться λ^* , то, кроме удовлетворения условий

$$\frac{(\sigma_p)_n}{(\sigma_p)_m} = \lambda \text{ и } (\epsilon_0)_n = (\epsilon_0)_m,$$

необходимо обеспечить равенство коэффициентов полноты диаграмм напряжений [54], где ϵ_0 — относительная деформация, отвечающая моменту разрушения. Этот коэффициент определяется как отношение площади диаграммы напряжений к площади прямоугольника со сторонами σ_p и ϵ_0 .

Остановимся еще на одной особенности льда как материала — его неоднородности.

* Как известно, удельная работа деформации, численно равная площади диаграммы напряжений (σ , ϵ), представляет собой работу деформации единицы объема.

Условия моделирования справедливы, если лед является однородным и изотропным. В § 2 отмечалось, что натуральный лед можно считать изотропным только в плоскости, параллельной плоскости замерзания, в то время как по толщине его физико-механические характеристики изменяются в значительных пределах. Можно показать, что такого рода анизотропия не должна существенно влиять на результаты моделирования. Дело в том, что к ледяному покрову с указанной анизотропией можно применить аппарат теории изгиба тонких изотропных пластин, если вместо расчетных величин E и μ пользоваться их приведенными значениями, учитывающими изменчивость E и μ по толщине льда [83].

При определении усилий и моментов замена расчетных величин физико-механических характеристик приведенными позволяет использовать обычные формулы теории изгиба изотропных упругих пластин. Однако формулы этой теории не могут быть применены для нахождения напряжений. Так, использование формулы $\sigma_0 = \frac{6M}{h^2}$, где σ_0 — напряжение (предел прочности), вычисленное в предположении, что материал пластины изотропен по толщине h , может привести к значительным ошибкам. Истинное значение напряжения $\sigma_{ист}$ для льда как материала, анизотропного по толщине, можно выразить через σ_0 следующим образом:

$$\sigma_{ист} = \sigma_0 \varphi,$$

где φ — некоторая функция, зависящая от закона изменения модуля упругости E по толщине.

Функция φ показывает, какую часть напряжения, вычисленного по формуле для упругого изотропного материала, составляет истинное напряжение материала с перепадом модуля E по толщине.

В соответствии с вышесказанным, при моделировании разрушения льда судном учет анизотропности ледяного покрова, заключающейся в изменении прочности характеристик льда по толщине, может быть сделан, если в условиях моделирования (21), справедливых для упругого изотропного льда, значения модуля E , коэффициента Пуассона μ и предела прочности σ_p заменить соответственно на $E_{пр}$, $\mu_{пр}$ и $(\sigma_p)_{ист}$.

Для определения приведенного модуля упругости в каждом частном случае нет необходимости знать закон изменения E по толщине. Значение приведенного модуля упругости можно получить непосредственно по данным механических испытаний льда на изгиб. Определить же экспериментально истинное значение предела прочности льда, не зная закона изменения модуля упругости E по толщине, не представляется возможным. Однако при моделировании не обязательно знать истинное значение предела прочности натурального и лабораторного льда. Для этой цели можно пользоваться значениями предела прочности льда σ_0 , полученными

экспериментально и рассчитанными по обычным формулам, справедливым для упругого материала. При этом необходимо лишь рассматривать σ_0 как некоторый условный параметр, предназначенный для сравнительной оценки нагрузки, действующей на лед.

Как следует из условий моделирования движения судна в сплошных льдах, натуральный лед и его модель, строго говоря, должны иметь одинаковые коэффициенты Пуассона: $\mu_n = \mu_m$. Если рассматривать разрушение ледяного покрова ледоколом как результат изгиба ледяной пластины корпусом судна, то невыполнение при моделировании равенства $\mu_n = \mu_m$ может нарушить подобие элементов изгиба. Известно, что элементы изгиба пластин связаны с цилиндрической жесткостью D_0 , а коэффициент Пуассона входит в ее выражение:

$$D_0 = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}.$$

Для большинства материалов $\mu < 0,5$, т. е. значительно меньше единицы. Поэтому изменение μ сравнительно мало сказывается на величине D_0 , и даже значительные отклонения от равенства $\mu_n = \mu_m$ не могут существенно отразиться на подобии элементов изгиба. Таким образом, строгое выполнение равенства коэффициентов Пуассона при моделировании не обязательно.

Точное соблюдение требования в отношении равенства коэффициентов сухого трения природы и модели вызывает в настоящее время значительные затруднения ввиду сложности воспроизведения на моделях судна и льда шероховатости поверхностей, соответствующей натурным условиям. Приближенное удовлетворение требования $(f_T)_n = (f_T)_m$ можно осуществить путем окраски поверхности модели специальными покрытиями с необходимой шероховатостью.

Требование в отношении равенства удельных весов модели и природы для модели ледяного покрова, приготовленного из натурального льда, удовлетворяется автоматически с достаточной для практического моделирования точностью.

Испытания моделей судов во льду

§ 8. Ледовый бассейн

Опытный бассейн для испытаний моделей судов во льдах, построенный в 1955 г. ААНИИ,— единственная лаборатория подобного типа в нашей стране и за рубежом. Она состоит из охлаждаемого помещения, в котором расположена чаша бассейна; машинного зала с аммиачной холодильной установкой и двух вспомогательных помещений для приборов, устройств и приспособлений, обеспечивающих проведение модельных испытаний.

Чаша бассейна выполнена в виде канала прямоугольного сечения со следующими размерениями (в метрах):

Длина по зеркалу воды	13,4
Ширина	1,85
Высота от днища до уровня борта	1,95
Возвышение борта над уровнем пола	1,1
Объем при наибольшем уровне наполнения 1,7 м	42 м ³

Чаша бассейна представляет собой двухслойную железобетонную конструкцию. Водонепроницаемость обеспечивается специальной гидроизоляцией. Бассейн наполняется водой через донный кингстон.

Помещение, в котором расположена чаша бассейна, охлаждается с помощью рассольных батарей с поверхностью охлаждения 340 м². Холодильная установка позволяет довести температуру воздуха в помещении бассейна до -17°C и поддерживать ее длительное время. Суммарная холодопроизводительность установки 140 000 ккал/час.

Общий вид бассейна показан на рис. 20. В диаметральной плоскости чаши бассейна расположено устройство для буксировки модели (рис. 21). На колеса 1 и 13, установленные на противоположных концах бассейна, надет бесконечный трос. В его нижнюю ветвь включена запряжка модели. С ведущим колесом жестко связан барабан, на котором уложен трос рабочего груза. Трос рабочего груза надет на направляющий ролик и проведен через блоки полиспаста; один его конец закреплен на барабане, другой на неподвижном основании. Рабочий груз, приводящий в движение модель, подвешивается к подвижному ролику

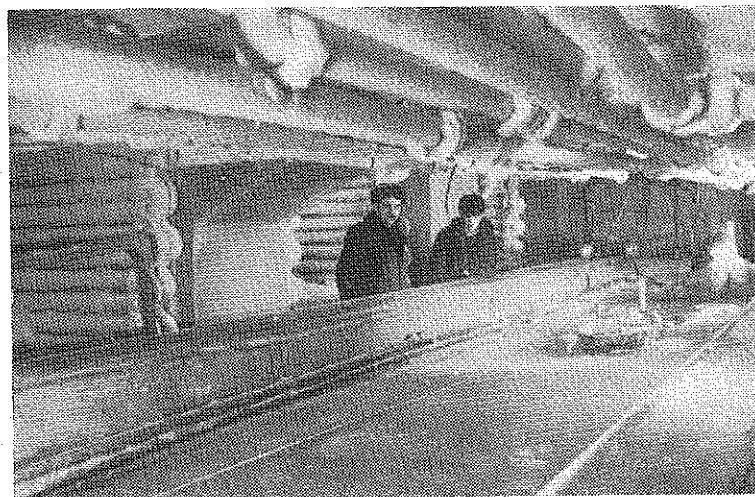


Рис. 20. Общий вид бассейна.

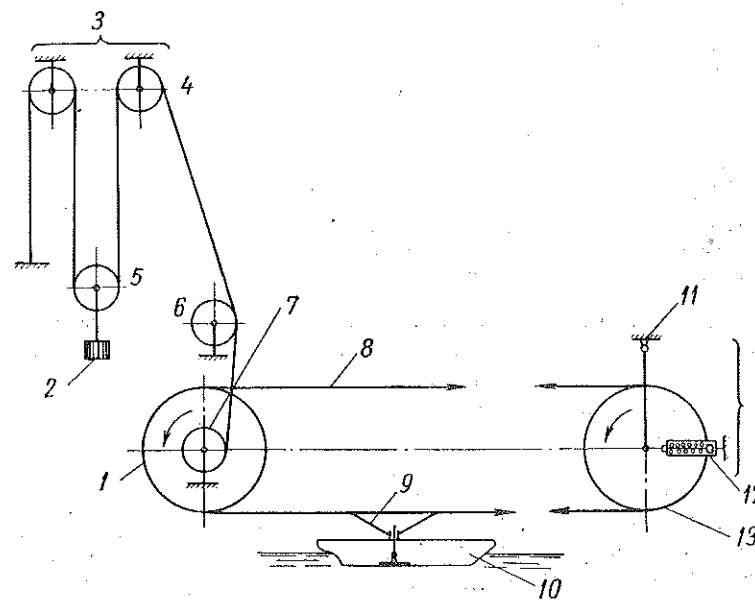


Рис. 21. Схема устройства для буксировки модели.

1, 13 — колеса; 2 — рабочий груз; 3 — полиспаст; 4, 6 — направляющие ролики; 5 — подвижный ролик полиспаста; 7 — барабан; 8 — бесконечный трос; 9 — запряжка модели; 10 — модель; 11 — шарнир подвески колеса; 12 — натяжное устройство и динамометр.

полиспада. Страгивающее усилие каждого колеса не превышает 0,7 Г. Столь малая величина достигнута за счет применения шарикоподшипников и тщательной регулировки. Барабан рабочего груза скреплен с втулкой колеса 1 посредством винтовой пары; на его ободе проточена канавка для укладки рабочего троса. Подвижный ролик полиспада имеет подвеску для навешивания и закрепления рабочего груза.

К бесконечному тросу, в целях исключения его проскальзывания по ободу колеса, приложено усилие, создаваемое натяжным устройством. Колесо 13 подвешено шарнирно, и к его оси прикреплены пружинные динамометры и талрепы. Талрепы позволяют создать заданное постоянное натяжение, поскольку в процессе эксплуатации буксировочный трос вытягивается. Колеса 1 и 13 крепятся в специальных каретках, конструкция которых позволяет поднимать и опускать их на некоторое расстояние по отношению к уровню воды в бассейне. Это необходимо для того, чтобы при испытании моделей различных размеров не менять уровень воды в бассейне.

Ниже приводятся основные параметры элементов буксировочного устройства

Диаметр колеса 1, м	0,622
» » 13, »	0,622
Эксцентриситет колеса 1 и 13, мм	± 0,2
Полярный момент инерции массы, Г·см·сек ² :	
колеса 1 с барабаном	1196
» 13	1170
Диаметр барабана, м	0,2
Кратность полиспада	2
Передаточное число буксировочного устройства	6,22
Усилие, обтягивающее бесконечный трос, кг	44
Наибольшее провисание бесконечного троса (стальной трос диаметром 1,2 м при включенной запряжке), см	4,3
Предельное тяговое усилие, кг	3,5

Стальные детали буксировочного устройства хромированы, а силуминовые анодированы. Суммарное трение в подвижных частях буксировочного устройства определяется тарировкой. На рис. 22 приведены кривые трения буксировочного устройства.

Подключение модели к бесконечному тросу осуществляется посредством специальной запряжки, которая буксирует модель, обеспечивая ее свободное всплытие, дифференцирование на ходу и прямолинейность движения.

Запряжка модели (рис. 23) состоит из жесткого контура — рамки с поперечным стержнем, в нижней части которой имеется обойма с шарикоподшипниками, и деталей, скрепленных с моделью: упорного подшипника, штанг и направляющих стоек.

Жесткий контур присоединен к нижней ветви бесконечного троса с помощью тросиков диаметром 1 мм, образующих фигуру ромба. В передней части запряжки имеется захват. Талреп, вклю-

ченный в диагональ ромба, позволяет выравнивать натяжения ветвей ромба. Вертикальное перемещение модели на ходу (всплытие) обеспечивается качением штанги в обойме жесткого контура запряжки. Дифференцирование модели на ходу осуществляется за счет вращения модели вокруг нижнего шарикоподшипника штанги. Направляющие стойки укреплены в носовой и кормовой оконечностях модели и препятствуют ее рысканию.

Для управления моделью предусмотрено устройство (рис. 24), которое позволяет вернуть модель на старт после пробега, остановить ее на любом участке пути, затормозить модель и по-

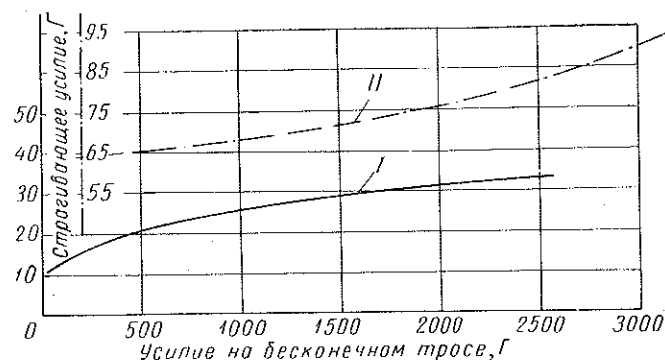


Рис. 22. Кривые трения буксировочного устройства.

I — тарировочная кривая трения; II — тарировочная кривая трения при включенном тахогенераторе.

движные части буксировочного устройства в конце пробега и застопорить буксировочное устройство при навешенном рабочем грузе.

Принцип действия этого устройства заключается в следующем. Мотор вращает червяк и червячное колесо, которое находится на одном валу с прижимным роликом. Чтобы увеличить трение между ободом колеса А буксировочного устройства и прижимным роликом, катушку последнего набирают из резиновых шайб. Необходимое усилие между прижимным роликом и колесом А создается пружиной 4. Электродвигатель укреплен на неподвижной штанге, опирающейся на колонки рабочей каретки, а все остальные детали — на подвижной части каретки. Соединение двигателя с червяком осуществлено с помощью телескопического вала, что обеспечивает перемещение подвижной части каретки относительно направляющих колонок в вертикальном направлении.

Рабочий груз удерживается силой трения прижимного ролика. С помощью рычага 2 создается необходимое усилие для удержания всей системы в неподвижном состоянии. Прижимный ролик и

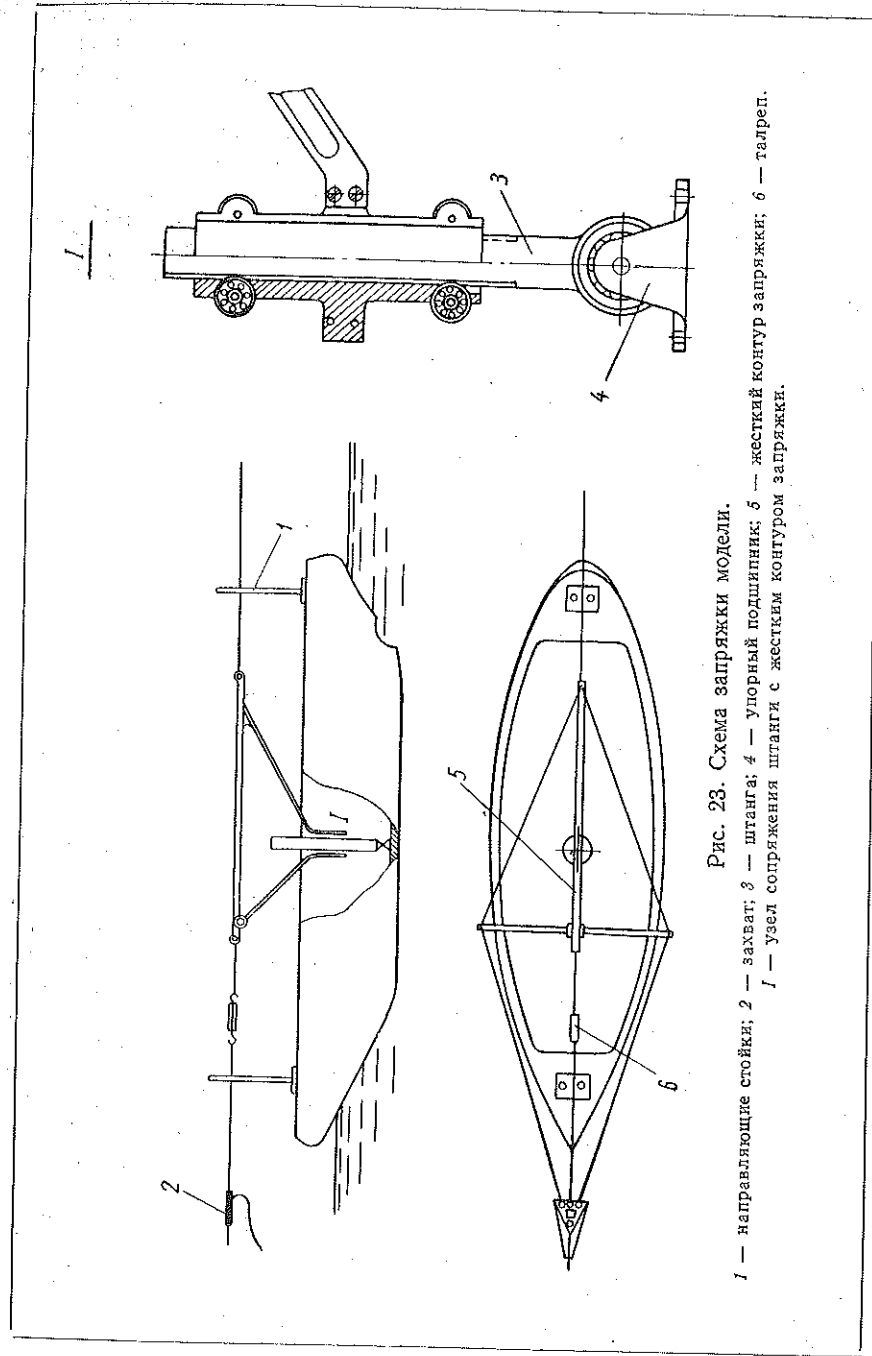


Рис. 23. Схема запряжки модели.

1 — направляющие стойки; 2 — захват; 3 — штанга; 4 — упорный подшипник; 5 — жесткий контур запряжки; 6 — талреп.
1 — узел сопряжения штанги с жестким контуром запряжки.

червячная шестерня находится на одной оси; усилие, возникающее в самотормозящей червячной паре под действием груза, препятствует повороту прижимного ролика.

Пуск модели осуществляется поворотом выключателя на пульте управления, который замыкает электроцепь соленоида. Сердечник соленоида перемещает рычаг 2 относительно шарнира 3; пружина 4 при этом сжимается. Противоположный конец рычага, шарнирно скрепленный с осью прижимного ролика, отводит его от обода колеса А, после чего модель и подвижные части буксировочного устройства под действием рабочего груза приходят в движение.

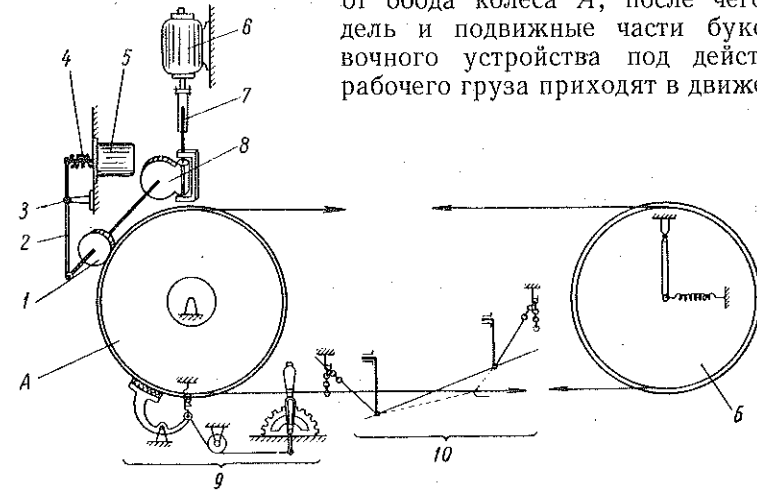


Рис. 24. Схема устройства для управления моделью.

1 — прижимный ролик; 2 — рычаг; 3 — шарнир рычага; 4 — рабочая пружина; 5 — соленоид; 6 — электродагатель; 7 — телескопический вал; 8 — червячный редуктор; 9 — ручной фрикционный тормоз; 10 — ретардный тормоз. А и Б — колеса буксировочного устройства.

Торможение модели и подвижных частей буксировочного устройства производится размыканием цепи соленоида. При этом его якорь под действием пружины 4 перемещается в крайнее левое положение и, воздействуя на рычаг 2, поворачивает его относительно шарнира 3. Прижимный ролик касается обода колеса А, и возникающее при этом усилие затормаживает модель и подвижные части буксировочного устройства.

Остановить модель на любом участке пути можно также ручным фрикционным тормозом, который представляет собой обычный рычажный механизм. Этот тормоз резервный на случай выхода из строя основного тормоза. Плавное торможение модели осуществляется ретардным тормозом. При подходе модели к колесу Б захват, расположенный в передней части запряжки, натягивает резиновый шнур ретардного тормоза, благодаря чему потенциальная энергия шнура поглощает кинетическую энергию модели и подвижных частей буксировочного устройства. В этот

момент включается фрикционный тормоз, который останавливает модель.

Возврат модели в стартовое положение осуществляется с помощью буксировочного устройства, которое приводится в движение электродвигателем. Одновременно с возвратом модели трос рабочего груза наматывается на барабан, и обойма полиспаста с навешенным на ней грузом поднимается вверх. При подходе модели к колесу А двигатель выключается.

В процессе испытаний кромки льда примораживаются к стенкам бассейна. Для отделения их от стенок предусмотрен обогревающий пояс в виде труб, смонтированный внутри чаши бассейна на уровне воды. Через трубы центробежным электронасосом прокачивается незамерзающая жидкость нагретая в специальном баке электронагревательными элементами до температуры 70° С. Температура жидкости на входе и выходе системы контролируется электротермометрами.

Отделенный от стенок бассейна лед дробится и перемещается по поверхности воды к транспортеру, установленному в окне торцевой стены бассейна. Через это окно лед транспортируется в баки, где растапливается. Вода из баков собирается в коллектор, откуда с помощью насоса перекачивается в бассейн.

Баки для растапливания льда, коллектор и насосы расположены в соседнем с бассейном помещении. Здесь же находится цистерна дифференцирования модели, устройство для ее динамической тарировки, а также компенсатор уровня воды в бассейне, который предохраняет бассейн от переполнения и одновременно служит для сброса избыточного объема воды в период намораживания льда. Компенсирующее устройство используется также для слива воды из бассейна при опускании в него модели. Необходимость такого слива обусловлена тем, что, как показал опыт, выступающая на ледяной покров вода приводит к изменению его прочности.

Помимо уборки льда, через окно в стене бассейна с помощью грузового устройства производится транспортировка модели в ледовый бассейн.

Приборы ледового бассейна расположены в отдельном отапливаемом помещении. Здесь установлены преобразователи тока, позволяющие получать постоянный и переменный ток для питания приборов.

Контроль температурного режима при намораживании льда осуществляется с помощью шести электротермометров, которые расположены над чашей бассейна. Запись показаний электротермометров на протяжении всего периода намораживания льда производится на ленту потенциометра типа ЭП-6. Таким образом, контроль температуры воздуха осуществляется дистанционно.

Для замера сопротивления модели при неустановившемся движении используется тензометрический упорный подшипник

(рис. 25). Измерительным элементом прибора служит мост сопротивления, а деформируемым элементом — стальная балочка с наклеенным на ней тензодатчиком. Показания прибора фиксируются на ленту осциллографа. Перед экспериментом тензометрический подшипник тарируется для определения масштаба усиления.

Прибор для измерения скорости движения модели состоит из электроконтактного или фотоимпульсного замыкателя и самописца-хронографа (рис. 26). Электроконтактный замыкатель устроен следующим образом. На ободе барабана рабочего троса имеется восемь выступов, которые при вращении колеса А, поочередно воздействуя на пружину электроконтактного замыкателя,

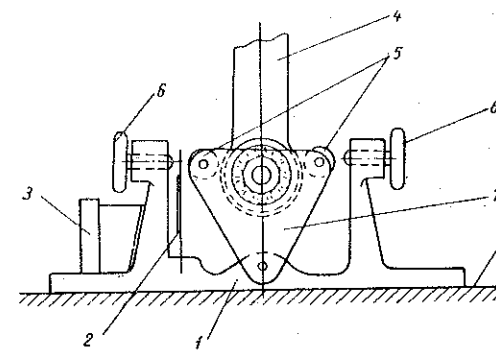


Рис. 25. Схема тензометрического подшипника.

1 — корпус подшипника; 2 — балка с тензодатчиком; 3 — выходная колодка; 4 — штанга запряжки; 5 — ролики; 6 — ограничители; 7 — обойма штанги; 8 — дно модели.

включают цепь электромагнита, связанного с пером самописца.

Фотоимпульсный замыкатель состоит из фотореле, источника света, электронного усилителя и магнитного реле. Легкий диск с отверстиями жестко скреплен с барабаном рабочего троса; источ-

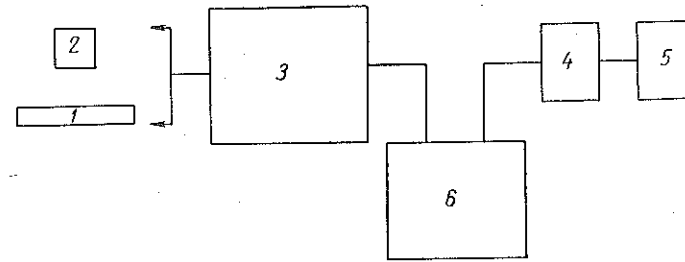


Рис. 26. Блок-схема прибора для измерения скорости движения модели.

1 — мерный ролик; 2 — фотореле; 3 — усилитель; 4 — дублирующее реле; 5 — электроконтактный хронометр; 6 — самописец.

ник света и фотореле смонтированы на неподвижной оси колеса А. При вращении колеса А световой луч проходит через отверстие диска и попадает на фотореле, вызывая электроимпульс, который усиливается и передается на магнитное реле, замыкающее цепь электромагнита, связанного с пером самописца. На ленте хронографа фиксируется время и пройденные моделью отрезки пути.

В качестве датчика времени используется электроконтактный хронометр, который фиксирует интервалы времени, равные половине секунды.

В случае необходимости производится непрерывная запись скорости движения модели. Это осуществляется с помощью чувствительного тахогенератора ТД-102 и осциллографа, используемого в качестве регистрирующего прибора. На оси тахогенератора закреплен шкив, который сопряжен фрикционно с ветвью бесконечного троса.

Тахогенератор имеет линейную характеристику по числу оборотов и напряжению. Масштаб скорости определяется тарировкой. Непрерывная запись скорости движения модели позволяет анализировать неустановившиеся режимы движения модели.

На рис. 27 показана принципиальная схема прибора, с помощью которого производится испытание образцов льда на изгиб для определения предела прочности. В приборе

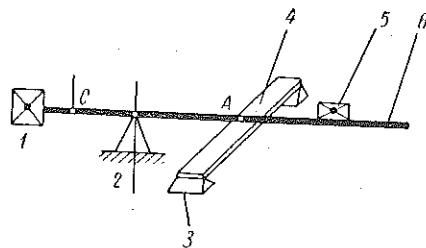


Рис. 27. Схема прибора для испытания образцов льда на изгиб.

1 — противовес; 2 — шарнирная опора рычага; 3 — опора образца; 4 — образец льда; 5 — подвижный груз; 6 — рычаг.

использован принцип рычага. Плавное нарастание усилия, действующего на образец льда в точке А, достигается перемещением по штанге груза 5, который приводится в движение часовым механизмом, закрепленным в точке С. Противовес 1 и груз 5 сделаны съемными, что позволяет изменять величину усилия. На плече рычага нанесена шкала, по которой отсчитывается действующее на образец усилие. В момент разрушения образца правое плечо рычага опускается и приводит в действие стопор, заторма-

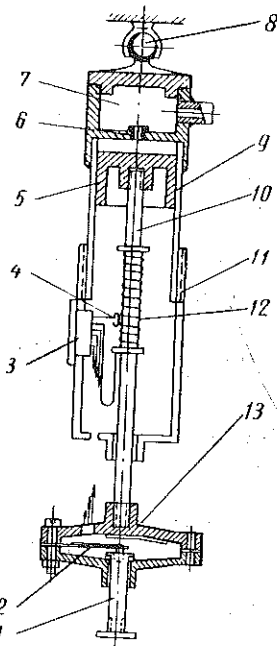


Рис. 28. Схема прибора для испытаний образцов льда на плаву.

1 — стержень; 2 — балка с тензодатчиками; 3 — клеммная колодка; 4 — ползунок реостата; 5 — поршень; 6 — шпиль; 7 — камера расширения; 8 — шарнирная подвеска; 9 — цилиндр; 10 — реостат; 11 — корпус; 12 — обойма; 13 — обойма.

живающий часовой механизм, а вместе с ним и груз 5, по положению которого на шкале определяется разрушающее усилие.

Схема прибора для испытания на плаву образцов льда в виде консольных балок показана на рис. 28. Усилие, прилагаемое к образцу, создается нажатием стержня, опирающегося на стальную балку. Измерительным элементом служит мост сопротивления, деформируемым — стальная балочка с тензодатчиком. Деформация образцов льда измеряется с помощью реостата. Показания прибора регистрируются на ленту осциллографа.

Принцип измерения, основанный на использовании моста сопротивления с регистрацией показаний на ленту осциллографа, нашел широкое применение в приборах ледового бассейна, так как он имеет ряд преимуществ (дистанционная запись показаний, отсутствие влияния температуры, высокая точность и возможность одновременной записи показания нескольких датчиков).

Для наблюдения за взаимодействием корпуса модели судна со льдом применяется подводная телевизионная установка.

§ 9. Модель ледяного поля

Согласно теории моделирования (см. § 6), лабораторный лед, в котором проводятся испытания моделей судов, должен удовлетворять соотношениям (18) и (21).

Методика приготовления лабораторного льда в условиях ледового бассейна, помимо соблюдения указанных требований, должна обеспечить возможность многократно воспроизводить лед заданной толщины и физико-механических характеристик.

В бассейне применяется натуральный поликристаллический ослабленный лед. Ослабление прочности льда достигается внедрением в его кристаллическую решетку примесей и созданием значительных межкристаллических прослоек. Практически это достигается растворением в воде поваренной соли. Однородность льда и его поликристаллическое строение достигается внесением в верхний переохлажденный слой воды большого количества мелких частиц льда, которые являются центрами кристаллизации. Поэтому рост льда начинается во всех точках ледяного покрова одновременно.

Предел прочности моделированного льда зависит от солености воды (рис. 29). Чтобы получить моделированный лед заданной прочности, содержание соли в воде доводят до необходимой концентрации, после чего воду охлаждают до температуры, близкой к температуре кристаллизации. Зависимость температуры кристаллизации воды от солености приведена на рис. 30.

Перед приготовлением моделированного льда температуру воздуха в бассейне понижают до -10°C , а поверхность воды тщательно очищают от остатков битого льда и «сала», измеряют температуру воды в бассейне и при наличии температурных перепадов воду перемешивают. Затем над спокойным зер-

калом воды распыляется 0,15—0,20 л воды. Частицы воды, переохлаждаясь в воздухе, превращаются в кристаллы льда и, попадая на водную поверхность, производят «зарядку ледяного поля» — дают начало кристаллообразованию.

Для распыления воды используется сжатый воздух, который подается в распылитель воздушным компрессором.

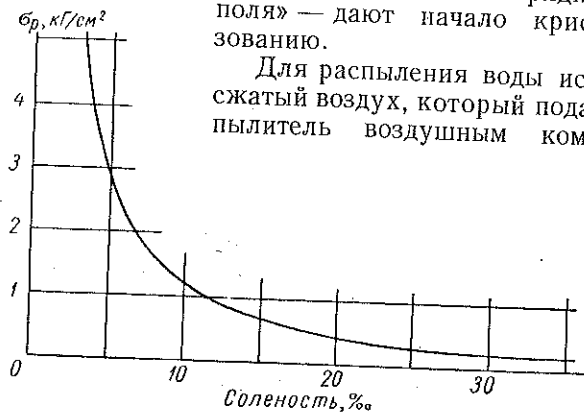


Рис. 29. График зависимости предела прочности моделированного льда на изгиб от солености воды.

Конструкция распылителя позволяет менять величину частиц, т. е. размер ядер кристаллизации.

Распыление воды осуществляется в течение 1—2 мин. За это время вся поверхность воды в бассейне покрывается кристалликами льда. Структурный анализ показывает, что один квадратный дециметр льда содержит $8 \cdot 10^{-4}$ кристаллов с различной ориентацией оптических осей. После внесения ядер кристаллизации и образования тонкого сплошного ледяного покрова дальнейший рост кристаллов возможен только в вертикальном направлении.

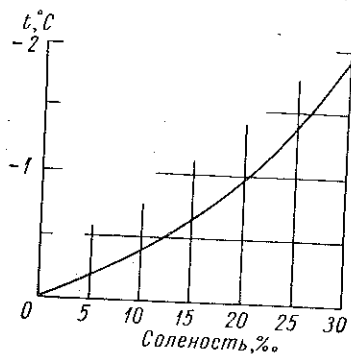


Рис. 30. График зависимости температуры кристаллизации воды от солености.

Температура воздуха в бассейне после зарядки льда понижается до -12°C , а толщина льда определяется временем его намораживания.

Качество моделированного льда, как показывает опыт, зависит от однородности его структуры. Последняя, в свою очередь, зависит от равномерности распределения ядер кристаллизации по поверхности воды, постоянства температуры воды и равномерности и постоянства температуры воздуха над чашей бассейна в процессе намораживания льда. При наращивании моделированного льда температура воздуха в помещении бассейна может сохраняться

постоянной либо плавно изменяться в сторону повышения или понижения.

При режиме намораживания с повышающейся температурой последняя в момент зарядки доводится до определенной величины, затем циркуляция хладагента в батареях охлаждения прекращается. В процессе роста льда температура воздуха в бассейне повышается.

По мере увеличения толщины льда скорость нарастания его непрерывно падает, так как температурный градиент между водой и воздухом уменьшается. Количество соляного раствора, стекающего из верхних слоев льда в нижние, непрерывно увеличивается. Это приводит к тому, что прочность верхних слоев льда становится больше нижних. Так, соленость верхних слоев льда, замороженного до толщины 18 мм из воды соленостью $7,4\text{‰}$ (в течение 15 час при температуре воздуха от -11 до -6°C) составляла $3,7\text{‰}$, а нижних слоев — $4,8\text{‰}$.

При режиме намораживания льда с повышающейся температурой наблюдается большое структурное различие верхних и нижних слоев льда. Кристаллы льда, находящиеся в верхних слоях, относительно малы, а сами слои монолитнее нижних, состоящих из более крупных кристаллов. Это нередко приводит к образованию двухслойного льда с явно выраженной границей раздела между верхним и нижним слоями. Как показали опыты, двухслойный лед не пригоден для проведения модельных испытаний.

Режим намораживания льда при сохранении постоянной температуры воздуха в бассейне менее экономичен, так как требует непрерывной работы холодильной установки в процессе всего периода намораживания. Однако за счет большей скорости намораживания он позволяет получать моделированный лед с более высокими структурными качествами, чем при режиме с возрастающей температурой воздуха. Структура льда по толщине в этом случае более однородна, так как раствор соли, находящийся между кристаллами, распределяется по толщине льда более равномерно, не успевая полностью проникнуть из верхних слоев в нижние. Кроме того, этот режим дает возможность за счет большей скорости роста льда сократить время намораживания и тем самым увеличить эффективность работы бассейна.

Намораживание льда производится и при понижающейся температуре воздуха в бассейне. Постоянная скорость роста льда в процессе его намораживания до заданной толщины в этом случае позволила бы получить однородный по структуре лед и тем самым повысить его качество. Однако практическое осуществление этого режима в ледовом бассейне возможно лишь при автоматизации процесса подачи холода в бассейн.

В настоящее время наиболее часто применяется намораживание льда при постоянной температуре воздуха, равной -12°C . В усло-

виях ледового бассейна это позволяет многократно приготавливать моделированный лед заданных прочностных характеристик и тем самым добиться хорошей повторяемости среды для испытаний моделей.

Для моделированного льда, намораживаемого в ледовом бассейне, связь между пределом прочности и модулем упругости может быть выражена в общем виде зависимостью

$$E = K\sigma_p, \quad (22)$$

где $K = 900 \div 1200$.

Принятая в ледовом бассейне методика приготовления моделированного льда позволяет получать сплошной ледяной покров с минимальным пределом прочности льда на изгиб $\sigma_p = 0,16 \text{ кг/см}^2$. Таким образом σ_p пресноводного льда, равное $12,5 \text{ кг/см}^2$, в ледовом бассейне может быть уменьшено в 80 раз, а σ_p морского льда, равное 8 кг/см^2 — в 50 раз. Дальнейшее понижение прочности моделированного льда практически возможно, но влечет за собой значительное увеличение пластических свойств льда.

К каким последствиям может привести пластичность льда при моделировании?

Упруго-пластические свойства моделированного льда изучаются в ледовом бассейне путем механических испытаний на изгиб образцов и пластин. Они испытываются методом нагрузки с последующей разгрузкой. Такой метод позволяет в каждом частном случае определить отдельно упругую и пластическую части деформации, а следовательно, оценить степень пластичности льда. Для получения более полных данных об упруго-пластических свойствах моделированного льда при различных режимах нагружения проводят испытания ледяных пластин на плаву с записью деформации и напряжений на осциллограф. На рис. 31 приведены диаграммы разрушения пластин моделированного льда, из которых видно, что напряжения в ледяном покрове являются функцией деформации и времени [31].

Зависимость между напряжениями и деформациями ледяных пластин можно выразить формулой

$$\sigma = E(T)\omega,$$

где σ — напряжение,

ω — деформация,

$E(T)$ — коэффициент пропорциональности (модуль деформации).

Приведенное выражение отличается от закона Гука тем, что в данном случае $E(T)$ является не физической константой, а представляет собой коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от времени T . Для заданного значения времени коэффициент $E(T)$ можно считать постоянным. Таким образом, моделированный лед можно условно считать подчиняющимся

закону Гука. Это позволяет распространить на него условия подобия, вытекающие из теории моделирования движения судна в сплошных льдах.

Исследования пластичности моделированного льда показали, что при сравнительно кратковременных нагрузках, которые имеют место в процессе разрушения льда моделями в ледовом бас-

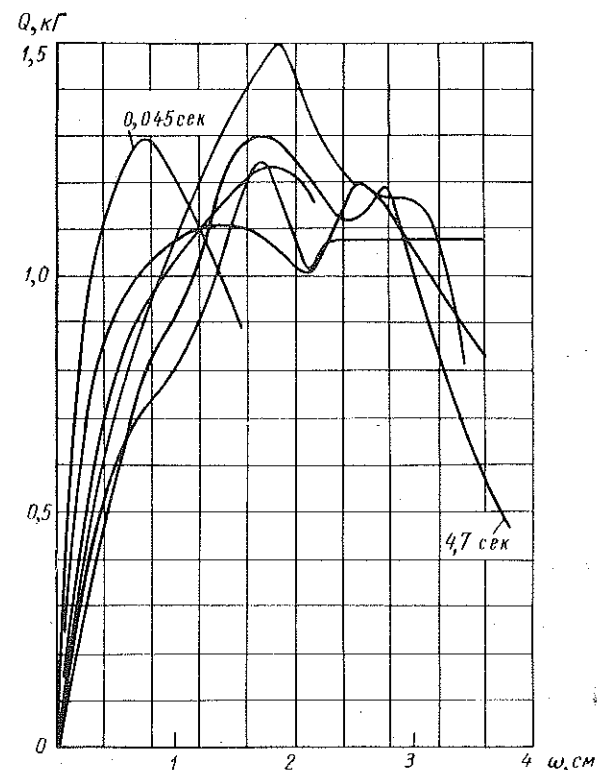


Рис. 31. Диаграмма разрушения пластин моделированного льда при различном времени приложения нагрузки (от 0,045 до 5,0 сек).

сейне, предел прочности льда на изгиб практически не зависит от времени действия нагрузки (рис. 32). Режим нагрузки сказывается лишь на величине деформации. При моделировании это затрудняет выполнение условия подобия в отношении модулей упругости природы и модели $\frac{E_n}{E_m} = \lambda$. Невыполнение этого условия при соблюдении всех других требований моделирования может привести к нарушению подобия в геометрии разрушения льда

натуры и модели. Последняя, при прочих равных условиях, определяется параметром

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{(1-\mu^2)12k}}, \quad (23)$$

зависящим от модуля E [54]. Параметр l имеет размерность длины и играет роль линейного масштаба при рассмотрении изгиба пластины в плане. Указанное обстоятельство в конечном итоге может сказаться и на результатах модельных пересчетов.

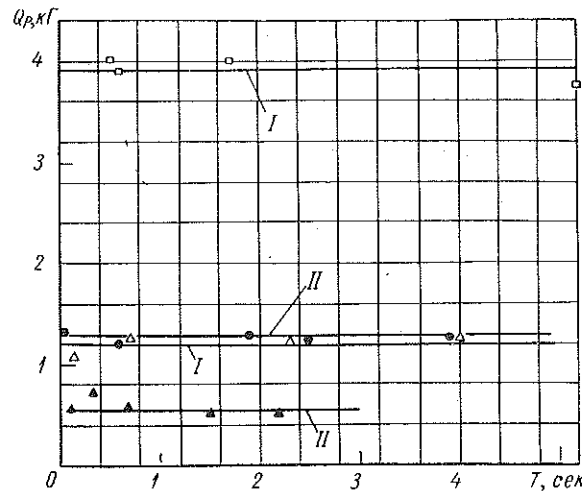


Рис. 32. График зависимости усилия, разрушающего ледяную пластину, от времени нагружения.

I — полубесконечная пластина; II — центральная пластина
 \square — $h = 23$ мм при $\sigma_p = 2,2$ кг/см²; Δ — $h = 3,5$ мм при $\sigma_p = 19$ кг/см²; \bullet — $h = 11,5$ мм при $\sigma_p = 1,2$ кг/см²; \blacktriangle — $h = 8$ мм при $\sigma_p = 1,0$ кг/см².

Проанализируем, к каким конкретным последствиям может привести зависимость модуля $E(T)$ от времени при моделировании движения судна в сплошных льдах. Будем полагать, что деформация (прогиб) f ледяного покрова линейно зависит от времени действия нагрузки T , т. е. $f \sim T$. (Это подтверждается имеющимися данными по натурному пресноводному льду [35] и моделированному льду).

Выражение для стрелки прогиба ледяной пластины под действием силы может быть представлено в виде

$$f = \frac{Q}{a\sqrt{kD_0}}, \quad (24)$$

где

f — стрелка прогиба;
 Q — нагрузка;
 a — численный коэффициент;
 k — коэффициент жесткости упругого основания льда, равный 1 т/м^3 ;

$D_0 = \frac{E(T)h^3}{12(1-\mu^2)}$ — цилиндрическая жесткость пластины.

Решая (24) относительно $E(T)$, получаем

$$E(T) \sim \frac{Q^2}{f^2 h^3}, \quad (25)$$

или для льда заданной толщины и прочности

$$E(T) \sim \frac{1}{f^2}. \quad (26)$$

Учитывая, что $f \sim T$, получаем

$$E(T) \sim \frac{1}{T^2}. \quad (27)$$

Заменив время действия нагрузки T скоростью приложения нагрузки v_0 , будем иметь

$$E(T) \sim v_0^2. \quad (28)$$

Из выражения (23) следует, что для выполнения требования геометрического подобия ломки льда как упруго-пластического материала, т. е. для того, чтобы $\frac{l_n}{l_m} = \lambda$, необходимо иметь

$$\frac{h_n}{h_m} = \lambda \text{ и } \frac{[E(T)]_n}{[E(T)]_m} = \lambda.$$

Заменив $E(T)$ его значением из выражения (28), запишем полученное выше условие в виде

$$\frac{(v_0)_n}{(v_0)_m} = \sqrt{\lambda}. \quad (29)$$

Таким образом, для геометрического подобия картины разрушения льда необходимо, чтобы толщины натурного и моделированного льда относились как λ , а скорости приложения нагрузки как $\sqrt{\lambda}$.

Так как скорости приложения нагрузки ко льду ледоколом или его моделью v_0 пропорциональны скоростям их движения v , то для геометрического подобия ломки упруго-пластического льда необходимо, чтобы отношение толщин удовлетворяло условию $\frac{h_n}{h_m} = \lambda$, а отношение скоростей условию $\sqrt{\lambda}$.

Таким образом, пластичность льда приводит к тому, что геометрия ломки льда судном и его моделью должна зависеть от скорости движения, и, следовательно, подобие геометрической картины разрушения льда судном и моделью будет иметь место отношения их скоростей как $\sqrt{\lambda}$.

§ 10. Методика модельных испытаний

Масштаб модели для испытаний в ледовом бассейне выбирается с учетом условий подобия (18), (20) и (21). При этом следует стремиться к тому, чтобы размеры модели были максимально до-

пустимыми с учетом ограничений, обусловленных главными размерами и конструктивными особенностями ледового бассейна, методикой приготовления моделированного льда и т. п.

Установлено, что при испытаниях в сплошном льду для надежного выбора средней скорости модели вполне достаточен путь установившегося движения модели во льду, равный 2—2,5 длинам модели. Учитывая длину бассейна, стартовый и тормозной путь можно принять наибольшую длину модели для испытания в ледовом бассейне равной 2,5 м.

При испытании модели необходимо исключить влияние граничных условий кромки льда. Опытным путем установлено, что отстояние кромки канала, проложенного моделью в сплошном льду, от стенки бассейна, равное 20 толщинам льда, позволяет практически устранить влияние граничных условий кромки льда на ледовое сопротивление модели. Это условие накладывает ограничение на ширину моделей.

Как указывалось в предыдущем параграфе, принятая в ледовом бассейне методика приготовления моделированного льда позволяет уменьшить прочность льда до 50—80 раз.

Буксировочное устройство бассейна рассчитано на тяговое усилие 3,5 кГ. Поэтому наибольшее допустимое сопротивление модели не должно превышать этой величины.

Требования, предъявляемые к модели судна, вытекают из условий моделирования. Согласно этим условиям модель судна должна быть динамически эквивалентна натурному судну. Для практического осуществления этого условия при изготовлении моделей соблюдаются требования геометрического подобия в отношении формы обводов подводной части корпуса. Затем модель приводится к заданному весовому водоизмещению D_m , определяемому соотношением

$$\frac{D_n}{D_m} = \lambda^3,$$

где D_n — водоизмещение натурального судна.

После этого производится динамическая тарировка модели, которая заключается в приведении координат центра тяжести модели X_g и Z_g и моментов инерции ее массы I_x и I_y к заданным значениям согласно зависимостям

$$X_{g(m)} = X_{g(n)} \cdot \frac{1}{\lambda};$$

$$Z_{g(m)} = Z_{g(n)} \cdot \frac{1}{\lambda};$$

$$I_{x(m)} = I_{x(n)} \cdot \frac{1}{\lambda^5};$$

$$I_{y(m)} = I_{y(n)} \cdot \frac{1}{\lambda^5}$$

Модели судов должны быть достаточно прочными и длительное время сохранять свою форму. Они изготавливаются из дерева наборными. Наружную поверхность моделей оклеивают стеклотканью, а форштевень и ледовый пояс покрывают слоем эпоксидной смолы. Наружную поверхность корпуса модели покрывают краской с определенной шероховатостью, а внутреннюю — влагостойким покрытием. Толщину бортов и днища модели выбирают такими, чтобы вес модели составлял не более 35—40% ее весового водоизмещения.

На модели монтируют направляющие стойки, упорный подшипник и штангу с грузами для динамической тарировки. Для проведения самоходных испытаний на модели монтируют гребные винты, валы, необходимую измерительную аппаратуру и т. п.

Устройство для буксирования модели в ледовом бассейне основано на гравитационном принципе, при котором тяговое усилие задается и остается постоянным на всем пути движения, а замедляется скорость движения модели.

Таким образом, среднее значение сопротивления, приложенного к модели при движении ее во льду, может быть определено по выражению

$$R_m = (P_e)_m - \Delta P, \quad (30)$$

где:

- R_m — среднее сопротивление модели;
- $(P_e)_m = \frac{P_0}{i_1}$ — буксирующее усилие;
- P_0 — вес рабочего груза;
- i_1 — передаточное число системы;
- ΔP — трение в подвижных частях буксировочного устройства (рис. 22).

В ряде случаев для анализа элементов неустановившегося движения модели (удар о кромку ледяного поля, вползание на нее, обламывание льда с последующим разгоном перед следующим ударом) необходимо определять мгновенное значение ее сопротивления. Ниже приводится вывод зависимости, которая позволяет экспериментально определять сопротивление движущейся модели в любой момент времени. Исходя из схемы буксировочного устройства (рис. 21), введем следующие обозначения:

- P_0 — вес рабочего груза;
- q_1 — вес блока 5;
- I', I'', I''' — моменты инерции колес 4, 5, 6;
- r_1, r_2, r_3 — радиусы колес 4, 5, 6;
- I_1 — момент инерции колеса с барабаном рабочего груза;
- I_{13} — момент инерции колеса 13;
- r_0 — радиус барабана рабочего груза;
- r_4 — радиус колес 1 и 13;
- q_2 — вес бесконечного троса и запряжки модели;

- D_m — вес модели;
 R_m — сопротивление модели;
 $(P_d)_m$ — тяговое усилие ведущей ветви бесконечного троса;
 s_1 — перемещение груза P_0 ;
 v_1 — скорость опускания груза P_0 ;
 a_1 — ускорение груза P_0 ;
 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ — угловая скорость колес 4, 5, 6;
 ω_0 — угловая скорость колес 1 и 13;
 S_m — перемещение модели;
 v_m — скорость движения модели;
 a_m — ускорение модели.

Из кинематической схемы буксировочного устройства вытекают соотношения:

$$\begin{aligned}
 s_1 &= s \frac{r_0}{2r_4}; & \omega_1 &= \frac{v_1}{r_1} = \frac{v_m r_0}{2r_1 r_4}; \\
 v_1 &= v_m \frac{r_0}{2r_4}; & \omega_2 &= \frac{2v_1}{r_2} = \frac{v_m r_0}{r_2 r_4}; \\
 a_1 &= a_m \frac{r_0}{2r_4}; & \omega_3 &= \frac{2v_1}{r_3} = \frac{v_m r_0}{r_3 r_4}; \\
 \omega_0 &= \frac{2v_1}{r_0} = \frac{v_m}{r_4}.
 \end{aligned}$$

В данном случае применим закон об изменении кинетической энергии системы. Запишем его в виде

$$dT_0 = dA, \quad (31)$$

где dT_0 — изменение кинетической энергии системы;
 dA — дифференциал работы всех внешних сил, приложенных к системе.

Кинетическая энергия системы

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{(P_0 + q_1) v_1^2}{2g} + \frac{I' \omega_1^2}{2} + \frac{I'' \omega_2^2}{2} + \frac{I''' \omega_3^2}{2} + \\
 &+ \frac{I_1 + I_{13}}{2} \omega_0^2 + \frac{q_2 v^2}{2g} + \frac{D_m v^2}{2g}.
 \end{aligned}$$

Выражая ее через скорость модели, получаем

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{v_m^2}{2} \left(\frac{P_0 + q_1}{g} \cdot \frac{r_0^2}{4r_4^2} + \frac{I' r_0^2}{4r_1^2 r_4^2} + \frac{I'' r_0^2}{r_2^2 r_4^2} + \frac{I''' r_0^2}{r_3^2 r_4^2} + \right. \\
 &+ \left. \frac{I_1 + I_{13}}{r_4^2} + \frac{q_2}{g} + \frac{D_m}{g} \right). \quad (32)
 \end{aligned}$$

Вычислим работу внешних сил, приложенных к системе.

Зададим модели перемещение s_m и определим сумму работ приложенных сил: веса P_0 и q_1 , сопротивления модели R_m и трения системы ΔP . Если модель получит перемещение s_m , то грузы P_0 и q_1 переместятся на величину $s_m \frac{r_0}{2r_4}$, и, следовательно, сумма работ действующих сил на пути s_m будет

$$A = -R_m \cdot s_m + (P_0 + q_1) \frac{r_0}{2r_4} s_m - \Delta P \cdot s_m. \quad (33)$$

Дифференцируя выражения (32) и (33), получаем:

$$dA = \left[-R_m \frac{ds_m}{dt} + (P_0 + q_1) \frac{r_0}{2r_4} \cdot \frac{ds_m}{dt} - \Delta P \frac{ds_m}{dt} \right] dt;$$

$$\begin{aligned}
 dT &= \left(\frac{P_0 + q_1}{g} \cdot \frac{r_0^2}{4r_4^2} + \frac{I' r_0^2}{4r_1^2 r_4^2} + \frac{I'' r_0^2}{r_2^2 r_4^2} + \frac{I''' r_0^2}{r_3^2 r_4^2} + \right. \\
 &+ \left. \frac{I_1 + I_{13}}{r_4^2} + \frac{q_2}{g} + \frac{D_m}{g} \right) v_m \frac{dv_m}{dt} dt.
 \end{aligned}$$

Подставив найденные значения dT и dA в формулу (31) и учтя, что

$$\frac{ds}{dt} = v_m \text{ и } \frac{dv_m}{dt} = a_m,$$

находим

$$\begin{aligned}
 a_m \left(\frac{P_0 + q_1}{g} \cdot \frac{r_0^2}{4r_4^2} + \frac{I' r_0^2}{4r_1^2 r_4^2} + \frac{I'' r_0^2}{r_2^2 r_4^2} + \frac{I''' r_0^2}{r_3^2 r_4^2} + \right. \\
 \left. + \frac{I_1 + I_{13}}{r_4^2} + \frac{q_2}{g} + \frac{D_m}{g} \right) = -R_m + (P_0 + q_1) \frac{r_0}{2r_4} - \Delta P. \quad (34)
 \end{aligned}$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned}
 m_0 &= \frac{I' r_0^2}{4r_1^2 r_4^2} + \frac{I'' r_0^2}{r_2^2 r_4^2} + \frac{I''' r_0^2}{r_3^2 r_4^2} + \frac{I_1 + I_{13}}{r_4^2} + \frac{q_2}{g}, \\
 m &= m_0 + \frac{P_0 + q_1}{g} \cdot \frac{r_0^2}{4r_4^2}.
 \end{aligned}$$

Величина m_0 характеризует инерцию движущихся частей системы и может быть названа приведенной массой буксировочного устройства системы. Величину m будем называть приведен-

ной массой буксировочного устройства системы и падающего груза. Тогда равенство (34) можно записать в виде

$$a_m \left(m + \frac{D_m}{g} \right) = (P_0 + q_1) \frac{r_0}{2r_A} - R_m - \Delta P,$$

откуда

$$R_m = (P_0 + q_1) \frac{r_0}{2r_A} - a_m \left(\frac{D_m}{g} + m \right) - \Delta P. \quad (35)$$

Значение приведенной массы буксировочного устройства системы m_0 , подсчитанное теоретически и определенное экспериментально методом падающего груза, будет $m_0 = 3,08 \text{ Г} \cdot \text{сек}^2/\text{см}$.

Из выражения (35) следует, что для определения сопротивляющуюся составляющую ускорения модели a_m . Ускорение a_m может быть определено через тяговое усилие ведущей ветви бесконечного троса.

Запишем уравнение движения модели в виде

$$\frac{D_m}{g} a_m = (P_e)_m - R_m - \Delta P,$$

или

$$R_m = (P_e)_m - \frac{D_m}{g} a_m - \Delta P, \quad (36)$$

где $(P_e)_m$ — тяговое усилие ведущей ветви бесконечного троса.

Приравняв выражение (35) к выражению (36), находим

$$(P_e)_m = (P_0 + q_1) \frac{r_0}{2r_A} - a_m m,$$

откуда

$$a_m = \frac{(P_0 + q_1) \frac{r_0}{2r_A} - (P_e)_m}{m}.$$

Подставляя найденное значение ускорения в выражение (35), получаем

$$R_m = (P_0 + q_1) \frac{r_0}{2r_A} - \left(\frac{D_m}{g} + m \right) \frac{(P_0 + q_1) \frac{r_0}{2r_A} - (P_e)_m}{m} - \Delta P. \quad (37)$$

Тяговое усилие $(P_e)_m$, приложенное к модели, может быть измерено с помощью тензометрического подшипника, показания которого фиксируются на ленте осциллографа.

Средняя скорость движения выбирается на участке установившегося движения модели. В целях уменьшения разгонного участка и быстрее вывода модели на режим установившегося

движения ей сообщается дополнительный импульс за счет работы падающего груза во время пробега модели по участку чистой воды. При правильно подобранном разгонном импульсе модель выходит на режим установившегося движения, пройдя во льду расстояние, равное 0,8—1,2 своей длины. Длина участка установившегося движения составляет 6—6,5 м, что вполне достаточно для надежного выбора средней скорости модели. Одним из способов регистрации пути, необходимого для определения скорости движения модели, является контактный способ, когда на ленту хронографа фиксируется продолжительность прохождения моделью заданных отрезков пути. Датчиком времени в этом случае служит электро-

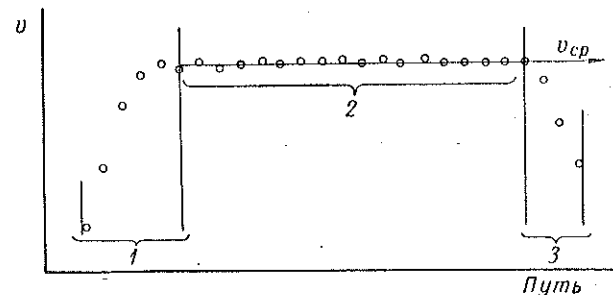


Рис. 33. Запись скорости модели.

1 — разгон; 2 — установившееся движение; 3 — торможение.

контактный хронометр с периодом $1/2 \text{ сек}$; датчиком пути — мерный ролик с контактным или фотоимпульсным реле.

Обозначим через r_b радиус барабана, а через n — число замыкателей на этом барабане. Тогда путь, пройденный моделью и соответствующий расстоянию между двумя отметками на ленте самописца, будет

$$L = \frac{2\pi r_b}{n}.$$

Если длина ленты хронографа, соответствующая протяжке за одну секунду, равна τ , а расстояние на ленте между отметками пути равно l_1 , то скорость модели на участке пути L будет

$$v = \frac{2\pi r_b \tau}{n l_1}.$$

Чтобы определить среднюю скорость модели за весь пробег, строят график изменения скорости ее движения на участках пути между двумя отметками. По этому графику можно определить длину разгонного участка и участка установившегося движения, а также момент начала торможения модели. Схема записи скорости модели в сплошных льдах приведена на рис. 33.

Для анализа режимов неустановившегося движения модели необходима непрерывная запись скорости ее движения на ленту осциллографа, что осуществляется с помощью специального устройства, датчиком которого служит тахогенератор.

Контроль заданных характеристик моделированного льда (предела прочности и толщины) производится после пробега модели.

Предел прочности льда σ_p определяется по результатам испытаний на изгиб образцов, приготовленных из ледяного покрова. Чтобы максимально приблизить условия испытаний образцов к условиям разрушения ледяного покрова моделью, большое внимание уделяют технологии изготовления образцов и соблюдению температурного режима.

Образцы выпиливают электротепловым ножом из участков ледяного покрова, оставшегося неразрушенным после пробега модели. Затем образцы льда помещают в ванночку, наполненную водой из бассейна. Тем самым температура каждого образца сохраняется равной температуре ледяного покрова.

Образцы испытывают, как двухопорную балку, нагруженную сосредоточенным усилием в середине пролета. Величина разрушающего усилия определяется по положению груза на штанге рычажного прибора, описанного в § 8. Абсолютные размеры образцов моделированного льда выбираются из условия $l \geq 10h$ и $b \geq 2,5h$, где l , b и h — соответственно длина, ширина и толщина образца.

Величина предела прочности льда рассчитывается по выражению

$$\sigma_p = \frac{2}{3} \frac{Pl}{bh^2} + \frac{3}{4} \gamma \frac{l^2}{h},$$

второй член которого учитывает вес образца.

В настоящее время контроль прочности льда в условиях ледового бассейна производится по схеме двухопорной балки. В дальнейшем предполагается перейти к методу испытаний на изгиб консольных балок на плаву без извлечения их из воды, что позволит сохранить внешние условия разрушения льда моделями. В этом случае разрушающее усилие будет фиксироваться на ленте осциллографа (см. § 8).

Толщина ледяного покрова, приготовляемого в ледовом бассейне, при принятом температурном режиме воды и воздуха зависит от времени намораживания. Поэтому начало опыта во льду заданной толщины определяется в соответствии с временем, прошедшим с момента зарядки. По истечении необходимого срока намораживания производится контрольный замер льда. Промер толщины льда по всей длине бассейна осуществляется после пробега модели, а полученные при этом данные осредняются. Толщина

льда замеряется приспособлением, мерительными элементами которого являются нониусная линейка и индикаторная головка.

В сплошных льдах в ледовом бассейне могут быть проведены следующие виды модельных испытаний.

1. Испытания при различных тяговых усилиях в сплошном льду заданной толщины и прочности. Результаты этих испытаний представляются графически в виде кривой зависимости сопротивления модели от скорости движения: $R_n = f(v)$ при $h = \text{const}$ (рис. 34). Значения толщины и прочности моделированного льда определяются из условия подобия (21). Такие испытания обычно проводят для определения тяги винтов судна, необходимой для

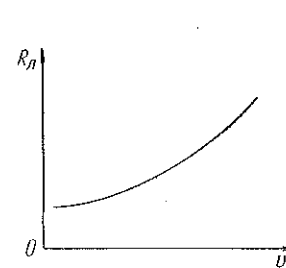


Рис. 34. График зависимости сопротивления модели от скорости при $h = \text{const}$.

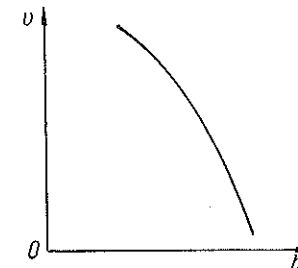


Рис. 35. График зависимости скорости движения модели от толщины льда при $P_e = \text{const}$.

преодоления льда заданной толщины и прочности. Как будет показано в § 12, в рассматриваемом случае составляющая полного сопротивления модели, не зависящая от скорости движения (прямое сопротивление), пересчитывается на натуру в соответствии с условием подобия Фруда, а оставшаяся часть — скоростное сопротивление — определяется по эмпирическому выражению (71). При этом численные значения коэффициента, входящего в выражение (71), находят по кривой $R_s = f(v)$, полученной для модели.

2. Испытания в сплошном льду различной толщины при постоянном (заданном) тяговом усилии. В результате этих испытаний строится кривая $v = f(h)$ при $P_e = \text{const}$ (рис. 35). Такие испытания проводят с целью определения предельной толщины льда, преодолеваемого судном непрерывным ходом при заданной тяге винтов (мощности энергетической установки). Прочность моделированного льда рассчитывают в соответствии с условием подобия $\frac{(\sigma_p)_n}{(\sigma_p)_m} = \lambda$. При этом должна быть известна прочность натурального льда. Предельная толщина льда, преодолеваемого моделью, определяется по пересечению кривой $v = f(h)$ с осью x , а предельная толщина льда, преодолеваемого судном, — пересчетом по выражению $h_n = h_m \lambda$.

Такой вид испытаний применяется также для отработки формы обводов корпуса судна. В этом случае при заданном тяговом усилии проводятся испытания нескольких моделей, выполненных в одинаковых главных размерениях и отличающихся формой обводов корпуса. Для каждой модели строится кривая $v = f(h)$. Оценка формы обводов корпуса производится на основе сопоставления этих кривых.

3. Самоходные испытания модели. Самоходные испытания модели могут проводиться как в сплошных, так и в битых льдах. Основная цель таких испытаний — определение степени защищенности движительно-рулевого комплекса от воздействия льда. Испытания проводятся по методу самоходных в жесткой запряжке. Поток воды вблизи винто-рулевого комплекса моделируется по условиям подобия Фруда. На ленту осциллографа фиксируются удары лопастей винтов о лед, клинение винта льдом, действие льда на насадки винтов и рули, а также на элементы ограждения винто-рулевого комплекса. Если на исследуемом объекте невозможно установить датчики, то применяется способ приметных точек. Тычинки — медные проволочки диаметром 0,1—0,2 мм и длиной 1—1,5 см — монтируются на корпусе модели или на исследуемой выступающей части корпуса. При взаимодействии со льдом тычинки изгибаются, что позволяет судить о траекториях движения льдин, а следовательно, и о характере взаимодействия льда с исследуемым объектом.

Визуальные наблюдения за характером взаимодействия корпуса и его выступающих частей со льдом осуществляются с помощью подводной телевизионной установки. Для этой цели вода в бассейне освещается с помощью химикатов. Телевизионная установка имеет фотоприставку, фиксирующую на пленку объект наблюдения в заданный момент времени.

§ 11. Экспериментальная проверка условий моделирования в ледовом бассейне

Точное выполнение некоторых условий подобия при воспроизведении в опытовом бассейне движения судна в сплошных льдах достаточно сложно, поэтому особенно важное значение приобретает проверка метода моделирования. Такая проверка базируется на данных серийных испытаний моделей в ледовом бассейне и натуральных испытаний во льдах. Оценка степени выполнимости условий моделирования осуществляется двумя путями. Первый путь (прямой) заключается в количественной оценке результатов моделирования, второй (косвенный) — в сопоставлении общей картины взаимодействия корпуса модели и натурального судна со льдом, в частности геометрии ломки льда корпусом.

Проверка результатов моделирования является составной частью методики испытаний в ледовом бассейне и регулярно осу-

ществляется в повседневной практике. Для этой цели используются материалы всех модельных и натуральных экспериментов во льдах: материалы испытаний судов и их моделей, данные механических и фрикционных испытаний ледяного покрова и т. п.

Ниже приводится пример использования результатов испытаний масштабной серии моделей ледокола «Ермак» в сплошных льдах для количественной проверки расчета сопротивления.

Масштабная серия моделей ледокола «Ермак» (три модели), выполненных в масштабе 1 : 50, 1 : 65 и 1 : 80, проходила испытания в моделированном льду, характеристики которого приведены в табл. 3. На рис. 36 приведены буксировочные кривые сопротивления моделей масштабной серии, на рис. 37 — кривые относительного сопротивления $\frac{(R_{лч})_м}{D_м}$ в функции числа Фруда, где $(R_{лч})_м$ — чистое ледовое сопротивление, $D_м$ — весовое водоизмещение модели.

Таблица 3

Параметры моделированного льда при испытаниях масштабной серии ледокола «Ермак»

Масштаб модели	h, см		σ_p , кг/см ²		E, кг/см ²	
	испытание	по условию подобия	испытание	по условию подобия	испытание	по условию подобия
1 : 80	0,75	0,75	0,85	0,87	200	375
1 : 65	0,90	0,92	1,00	1,08	360	400
1 : 50	1,20	1,20	1,40	1,40	600	600

При удовлетворении условий моделирования (18), (20) и (21) часть полного ледового сопротивления модели, не зависящая от скорости движения (прямое сопротивление), может быть пересчитана на натуру согласно соотношению

$$(R_{пр})_н = (R_{пр})_м \lambda^3, \quad (38)$$

где $(R_{пр})_н$ — прямое сопротивление натуре;
 $(R_{пр})_м$ — прямое сопротивление модели.
 Соотношение (38) эквивалентно

$$(R_{пр})_н = (R_{пр})_м \frac{D_н}{D_м}. \quad (39)$$

Из рис. 37 видно, что при скорости, близкой к нулю, кривые относительного сопротивления всех трех моделей фактически со-

впадают. Это свидетельствует о том, что вывод теории моделирования о возможности пересчета прямого сопротивления справедлив. Небольшое расхождение кривых на рис. 37 объясняется отклоне-

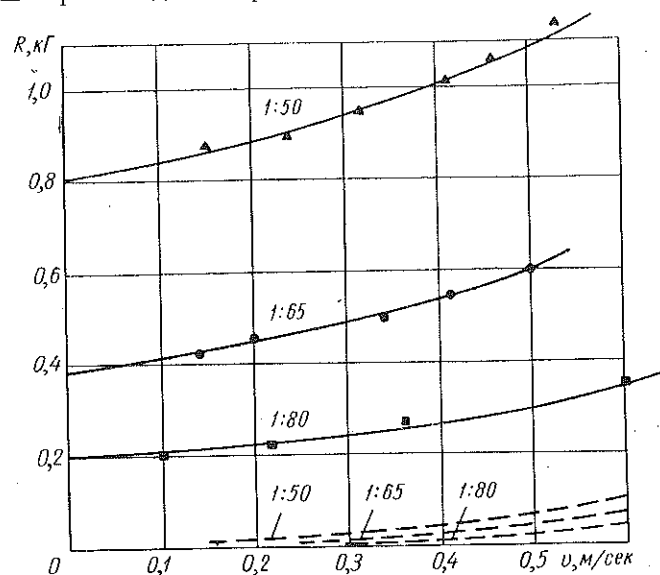


Рис. 36. Буксировочные кривые сопротивления моделей масштабной серии ледокола «Ермак». — в сплошном льду; - - - на свободной воде.

ниями величин h , σ_p и E от требуемых по условиям подобия (табл. 3), т. е. погрешностью опыта. В то же время кривые относительного сопротивления моделей масштабной серии с увеличе-

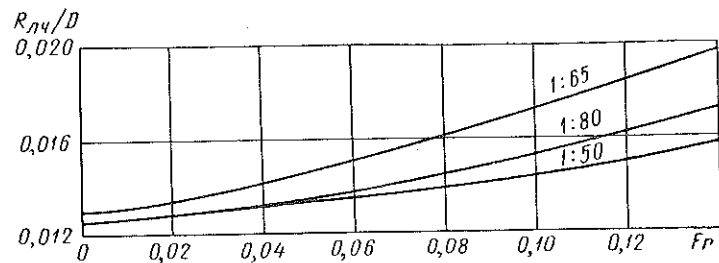


Рис. 37. Кривые относительного сопротивления моделей в функции числа Фруда.

нием скорости расходятся. Это подтверждает вывод теории моделирования о невозможности прямого пересчета скоростного сопротивления.

Выше (§ 6) было показано, что при соблюдении условий моделирования (18), (20) и (21) картина разрушения льда в плане

у природы и модели должна быть геометрически подобной. Выполнимость этого положения может быть проиллюстрирована на примере испытаний речного ледокола «Терек» и его модели.

Натурные испытания этого ледокола были проведены в 1958 г. в сплошных ровных льдах Куйбышевского водохранилища. В ледовом бассейне была испытана модель ледокола «Терек», выполненная в масштабе 1 : 25. Длина ледокола по ГВЛ 44,7 м; ширина 11,4 м; осадка 2,4 м; форма обводов корпуса — ледокольная; мощность главных двигателей 1800 л. с.

Во время испытаний ледокола, проходивших в исключительно благоприятной ледовой и метеорологической обстановке, велись тщательные наблюдения за характером взаимодействия корпуса со льдом, проводилась фото- и киносъемка со льда и с борта судна, делались обмеры и зарисовки конфигурации льдин, кромок канала и т. д. Аналогичные наблюдения проводились при модельных испытаниях в бассейне.

Параметры моделированного льда (толщина и прочность) были выбраны в соответствии с условиями подобия. В натуральных условиях при толщине льда 20 см σ_p ледяного покрова составляло 7—14 кг/см². Модель испытывалась при толщине льда 0,8 см и прочности $\sigma_p = 0,3$ и 0,4 кг/см². Условия моделирования в отношении модуля упругости специально не выдерживались.

Анализ наблюдений показывает, что как в природе, так и в бассейне основными факторами, влияющими на картину разрушения льда в плане, являются скорость движения, толщина и прочность ледяного покрова.

При прочих равных условиях наибольшее влияние на геометрию ломки оказывает скорость движения: с уменьшением скорости увеличиваются абсолютные размеры обламываемых секторов и, следовательно, уменьшается число рядов секторов с каждого борта. Изменение толщины и прочности льда приводит к аналогичным, но менее существенным изменениям геометрии ломки.

Сравнение характера разрушения ледяного покрова судном и моделью показывает, что ломка льда в натуральных и лабораторных условиях имеет общее качественное сходство. Однако наблюдается некоторое отличие в характере местного разрушения льда форштевнем и бортами. Так, если в натуре «прорезание» льда форштевнем проявляется в виде смятия и скалывания, то у модели «прорезание» характеризуется выкрашиванием ледяного покрова. Обламыванию льда бортами в натуральных условиях предшествует смятие верхней кромки льда; на модели же в большинстве случаев местное разрушение льда бортами практически отсутствует.

На рис. 38 приведены характерные схемы разрушения льда ледоколом «Терек» и его моделью при движении с различной скоростью. Схемы воспроизводят в масштабе конфигурацию и расположение трещин и обломанных льдин по отношению к ледовой ватерлинии судна с указанием размеров секторов. Анализ этих

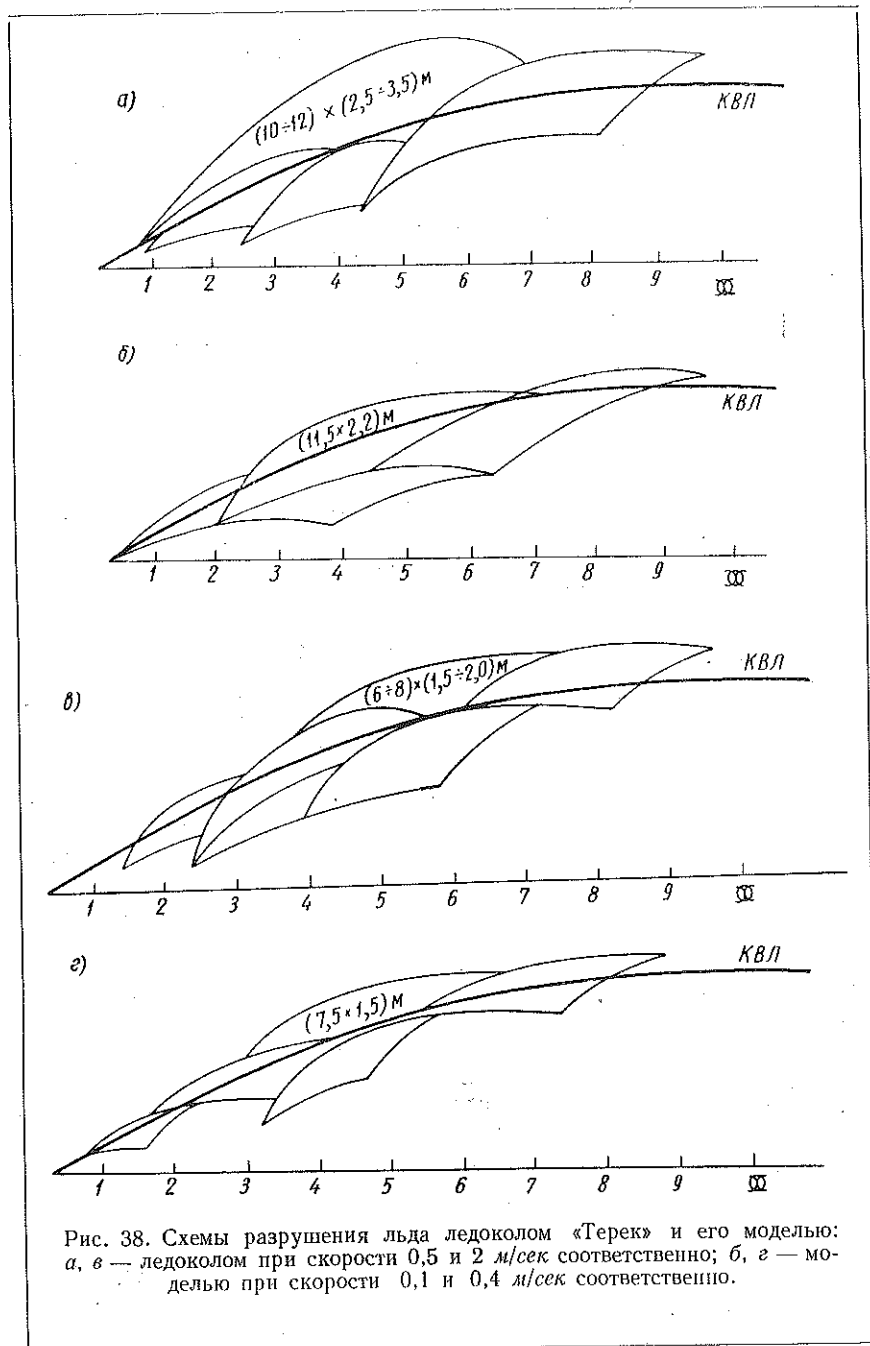


Рис. 38. Схемы разрушения льда ледоколом «Терек» и его моделью: а, в — ледоколом при скорости 0,5 и 2 м/сек соответственно; б, г — моделью при скорости 0,1 и 0,4 м/сек соответственно.

схем позволяет сделать вывод, что в целом картина ломки льда ледоколом «Терек» и его моделью идентичны: имеется аналогия в отношении числа рядов секторов, расположения зон контакта корпуса со льдом по длине ватерлинии, формы секторов, характера образования трещин и т. п. Линейные размеры обламываемых бортами льдин геометрически подобны при отношении скорости движения натуре и модели, равном $\sqrt{\lambda}$. Последнее согласуется с выводами § 9 в отношении подобия геометрии ломки льда, для которого характерно проявление пластических свойств.

Аналогичные результаты получены также по ряду других испытаний ледоколов и их моделей. При этом установлено, что с уменьшением масштаба модели соблюдение подобия в отношении физико-механических характеристик ледяного покрова становится более трудным. В целом же можно сделать заключение, что условия проведения модельных испытаний в ледовом бассейне удовлетворяют требованиям моделирования движения судна в сплошных льдах. Несоблюдение некоторых второстепенных условий подобия (например, в отношении модуля упругости и коэффициентов Пуассона льда) не может служить решающим препятствием для практического использования метода модельных испытаний в сплошных льдах.

Достигнутые успехи не свидетельствуют о полном решении проблемы моделирования движения судна во льдах. Дальнейшее совершенствование метода моделирования может быть достигнуто путем более детального изучения свойств среды (ледяного покрова), строгого соблюдения всех необходимых условий моделирования, улучшения методики и техники проведения испытаний. В частности, поскольку в существующем бассейне выполнение ряда условий подобия затруднительно из-за больших масштабов моделей, в дальнейшем, очевидно, потребуется создание ледового бассейна больших размеров.

Методы определения сопротивления при движении судна в сплошных льдах

§ 12. Пересчет сопротивления с модели на натуру

Разработка критериев подобия и практическое осуществление моделирования движения судна в сплошных льдах в бассейне служат основанием для определения ледового сопротивления судна методом пересчета с модели на натуру.

Надежность определения сопротивления сплошного льда движению судна методом пересчета зависит прежде всего от степени соблюдения условий моделирования в ледовом бассейне. Сложность строгого выполнения условий проведения модельного эксперимента определяется необходимостью одновременного соблюдения условия подобия Фруда, Коши и Рейнольдса. Это, вообще говоря, неосуществимо из-за несовместимости требований, относящихся к скорости движения модели и натуре. Однако при движении ледокола в сплошных льдах с малой скоростью можно пренебречь частью скоростного сопротивления, которая моделируется в соответствии с условием подобия Рейнольдса. В этом случае преобладающее значение имеет прямое сопротивление, включающее силы сопротивления, обусловленные ломкой, притапливанием, переворачиванием льда и сухим трением, которое не зависит от скорости движения. Все эти составляющие моделируются по условию подобия Фруда, за исключением усилий, связанных с ломкой льда ледоколом, требующих выполнения условий подобия Коши. Отношения скоростей движения натуре и модели и физико-механических характеристик льда, вытекающие из условия подобия Коши, не противоречат условию подобия Фруда. Поэтому моделирование движения судна в сплошных льдах при малых скоростях хода производится по условию подобия Фруда. Последний при выбранном линейном масштабе λ позволяет получить следующие соотношения между толщинами, пределами прочности и модулями упругости натурального и моделируемого льда:

$$\frac{h_n}{h_m} = \frac{(\sigma_p)_n}{(\sigma_p)_m} = \frac{E_n}{E_m} = \lambda. \quad (40)$$

При соблюдении этих условий прямое сопротивление натуре и модели будет относиться как

$$\frac{(R_{пр})_n}{(R_{пр})_m} = \lambda^3. \quad (41)$$

Отношение (41) можно заменить эквивалентным ему отношением для величин относительного прямого сопротивления

$$\frac{(R_{пр})_n}{D_n} = \frac{(R_{пр})_m}{D_m} \quad \text{или} \quad (R_{пр})_n = (R_{пр})_m \frac{D_n}{D_m}. \quad (42)$$

Результаты пересчета с модели на натуру по выражениям (41) и (42) характеризуют ледовые качества судна при работе в «стандартных» ледовых условиях, отвечающих условиям испытаний в бассейне. Такими стандартными условиями является ровный сплошной ледяной покров нулевой разрушенности, торосистости и заснеженности.

В реальной ледовой обстановке проходимость ледокола будет тем ближе соответствовать расчетной, чем ближе натурные ледовые условия отвечают стандартным.

Метод пересчета дает наилучшие результаты применительно к случаям движения судна во льдах с малой скоростью, когда скоростная часть полного сопротивления невелика. Это имеет место при определении предельной толщины льда, которую преодолевает ледокол, и при определении сопротивления (тяги винтов) движению судна во льдах заданной толщины со скоростью хода 1—3 узл.

Как указывалось выше, невозможность одновременного удовлетворения условиям подобия Фруда и Рейнольдса не позволяет использовать метод прямого пересчета при больших скоростях движения судна. Однако принимая гипотезу о независимости составляющих ледового сопротивления, в данном случае можно использовать полуэмпирический метод, аналогичный тому, который применяется при определении сопротивления воды движению судна. Как известно, испытания моделей на свободной воде проводятся с соблюдением условия подобия Фруда, а часть сопротивления, подчиняющаяся условию подобия Рейнольдса (сопротивление трения), определяется расчетным путем.

Применение метода независимого определения составляющих сопротивления при движении судна в сплошных льдах упрощается, так как часть полного сопротивления модели, поддающаяся пересчету на натуру согласно условию подобия Фруда (прямое сопротивление), не зависит от скорости движения. Скоростную часть полного сопротивления можно определять расчетным путем по полуэмпирической формуле (71), приведенной в § 13.

Величина полного ледового сопротивления согласно выражению (1) может быть получена как сумма прямого и скоростного сопротивлений.

Определение сопротивления судна при движении в сплошном льду заданных характеристик с помощью изложенного метода производится в следующем порядке.

1. По результатам модельных испытаний в сплошном льду, толщина и прочность которого назначены в соответствии с условиями моделирования (40), строится кривая буксировочного сопротивления модели в сплошных льдах $(R_{л})_м = f(v)$.

2. С графика $(R_{л})_м = f(v)$ снимается величина прямого сопротивления модели.

3. Пересчетом с модели на натуру по формуле (41) определяется величина прямого сопротивления судна.

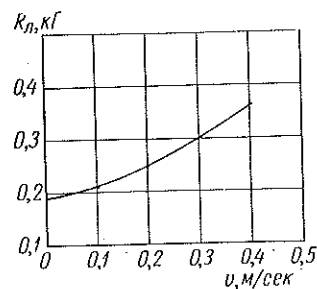


Рис. 39. Буксировочная кривая модели ледокола «Ермак» в сплошных льдах.

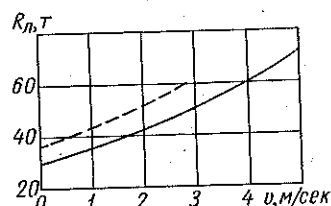


Рис. 40. Сопоставление результатов натуральных испытаний ледокола «Ермак» с расчетными данными.

--- натура; — расчет.

4. С помощью одного из способов, указанных в § 5, определяется величина сопротивления воды движению судна $R_в$.

5. По выражению (71) вычисляется сопротивление $R_з$ и скоростное сопротивление как сумма $R_з + R_в$.

6. Строится кривая ледового сопротивления судна (тяги винтов) в функции скорости хода, как сумма прямого и скоростного сопротивления.

Пример. По результатам испытаний модели масштаба 1 : 50 определить сопротивление ледокола «Ермак» при движении со скоростью 1—10 узл. в ровном сплошном льду толщиной $h = 40$ см и $\sigma_p = 10$ кг/см².

Определяем толщину и прочность моделированного льда для модельных испытаний:

$$h_m = \frac{h_n}{\lambda} = 0,8 \text{ см};$$

$$(\sigma_p)_m = \frac{(\sigma_p)_n}{\lambda} = 0,2 \text{ кг/см}^2.$$

Результаты испытаний модели представляем в виде буксировочной кривой $(R_{л})_м = f(v)$ (рис. 39).

По графику рис. 39 находим величину прямого сопротивления модели

$$(R_{пр})_м = 0,19 \text{ кг}.$$

Определяем величину прямого сопротивления ледокола «Ермак»

$$(R_{пр})_н = (R_{пр})_м \lambda^3 = 0,019 \cdot 125 \ 000 = 24 \text{ т}.$$

С графика рис. 17 снимаем величину сопротивления воды движению ледокола «Ермак» при заданных скоростях хода 1; 2; 3; 4 и 5 м/сек.

По выражению (71) вычисляем $R_з$ и скоростное сопротивление ледокола «Ермак» как сумму $R_з + R_в$ (табл. 4).

Определяем полное ледовое сопротивление ледокола «Ермак», как сумму прямого и скоростного сопротивления (табл. 5).

Таблица 4

Определение скоростного сопротивления ледокола «Ермак»
($B = 21,5$ м; $B^{1,65} = 153$; $\eta_2 = 3,25$)

v , м/сек	$R_з$, т	$R_в$, т	$R_{ск} = R_з + R_в$, т
1	4,7	0,9	5,6
2	9,4	2,3	11,7
3	14,1	5,5	19,6
4	18,8	10,5	29,3
5	23,5	16,6	40,1

Таблица 5

Определение полного ледового сопротивления ледокола «Ермак»

v , м/сек	$R_{пр}$, т	$R_{ск}$, т	$R_{л} = R_{пр} + R_{ск}$, т
1	24	5,6	29,6
2	24	11,7	35,7
3	24	19,6	43,6
4	24	29,3	53,3
5	24	40,1	64,1

Результаты расчета сопротивления ледокола «Ермак» представлены на рис. 40. На этом же рисунке пунктиром нанесена кривая сопротивления ледокола в сплошном льду толщиной 42 см, полученная при натуральных испытаниях ледокола в 1941 г. Сопоставление результатов расчета с данными натуральных испытаний указывает на их удовлетворительную сходимость.

Определение предельной толщины льда $h_{пр}$, преодолеваемого ледоколом при движении в сплошных льдах, заключается в следующем:

1. По результатам модельных испытаний во льду заданной прочности при постоянном заданном тяговом усилии строится кривая зависимости скорости движения модели от толщины льда $v_m = f(h_m)$ (рис. 35).

2. С графика $v_m = f(h_m)$ снимается величина предельной толщины моделированного льда.

3. По выражению (40) определяется предельная толщина льда, преодолеваемого ледоколом.

Пример. Определить предельную толщину льда, преодолеваемого ледоколом «Ермак», путем испытания его модели в масштабе 1 : 50, при максимальном тяговом усилии винтов 80 т и прочности льда 10 кг/см².

Определяем тяговое усилие и прочность моделированного льда для испытаний модели:

$$(P_e)_м = \frac{(P_e)_н}{\lambda^3} = \frac{80 \ 000}{125 \ 000} = 0,64 \text{ кг};$$

$$(\sigma_p)_м = \frac{(\sigma_p)_н}{\lambda} = \frac{10}{50} = 0,2 \text{ кг/см}^2.$$

По данным испытаний в бассейне предельная толщина льда, преодолеваемого моделью ледокола «Ермак», оказалась равной 1,52 см.

С помощью выражения (40) определяем $(h_{пр})_н$ для ледокола «Ермак»:

$$(h_{пр})_н = (h_{пр})_м \cdot \lambda = 1,52 \text{ см} \times 50 = 76 \text{ см}.$$

Данные натуральных испытаний показывают, что предельная толщина сплошного льда, преодолеваемого ледоколом «Ермак», составляет около 80 см, что свидетельствует о удовлетворительной точности расчета.

§ 13. Полуэмпирический метод расчета сопротивления

Теорией моделирования движения судна в сплошных льдах доказано, а экспериментальной проверкой подтверждено, что только составляющие полного сопротивления модели, не зависящие от скорости движения, могут быть пересчитаны на натуру в соответствии с условиями подобия. Вследствие этого метод определения сопротивления ледокола путем пересчета с модели на натуру может быть рекомендован лишь при сравнительно малых скоростях движения, когда составляющие скоростного сопротивления малы по сравнению с прямым сопротивлением. В частности, этот метод дает хорошие результаты при определении предельной ледопроеходимости судов в сплошных льдах.

Однако применение метода пересчета для оценки ледовых качеств судна связано с необходимостью проводить в каждом частном случае трудоемкие модельные испытания в ледовом бассейне. Кроме того, возможности этого метода ограничены недостаточной изученностью физико-механических свойств натурального льда и вытекающими отсюда трудностями определения необходимых характеристик моделированного льда.

Перечисленные недостатки метода пересчета ледового сопротивления с модели на натуру заставляют искать такие расчетные способы, которые позволяли бы в каждом частном случае приближенно оценивать ледопроеходимость судна в сплошных льдах, не прибегая к модельным испытаниям в ледовом бассейне. Такие способы, основанные на использовании зависимостей, связывающих ледовое сопротивление с характеристиками судна и параметрами ледяного покрова, с успехом могут быть использованы при решении ряда задач, возникающих в начальных стадиях проектирования судов, а также в процессе их эксплуатации во льдах.

В 1890 г. Р. И. Рунебергом [73] на основе данных опыта работы ледоколов в ледовых условиях Балтийского моря была предложена эмпирическая зависимость, связывающая толщину льда h , вертикальное усилие P и ширину ледокола B :

$$h = cP^{0,5}B^{-0,25}, \quad (43)$$

где c — коэффициент, зависящий от физико-механических свойств льда (для осеннего льда Балтийского моря $c = 0,15$).

Анализируя статическое налезание ледокола на ледяной покров, Р. И. Рунеберг вывел также зависимость между максимальным вертикальным давлением, действующим на лед, и упорным давлением винтов:

$$P = R \frac{\cos \alpha \cos \beta - f \sin \alpha}{\sin \alpha \cos \beta + f \sin \beta \cos \alpha}, \quad (44)$$

где R — упор винтов;

α — «угол нападения» — угол между средним наклоном батоксов к ГВЛ;

β — угол между средним наклоном сечений, перпендикулярных к батоксам и ГВЛ;

f — коэффициент трения льда.

В 1895—1897 гг. инженер-механик В. И. Афанасьев исследовал сопротивление льда движению судна с точки зрения затраты мощности [4]. Он пришел к выводу, что мощность N , затрачиваемая на преодоление сопротивления льда, зависит от его толщины t , скорости судна v , формы обводов корпуса и прочности льда:

$$N = cvt^2 \operatorname{tg} \alpha, \quad (45)$$

где N — индикаторная мощность, л. с.;

v — скорость движения, узл.;

t — толщина льда, дюйм;

α — угол наклона форштевня к ГВЛ;

c — коэффициент, зависящий от физико-механических свойств льда (для пресноводного льда $c = 5$; для морского $c = 3$).

Эмпирические зависимости, предложенные Р. И. Рунебергом и В. И. Афанасьевым, впервые позволили производить сравнительную оценку ледокольных качеств судов. Но поскольку эти выражения были созданы на основе обобщения опыта работы судов сравнительно малой мощности (до 1000 л. с.), их применение ограничено. Так, использование формул (43) и (45) для оценки ледопроеходимости современных судов приводит к значительным погрешностям. Следует также отметить, что эти формулы недостаточно учитывают физико-механические свойства льда.

Нельзя отметить роли Д. И. Менделеева [49] и адмирала С. О. Макарова [47] в развитии науки о ледопроеходимости. Хотя С. О. Макаров не является автором научных работ, его деятельность, связанная с созданием ледокола нового типа, способствовала прогрессу науки в области ледоколостроения. В частности, он провел ряд научных исследований по изучению физико-механических свойств ледяного покрова и сопротивления льда движению на ледоколе «Ермак».

Материалы этих исследований в дальнейшем были использованы академиком А. Н. Крыловым в его работах по определению усилий, действующих на ледокол при движении во льдах [40].

Д. И. Менделеев принимал активное участие в научно-исследовательской работе по созданию новых арктических ледоколов и лично разработал несколько вариантов формы обводов корпуса.

Значительным научным трудом, посвященным проблемам ледопроеходимости, следует считать работу Ю. А. Шиманского [87], в котором описан новый метод сравнения ледокольных качеств судов. Оригинальность этой работы заключается в том, что автор отказывается от установления каких-либо абсолютных количественных зависимостей между величиной сопротивления льда движению судна и определяющими его факторами.

Ю. А. Шиманский предложил оценивать форму обводов корпуса, мощность и прочность судна с помощью так называемых «условных измерителей». Так, условный измеритель формы представляет собой отношение составляющих сил давления льда, просуммированных по длине носовой части корпуса, измеритель мощности — условные максимальные толщины льда, определяемые по диаграммам, построенным на основании теоретических исследований поведения ледяного покрова под нагрузкой, и т. д.

Метод оценки ледовых качеств судов с помощью условных измерителей имеет ряд преимуществ и недостатков. Он позволяет сопоставить ледовые качества проектируемого судна с прототипом и выявить влияние основных элементов судна на его ледовые качества. Однако, как показала экспериментальная проверка, достоверность такой оценки ледовых качеств невелика.

И. В. Виноградов, [13], решая уравнение энергетического баланса при налезании носовой части судна на ледяной покров, получил аналитическую зависимость между действующим на лед вертикальным давлением и элементами судна. По мнению автора, эта зависимость не может быть использована для определения абсолютного значения вертикального давления. Предложенная формула позволяет лишь исследовать влияние на вертикальное давление водоизмещения, упорного давления винтов и размерений ледокола. На основе этой формулы И. В. Виноградов предложил измеритель ледокольной способности судна:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \frac{N_1}{N_2} \right)^{1/4}, \quad (46)$$

где h — толщина льда;

D — водоизмещение;

N — мощность главных механизмов.

Однако эта формула не учитывает форму обводов корпуса ледокола и может быть использована только для геометрически подобных судов.

Наряду с упомянутыми теоретическими исследованиями сопротивления сплошного льда движению судна, в предвоенное время был получен ряд эмпирических зависимостей обобщающих данные натурных испытаний ледоколов. Так, формулы В. С. На-

зарова [51] и В. Л. Цурикова [85] связывают мощность механизмов со скоростью движения судна и толщиной льда. Такого рода эмпирические зависимости не получили широкого применения, поскольку они базировались на ограниченном числе натуральных материалов.

В послевоенное время расчетные методы определения сопротивления судна при движении в сплошных льдах разрабатывались Л. М. Ногидом, В. И. Негановым, М. К. Таршисом и М. С. Яковлевым. Остановимся на исследованиях последних двух авторов.

М. К. Таршис [79] рассматривает сопротивление сплошного льда движению судна R в виде суммы двух слагаемых: ледового сопротивления R_n и сопротивления воды R_v :

$$R = R_n + R_v = \sum N_i \left(\frac{a_1}{a_3} + f_T \frac{\cos \alpha}{a_3} \right)_i + cv^2, \quad (47)$$

где $N_i \left(\frac{a_1}{a_3} + f_T \frac{\cos \alpha}{a_3} \right)$ — сопротивление в каждой точке контакта корпуса со льдом;

N — вертикальная составляющая давления корпуса, которая разрушает лед (для форштевня $N = 1,64\sigma_p h^2$, для бортов $N = 0,82\sigma_p h^2$, где σ_p — предел прочности льда на изгиб и h — толщина льда);

a_1 и a_3 — направляющие косинусы между нормалью и осями;

α — угол между касательной к ватерлинии и диаметральной плоскостью в точке контакта борта со льдом;

f_T — коэффициент трения льда;

c — коэффициент сопротивления;

v — скорость движения судна.

Как видно из выражения [47], ледовое сопротивление зависит от числа точек корпуса судна, которые одновременно взаимодействуют со льдом. Количество таких точек контакта, в свою очередь, зависит от ширины судна и геометрии ломки, т. е. от толщины льда и модуля его упругости. Сопротивление сплошного льда движению судна М. К. Таршис сводит к усилиям, затрачиваемым на разрушение ледяного покрова, полагая, что при контакте корпуса со льдом в нескольких точках в каждой из них происходит разрушение льда. Такое предположение не соответствует действительной картине ломки льда корпусом судна.

М. С. Яковлевым разработана методика определения ледопроеходимости речных судов [91]. Автор представляет полное сопротивление в виде суммы двух составляющих: R_x , которая не зависит от скорости движения и может быть найдена расчетным

путем, и R_x'' , зависящей от скорости, определяемой на основе испытаний модели в битых льдах.

Выражение для R_x' имеет вид

$$R_x' = r_1 + r_2 = \frac{2}{\sin \psi_0} \int_0^{L_n} P_n \operatorname{tg} \psi \cos \zeta dx + \frac{2}{\sin \psi_0} f \int_0^{L_n} P_n \sin \psi dx, \quad (48)$$

где r_1 — сопротивление разрушению льда;
 r_2 — сопротивление трения корпуса о лед;
 $P_n = f(\zeta, t)$ — разрушающее лед нормальное давление;
 ζ — угол между нормалью к борту и вертикалью;
 t — толщина льда;
 ψ_0 — угол входа ГВЛ;
 ψ — угол между плоскостью батокса и касательной к грузовой ватерлинии;
 f — коэффициент трения;
 L_n — длина носового заострения.

Величину нормального давления, которое разрушает лед, автор определяет на основе теоретического решения А. И. Маслова о деформации полубесконечной балки-полоски на упругом основании [48].

Выведенные М. С. Яковлевым зависимости предназначаются в основном для сравнительной оценки ледокольных качеств проектируемых судов. Получаемые при этом предельные толщины льда, разрушаемого ледоколом, вообще говоря, являются условными величинами, однако они хорошо согласуются с данными эксплуатации речных ледоколов. Следует отметить, что некоторые положения данной методики расчета ледопроеходимости речных судов противоречат физическому смыслу. Сомнительной является возможность пересчета данных испытаний модели в битых льдах для получения составляющей сопротивления в сплошных льдах, зависящей от скорости движения ледокола.

Из зарубежных исследований сопротивления льда движению судна в сплошных льдах следует отметить работы Янссона [98] и Милано [105].

Янссон представляет полное сопротивление льда R при непрерывном движении ледокола в виде

$$R = (c_1 e^{v/4} + c_2 e v^2) B, \quad (49)$$

где c_1 и c_2 — экспериментальные коэффициенты;
 e — толщина преодолеваемого льда;
 v — скорость движения;
 B — ширина ледокола.

Как указывает автор, данные, полученные при испытаниях ледокола «Мэккино», не подтвердили величину показателя степени при толщине льда в выражении (49). Другая формула Янссона

для определения сопротивления ледокола типа «Капитан Белюсов» также не подтверждается натурными данными.

Милано, используя зависимость И. В. Виноградова [13] для вертикального усилия, создаваемого носовой частью судна при вползании на лед, а также данные о несущей способности сектора на упругом основании, приводит график, позволяющий определить толщину льда, преодолеваемого ледоколом при непрерывном ходе. На этом графике толщина льда является функцией упорного давления винтов ледокола и температуры поверхности льда. Материалы исследований Милано не позволяют оценить их практическую ценность [105].

Предлагаемый для практического использования полуэмпирический метод определения сопротивления сплошного льда движению судна был разработан под руководством академика Ю. А. Шиманского. Для вывода аналитической зависимости, связывающей сопротивление судна с элементами корпуса и параметрами льда, были использованы теоретические и экспериментальные (натурные и модельные) исследования. При этом за исходные были приняты следующие положения.

Полное ледовое сопротивление в соответствии с приведенной выше классификацией сил (см. § 5) представляется в виде суммы прямого и скоростного сопротивлений, каждое из которых включает различные по природе силы. Действие этих сил будем считать взаимонезависимым. Движение судна в сплошных льдах будем полагать установившимся. Исходя из закона сохранения энергии, приравняем работу силы тяги винтов на единице пути судна работе всех сил сопротивления. Тогда работа каждой составляющей силы сопротивления, отнесенная к единице пути судна, будет измеряться в единицах силы. Такой подход позволяет представить силу тяги винтов в виде равенства

$$P_e = R_1 + R_2 + R_3 + R_v,$$

где R_1 — сопротивление, обусловленное разрушением ледяного покрова;

R_2 — сопротивление, обусловленное силами весового характера (притапливание, поворачивание льда, изменение посадки судна, а также сопротивление сухого трения);

R_3 — сопротивление, обусловленное раздвиганием разрушенного льда;

R_v — сопротивление воды движению судна.

Силы R_1 , R_2 , R_3 и R_v , величина которых определяется как отношение работы составляющих сил сопротивления к единице пути судна, можно рассматривать в качестве средних значений сил сопротивления, действующих на судно при его непрерывном движении во льду с некоторой средней скоростью v .

Основываясь на физических соображениях, для каждой из этих составляющих сил сопротивления выведем аналитические

зависимости, в которые будут входить некоторые коэффициенты, учитывающие условности, допущенные при решении. Эти коэффициенты могут быть определены эмпирическим путем на основании данных модельных и натуральных испытаний.

Рассмотрим сначала прямое сопротивление судна, состоящее из сопротивления, связанного с разрушением ледяного покрова (R_1), и сопротивления, обусловленного силами весового характера (R_2). В свою очередь, сопротивление, связанное с разрушением льда, включает сопротивление ломке льда изгибом бортами судна и сопротивлению прорезанию льда форштевнем и прилегающими к нему участками бортов. Сопротивление разрушению льда может быть выражено через величину работы, расходуемой судном на разрушение льда и отнесенной к единице пути. Эта работа должна быть равна потенциальной энергии разрушения льда, отнесенной к единице пути судна.

Ломку льда изгибом бортами судна представим в виде деформации балки-полоски, лежащей на упругом основании, под действием вертикальных и горизонтальных усилий, приложенных к свободной кромке. Тогда, как это принято в работе Ю. А. Шиманского [87], необходимая для разрушения льда вертикальная сила, отнесенная к единице ширины кромки, может быть записана в виде

$$N_0 = 0,52\alpha_0 h^2 \sigma_p, \quad (50)$$

а потенциальная энергия ломки льда V_0 в виде

$$V_0 = \frac{N_0^2}{4EJ\alpha_0^3},$$

где $\alpha_0 = \sqrt[4]{\frac{k}{4EJ}}$ — аргумент, имеющий размерность 1/длина;
 k — коэффициент жесткости упругого основания льда;

$J = \frac{1 \cdot h^3}{12}$ — момент инерции сечения ледяного покрова шириной, равной единице.

Для пресной воды $k = 1 \text{ т/м}^3$, поэтому можно записать

$$\alpha_0 = \sqrt[4]{\frac{3}{Eh^3}}. \quad (51)$$

Подставив (50) в формулу для V_0 , получим

$$V_0 = 0,27\sigma_p^2 h^4 \alpha_0^3.$$

При ломке льда вертикальными силами разрушение происходит на расстоянии x_1 от кромки льда, которое определяется по выражению

$$x_1 = \frac{\pi}{4\alpha_0} = \frac{\pi}{4\sqrt[4]{3}} E^{0,25} h^{0,75}. \quad (52)$$

Считая, что потенциальная энергия всей массы льда, разрушаемого бортами ледокола, пропорциональна ширине ледокола B , получаем выражение для потенциальной энергии разрушения льда, отнесенной к единице пути ледокола

$$V_1 = \frac{BV_0}{x_1}. \quad (53)$$

Подставив в (53) значения V_0 , x_1 и α_0 и произведя соответствующие сокращения, будем иметь

$$V_1 = k_0 \frac{B\sigma_p^2 h}{E}. \quad (54)$$

Чтобы получить общее выражение для работы, затрачиваемой на разрушение льда бортами и отнесенной к единице пути судна, выражение (54) необходимо умножить на коэффициент, который учитывал бы влияние формы обводов корпуса на степень использования работы тяги винтов ледокола при ломке льда вертикальными составляющими давления корпуса. Необходимость введения этого коэффициента обусловлена тем, что при движении ледокола во льду вследствие специфичности обводов его корпуса имеют место как вертикальные, так и горизонтальные силы, действующие на ледяной покров. Разрушение же льда происходит в результате изгиба, вызванного вертикальными силами, поскольку потенциальная энергия изгиба льда значительно меньше потенциальной энергии сжатия под действием горизонтальных сил. Поэтому работа, затрачиваемая судном на сжатие ледяного покрова горизонтальными силами, с точки зрения разрушения оказывается бесполезной.

Степень использования вертикальных сил при разрушении льда корпусом судна Ю. А. Шиманский предложил учитывать с помощью «коэффициента использования» μ_0 , численное значение которого может быть определено по формуле

$$\mu_0 = 1 + \frac{\sum_{III}}{\sum_{II}}, \quad (55)$$

где \sum_{III} — суммарное продольное горизонтальное усилие;
 \sum_{II} — суммарное вертикальное усилие, действующие на ледяной покров в носовой части корпуса судна [87].

Значения \sum_{III} и \sum_{II} могут быть найдены по табл. 6. Для этого с теоретического чертежа ледокола снимают углы наклона борта к вертикали β' и углы наклона ватерлинии к плоскостям батоксов α' (рис. 41).

При $\sum_{II} = 0$ (что отвечает прямостенному борту) $\mu_0 = \infty$, и, следовательно, разрушение льда становится невозможным ввиду бесконечно большого значения потенциальной энергии раз-

Расчет коэффициента использования μ_0 и коэффициента ледорезности η_2

Угол наклона шпангоута к вертикали β' , град.	I									
Угол наклона ватерлинии к ДП α' , град.	II									
α_1 град.	III									
α_2 град.	IV									
$\alpha(III)$	V									
$\alpha(II)$	VI									
$\Lambda + I$	VII									
$\Pi\Lambda + \text{IA}$	VIII									
$\Pi\Lambda\Lambda$	IX									
$P_y = \frac{IX}{III} \frac{VII}{VIII}$	X									
$P_z = \text{IV} \cdot X$	XI									
$P_x = \text{III} \cdot X$	XII									
							$\Sigma\Sigma$			
							Поправка $1/2 (P_0 + P_{10})$			
							$\Sigma\Sigma_{испр}$		ΣI	ΣIII
									ΣII	

рушения льда. При $\Sigma_{III} = 0$, т. е. при полном отсутствии горизонтальных усилий, $\mu_0 = 1$. В этом случае работа тяги винтов полностью расходуется на разрушение льда.

Таким образом, выражение для работы, затрачиваемой на ломку льда бортами и отнесенной к единице пути судна, может быть записано в виде

$$A_1 = k_0 \frac{B \sigma_p^2 h}{E} \mu_0. \tag{56}$$

Принимая модуль упругости E пропорциональным пределу прочности льда σ_p (см. § 9) и учитывая, что работа, отнесенная

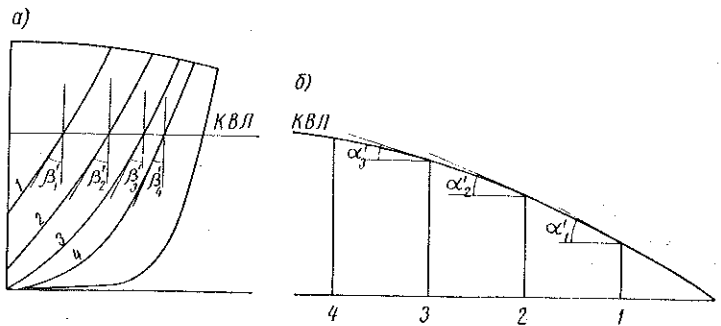


Рис. 41. Углы β' и α' на теоретическом чертеже: а — корпус; б — полуширота.

к единице пути судна, имеет размерность силы, можно записать выражение для составляющей сопротивления, обусловленного разрушением льда бортами:

$$R_1 = k_1 B \sigma_p h \mu_0. \tag{57}$$

Коэффициент k_1 может быть определен по результатам модельных испытаний в ледовом бассейне.

При выводе выражения для составляющей сопротивления ломки льда бортами была использована теория разрушения ледяного покрова как бесконечной балки, лежащей на упругом основании. Такая схема разрушения льда отличается от действительной картины ломки льда ледоколом. Однако при принятом полуэмпирическом способе составления выражения (57) такое предположение следует считать приемлемым, поскольку допущенная условность будет учитываться коэффициентом k_1 .

Чтобы получить выражение для той части упорного давления винтов, которая затрачивается на прорезание льда форштевнем и

прилегающими к нему участками бортов, воспользуемся формулой для потенциальной энергии среза:

$$V_c = \frac{1}{2} \frac{N^2 b}{FG},$$

где $N = \tau F$ — вертикальное усилие, необходимое для разрушения льда срезом со стороны одного борта;

τ — предел прочности льда на срез;

$F = lh$ — площадь среза;

l — длина зоны прорезания по борту;

b — ширина единичного участка среза льда;

G — модуль сдвига льда.

С учетом приведенных выше обозначений потенциальная энергия среза льда носовой оконечностью запишется следующим образом:

$$V_c = \frac{\tau^2 l h b}{G}.$$

Площадь прорезания льда в плане lh на пути x_1 можно представить в виде $x_1 l \sin \alpha_0$, где α_0 — угол входа КВЛ.

Учитывая вышесказанное, а также принимая для льда G пропорциональным E и, следовательно, σ_p ; τ пропорциональным σ_p и l пропорциональным h , потенциальную энергию среза льда форштевнем, отнесенную к единице длины судна x_1 , можно записать в виде

$$\frac{V_c}{x_1} = k'_0 \sigma_p h^2 \sin \alpha_0.$$

Чтобы учесть степень использования вертикальных сил при прорезании льда форштевнем и прилегающими к нему участками бортов, последнее выражение необходимо умножить на $\operatorname{tg} \beta'$, где β' — угол наклона борта к вертикали. Имея в виду, что для крайней носовой оконечности ледокола справедлива зависимость

$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sin \alpha_0},$$

где φ — угол наклона форштевня к горизонту, получим выражение для сопротивления прорезанию льда

$$R_1'' = k_1'' \sigma_p h^2 \operatorname{tg} \varphi. \quad (58)$$

Сопоставив выражения (57) и (58), видим, что составляющие упорного давления винтов, затрачиваемого на разрушение льда корпусом судна, имеют различную структуру, вследствие чего сопротивление ломки льда не может быть представлено в виде одного слагаемого. В настоящее время модельный эксперимент не позволяет разделить составляющие R_1' и R_1'' , а следовательно, опреде-

лить коэффициенты k_1' и k_1'' . В связи с этим в дальнейшем, в первом приближении сопротивление ломке льда будем определять по выражению (57), которое представляет собой сопротивление, обусловленное разрушением льда бортами. При этом имеется в виду, что сопротивление прорезанию льда форштевнем распределяется между составляющими сопротивления, не зависящими от скорости движения (в частности, оно должно входить в сопротивление сил весового характера R_2).

Таким образом, окончательно сопротивление ломке льда запишем в виде

$$R_1 = k_1 B \sigma_p h \mu_0. \quad (59)$$

Работу силы тяги винтов, затрачиваемую на преодоление сопротивления, связанного с изменением посадки ледокола, можно определить следующим образом.

Будем считать, что величина вертикальной силы, действующей на судно при его вползании на лед, пропорциональна ширине судна B . Тогда работу этой силы на вертикальном перемещении точки приложения силы Δ , отнесенную к единице пути ледокола, можно записать в виде

$$A_2 \sim \frac{BN_0 \Delta}{x_1}. \quad (60)$$

Вертикальное перемещение Δ при вползании ледокола на лед, в свою очередь, может быть представлено в виде суммы двух слагаемых

$$\Delta = \Delta T + l_N \theta, \quad (61)$$

где ΔT — всплытие ледокола;

θ — изменение дифферента при вползании ледокола на лед;

l_N — плечо силы BN_0 (расстояние от точки приложения силы до центра тяжести ледовой ватерлинии).

Подставив в (60) значение Δ из (61), получим

$$A_2 \sim \frac{BN_0}{x_1} (\Delta T + l_N \theta).$$

Учитывая, что $\Delta T = \frac{BN_0}{S_0}$ и $\theta = \frac{BN_0 l_N}{DH}$,

где S_0 — площадь;

D — весовое водоизмещение судна;

H — продольная метацентрическая высота.

Формулу для работы силы N_0 , отнесенной к единице пути ледокола, можно привести к виду

$$\frac{BN_0}{2x_1} \left(\frac{BN_0}{S_0} + \frac{BN_0 l_N^2}{\gamma V H} \right) = \frac{B^2 N_0^2}{2x_1} \left(\frac{1}{S_0} + \frac{l_N^2}{\gamma V H} \right).$$

Пренебрегаем величиной $\frac{1}{S_0}$ по сравнению со вторым слагаемым в скобках (что равносильно допущению об отсутствии всплывания ледокола), а также считаем, что величина l_N пропорциональна длине ледокола L , а продольная метacentрическая высота H — величине $\frac{BL^3}{V}$. Тогда получим выражение для работы силы тяги винтов, затрачиваемой на изменение посадки ледокола, отнесенной к единице пути ледокола:

$$A_2 \sim \frac{B^2 N_0^2}{x_1} \left(\frac{1}{\sqrt{BL}} \right). \quad (62)$$

Подставив в (62) значения N_0 из (50) и x_1 из (52) и умножив на коэффициент использования μ_0 , получим выражение для составляющей сопротивления, обусловленного изменением посадки ледокола:

$$R_2' = k_0'' \frac{Bh^{7/4} \sigma_p^2}{LE^{3/4}} \mu_0. \quad (63)$$

Принимая, как и ранее, что E прямо пропорциональна σ_p и обозначая отношение $\frac{B}{L}$ через C_0 , окончательно представим (62) в виде

$$R_2' = k_2' C_0 h^{1,75} \sigma_p^{1,25} \mu_0. \quad (64)$$

При выводе аналитических выражений для работы, затрачиваемой ледоколом на поворачивание льдин, будем исходить из того, что каждая обломанная льдина сначала поворачивается на ребро, а затем притапливается. Работа поворачивания может быть выражена в виде произведения веса льдины на изменение расстояния между ее центром тяжести и центром величины.

При толщине льда h указанное расстояние (до поворота льдины) будет

$$\frac{h}{2} - \frac{h \frac{\gamma_{\text{л}}}{\gamma_{\text{в}}}}{2} = \frac{h}{2} \left(1 - \frac{\gamma_{\text{л}}}{\gamma_{\text{в}}} \right),$$

где $h \frac{\gamma_{\text{л}}}{\gamma_{\text{в}}}$ — часть льдины, находящаяся под водой;

$\gamma_{\text{в}}$ — удельный вес воды;

$\gamma_{\text{л}}$ — удельный вес льда.

После поворачивания на 90° это расстояние составит

$$\frac{b_0}{2} - \frac{b_0 \frac{\gamma_{\text{л}}}{\gamma_{\text{в}}}}{2} = \frac{b_0}{2} \left(1 - \frac{\gamma_{\text{л}}}{\gamma_{\text{в}}} \right),$$

где b_0 — ширина льдины.

Тогда (если через a_0 обозначить длину льдины) работа по поворачиванию льдины будет

$$A_3 = a_0 b_0 h \gamma_{\text{л}} \left(\frac{b_0}{2} - \frac{h}{2} \right) \left(1 - \frac{\gamma_{\text{л}}}{\gamma_{\text{в}}} \right).$$

Отнесем работу к единице площади льдины, допуская при этом, что общая площадь льдин пропорциональна ширине ледокола B . Тогда работа, необходимая для поворачивания льда и отнесенная к единице пути ледокола, будет пропорциональна величине

$$\gamma_{\text{л}} B h (b_0 - h) = \gamma_{\text{л}} B h^2 \left(\frac{b_0}{h} - 1 \right).$$

Ширину поворачиваемых льдин b_0 можно принимать пропорциональной величине x_1 , определяемой выражением (52). Учитывая, что x_1 значительно больше толщины льда, формулу для составляющей сопротивления, связанной с поворачиванием льда, можно представить в виде

$$R_2'' = k_2'' \gamma_{\text{л}} B h^{1,75} E^{0,25} \mu_0. \quad (65)$$

Для притапливания льдин ледоколу необходимо затратить работу на преодоление сил плавучести льда A_4 , которая равна произведению избыточной силы плавучести Q на глубину притапливания. При выводе выражения для избыточной силы плавучести необходимо учитывать, что притапливание льдин происходит после их поворачивания на ребро, т. е. толщиной перевернутой льдины в рассматриваемом случае является ее ширина b_0 . Тогда можно записать

$$Q = \gamma_{\text{л}} a_0 b_0 h \left(1 - \frac{\gamma_{\text{л}}}{\gamma_{\text{в}}} \right),$$

где $\gamma_{\text{л}} b_0 \left(1 - \frac{\gamma_{\text{л}}}{\gamma_{\text{в}}} \right)$ — высота льдины над водой.

Среднюю глубину притапливания льдин можно считать пропорциональной толщине плавающей льдины h . Тогда работа, затрачиваемая на притапливание льдины, будет пропорциональна

$$A_4 \sim \lambda_{\text{л}} a_0 b_0 h \left(1 - \frac{\gamma_{\text{л}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) h.$$

Допуская, как и ранее, что общая площадь притапливаемых льдин пропорциональна ширине ледокола B , находим, что работа, затрачиваемая на притапливание льда и отнесенная к единице пути ледокола, будет пропорциональна величине

$$A_4 \sim \gamma_{\text{л}} B h^2 \left(1 - \frac{\gamma_{\text{л}}}{\gamma_{\text{в}}} \right).$$

Таким образом, выражение для составляющей сопротивления, обусловленного притапливанием льда, может быть представлено в виде

$$R_2'' = k_2'' \gamma_{\text{л}} B h^2 \mu_0. \quad (66)$$

Работа, совершаемая ледоколом при движении в сплошном льду, затрачивается не только на преодоление указанных выше составляющих сил прямого сопротивления, но и на преодоление возникающих при поворачивании и притапливании льда сил трения корпуса о лед и льда о лед, которые не зависят от скорости движения.

Величина сил сухого трения пропорциональна величинам соответствующих давлений. Поэтому составляющие работы тяги винтов ледокола, затрачиваемой на преодоление сил сухого трения, должны быть пропорциональны соответствующей работе, затрачиваемой на изменение посадки судна, поворачивание и притапливание льда. Последнее дает основание предполагать, что полученные выше выражения для составляющих прямого сопротивления учитывают влияние сил трения, не зависящих от скорости движения.

Составляющие тяги винтов ледокола, затрачиваемой на изменение посадки ледокола (64), поворачивание льда (65) и его притапливание (66), расходуется на преодоление сопротивления, обусловленного силами весового характера. Как следует из формул (64), (65) и (66), каждая из этих составляющих подчиняется условиям подобия Фруда. Их сумма также подчиняется этим условиям и может быть пересчитана на натуру. Поэтому представляется целесообразным объединить указанные составляющие, т. е. получить общее выражение для тяги винтов ледокола, затрачиваемой на преодоление сил сопротивления весового характера. Это облегчит практическое определение численного значения эмпирического коэффициента, входящего в это выражение.

Просуммировав составляющие R_2' , R_2'' и R_2''' , получим

$$R_2' + R_2'' + R_2''' = k_2' C_0 h^{1,75} \sigma_p^{1,25} \mu_0 + k_2'' \gamma_{\text{л}} B h^{1,75} E^{0,25} \mu_0 + k_2''' \gamma_{\text{л}} B h^2 \mu_0. \quad (67)$$

Анализируя формулу (67) и учитывая, что доля составляющей сопротивления, обусловленной изменением посадки, сравнительно невелика, выражение для сил сопротивления весового характера можно представить в виде

$$R_2 = R_2' + R_2'' + R_2''' = k_2 \gamma_{\text{л}} B h^2 \mu_0. \quad (68)$$

Таким образом, прямое сопротивление ледокола при движении в сплошных льдах определяется зависимостью

$$R_{\text{пр}} = R_1 + R_2 = k_1 B \sigma_p h \mu_0 + k_2 \gamma_{\text{л}} B h^2 \mu_0. \quad (69)$$

Теперь остановимся на анализе скоростного сопротивления. При движении судна в сплошных льдах часть полного сопротивления, зависящая от скорости движения ($R_{\text{ск}}$), включает сопротивление, обусловленное раздвиганием разрушенного льда R_3 , и сопротивление воды движению судна $R_{\text{в}}$. При анализе природы сил, действующих на льдину при ее раздвигании корпусом, следует различать силы, обусловленные вязкостью жидкости, и силы, связанные с образованием волн. Поскольку раздвигание разрушенного льда происходит в погруженном состоянии, волновое сопротивление практически отсутствует, и, следовательно, большая часть сил сопротивления зависит от скорости движения и относится к категории вязкостных сил. Тяга винтов, затрачиваемая на преодоление этих сил, по-видимому, зависит в основном от массы раздвигаемого льда, отнесенной к единице пути судна. Если считать, что объем раздвигаемого льда, отнесенный к единице пути судна, пропорционален ширине судна B и толщине льда h , масса этого льда будет пропорциональна величине $\frac{Bh}{g} \gamma_{\text{л}}$.

При выводе аналитического выражения для части тяги винтов ледокола, затрачиваемой на раздвигание разрушенного льда, необходимо учитывать также, что перемещение льда происходит как в продольном, так и в поперечном направлениях. Поэтому сопротивление раздвиганию льда, по-видимому, будет зависеть от ширины судна в степени большей, чем единица, и от скорости в степени меньшей двух.

Поскольку раздвигание льда происходит в горизонтальной плоскости, влияние формы обводов корпуса на эту составляющую сопротивления может быть учтено «коэффициентом ледорезности»

$\eta_2 = \frac{\sum_{\text{I}}}{\sum_{\text{III}}}$, который представляет собой отношение суммарного поперечного усилия \sum_{I} к суммарному продольному горизонтальному усилию \sum_{III} . Величины \sum_{I} и \sum_{III} , зависящие от формы обводов носовой части корпуса в районе ледовой ватерлинии, можно определить по табл. 6 с использованием теоретического чертежа ледокола (см. рис. 41).

Таким образом, выражение для тяги винтов ледокола, затрачиваемой на раздвигание разрушенного льда, может быть представлено в виде

$$R_3 = k_3 B^x h v^y \frac{1}{\eta_2}.$$

Значение коэффициента k_3 , а также показатели степени при B и v должны быть определены на основании данных натурных и модельных испытаний.

Величину сопротивления воды движению судна $R_{\text{в}}$ можно определить общепринятым путем и при желании вычесть из полного ледового сопротивления (см. § 5).

Полное сопротивление судна при движении в сплошных льдах будет определяться зависимостью

$$R_{\text{л}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{в}} = k_1 B \sigma_{\text{п}} h \mu_0 + k_2 \gamma_{\text{л}} B h^2 \mu_0 + k_3 B^x h v^y \frac{1}{\eta_2} + R_{\text{в}}. \quad (70)$$

Как видно из выражения (70), первые два члена, представляющие собой сопротивление ломке льда и сопротивление, обусловленное силами весового характера, удовлетворяют условию подобия Фруда и позволяют производить расчеты сопротивления

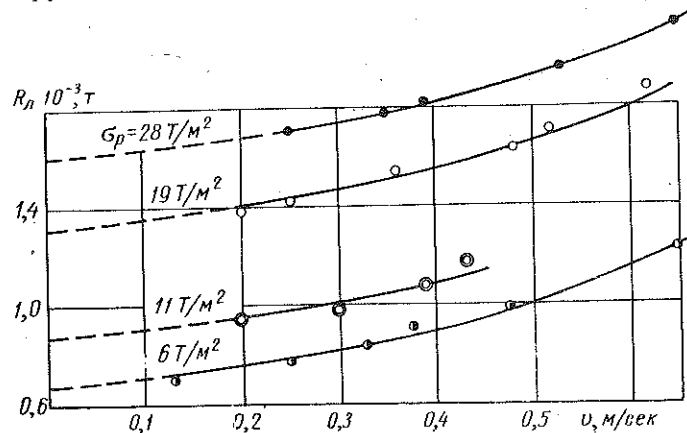


Рис. 42. Кривые сопротивления модели ледокола «Ермак» во льду различной прочности при толщине $h = 15$ мм.

модели и натуре. Коэффициенты k_1 и k_2 являются величинами безразмерными. Третий член выражения (70) не подчиняется условию подобия Фруда, поэтому коэффициент k_3 является размерной величиной.

Коэффициенты k_1 , k_2 и k_3 учитывают все предположения и допущения, сделанные при установлении структуры соответствующих членов выражения (70). Численные значения этих коэффициентов, так же как и неизвестные показатели степени x и y в третьем члене выражения (70), были получены на основании результатов модельных испытаний [32]. Для этой цели были использованы результаты серийных испытаний модели ледокола «Ермак» в масштабе 1 : 50 во льдах различной толщины (от 6 до 18 мм) и прочности (от 0,2 до 3,7 кг/см²). На рис. 42 приведены буксировочные кривые этой модели во льду толщиной 15 мм при различной прочности.

В результате обработки указанных экспериментальных данных были получены следующие значения коэффициентов k : $k_1 = 0,004$ и $k_2 = 3,6$.

Численное значение показателя степени y в выражении (70) в диапазоне скоростей от 0 до 0,4 м/сек оказалось возможным принять равным единице.

Для определения коэффициента k_3 и показателя степени x в выражении (70) были использованы результаты натурных испытаний ледокола «Ермак» во льдах Арктики и Финского залива. Численные значения этих величин оказались равными $k_3 = 0,25$ и $x = 1,65$, что позволило выразить сопротивление R_3 формулой

$$R_3 = 0,25 B^{1,65} h v \frac{1}{\eta_2}. \quad (71)$$

Таким образом, с учетом численных значений коэффициентов k_1 , k_2 и k_3 формулу для расчета сопротивления ледокола «Ермак» при ходе в сплошных льдах можно записать в виде

$$R_{\text{л}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{в}} = 0,004 B \sigma_{\text{п}} h \mu_0 + 3,6 \gamma_{\text{л}} B h^2 \mu_0 + 0,25 B^{1,65} h v \frac{1}{\eta_2} + R_{\text{в}}, \quad (72)$$

где $R_{\text{л}}$ — полное ледовое сопротивление судна в сплошных льдах, t ;
 $R_{\text{в}}$ — сопротивление воды движению судна, t ;
 h — толщина льда, m ;
 $\sigma_{\text{п}}$ — предел прочности льда на изгиб, t/m^2 ;
 $\gamma_{\text{л}}$ — удельный вес льда, t/m^3 ;
 B — ширина судна, m ;
 v — скорость движения судна, $m/сек$;
 μ_0 и η_2 — коэффициенты, характеризующие форму обводов корпуса судна (см. табл. 6).

Выражение (72) может быть использовано также для приближенной оценки проходимости других ледоколов, размерения и форма которых отличны от ледокола «Ермак». Коэффициенты μ_0 и η_2 в известной мере учитывают влияние формы обводов и соотношений главных размерений на сопротивление льда движению судна. Расчетные значения коэффициентов μ_0 и η_2 для морских ледоколов различных типов приводятся в табл. 7.

Таблица 7
Значения коэффициентов μ_0 и η_2 для ледоколов (при осадке по КВЛ)

Коэффициенты	Ледоколы					
	«Москва»	«Сибирь»	«Красин»	«Ермак»	«Капитан Белюсов»	«Добрыня Никитич»
μ_0	1,34	1,53	1,84	1,59	1,32	1,50
η_2	3,2	2,94	3,54	3,35	2,46	2,48

Формула (72) может служить для определения величины тяги винтов, необходимой для преодоления льда заданной толщины и прочности с заданной скоростью хода, и для определения толщины льда, которую способен преодолевать ледокол при заданной тяге винтов и заданной скорости хода.

Проиллюстрируем использование формулы (72) для решения ряда практических задач по определению характеристик проходности ледокола в сплошных льдах.

Пример 1. Определить сопротивление ледокола «Ермак», движущегося со скоростью $v = 1$ м/сек в сплошных льдах различной толщины h , если $\sigma_p = 50$ т/м², $\gamma_{\text{л}} = 0,9$ т/м³; $B = 21,5$ м; $\mu_0 = 1,59$ и $\eta_2 = 3,35$.

При $h = 0,4$ м

$$R_1 = 0,004B\sigma_p h \mu_0 = 2,7 \text{ м};$$

$$R_2 = 3,6\gamma_{\text{л}} B h^2 \mu_0 = 18 \text{ м};$$

$$R_3 = 0,25B^{1,65} h v \frac{1}{\eta_2} = 4,7 \text{ м};$$

$$R_{\text{в}} = 0,9 \text{ м}; \text{ (см. рис. 17);}$$

$$R_{\text{л}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{в}} = 2,7 + 18 + 4,7 + 0,9 = 26,3 \text{ м}.$$

При $h = 0,6$ м

$$R_1 = 4,1 \text{ м}; R_2 = 40 \text{ м}; R_3 = 7,0 \text{ м}; R_{\text{в}} = 0,9 \text{ м};$$

$$R_{\text{л}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{в}} = 52,0 \text{ м}.$$

При $h = 0,8$ м

$$R_1 = 5,5 \text{ м}; R_2 = 71,5 \text{ м}; R_3 = 9,4 \text{ м}; R_{\text{в}} = 0,9 \text{ м};$$

$$R_{\text{л}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{в}} = 87,3 \text{ м}.$$

Пример 2. Определить сопротивление ледокола «Ермак», движущегося со скоростью $v = 1,0$ м/сек в сплошных льдах толщиной $h = 0,8$ м при различном σ_p .

При $\sigma_p = 20$ т/м²

$$R_1 = 0,004B\sigma_p h \mu_0 = 2,2 \text{ м};$$

$$R_2 = 3,6\gamma_{\text{л}} B h^2 \mu_0 = 71,5 \text{ м};$$

$$R_3 = 0,25B^{1,65} h v \frac{1}{\eta_2} = 9,4 \text{ м};$$

$$R_{\text{в}} = 0,9 \text{ м};$$

$$R_{\text{л}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{в}} = 84,0 \text{ м}.$$

При $\sigma_p = 50$ т/м²

$$R_1 = 5,5 \text{ м}; R_2 = 71,5 \text{ м}; R_3 = 9,4 \text{ м}; R_{\text{в}} = 0,9 \text{ м};$$

$$R_{\text{л}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{в}} = 87,3 \text{ м}.$$

При $\sigma_p = 100$ т/м²

$$R_1 = 11 \text{ м}; R_2 = 71,5 \text{ м}; R_3 = 9,4 \text{ м}; R_{\text{в}} = 0,9 \text{ м};$$

$$R_{\text{л}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{в}} = 92,8 \text{ м}.$$

Пример 3. Определить толщину льда, разрушаемого ледоколом «Ермак», если он движется со скоростью 1 м/сек при тяге винтов 80 т и различной прочности льда σ_p .

При $\sigma_p = 20$ т/м²

$$R_1 = 0,004B\sigma_p h \mu_0 = 2,74h, \text{ м};$$

$$R_2 = 3,6\gamma_{\text{л}} B h^2 \mu_0 = 111,5h^2, \text{ м};$$

$$R_3 = 0,25B^{1,65} h v \frac{1}{\eta_2} = 11,7h, \text{ м};$$

$$R_{\text{в}} = 0,9 \text{ м}.$$

Подставляя значения R_1 , R_2 , R_3 и $R_{\text{в}}$ в формулу (72) и решая это уравнение относительно h , получим:

$$h = 0,79 \text{ м}.$$

При $\sigma_p = 50$ т/м²

$$R_1 = 6,85h, \text{ м}; R_2 = 111,5h^2, \text{ м}; R_3 = 11,7h, \text{ м};$$

$$R_{\text{в}} = 0,9 \text{ м};$$

$$h = 0,77 \text{ м}.$$

При $\sigma_p = 100$ т/м²

$$R_1 = 13,7h, \text{ м}; R_2 = 111,5h^2, \text{ м}; R_3 = 11,7h, \text{ м}; R_{\text{в}} = 0,9 \text{ м};$$

$$h = 0,74 \text{ м}.$$

Пример 4. Определить сопротивление ледокола «Ермак», движущегося с различной скоростью во льдах толщиной $h = 0,6$ м при $\sigma_p = 50$ т/м².

При $v = 1$ м/сек

$$R_1 = 0,004B\sigma_p h \mu_0 = 4,1 \text{ м};$$

$$R_2 = 3,25\gamma_{\text{л}} B h^2 \mu_0 = 40 \text{ м};$$

$$R_3 = 0,25B^{1,65} h v \frac{1}{\eta_2} = 7,0 \text{ м};$$

$$R_{\text{в}} = 0,9 \text{ м};$$

$$R_{\text{л}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{в}} = 52,0 \text{ м}.$$

При $v = 2$ м/сек

$$R_1 = 4,1 \text{ м}; R_2 = 40 \text{ м}; R_3 = 14 \text{ м}; R_{\text{в}} = 2,3 \text{ м};$$

$$R_{\text{л}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{в}} = 60,4 \text{ м}.$$

При $v = 3$ м/сек

$$R_1 = 4,1 \text{ м}; R_2 = 40 \text{ м}; R_3 = 21 \text{ м}; R_{\text{в}} = 5,5 \text{ м};$$

$$R_{\text{л}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{в}} = 70,6 \text{ м}.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 8.

Результаты расчета проходимости ледокола «Ермак»
в сплошном льду

Таблица 8

Ледовое сопротивление, t	Толщина льда, m	Предел прочности льда, t/m	Скорость хода, $m/сек$	Ледовое сопротивление, t	Толщина льда, m	Предел прочности льда, t/m	Скорость хода, $m/сек$
26,3	0,4	50	1	80	0,79	20	1
52	0,6	50	1	80	0,77	50	1
87,5	0,8	50	1	80	0,74	100	1
84	0,8	20	1	60,3	0,6	50	2
92,5	0,8	100	1	77,6	0,6	50	3

По имеющимся натурным данным ледокол «Ермак» при максимальной тяге винтов $P_e = 80 t$ и скорости непрерывного хода около $v = 2$ узл. преодолевает сплошной лед толщиной около 0,8 м. Сравнение этих цифр с результатами расчета, приведенными в табл. 8, показывает достаточно хорошую сходимость натуральных и расчетных данных.

Как видно из табл. 8, наибольшее влияние на сопротивление сплошного льда движению судна оказывает толщина льда. Влияние предела прочности льда на изгиб сравнительно невелико.*

* Следует отметить, что в натуральных условиях сплошной ледяной покров характеризуется также торосистостью, разрушенностью и т. п. Способ учета этих характеристик льда при расчетах проходимости судна приводится в § 29.

Силы сопротивления при движении судна в битых льдах

§ 14. Особенности движения судна в битых льдах

Исследование движения судна в битых льдах имеет большое практическое значение, так как ледоколы и особенно транспортные суда ледового плавания большую часть навигации плавают в битых льдах.

Процесс движения судна в битых льдах довольно сложен, поэтому составить его строгое аналитическое описание не представляется возможным. Большинство исследований, посвященных этой проблеме, базируется на данных лабораторных и натуральных экспериментов.

Впервые испытания моделей судов в лабораторных условиях были проведены в 1939 г. В. С. Назаровым и А. Л. Костюковым [39]. Однако систематическое изучение движения судна в битых льдах с помощью модельных испытаний началось в 1949 г., по инициативе Л. М. Ногида [54]. Впоследствии модельными испытаниями в битых льдах занимались А. В. Бронников [8], О. В. Дубровин [25], А. Я. Рывлин [75] и др. Параллельно изучалось движение судна в битых льдах с помощью натурального эксперимента. Пионерами в этой области являются Я. Я. Гаккель [16], [17], Г. Е. Ратманов [72], А. Ф. Лактионов и В. В. Дремлюг [22].

Основная цель теоретических и экспериментальных исследований — создание расчетных зависимостей, которые позволили бы связать сопротивление движению судна в битых льдах с его скоростью, главными размерениями и формой обводов корпуса, а также с параметрами битого льда. В настоящее время установлено, что получать такие зависимости можно лишь на основе комплексного использования данных теоретических разработок, модельных и натуральных экспериментов.

В отличие от движения судна в сплошных льдах, для которого характерно разрушение льда корпусом, движение судна в различных видах битого льда происходит в основном за счет раздвигания и уплотнения льда. Величина составляющих сопротивления в этом случае зависит от протяженности льдин. Поскольку в естественных

условиях протяженность льдин изменяется в широких пределах, характер взаимодействия корпуса со льдом и соотношение составляющих сил сопротивления также существенно изменяются. Поэтому процесс движения судна во всех встречающихся на практике видах битого льда может быть описан только с помощью частных методик. При этом различают два случая движения судна в битых льдах: движение в мелкобитых льдах и движение в обломках полей и крупнобитых льдах.

Согласно существующей ледовой классификации, протяженность льдин, составляющих мелкобитый лед, не превышает 15—

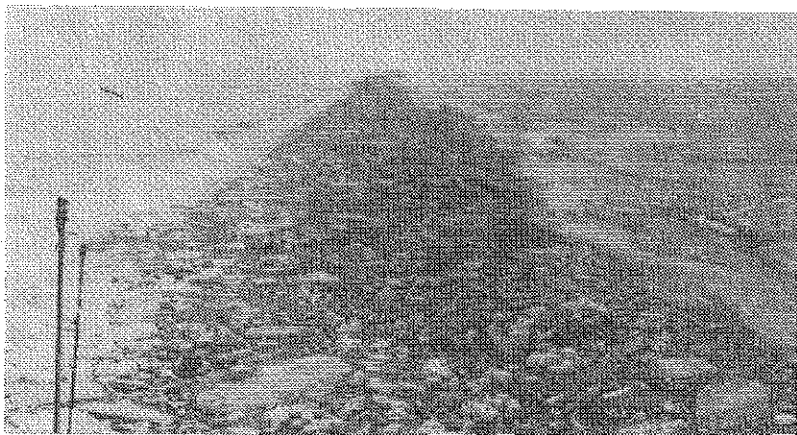


Рис. 43. Мелкобитый лед в канале, проложенном ледоколом в сплошных льдах.

20 м. Как упоминалось ранее (см. § 1), мелкобитый лед образуется либо за счет естественного разрушения (таяния) более крупных форм морского льда — так называемый «природный» мелкобитый лед (см. рис. 3 и 4), либо при взламывании льда ледоколом (рис. 43).

Наблюдения показывают, что взаимодействие корпуса со льдом при движении судна в мелкобитых льдах в канале за ледоколом существенно не отличается от взаимодействия, имеющего место при плавании в «природных» мелкобитых льдах.

Наиболее характерные детали этого взаимодействия следующие. При встрече носа судна с льдиной происходит соударение; затем форштевень частично притапливает и наклоняет льдину, которая получает толчок и соскальзывает вправо или влево от форштевня, следуя вдоль борта в частично притапленном состоянии. При этом льдина получает некоторую скорость в направлении, приблизительно перпендикулярном диаметральной плоскости судна. При значительном числе льдин происходит уплотнение

мелкобитого льда вблизи судна в результате раздвигания льдин бортами; кроме того, в движение вовлекаются соседние льдины, не соприкасающиеся непосредственно с обшивкой.

Размеры указанной зоны уплотнения льда зависят от его сплоченности. Следует отметить, что зона уплотненного и, следовательно, приведенного в движение судном льда наблюдается не только в направлении, перпендикулярном курсу судна, но отчасти и впереди форштевня, особенно в том случае, если притапленная форштевнем льдина не имеет возможности соскользнуть по борту и буксируется носом судна. Однако, как показывают наблюдения, проведенные в натуральных и лабораторных условиях, такие случаи встречаются сравнительно редко и могут не приниматься во внимание. Кроме указанного обстоятельства, образованию зоны уплотненного льда перед форштевнем судна способствует недостаточная ширина канала.

Картина, наблюдаемая при движении судна в мелкобитых льдах, существенно зависит от сплоченности. Так, при движении судна в разреженных льдах (менее 6 баллов) притапливания льдин бортами судна почти не наблюдается; зона льдин, приводимых в движение бортами, сравнительно невелика, а впереди форштевня вообще отсутствует. За кормой ледокола остается широкая (значительно превосходящая ширину судна) полоса воды, свободная от льда, которая длительное время не затягивается льдинами. При движении с большими скоростями наблюдается заметное волнообразование, мало отличающееся от картины волнообразования на свободной воде, но менее интенсивное.

При движении во льдах сплоченностью 6 баллов и выше наблюдается более интенсивное притапливание льдин бортами судна. Увеличивается количество льдин, приведенных в движение судном, и появляется зона уплотненного льда впереди форштевня. Волнообразование в сплоченных 8—10-балльных льдах выражено слабо, даже при значительных скоростях движения судна. Канал за судном в этом случае быстрее затягивается битым льдом.

Необходимо отметить также, что сплоченный мелкобитый лед, как правило, равномерно распределен по поверхности воды, чего нельзя сказать о разреженных льдах, которые в натуральных условиях распределяются по поверхности воды неравномерно. Плавание судов в разреженных мелкобитых льдах принципиально не отличается от плавания по свободной воде, поэтому изучение движения судна в разреженных льдах не представляет практического интереса.

Согласно классификации к крупнобитым льдам и обломкам полей относится дрейфующий лед с протяженностью льдин от 20 до 2000 м. Эта категория морского льда наиболее многообразна, и для ее описания требуется наибольшее число параметров (протяженность, толщина, прочность, сплоченность, сжатие, разрушенность и т. д.). Крупнобитый лед встречается на

трассах арктических морей во все периоды навигации, и его свойства изменяются в очень широких пределах.

Процесс движения судна в крупнобитом льду и обломках полей носит ярко выраженный нестационарный характер и может быть условно разделен на несколько характерных этапов.

1-й этап — движение ледокола до встречи с льдиной. Ледокол движется либо по свободной воде, либо в мелкобитом льду, заполняющем пространство между отдельными крупными льдинами. Движение судна на этом этапе может быть равномерным или равноускоренным.

2-й этап — удар ледокола о кромку льдины. Ледокол вступает в контакт с полем, в результате чего скорость его поступательного движения за короткий промежуток времени снижается. Судно, разрушая на небольшом участке кромку льда (сминая и прорезая ее форштевнем, аналогично тому, как это имеет место при движении в сплошных льдах), вползает на льдину, получая дифферент на корму. Сила взаимодействия между форштевнем и льдиной растет и может достигнуть значения, при котором произойдет либо полная остановка ледокола, либо полное или частичное разрушение льдины.

3-й этап — движение ледокола во льду — характеризуется общим разрушением льдины (в отличие от местного разрушения, характерного для предыдущего этапа). При этом ледокол силой веса носовой оконечности и упорным давлением винтов воздействует на поле. Во взаимодействие с льдом вступают участки бортов, прилегающие к форштевню. Поскольку борта в носовой оконечности имеют значительный наклон к вертикали, давление носа на льдину может быть разложено на горизонтальные (продольную и поперечные) и вертикальную составляющие. В зависимости от соотношения этих сил, размеров льдины и пределов прочности льда на срез, растяжение и изгиб наступает разрушение льдины в виде трещины, идущей от форштевня к одной из ее кромок (рис. 44), либо (под действием изгиба) в виде облома секторов на некотором расстоянии от борта. Нос ледокола опускается, его скорость достигает минимального значения. Возможны (и на практике чаще всего имеют место) различные комбинации указанных видов разрушения.

При наличии сквозной трещины ледокол, действуя как клин, продвигается вперед, раздвигая обломки поля, которые, следуя обводам бортов, расходятся в стороны. Скорость ледокола начинает возрастать.

После того как льдины оказываются раздвинутыми на расстояние, равное наибольшей ширине судна, снова начинается разгон ледокола, что соответствует рассмотренному выше 1-му этапу движения, и т. д.

Приведенное описание движения судна в крупнобитых льдах схематично. На практике, несомненно, будут иметь место некото-

рые отклонения, в особенности при различных неравномерностях ледяного покрова (в виде торосообразований, трещин, проталин и т. п.).

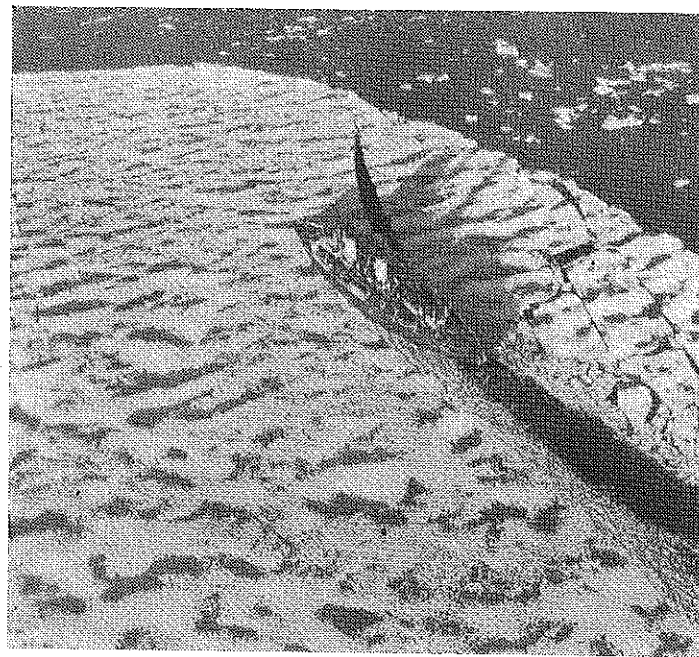


Рис. 44. Скалывание ледоколом кромки ледяного поля.

§ 15. Силы, действующие на судно. Условия подобия

В соответствии с рассмотренной картиной движения судна в битых льдах представляется возможным проанализировать силы ледового сопротивления и провести их классификацию. Последняя была подробно разработана Л. М. Ногидом, который показал, что при движении в битых льдах возникают те же силы, что и при форсировании сплошных льдов (см. § 5), однако количественное значение отдельных составляющих полного сопротивления резко изменяется [54]. Так, можно исключить составляющую сил сопротивления, связанную с разрушением льда, вследствие чего отпадает необходимость учитывать такие физико-механические характеристики льда, как предел прочности и модуль упругости.

Полное сопротивление движению судна R_d полагаем состоящим из следующих элементов:

— импульсивного сопротивления R_1 , обусловленного потерей кинетической энергии судна при ударах о льдины;

— диссипативных сил сопротивления R_2 , связанных с рассеиванием энергии движущегося судна, которые можно представить в виде суммы двух слагаемых: диссипативной составляющей, возникающей вследствие сопротивления воды раздвиганию льдин (R_2'), и диссипативной составляющей, обусловленной трением льдин друг о друга R_2'' ;

— сопротивления R_3 , вызванного деформацией льда при раздвигании и не зависящего от скорости, — назовем эту составляющую статическим (прямым) сопротивлением;

— сопротивления R_4 , обусловленного притапливанием и поворачиванием льдин, возникающим при этом волнообразованием и соответствующим изменением посадки судна;

— сопротивления воды движению судна $R_в$.

Таким образом, полное ледовое сопротивление судна при движении в мелкобитых льдах может быть представлено в виде

$$R_{л} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_в, \quad (73)$$

а чистое ледовое сопротивление

$$R_{лч} = R_{л} - R_в = R_1 + R_2 + R_3 + R_4. \quad (74)$$

Выводы, сделанные в § 5 относительно величины составляющей сопротивления воды $R_в$ при движении судна в сплошных льдах, полностью распространяются и на случай движения в мелкобитых льдах. Иными словами, величина составляющей сопротивления воды движению судна при движении в мелкобитых льдах может быть подсчитана обычными методами, применяемыми при расчетах ходкости на свободной воде.

Существенную роль при движении судна в мелкобитых льдах играют силы «сухого» трения, возникающего между бортом и льдинами. Эти силы, пропорциональные соответствующим давлениям льда, следует принимать во внимание при составлении выражений для расчета составляющих сил ледового сопротивления (см. § 6).

Анализ и экспериментальные исследования сил, действующих на судно при его движении в мелкобитых льдах, позволили Л. Н. Ногиду [54] установить, что для совместного моделирования составляющих сил чистого ледового сопротивления в мелкобитых льдах достаточно выполнить условия

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}} = \text{idem},$$

$$f_r = \text{idem},$$

где Fr — число Фруда;

f_r — коэффициент сухого трения.

При этом имеется в виду, что коэффициент восстановления при ударе судна о льдины $e_1 = 0$. Это допущение подтверждается сле-

циальными экспериментами, которые показывают, что податливостью борта в процессе контакта его со льдом можно пренебречь и удар корпуса судна о льдину (так же как и соударение льдин между собой) считать неупругим.

При движении судна в крупнобитых льдах возникают те же силы, что и при ходе ледокола в сплошных льдах. Однако количественное соотношение между составляющими ледового сопротивления будет иным. Поскольку движение судна в крупнобитых льдах отличается большим многообразием и относится к числу нестандартных процессов, его моделирование встречает непреодолимые трудности и в настоящее время не осуществляется. Общий теоретический анализ движения судна в крупнобитых льдах также пока не разработан. Поэтому для расчета сопротивления судна в таких льдах могут быть использованы лишь приближенные эмпирические формулы, полученные на основании обобщения материалов натуральных испытаний (см. § 25).

§ 16. Модельные эксперименты в битых льдах

Модельные испытания в мелкобитых льдах проводятся в бассейнах ЛКИ и ААНИИ. Общая методика таких испытаний не отличается от принятой при обычных испытаниях моделей судов в бассейнах гравитационного типа, в которых модель приводится в движение с помощью падающего груза. Иначе говоря, заданной величиной является сопротивление движению модели, а в процессе эксперимента определяется среднее значение скорости ее движения. Буксировка моделей осуществляется в упряжке, обеспечивающей свободу дифферентовки и препятствующей рысканию.

Характер изменения скорости модели — один из основных показателей, определяющих качество и точность эксперимента. По виду кривых изменения скорости в процессе пробега модели можно судить о повторяемости результатов опыта, равномерности движения модели и ряде других требований, предъявляемых к эксперименту.

В соответствии с условиями подобия, приведенными в § 15, модели судов и битого льда должны удовлетворять требованиям геометрического подобия и иметь одинаковые с натурными удельные веса и коэффициенты сухого трения о лед. В целях соблюдения указанных требований модели судов могут изготавливаться из парафина или дерева.

Среда для испытаний моделей («моделированный» мелкобитый лед) приготавливается либо из парафина (бассейн ЛКИ), либо из натурального льда (бассейн ААНИИ).

Удельный вес парафинового искусственного битого льда 0,85—0,90 г/см³. Коэффициенты трения парафина по сухому и влажному парафину, крашеному дереву такой же шероховатости, как поверхность бортов модели, составляют: динамический — от 0,09 до 0,14, статический — от 0,16 до 0,38.

Первоначально искусственный мелкобитый лед состоял из льдин произвольной формы и величины — такой лед получил название «нерегулярного» (рис. 45). С 1950 года испытания в моде-



Рис. 45. Испытание модели в искусственном «нерегулярном» мелкобитом льду.

лированных парафиновых битых льдах начали проводиться в так называемых «регулярных» льдах (рис. 46). В этом случае льдинам придается «стандартная» шестигранная форма. Таким образом,

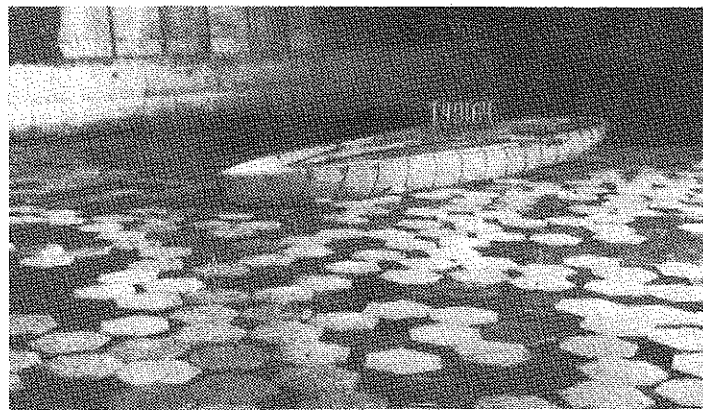


Рис. 46. Испытание модели в искусственном «регулярном» мелкобитом льду.

неизбежная при проведении экспериментальных исследований идеализация среды распространяется также на конфигурацию и размеры льдин в плане. Заданная сплоченность мелкобитого льда

парафинового состава достигается загрузкой в бассейн определенного количества искусственного льда.

Мелкобитый лед готовится из ледяной пластины, замороженной в бассейне (рис. 47). Для создания требуемой сплоченности поля соответствующая часть ледяной пластины удаляется из бассейна. Оставшаяся часть распиливается на куски заданных размеров примерно квадратной формы. Поскольку при этом некоторая часть льдин разламывается, приготовленная таким путем ледовая среда должна быть, строго говоря, отнесена к катего-

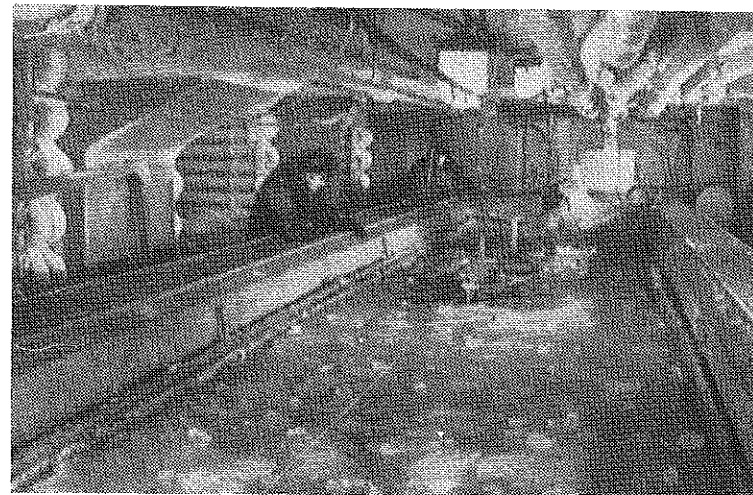


Рис. 47. Натуральный мелкобитый лед в опытовом ледовом бассейне.

рии нерегулярной, однако размеры и форма большей части льдин оказываются более или менее одинаковыми.

Техника испытаний моделей в мелкобитых льдах парафинового и натурального составов в основном одинакова, причем наибольшие затруднения вызывает воспроизведение (разравнивание) перед каждым пробегом битого льда на всей площади бассейна. Качество воспроизведения среды непосредственно влияет на повторяемость результатов опытов и, следовательно, на точность эксперимента в целом.

Сравнительный анализ результатов испытаний в нерегулярных и регулярных парафиновых битых льдах показывает, что точность испытаний в нерегулярных льдах в силу ряда причин (трудность воспроизведения повторяемости среды, затруднения в выборе среднего значения скорости и др.) невысока и возможная ошибка может достигать величины порядка 30%. Это ограничивает возможность использования результатов испытаний в нерегулярных

Параметры моделей судов, подвергнутых испытаниям в мелкобитых льдах

Номер модели	Наименование модели-прототипа	Водоизмещение D , кг	Масштаб λ	Отношение L/B	Отношение B/H	Коэффициент обшей подпруги δ	Коэффициент подпруги носовой ветви $K_{ВЛ} \sigma_n$	Тангенс угла входа носовой ветви $KB_{ВЛ} \operatorname{tg} \alpha_0$
1	Ледокол типа «Сибирь»	72,0	1 : 50	4,4	2,68	0,5	0,660	0,404
2		72,0	1 : 50	5,5	2,68	0,5	0,695	0,376
3		72,0	1 : 50	3,5	2,68	0,5	0,654	0,464
4		72,0	1 : 50	4,4	2,00	0,5	0,693	0,470
5		72,0	1 : 50	4,4	3,50	0,5	0,633	0,350
6		140,8	1 : 40	4,4	2,68	0,5	0,660	0,404
7		41,7	1 : 60	4,4	2,68	0,5	0,660	0,404
8		140,8	1 : 40	4,4	2,68	0,45	0,650	0,380
9		140,8	1 : 40	4,4	2,68	0,55	0,670	0,410
10		370,0	1 : 29	4,4	2,68	0,50	0,660	0,404
11		9,0	1 : 100	4,4	2,68	0,50	0,660	0,404
12	Ледокол типа «Унид»	82,8	1 : 40	4,0	2,41	0,468	0,720	0,580
13	Ледокол «Илья Муромец»	87,5	1 : 28	3,7	2,30	0,412	0,670	0,396
14	Транспортное судно ледового плавания типа «Амгуема»	87,1	1 : 50	6,65	2,47	0,638	0,770	0,427
15	Ледокол «Ермак»	15,9	1 : 80	4,3	2,83	0,532	0,715	0,424
16		29,7	1 : 65	4,3	2,83	0,532	0,715	0,424
17		65,2	1 : 50	4,3	2,83	0,537	0,700	0,466
18		65,2	1 : 50	3,8	2,83	0,537	0,700	0,466
19		65,2	1 : 50	5,1	2,83	0,542	0,740	0,364
20	Дизель-электроход «Лена»	87,4	1 : 50	6,6	2,47	0,647	0,770	0,427

льдах. Точность испытаний в регулярных льдах значительно выше: возможная погрешность не превышает 10—15%. Точность испытаний в мелкобитых льдах натурального состава примерно такая же, как в регулярных парафиновых льдах.

Следует отметить, что общая картина, наблюдаемая при движении модели в натуральных и парафиновых регулярных льдах примерно одинакова и в целом удовлетворительно воспроизводит условия, имеющие место при движении натурного судна в мелкобитых льдах.

В зависимости от поставленной задачи результаты модельных испытаний в мелкобитых льдах могут быть использованы:

— для проверки законов моделирования или выведенных теоретическим путем закономерностей и определения входящих в них эмпирических коэффициентов;

— для сравнительной оценки ледопроеходимости проектируемых судов в мелкобитых льдах.

— для решения ряда специальных задач, связанных с работой движительного комплекса, гидроомывающих устройств и т. п. (в этом случае практикуются испытания самоходных моделей).

В табл. 9 в качестве примера приведен перечень параметров нескольких моделей судов, подвергнутых систематическим испытаниям в мелкобитых льдах.

Аналитическое выражение сопротивления при движении судна в мелкобитых льдах

§ 17. Постановка задачи

Сложность и многообразие процессов, которые определяют сопротивление движению судна в мелкобитых льдах, не позволяют аналитически строго описать это явление. Поэтому расчетные зависимости, связывающие сопротивление судна в битых льдах со скоростью движения, размерениями и параметрами льда создавались, как правило, на основании эмпирических данных, полученных в натуре и опытовых бассейнах.

Все эти зависимости можно разделить на две группы. К первой относятся эмпирические формулы и графики, выведенные на основании обработки натурных данных, ко второй — эмпирические зависимости базирующиеся на результатах модельных испытаний.

В 1933—1937 гг. были сделаны первые попытки изучения проходимости судов во льдах [16], [17]. Я. Я. Гаккель предложил метод оценки проходимости льда, приняв за критерий проходимости потерю скорости при движении судна во льдах по сравнению со скоростью хода по свободной воде. Отметив, что этот показатель зависит от типа судна, автор обобщает данные для транспортных судов с мощностью энергетической установки 1000—2500 л. с. и скоростью хода по свободной воде около 11 узл. Уменьшение скорости движения судна во льду считается пропорциональным сплоченности льда. Для определения этой величины Я. Я. Гаккель измерил скорость движения во льду пароходов «Малыгин» (около 280 измерений в различных льдах) и «Моссовет» (около 60 измерений). На основании обработки большого количества натурных материалов были получены данные о средней проходимости во льдах различных морей Арктики.

Вслед за Я. Я. Гаккелем непосредственные наблюдения за проходимостью во льдах Арктики были проведены в 1935 г. Г. Е. Ратмановым с борта ледокола «Красин» [72]. Результаты испытаний представлены в виде графиков зависимости скорости хода от сплоченности льда (в баллах) при заданном режиме работы энергетической установки. Проведенная работа позволила автору сделать некоторые выводы о ледоходимости ледокола «Красин».

В 1944 г. А. Ф. Лактионов и В. В. Дремлюг [22] сделали попытку определить скорость движения различных типов судов в зависимости от состояния, вида льда и метеорологических условий на трассе Северного морского пути, основываясь на записях в судовых журналах, журналах ледовых наблюдений и рейсовых донесениях. Обобщив данные по 38 судам, авторы встретились с естественной в таких случаях разнородностью и некачественностью материала (ошибки, субъективность при определении сплоченности льда, неполнота наблюдений и т. п.). В результате обработки материала авторы получили эмпирическую формулу для определения скорости движения некоторых судов в зависимости от сплоченности льда. Было отмечено, что проходимость судна во льдах зависит не только от сплоченности, но и от вида льда, а также характера движения судна.

Натурные наблюдения за проходимостью судов в различных ледовых условиях (в том числе в битых льдах) в 1947—1952 гг. провел В. Л. Цуриков [85].

Приведенные во всех этих работах методы расчета проходимости судна составлены без учета видов битого льда и, следовательно, без учета характера движения судна и взаимодействия корпуса со льдом. Кроме того, эти работы базируются на натурных данных, полученных в основном с помощью визуальных наблюдений.

Из иностранных работ, затрагивающих вопросы расчета сопротивления битого льда движению судна, нам известна лишь работа Милано [105], в которой приводится эмпирическая зависимость для расчета скорости движения ледокола при его разгоне в канале, заполненном мелкобитым льдом, а также графики для определения входящих в формулу коэффициентов. Согласно этой зависимости, скорость движения ледокола при разгоне в канале зависит от параметров ледокола (водоизмещения и тяги винтов), длины его разгона и не зависит от характеристик льда. Последнее обстоятельство вызывает сомнение в применимости формулы для расчета скорости движения судов в канале мелкобитого льда.

Впервые эмпирическую формулу для расчета ледового сопротивления судна в мелкобитых льдах, полученную на основании данных модельных испытаний в «регулярных» моделированных льдах, предложил Л. М. Ногид:

$$R_{лч} = A_{лч} k_{лч} D \left(\frac{L}{B} \right)^{1,25} \left(\frac{B}{T} \right)^{0,5} Fr^2, \quad (75)$$

где $A_{лч} = f(r, Fr)$ — коэффициент, зависящий от протяженности льда и относительной скорости судна;

$k_{лч} = f(h, s, Fr)$ — коэффициент, зависящий от сплоченности и толщины льда и относительной скорости судна.

Численные значения коэффициентов $A_{лч}$ и $k_{лч}$ определяются с помощью графиков.

Другая формула для расчета ледового сопротивления ледокола при движении в мелкобитых льдах получена на основе более обширных материалов модельных испытаний:

$$R_{лч} = \gamma_B L^m B^n r^k h^p (d + c Fr^q), \quad (76)$$

где γ_B — удельный вес воды;
 m, n, k, p, q — показатели степени, зависящие от сплоченности льда;
 c — безразмерный коэффициент, зависящий от сплоченности льда;
 d — безразмерный коэффициент, зависящий от сплоченности и ширины канала битого льда.

При сплоченности льда, равной, например, 8 баллам, и неограниченной ширине канала формула (76) принимает вид

$$R_{лч} = \gamma_B L^{0,5} B^{0,25} r^{1,2} h^{1,3} (0,4 + 8,0 Fr^{1,35}). \quad (77)$$

Для расчета сопротивления судов ледового плавания при движении в мелкобитых льдах А. В. Бронниковым [8] предложена формула

$$R_{лч} = 977 Fr^{1,42} \left(\frac{D}{10920} \right)^s \cdot \left(\frac{t}{0,8} \right)^m \cdot \left(\frac{B}{8} \right)^n \cdot \left(\frac{d}{7,3} \right)^p \cdot \left(\frac{6,6}{L:B} \right)^q \times \\ \times \left(\frac{0,65}{\delta} \right)^r \left(\frac{15}{B_K : B} \right)^k, \quad (78)$$

где t — толщина льда;
 B — сплоченность льда;
 d — протяженность льда;
 B_K — ширина канала;

$$s = 1 - \frac{m+p}{3};$$

$$m = 0,267 \cdot Fr^{-0,67};$$

$$n = 0,785 Fr^{-0,493};$$

$$p = 1,65 Fr^{0,42} + 0,25;$$

$$q = 1,93 Fr^{0,42} - 0,60;$$

$$r = 32,4 Fr^{2,27} + 1,25;$$

$$k = 0,034 Fr^{-1,31}.$$

Выражения (75), (76) (для ледоколов) и (78) (для судов ледового плавания) чисто эмпирические и по сути дела представляют собой

комбинации степенных функций параметров льда и судна, причем показатели степени назначались в некоторых случаях из умозрительных или мало обоснованных соображений.

Общий недостаток этих эмпирических выражений заключается в том, что они неполно отражают физический смысл явлений, имеющих место при движении судна в мелкобитых льдах, и, следовательно, неполно учитывают влияние ряда параметров судна и льда на величину сопротивления. Необходимо всегда помнить, что эти формулы относятся к конкретному типу судна и определенным ледовым условиям, в которых производились испытания, и поэтому не являются универсальными.

Для вывода более общих зависимостей нами принят комбинированный «полуэмпирический» метод, позволяющий охватить все основные черты физики рассматриваемого явления. С этой целью предварительно вводится ряд упрощающих предположений и допущений как в отношении движущегося объекта (судна), так и сопротивляющейся среды (мелкобитого льда). Затем составляется условная схема, позволяющая описать аналитически рассматриваемое явление с учетом основных определяющих его факторов и довести решение до простых расчетных формул. В эти формулы входят постоянные безразмерные коэффициенты, отражающие условность сделанных допущений и неточности принятой схемы. Численные значения этих коэффициентов могут быть определены эмпирическим путем по данным модельных и натурных испытаний, причем стабильность коэффициентов при изменении параметров судна и льда может служить критерием того, в какой степени полученные формулы отражают рассматриваемое явление. Аналогичный метод находит широкое применение в различных исследованиях; в частности, он был предложен Ю. А. Шиманским при создании формул для расчета сопротивления ледокола в сплошных льдах.

Движение судна в разреженных мелкобитых льдах не представляет практического интереса, поэтому при выводе расчетных формул для определения ледового сопротивления рассматривается только движение судна в сплоченных мелкобитых льдах. К таким льдам можно отнести мелкобитые льды сплоченностью 6 баллов и выше.

Будем полагать судно симметричным относительно диаметральной плоскости, а его борта — вертикальными по всей длине. Последнее допущение равносильно пренебрежению составляющей сопротивления, обусловленной работой, затрачиваемой на притапливание и поворачивание льдин бортом. Есть основание полагать, что последнее допущение не внесет существенных погрешностей, поскольку величина указанной составляющей в общем балансе сопротивления невелика (см. § 22). Таким образом, рассматриваемая задача становится плоской, т. е. все перемещения происходят в плоскости xOy , совмещенной с поверхностью воды (рис. 48).

Движение судна во льдах будем считать установившимся с постоянной скоростью $v = \text{const}$. Оси координат xOy свяжем с судном таким образом, чтобы направление движения совпадало с положительным направлением оси Ox . Удары судна о льдины будем считать неупругими. Мелкобитому льду приписываем свойство однородности, изотропности и сплошности. Согласно первому свойству, средняя плотность мелкобитого льда в невозмущенном состоянии постоянна. Изотропность означает, что свойства среды не зависят от произвольно выбранного направления в плоскости xOy . Свойство сплошности позволяет считать, что контакт льда с судном происходит по всей длине носовой ветви ватерлинии от форштевня до миделя.

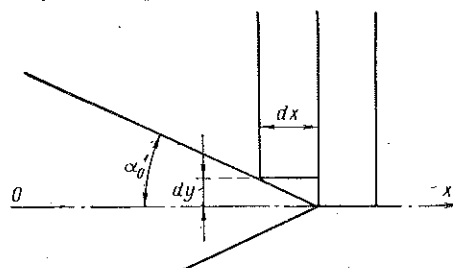


Рис. 48. Схема взаимодействия элемента льда с судном в районе форштевня.

В корму от миделя полагаем этот контакт отсутствующим, что соответствует фактической картине, наблюдаемой в натуре и в бассейне при движении судна в мелкобитых льдах. Некоторое отступление от указанной картины имеет место при движении в десятибалльном льду, особенно в условиях опытового бассейна, когда сказываются граничные условия (ширина канала).

Принятые гипотезы справедливы лишь в том случае, если размеры отдельных льдин (протяженность) малы по сравнению с размерами судна. Практически можно считать, что это требование удовлетворяется при реальных размерах натуральных мелкобитых льдов и размерениях морских транспортных судов и ледоколов. Указанное требование можно распространить также на все проведенные в бассейнах испытания моделей в регулярных парафиновых льдах и льдах натурального состава.

Как показано в § 14, при движении в сплоченных мелкобитых льдах возмущение среды происходит в основном в направлении, перпендикулярном к диаметральной плоскости судна, и частично в направлении движения судна. Результаты многочисленных наблюдений, а также специально проведенные расчеты свидетельствуют о том, что перемещения льдин в направлении движения судна малы по сравнению с соответствующими поперечными перемещениями и с учетом приближенного полуэмпирического характера настоящего исследования эти перемещения могут не приниматься в рассмотрение. Поэтому будем полагать, что льдины, вошедшие в контакт с бортом, перемещаются только в направлении, перпендикулярном движению судна. Массу льда, приводимую в движение перед носом судна, будем учитывать отдельно, путем введения сосредоточенной силы, приложенной к форштевню. При таком подходе к решению задачи применяемый метод будет

эквивалентен обычному методу, используемому при решении прикладных задач механики сплошных сред и основанному на аппроксимации линий тока. Аналогичный прием использовался, например, при изучении установившегося движения сыпучей среды, когда линии тока задавались некоторыми кривыми, выбираемыми на основании определенных соображений экспериментального, а в ряде случаев умозрительного характера.

Для вывода аналитических выражений составляющих сил ледового сопротивления выделим двумя сечениями, параллельными оси Oy , элемент мелкобитого льда шириной dx (рис. 48) и рассмотрим его взаимодействие с корпусом судна, движущегося в направлении оси Ox с постоянной скоростью v . Масса такого элемента

$$dm = \bar{a}\rho h dx, \quad (79)$$

где h — толщина льда;

ρ — массовая плотность льда;

\bar{a} — некоторый коэффициент, зависящий главным образом от сплоченности и протяженности льдин (определяется по данным модельных испытаний).

При принятой классификации сил полная величина контактного усилия, действующего со стороны элемента льда на судно, будет складываться из сил инерции раздвигаемого элемента (импульсивное сопротивление), сил сопротивления воды движению элемента и сил трения элементов поля друг о друга (диссипативная составляющая сопротивления), а также упругих сил сжатия льда, не зависящих от скорости движения судна (статическая составляющая).

Рассмотрим каждую из перечисленных составляющих сопротивления.

§ 18. Импульсивное сопротивление

При движении судна участки корпуса, непосредственно прилегающие к форштевню, вступают в контакт с элементами льда, которые до этого момента были неподвижны, и вследствие конечного угла входа ватерлинии сразу же получают в направлении оси Oy скорость

$$v_y = v \operatorname{tg} \alpha'_0.$$

где α'_0 — угол входа ватерлинии.

Таким образом, в районе форштевня на элементы льда действует импульс, сообщающий им поступательное движение. Этому импульсу соответствует сосредоточенная сила, приложенная к судну в районе форштевня P_n и направленная нормально к борту (рис. 49).

Для определения этой силы воспользуемся законом изменения количества движения в направлении оси Oy , который для единичного элемента льда запишется в виде

$$P_y dt = dm v_y = \bar{a} \rho_n \operatorname{tg} \alpha'_0 h dx,$$

где P_y — сила, действующая на элемент в направлении оси Oy .

Равная ей по величине, но противоположная по знаку сила $P_{yn} = -P_y$ будет представлять проекцию нормальной силы P_n на ось Oy .

Имея в виду, что $\frac{dx}{dt} = v$ и $v_y = v \operatorname{tg} \alpha'_0$, получим

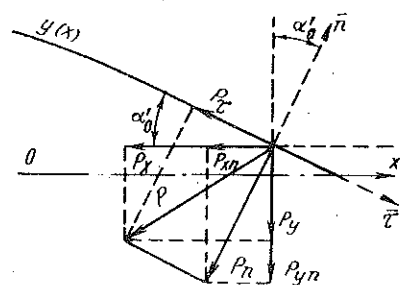


Рис. 49. Схема усилий, приложенных к борту при движении судна во льдах.

\bar{n} — направление нормали к борту;
 $\bar{\tau}$ — направление касательной к борту.

где $P_\tau = P_n f_\tau$ — касательное усилие;
 f_τ — коэффициент сухого трения льда о борт судна.

Напомним, что под силами сухого трения мы понимаем силы трения, не зависящие от скорости движения судна (в отличие от сил гидравлического трения). Как показали результаты специальных исследований коэффициентов трения парафина и льда, проведшихся при наличии жидкой смазки (воды) и без нее, при достаточно больших удельных давлениях, возникающих во время движения судна во льдах, силы трения не зависят от наличия воды и могут быть отнесены к категории сил сухого трения (см. § 2).

Проектируя на ось Ox нормальное и касательное усилия (рис. 49), получаем

$$P_x = P_n \sin \alpha'_0 + P_\tau \cos \alpha'_0 = P_n (\operatorname{tg} \alpha'_0 + f_\tau) \cos \alpha'_0.$$

Подставив значение P_n , согласно формуле (81) будем иметь

$$P_x = -\bar{a} \rho_n v^2 h \operatorname{tg} \alpha'_0 (\operatorname{tg} \alpha'_0 + f_\tau). \quad (82)$$

Таким образом, составляющая импульсивного сопротивления, возникающая с обоих бортов у форштевня судна, будет

$$R'_1 = 2P_x = -2\bar{a} \rho_n v^2 h \operatorname{tg} \alpha'_0 (\operatorname{tg} \alpha'_0 + f_\tau), \quad (83)$$

где знак минус указывает, что сопротивление R'_1 направлено против движения судна.

При дальнейшем движении вдоль борта судна элемент льда за время dt проходит в направлении оси Ox путь dx , со скоростью v_x ,

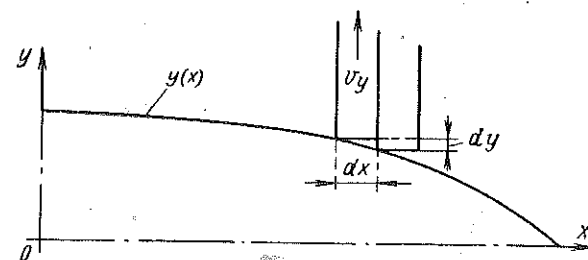


Рис. 50. Схема взаимодействия элемента льда с бортом судна.

а в направлении оси Oy — путь dy со скоростью v_y (рис. 50). Тогда

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} = -v, \\ v_y &= \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \frac{dx}{dt} = -v \frac{dy}{dx} = -v y'(x). \end{aligned} \right\} \quad (84)$$

Ускорение элемента льда

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = -v \frac{d^2y}{dx^2} \frac{dx}{dt} = v^2 y''(x). \quad (85)$$

Если ватерлиния выпуклая, то первая производная $y'(x)$ и вторая $y''(x)$ отрицательны и, следовательно, v_y будет положительной, а a_y — отрицательным.

Составляющая элементарного усилия вдоль оси Oy , приложенная к корпусу судна, равна силе инерции элемента льда

$$dP_y = -a_y dm = -v^2 y''(x) dm = -\bar{a} \rho_n v^2 h y''(x) dx. \quad (86)$$

Поступая так же, как и при рассмотрении импульсивного сопротивления у форштевня, получим выражение для элементарного импульсивного сопротивления, отнесенного к борту (с учетом силы сухого трения):

$$dR'_1 = -\rho_n \bar{a} v^2 h y''(x) [f_\tau - y'(x)] dx. \quad (87)$$

Чтобы определить составляющую импульсивного сопротивления, отнесенную к бортам, необходимо проинтегрировать выражение (87) по длине судна от форштевня до начала цилиндрической вставки и результат удвоить:

$$R_1'' = 2 \int_0^{L_H} dR_1'' = -2 \int_0^{L_H} \rho_n \bar{a} v^2 h y''(x) [f_T - y'(x)] dx,$$

где L_H — длина носового заострения судна по КВЛ от форштевня до начала цилиндрической вставки.

Замечая, что

$$\int_0^{L_H} y''(x) dx = -y'(x) \Big|_0^{L_H} = -\operatorname{tg} \alpha'_0,$$

$$\int_0^{L_H} y''(x) y'(x) dx = [y'(x)]^2 \Big|_0^{L_H} - \int_0^{L_H} y'(x) y''(x) dx,$$

или

$$\int_0^{L_H} y''(x) y'(x) dx = \frac{1}{2} [y'(x)]^2 \Big|_0^{L_H} = \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha'_0}{2},$$

получим

$$R_1'' = -2\rho_n \bar{a} v^2 h \left[-f_T \operatorname{tg} \alpha'_0 - \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha'_0}{2} \right]. \quad (88)$$

Складывая (83) и (88), получим окончательную формулу для импульсивного сопротивления:

$$R_1 = R_1' + R_1'' = 2\rho_n \bar{a} v^2 h \left(\operatorname{tg}^2 \alpha'_0 + \operatorname{tg} \alpha'_0 f_T - f_T \operatorname{tg} \alpha'_0 - \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha'_0}{2} \right) = -\bar{a} \rho_n h v^2 \operatorname{tg}^2 \alpha'_0. \quad (89)$$

Знак минус в формуле (89) свидетельствует о том, что сопротивление направлено в сторону, противоположную движению судна. Независимость инерционной составляющей от сил трения является следствием принятых допущений о характере и траекториях раздвижения льдин судном. Можно, однако, показать, что учет сил трения в рассматриваемом случае приведет к появлению дополнительного сопротивления, величина которого будет иметь второй порядок малости.

Коэффициент \bar{a} , входящий в формулу (89), зависит от протяженности льдин и сплоченности льда и измеряется в метрах.

Учитывая зависимость импульсивных сил от протяженности отдельных льдин и исходя из условий размерности, можно записать

$$\bar{a} = \bar{k}_3 r, \quad (90)$$

где \bar{k}_3 — безразмерный коэффициент, зависящий от сплоченности льда;

r — протяженность льдин.

Подставляя выражение (90) в формулу (89) и переходя от абсолютных скоростей движения судна к относительным, получаем

$$R_1 = -\bar{k}_3 \gamma_L r h L \operatorname{tg}^2 \alpha'_0 \operatorname{Fr}^2, \quad (91)$$

где

L — длина судна;

γ_L — удельный вес льда;

α'_0 — угол входа ватерлинии;

Fr — относительная скорость судна.

§ 19. Диссипативное сопротивление

Как указывалось выше, диссипативное сопротивление состоит из двух слагаемых: сопротивления воды раздвиганию элементов ледяного поля, и сопротивления, возникающего при взаимодействии льдин друг с другом.

Рассмотрим каждую составляющую отдельно.

Будем полагать, что первая составляющая диссипативного сопротивления пропорциональна первой степени скорости раздвижения льдин v_y . Тогда, учитывая, что $v_y = v y'(x)$, получим выражение для проекции элементарной силы сопротивления на ось Oy :

$$dP_y = \bar{b} v y'(x) dx.$$

Проекция этой силы на ось Ox с учетом сил сухого трения (см. § 18)

$$dP_x = \bar{b} v y'(x) [f_T - y'(x)] dx. \quad (92)$$

Интегрируя выражение (92) по длине судна от форштевня до начала цилиндрической вставки и удваивая результат, получаем

$$R_2 = 2 \int_0^{L_H} dR_2 = 2\bar{b} v \int_0^{L_H} y'(x) [f_T - y'(x)] dx. \quad (93)$$

Для первого интеграла имеем

$$\int_0^{L_H} y'(x) f_T dx = f_T y(x) \Big|_0^{L_H} = -\frac{B}{2} f_T.$$

Для вычисления второго интеграла используем способ интегрирования по частям и теорему о среднем:

$$\int_0^{L_n} [y'(x)]^2 dx = y'(x) y'(x) \Big|_0^{L_n} - \int_0^{L_n} y(x) y''(x) dx;$$

$$-\int_0^{L_n} y(x) y''(x) dx = -y(\xi) \int_0^{L_n} y''(x) dx =$$

$$= -y'(x) \Big|_0^{L_n} y(\xi) = \operatorname{tg} \alpha'_0 y(\xi).$$

Значение $y(\xi)$ определим из условия равенства площадей

$$L_n y(\xi) = \alpha_n \frac{B}{2} L_n,$$

что дает

$$y(\xi) = \alpha_n \frac{B}{2}.$$

После подстановки значения интеграла в формулу (93) получим

$$R'_2 = -\bar{b}vB(f_\tau + \alpha_n \operatorname{tg} \alpha'_0), \quad (94)$$

где α_n — коэффициент полноты носовой ветви ватерлинии.

Размерность коэффициента \bar{b}

$$[\bar{b}] = \frac{m}{m^2} \operatorname{сек} = \frac{m \cdot \operatorname{сек}^2}{m^4}.$$

Известно (см., например, [42] и [80]), что при движении льдины по поверхности воды ее сопротивление можно считать пропорциональным площади льдины в плане r^2 , а коэффициент сопротивления пропорциональным отношению среднего размера льдины r к ее толщине h .

Тогда, учитывая сказанное, а также соблюдая размерность, можем записать

$$b' = \bar{k}'_2 \frac{\gamma_n r h}{\sqrt{gL}},$$

где \bar{k}'_2 — некоторый безразмерный коэффициент, зависящий от сплоченности льда.

Обозначив

$$\frac{v}{\sqrt{gL}} = \operatorname{Fr},$$

получим выражение для первой диссипативной составляющей сопротивления:

$$R'_2 = -\bar{k}'_2 \gamma_n r h B (f_\tau + \alpha_n \operatorname{tg} \alpha'_0) \operatorname{Fr}. \quad (95)$$

При выводе выражения для второй диссипативной составляющей сопротивления судна, обусловленной трением льдин друг о друга и пропорциональной относительной скорости раздвижения элементов льда (как и в случае, рассмотренном в § 18), следует учитывать, что вследствие конечной величины угла входа ватерлинии α'_0 элемент поля сразу получает скорость вдоль оси Oy : $-v_y = v \operatorname{tg} \alpha'_0$.

Проекция на ось Oy соответствующей диссипативной силы, приложенной у форштевня с одного борта, будет

$$P_y = -\bar{c}v \operatorname{tg} \alpha'_0, \quad (96)$$

где \bar{c} — коэффициент сопротивления.

При дальнейшем продвижении элемент льда действует на борт судна с силой, пропорциональной относительной скорости раздвижения элементов льда. Проекция этой силы на ось Oy будет

$$dP_y = \bar{c} \frac{dv_y}{dx} dx,$$

или

$$dP_y = -\bar{c}v y''(x) dx. \quad (97)$$

Используя зависимости (96) и (97), можно получить выражение для второй составляющей диссипативного сопротивления с учетом силы трения:

$$R''_2 = -2\bar{c}v \operatorname{tg} \alpha'_0 (\operatorname{tg} \alpha'_0 + f_\tau) - 2\bar{c}v \int_0^{L_n} y''(x) \times$$

$$\times [f_\tau - y'(x)] dx = \bar{c}v \operatorname{tg}^2 \alpha'_0, \quad (98)$$

где \bar{c} — коэффициент, имеющий размерность $\frac{m \cdot \operatorname{сек}}{m} = \frac{m \cdot \operatorname{сек}}{m} \cdot \frac{m^3}{m^3}$.

Сила взаимодействия льдин друг с другом пропорциональна площади зоны контакта rh , а также характерному размеру судна, в качестве которого может быть принята, например, ширина судна B .

Тогда можно написать

$$\bar{c} = \bar{k}''_2 \gamma_n \frac{rhB}{\sqrt{gL}},$$

где \bar{k}''_2 — некоторый безразмерный коэффициент, зависящий от сплоченности льда.

Окончательно для второй составляющей диссипативного сопротивления будем иметь

$$R_2'' = -\bar{k}_2'' \gamma_n r h B \operatorname{tg}^2 \alpha_0' \operatorname{Fr}. \quad (99)$$

Полную диссипативную силу получим, складывая (99) и (95):

$$R_2 = R_2' + R_2'' = -\gamma_n r h B [\bar{k}_2' (f_\tau + \alpha_n \operatorname{tg} \alpha_0') + \bar{k}_2'' \operatorname{tg}^2 \alpha_0'] \operatorname{Fr}. \quad (100)$$

Определение коэффициентов \bar{k}_2' и \bar{k}_2'' , входящих в выражение (100), связано с большими трудностями. Однако для большинства транспортных судов и ледоколов с достаточной степенью точности можно принять

$$\frac{f_\tau + \alpha_n \operatorname{tg} \alpha_0'}{2} \simeq \operatorname{tg}^2 \alpha_0'. \quad (101)$$

В табл. 10 приводятся численные значения правой и левой частей выражения (101) для различных типов ледоколов и судов

Таблица 10

Значения входящих в формулу (101) параметров

Параметр	Название судна					
	«Ермак»	«Сибирь»	«Капитан Белоусов»	«Илья Муромец»	«Амгуема»	«Лена»
$\frac{f_\tau + \alpha_n \operatorname{tg} \alpha_0'}{2}$	0,20	0,18	0,26	0,18	0,20	0,20
$\operatorname{tg}^2 \alpha_0'$	0,18	0,163	0,33	0,16	0,19	0,185

ледового плавания; коэффициент трения $f_\tau = 0,1$ принят, согласно данным § 2. Из табл. 10 видно, что принятое допущение не приводит к существенной погрешности в выражении для диссипативной силы, которая теперь может быть записана в виде

$$R_2 = -\bar{k}_2 \gamma_n r h B (f_\tau + \alpha_n \operatorname{tg} \alpha_0') \operatorname{Fr}, \quad (102)$$

где

$\bar{k}_2 = \frac{2\bar{k}_2' + \bar{k}_2''}{2}$ — постоянный безразмерный коэффициент, зависящий от сплоченности льда.

§ 20. Статическое сопротивление

Для определения статической составляющей ледового сопротивления, не зависящей от скорости, рассмотрим упругий элемент льда шириной dx и жесткостью \bar{e} .

Естественно предположить, что проекция на ось Oy элементарного усилия, действующего на судно со стороны упругого элемента льда, пропорциональна ординате действующей ватерлинии $y(x)$, т. е.

$$dP_y = -ey(x) dx.$$

Проекция элементарной силы упругости на ось Ox с учетом сил сухого трения определится по выражению

$$dR_3 = -\bar{e}y(x) [f_\tau - y'(x)] dx.$$

Согласно принятым допущениям, полагаем, что действие упругих элементов на корпус происходит от форштевня до начала цилиндрической вставки. Тогда полная величина статической составляющей ледового сопротивления будет

$$R_3 = -2 \int_0^{L_n} \bar{e}y(x) [f_\tau - y'(x)] dx.$$

Первый интеграл, входящий в формулу,

$$\int_0^{L_n} f_\tau y(x) dx = \frac{LB}{4} \alpha_n f_\tau.$$

Второй интеграл определим интегрируя по частям:

$$\int_0^{L_n} y(x) y'(x) dx = y(x)^2 \Big|_0^{L_n} - \int_0^{L_n} y'(x) y(x) dx.$$

Тогда

$$\int_0^{L_n} y(x) y'(x) dx = -\frac{1}{2} \frac{B^2}{4}.$$

Выполнив интегрирование, получим

$$R_3 = -\bar{e} \left(\frac{B}{2} \right)^2 \left(1 + 2f_\tau \alpha_n \frac{L}{B} \right), \quad (103)$$

где \bar{e} — коэффициент, имеющий размерность

$$[\bar{e}] = \frac{m}{л^2} = \frac{mm}{л^3}.$$

Коэффициент \bar{e} зависит от протяженности льдин и их толщины, поэтому его можно представить в виде

$$\bar{e} = \bar{k}_1 \gamma_n r^{n_1} h^{n_2},$$

где k_1 — некоторый безразмерный коэффициент;
 n_1 и n_2 — показатели степени, причем из условий размерности $n_1 + n_2 = 1$.

Полагая в первом приближении $n_1 = n_2 = 0,5$, получаем

$$\bar{e} = \bar{k}_1 \gamma_n r^{0,5} h^{0,5}, \quad (104)$$

и, следовательно, выражение для статической составляющей силы сопротивления запишется в виде

$$R_3 = -\bar{k}_1 \gamma_n \sqrt{rh} \left(\frac{B}{2} \right)^2 \left(1 + 2f_{\tau} \alpha_n \frac{L}{B} \right). \quad (105)$$

Наблюдения, проведенные в натуральных условиях, показывают, что статическая составляющая сопротивления в мелкобитых льдах может быть отнесена к категории квазистатических сил, так как в конечном итоге «деформация» льда при его уплотнении судном в основном сводится к тому, что льдины, взаимодействуя друг с другом, совершают вертикальные перемещения. Последние, как известно, обусловлены объемными силами, не зависящими от скорости и подчиняющимися условиям подобия Фруда.

§ 21. Влияние ледового сжатия на сопротивление

Если мелкобитый лед находится в состоянии сжатия, то происходит значительное перераспределение величины ледового сопротивления между его составляющими, а именно: существенно увеличивается статическая составляющая ледового сопротивления, не зависящая от скорости, в то время как удельный вес скоростных составляющих сопротивления соответственно уменьшается.

Поскольку при движении судна в сжатых мелкобитых льдах наблюдается облегание судна льдом практически по всей длине ватерлинии, то добавку к величине статической составляющей сопротивления можно представить в виде

$$\Delta R_{сж} = 2 \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \bar{q} y(x) [f_{\tau} - y'(x)] dx,$$

или

$$\Delta R_{сж} = \bar{q} f_{\tau} \alpha B^2 \frac{L}{B}, \quad (106)$$

где \bar{q} — коэффициент сопротивления при сжатии;
 α — коэффициент полноты ватерлинии.

По аналогии с (104) можно написать

$$\bar{q} = \bar{k}_4 \gamma_n \sqrt{rh},$$

где \bar{k}_4 — безразмерный коэффициент.

Следовательно,

$$\Delta R_{сж} = 4\bar{k}_4 f_{\tau} \gamma_n \sqrt{rh} \alpha \left(\frac{B}{2} \right)^2 \frac{L}{B}. \quad (107)$$

Поскольку при ледовых сжатиях сплоченность составляет 10 баллов, коэффициент \bar{k}_4 зависит только от силы сжатия льда $s_{сж}$ в баллах. Полагая эту зависимость линейной, получим выражение для величины суммарной статической составляющей ледового сопротивления при движении судна в сжатых льдах:

$$R_3 = \gamma_n \sqrt{rh} \left(\frac{B}{2} \right)^2 \left[\bar{k}_1 \left(1 + 2f_{\tau} \alpha_n \frac{L}{B} \right) + \bar{k}_4 f_{\tau} \alpha \frac{L}{B} s_{сж} \right]. \quad (108)$$

Численное значение коэффициента \bar{k}_4 можно определить по результатам натуральных испытаний судов в сжатых льдах, поскольку модельные эксперименты в сжатых льдах не проводились ввиду их сложности.

§ 22. Сопротивление, обусловленное припаиванием и поворачиванием льдин

Как было указано выше, составляющая сопротивления R_4 обусловлена притапливанием и поворачиванием льдин бортом судна, возникающим при этом волнообразованием и изменением посадки судна. Работа этих сил не зависит от скорости, с которой протекают рассматриваемые процессы. Это — объемные силы, изменяющиеся пропорционально кубу линейных размеров льдин и судна.

Величина составляющей сопротивления, обусловливаемого притапливанием и поворачиванием льдин, возрастает с увеличением сплоченности льда и достигает максимума при сплоченности 10 баллов, что подтверждается приведенными выше результатами наблюдений за характером движения судна и модели во льдах, согласно которым с увеличением сплоченности возрастает число льдин, притапливаемых и поворачиваемых бортом. Косвенным доказательством сказанного служит также характер кривых сопротивления судна или модели в функции скорости при различной сплоченности льда. На рис. 51 в качестве примера приведена серия таких

* Множитель 4 при коэффициенте k_4 в формуле (108) учтен.

кривых для модели ледокола «Ермак». Из рисунка видно, что часть сопротивления судна, не зависящая от скорости, — статическое сопротивление, включающее составляющую, связанную с притапливанием и поворачиванием льдин, возрастает с увеличением сплоченности битого льда. При сплоченности льда менее шести баллов статическое сопротивление практически отсутствует, поэтому рассматриваемая составляющая сопротивления R_4 пренебрежимо мала.

Для определения величины этой составляющей при движении судна в сплоченных льдах был проделан ряд расчетов. При этом принимались следующие допущения:

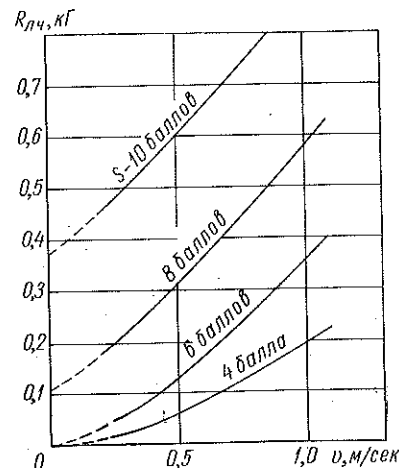


Рис. 51. Кривые сопротивления модели ледокола «Ермак» в мелкобитых льдах различной сплоченности.

Расчеты, выполненные в соответствии с указанными предположениями, показали, что даже в этом случае величина сил сопротивления, затрачиваемых на притапливание и поворачивание льдин, невелика и составляет менее одной десятой части статического сопротивления. Таким образом, реальная доля этих сил среди остальных составляющих ледового сопротивления будет пренебрежимо мала. К такому же выводу, основанному на аналогичных расчетах, выполненных для случая движения ледокола в сплошных льдах, пришли ранее Л. М. Ногид, В. И. Неганов и ряд других исследователей.

Косвенным подтверждением вывода о малой роли составляющих сил сопротивления, связанных с притапливанием и поворачиванием льдин, может служить также отсутствие у натуральных судов и моделей сколько-нибудь заметных изменений посадки при движении в мелкобитых льдах, а также установленный экспе-

— сплоченность льда полагалась равной 10 баллам, причем считалось, что льдины сплошь облегают борт судна (или модели) по всей длине ледовой ватерлинии; — притапливанию и поворачиванию подвержен один ряд льдин, прилегающий к борту, что подтверждается данными натуральных и модельных испытаний;

— все льдины, прилегающие к борту, притапливаются полностью (до уровня воды) и поворачиваются на 90° , т. е. до вертикального положения.

Как показывают результаты наблюдений, такие допущения завышают величину сил сопротивления, обуславливаемых притапливанием и поворачиванием льдин.

риментальным путем вывод о незначительном влиянии угла наклона форштевня на величину ледового сопротивления в мелкобитых льдах. Вполне очевидно, что весьма малыми будут также и силы, обусловленные волнообразованием, возникающим при поворачивании и притапливании льдин.

Таким образом, в формуле (74) с достаточной для практики точностью можно считать $R_4 = 0$.

Следует отметить, что, хотя формально в этом случае мы пренебрегаем составляющей R_4 в выражении для суммарной силы ледового сопротивления $R_{лч}$, фактически она будет учитываться, так как при принятом полуэмпирическом подходе к расчету сил сопротивления составляющая R_4 автоматически будет учтена совместно со статической составляющей сопротивления R_3 , поскольку обе эти силы по своей природе относятся к категории объемных.

§ 23. Общее выражение для расчета ледового сопротивления

Поскольку (см. § 5 и 22) $R_4 = 0$, а $R_{лч} = R_{лч} + R_3$, то, подставив их значения в (74), будем иметь

$$R_{лч} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Подставив в это выражение значения составляющих сил сопротивления R_1 , R_2 и R_3 из формул (91), (102) и (108), получим формулу для расчета чистого ледового сопротивления в битых льдах:

$$R_{лч} = \gamma_{лч} V r h \left(\frac{B}{2}\right)^2 \left[\bar{k}_1 \left(1 + 2f_{т} \alpha_{лч} \frac{L}{B}\right) + \bar{k}_4 f_{т} \alpha \frac{L}{B} s_{сж} \right] + \bar{k}_2 \gamma_{лч} r h B (f_{т} + \alpha_{лч} \operatorname{tg} \alpha'_0) Fr + \bar{k}_3 \gamma_{лч} r h L \operatorname{tg}^2 \alpha'_0 Fr^2, \quad (109)$$

где

- $R_{лч}$ — чистое ледовое сопротивление судна в мелкобитых льдах, кГ;
- r — протяженность мелкобитого льда, м;
- h — толщина мелкобитого льда, м;
- $\gamma_{лч}$ — удельный вес льда, кГ/м³;
- $f_{т}$ — коэффициент трения борта о лед;
- L — длина судна, м;
- B — ширина судна, м;
- α — коэффициент полноты конструктивной (ледовой) ватерлинии;
- $\alpha_{лч}$ — коэффициент полноты носовой ветви конструктивной ватерлинии;

α'_0 — угол входа носовой ветви конструктивной ватерлинии, град.;

$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$ — относительная скорость;

v — скорость судна, м/сек;

$g = 9,81$ м/сек² — ускорение силы тяжести;

$\bar{k}_1, \bar{k}_2, \bar{k}_3, \bar{k}_4$ — безразмерные коэффициенты.

Полученную формулу следует рассматривать как полуэмпирическую зависимость, поскольку она содержит в явном виде лишь основные параметры судна и льда, поддающиеся определению, а прочие характеристики, отражающие отступления от реальной картины, учитываются безразмерными коэффициентами $\bar{k}_1, \bar{k}_2, \bar{k}_3$ и \bar{k}_4 . Эти коэффициенты, таким образом, являются средне-статистическими величинами, которые должны иметь стабильные значения, т. е. зависеть только от изменения сплоченности и ширины канала мелкобитого льда B_K .

Величина коэффициентов \bar{k}_3 и \bar{k}_4 постоянна, величина коэффициента \bar{k}_2 зависит лишь от сплоченности льда, а величина коэффициента \bar{k}_1 , входящего в выражение для статической составляющей ледового сопротивления, зависит от сплоченности и ширины канала мелкобитого льда.

Нетрудно убедиться, что выражение (109) не противоречит условиям подобия Фруда и может быть использовано для расчетов ледового сопротивления как моделей, так и натуральных судов.

Чтобы использовать выражение (109) для расчетов сопротивления судна в мелкобитых льдах, необходимо знать численные значения безразмерных коэффициентов $\bar{k}_1, \bar{k}_2, \bar{k}_3$ и \bar{k}_4 . Их можно определить на основании данных модельных испытаний. Расчеты показали, что значения этих коэффициентов достаточно стабильны в диапазоне сплоченности льда от 4 до 10 баллов (табл. 11 и рис. 52, 53).

Таблица 11

Численные значения коэффициентов $\bar{k}_1, \bar{k}_2, \bar{k}_3$ и \bar{k}_4

Коэффициенты	Сплоченность льда, баллы			
	4	6	8	10
\bar{k}_1^*	0	0	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$
\bar{k}_2	0,93	2,54	5,70	8,2
\bar{k}_3	4,3	4,3	4,3	4,3
\bar{k}_4	—	—	—	$30 \cdot 10^{-2}$

* При $\frac{B_K}{B} = 10$.

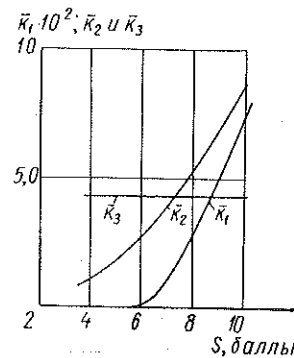


Рис. 52. График зависимости коэффициентов \bar{k}_1, \bar{k}_2 и \bar{k}_3 от сплоченности льда s .

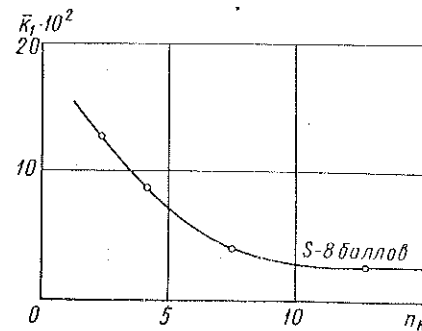


Рис. 53. График зависимости коэффициента \bar{k}_1 от относительной ширины канала B_K .

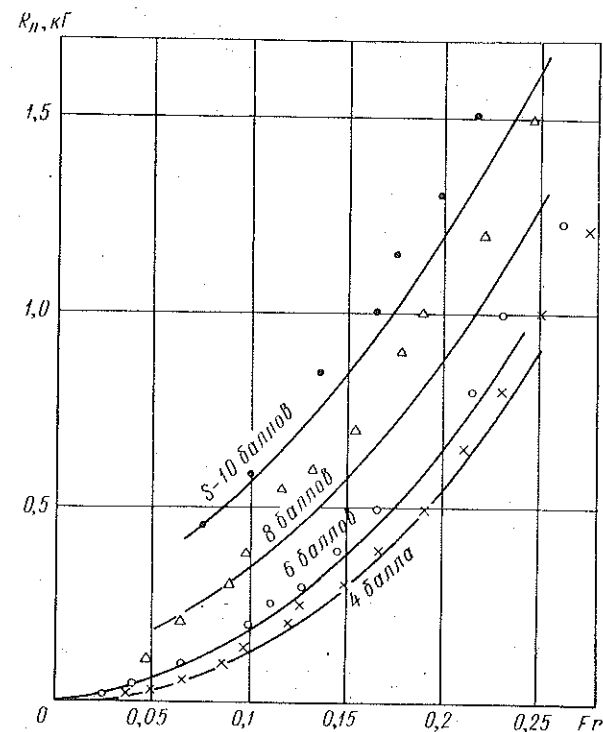


Рис. 54. Сопоставление расчетных кривых с результатами испытаний модели дизель-электрохода «Лена» в мелкобитых льдах различной сплоченности s .

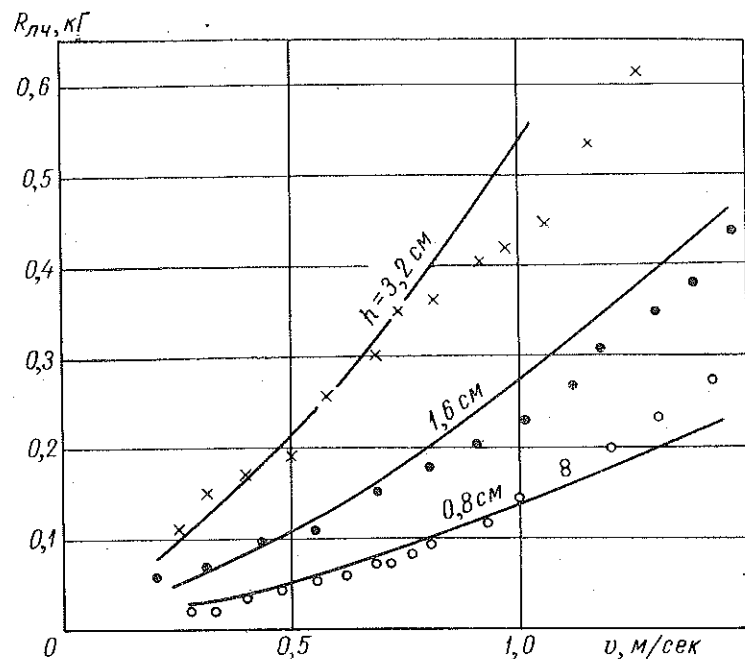


Рис. 55. Сопоставление расчетных кривых с результатами испытаний модели ледокола «Сибирь» в мелкобитых льдах различной толщины при $s = 6$ баллам.

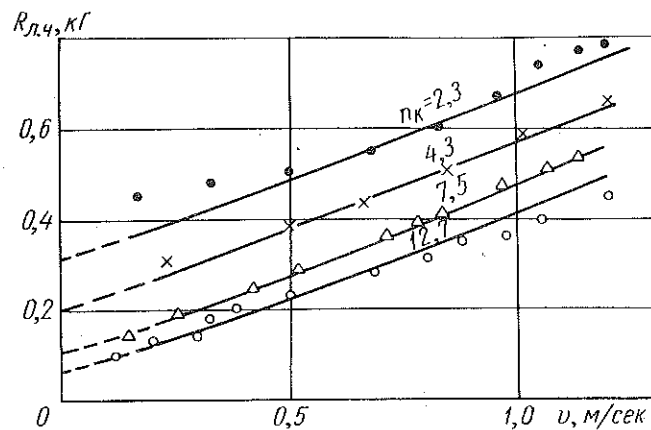


Рис. 56. Сопоставление расчетных кривых с результатами испытаний модели ледокола «Ермак» в мелкобитых льдах при $s = 8$ баллам и различной ширине канала n_k .

Для оценки степени точности расчетов ледового сопротивления по формуле (109) на рис. 54—56 приведены результаты сравнения расчетных данных с данными некоторых модельных испытаний в мелкобитых льдах парафинового и натурального составов. Из этих графиков видно, что расчетные кривые удовлетворительно согласуются с данными всех модельных испытаний ледоколов и судов ледового плавания. Расхождение расчетных кривых с экспериментальными точками не выходит за пределы точности, присущей модельным испытаниям. Это дает основания полагать, что формула (109) удовлетворительно отражает основные закономерности движения судна в мелкобитых льдах.

При сопоставлении формулы (109) с выражениями (75), (76) и (78) видно, что все они имеют неодинаковую структуру и содержат различные параметры судна. Формулы (75), (76) и (78) чисто эмпирические, причем выражения (75) и (76) справедливы для ледоколов, а формула (78) — для транспортных судов. Формула (109) является полуэмпирической и универсальной и может быть использована для расчетов сопротивления как ледоколов, так и транспортных судов ледового плавания.

Общий недостаток выражений (75), (76) и (78) в том, что они не отражают физического смысла процесса движения судна в мелкобитых льдах и вследствие этого неполно учитывают влияние ряда параметров судна и льда на величину сопротивления. Так, не учитывается влияние параметров судна и льда при изменении сплоченности льда, хотя было установлено, что такое влияние имеет место. По той же причине параметры, характеризующие форму обводов корпуса, являются в известной мере случайными.

Отмеченные недостатки снижают степень надежности расчетов по эмпирическим формулам (75), (76) и (78). Поэтому при расчетах ледового сопротивления в мелкобитых льдах формуле (109) следует, безусловно, отдать предпочтение. Она может быть положена в основу практических расчетов проходимости судов во льдах. При определении сопротивления натурного судна в мелкобитых льдах по формуле (109) элементы судна являются известными величинами. Из параметров мелкобитого льда известными и заданными могут считаться лишь сплоченность и сжатие, а также коэффициент трения льда о корпус. (Как указывалось в § 2, величина последнего может быть принята для практических расчетов постоянной.) Прочие параметры мелкобитого льда: протяженность, толщину льдин и отчасти ширину канала — следует рассматривать как неизвестные величины. В главе VII приводится практический способ определения этих величин.

Методы определения сопротивления в натурных битых льдах

§ 24. Влияние параметров мелкобитого льда и характеристик судна на сопротивление

Прежде чем перейти к изложению практических методов расчета ледопроеходимости судна в натуральных условиях, проанализируем влияние параметров битого льда и характеристик судна на ледовое сопротивление. Это позволит выяснить «интенсивность» влияния указанных характеристик на ледовое сопротивление и, следовательно, определить, какие из них должны быть учтены в первую очередь. Такой анализ представляет интерес с точки зрения проектирования формы обводов судна, предназначенного для работы в мелкобитых льдах.

Влияние параметров льда и судна на величину чистого ледового сопротивления можно исследовать двумя способами: или рассматривать относительное (удельное) влияние этих параметров на величину ледового сопротивления, или учитывать абсолютное приращение величины чистого ледового сопротивления при реально возможных изменениях параметров судна и льда. Ввиду того что решение задачи первым способом представляет главным образом теоретический интерес, воспользуемся вторым способом, который является более наглядным и имеет прикладное значение. Кроме того, поскольку влияние каждого параметра судна и льда на величину $R_{лч}$ неоднозначно, для простоты ограничимся качественным исследованием поставленной задачи на примере нескольких моделей (см. табл. 9).

Рассмотрим сначала вопрос о влиянии на чистое ледовое сопротивление параметров, характеризующих мелкобитый лед, т. е. ширины канала, сплоченности, протяженности и толщины льда, а также коэффициента трения льда о борт судна.

Как отмечалось выше, расчетная формула (109) справедлива для случаев движения судна в мелкобитом льду сплоченностью 4—10 баллов. В натуральных условиях сплоченность мелкобитого льда изменяется в широких пределах, хотя, как указывалось выше, наиболее характерным является случай плавления судов в сплоченных мелкобитых льдах.

Результаты расчетов по формуле (109) показывают, что увеличение сплоченности поля мелкобитого льда приводит к интенсивному возрастанию величины чистого ледового сопротивления. Так, при изменении сплоченности льда от 4 до 10 баллов величина $R_{лч}$ для модели № 17 возрастает приблизительно в 5—10 раз (в зависимости от относительной скорости Fr).

К значительному возрастанию чистого ледового сопротивления приводит также уменьшение относительной ширины канала мелкобитого льда $n_k = \frac{B_k}{B}$, где B_k — ширина канала, B — ширина судна. По данным натурных и экспериментальных наблюдений, диапазон изменения этого параметра, в пределах которого он оказывает влияние на величину $R_{лч}$, составляет от 1,5 до 12. Для модели № 17 сужение канала от 12,7 до 2,3 привело к возрастанию величины $R_{лч}$ приблизительно до 500% (в зависимости от относительной скорости Fr). Изменение величины n_k влияет в основном на статическую составляющую ледового сопротивления, поэтому с увеличением сплоченности льда интенсивность этого влияния возрастает.

Изменение коэффициента сухого трения льдин о борт судна также существенно сказывается на величине ледового сопротивления в битых льдах. Из данных, приведенных в § 2 видно, что коэффициенты трения льда о борт судна в зависимости от ряда факторов могут изменяться в довольно широких пределах. Расчеты, проведенные по формуле (109), показали, что изменение динамического коэффициента трения от 0,01 до 0,2 влечет за собой изменение величины чистого ледового сопротивления модели № 17 при движении в восьмибалльных регулярных льдах приблизительно на 100% (рис. 57). С увеличением сплоченности льда интенсивность влияния коэффициента трения на величину $R_{лч}$ возрастает.

Остановимся особо на вопросе о непосредственных пересчетах ледового сопротивления модели и судна при движении в мелкобитых льдах с различным коэффициентом трения.

Будем полагать, что величина силы сухого трения пропорциональна коэффициенту трения f_t , определяемому с учетом состояния поверхности, и нормальному давлению P_n .

В рассматриваемом случае P_n равно контактному усилию, возникающему при взаимодействии судна со льдом, которое направлено по нормали к борту. Соответствующая сила трения $P_T =$

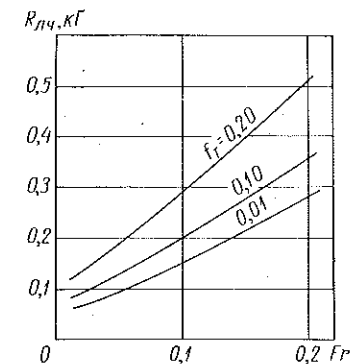


Рис. 57. Влияние коэффициента трения на сопротивление модели в мелкобитых льдах.

$= f_{\tau} P_n$ и направлена по касательной к борту судна. Контактное усилие P_n является непрерывной функцией от координаты x , скорости судна v и параметров льда. Для судна, плавающего в определенных ледовых условиях при постоянной скорости

$$P_n = p(x).$$

Проекция контактного усилия и силы трения на ось Ox будет

$$P_x = f(x) [f_{\tau} - y'(x)], \quad (110)$$

где

$$f(x) = \frac{p(x)}{\sqrt{1+y'^2}} - \text{некоторая функция от } x.$$

Соответствующая сила сопротивления может быть получена интегрированием выражения (110) по всей длине носового заострения судна:

$$R_{\text{борт}} = 2 \int_0^{L_n} f(x) [f_{\tau} - y'(x)] dx.$$

Применяя теорему о среднем, получим

$$R_{\text{борт}} = 2f(\xi) \int_0^{L_n} [f_{\tau} - y'(x)] dx,$$

или

$$R_{\text{борт}} = 2f(\xi) \left(f_{\tau} L_n + \frac{B}{2} \right). \quad (111)$$

Поскольку при движении в сплоченных льдах, кроме усилий, равномерно распределенных вдоль борта, на судно действует также сосредоточенное усилие, приложенное в районе форштевня R_{ϕ} , суммарное сопротивление будет

$$R = R_{\text{борт}} + R_{\phi} = 2f(\xi) \left(f_{\tau} L_n + \frac{B}{2} \right) + R_{\phi}.$$

Для одного и того же судна при движении в среде с различными коэффициентами трения f_{τ_0} и f_{τ_1} , получим

$$f_1(\xi) = f_2(\xi)$$

и, следовательно,

$$\frac{R_0 - R_{\phi_0}}{R_1 - R_{\phi_1}} = \frac{f_{\tau_0} L_n + \frac{B}{2}}{f_{\tau_1} L_n + \frac{B}{2}},$$

где усилия R_0 и R_{ϕ_0} соответствуют коэффициенту трения f_{τ_0} , а усилия R_1 и R_{ϕ_1} — коэффициенту трения f_{τ_1} .

Учитывая, что на основании формулы (83)

$$R_{\phi_1} = R_{\phi_0} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha'_0 + f_{\tau_1}}{\operatorname{tg} \alpha'_0 + f_{\tau_0}} \right),$$

окончательно получим

$$R_0 = R_1 \frac{f_{\tau_0} L_n + \frac{B}{2}}{f_{\tau_1} L_n + \frac{B}{2}} + R_{\phi_0} \frac{(f_{\tau_1} - f_{\tau_0}) \left(L_n \operatorname{tg} \alpha'_0 - \frac{B}{2} \right)}{(f_{\tau_0} + \operatorname{tg} \alpha'_0) \left(f_{\tau_1} L_n + \frac{B}{2} \right)}. \quad (112)$$

Как показывают расчеты, при изменении коэффициента трения во всем диапазоне встречающихся на практике значений множитель при R_{ϕ_0} для большинства судов имеет величину порядка 0,1—0,2. Учитывая, что само усилие R_{ϕ_0} составляет лишь часть суммарной величины ледового сопротивления, можно, не внося в расчеты существенной погрешности, пренебречь вторым членом правой части равенства (112). Таким образом, учет влияния сил сухого трения может быть осуществлен:

для судов с цилиндрической вставкой по формуле

$$R_0 = R_1 \frac{f_{\tau_0} L_n + 0,5B}{f_{\tau_1} L_n + 0,5B}; \quad (113)$$

для судов, не имеющих цилиндрической вставки, по формуле

$$R_0 = R_1 \frac{f_{\tau_0} L + B}{f_{\tau_1} L + B}. \quad (114)$$

Напомним, что формулы (113) и (114) выведены на основании предположения о том, что борта судна в районе ледовой ватерлинии вертикальны. Если принять во внимание наклон борта, то горизонтальная проекция контактного усилия и силы трения, распределенного вдоль борта судна, будет

$$R_x^{nn} = p(x) (\bar{l} + f_{\tau} \sqrt{1 - \bar{l}^2}),$$

где \bar{l} — направляющий косинус нормали к оси Ox .

Суммарное усилие

$$R = 2f(\xi) \int_0^{L_n} (\bar{l} + f_{\tau} \sqrt{1 - \bar{l}^2}) dx.$$

Формула для учета влияния сил сухого трения на ледовое сопротивление с учетом наклона бортов будет иметь вид

$$R_0 = R_1 \frac{\int_0^{L_n} (\bar{l} + f_{\tau_1} \sqrt{1 - \bar{l}^2}) dx}{\int_0^{L_n} (\bar{l} + f_{\tau_0} \sqrt{1 - \bar{l}^2}) dx}. \quad (115)$$

Проведенные расчеты показывают, что учет влияния наклона борта дает незначительное уточнение и для практических целей в большинстве случаев можно использовать простые формулы (113) и (114).

Проанализируем теперь влияние на ледовое сопротивление протяженности и толщины мелкобитого льда.

Степень суммарного влияния протяженности r и толщины льда h на величину чистого ледового сопротивления, как видно из анализа формулы (109), близка к квадратичной, причем указанные параметры входят в состав всех трех членов выражения (109) в одинаковой степени. Последнее обстоятельство является следствием предположений, принятых при выводе формулы (109). Экспериментальная проверка (модельные испытания) показала, что в пределах точности таких испытаний эти предположения справедливы и влияние параметров r и h на ледовое сопротивление в формуле (109) отражено в основном верно. Строго говоря, влияние протяженности и толщины льда на ледовое сопротивление может быть и неодинаковым. Однако в данном случае это обстоятельство не существенно, поскольку, как это будет показано ниже, параметры r и h натурального мелкобитого льда зависят друг от друга, причем наличие этой связи обусловлено природными условиями образования мелкобитого льда.

Раздельная оценка количественного влияния протяженности и толщины льда на чистое ледовое сопротивление проиллюстрирована на примере той же модели № 17. При изменении протяженности льда от 8,05 до 12,5 см величина $R_{лч}$ увеличивается примерно на 180%, а при изменении толщины льда в два раза (от 0,8 до 1,6 см или от 1,6 до 3,2 см) величина чистого ледового сопротивления при движении в шестибалльных льдах изменяется на 200%.

Как видно из формулы (109), при увеличении сплоченности мелкобитого льда интенсивность влияния параметров r и h на величину $R_{лч}$ несколько уменьшается.

Теперь рассмотрим влияние главных размерений и формы обводов корпуса на величину $R_{лч}$.

Из формулы (109) видно, что непосредственное влияние на величину $R_{лч}$ оказывают ширина судна B , длина L , отношение L/B , а также коэффициент полноты носовой ветви ватерлинии α_n и тангенс угла носового заострения КВЛ $\text{tg } \alpha_0$.

Перечисленные параметры характеризуют форму действующей (ледовой) ватерлинии судна, следовательно, величина ледового сопротивления определяется в основном элементами этой ватерлинии. Такой вывод логически вытекает из сущности явления и принятой при решении задачи условной схемы. Не останавливаясь на количественном анализе влияния указанных элементов судна на величину $R_{лч}$, отметим лишь, что поскольку элементы судна B , L , L/B , α_n и $\text{tg } \alpha_0$ входят в числитель формулы (109), то их уве-

личение приводит при прочих равных условиях к возрастанию величины чистого ледового сопротивления, причем наиболее существенное влияние оказывает ширина судна B .

На рис. 58—60 приведены результаты расчетов $R_{лч}$, выполненных для серии моделей, которые отличаются отношениями длины к ширине, ширины к осадке, и коэффициентом общей полноты (табл. 9). Пределы изменения отношений L/B , B/T и коэф-

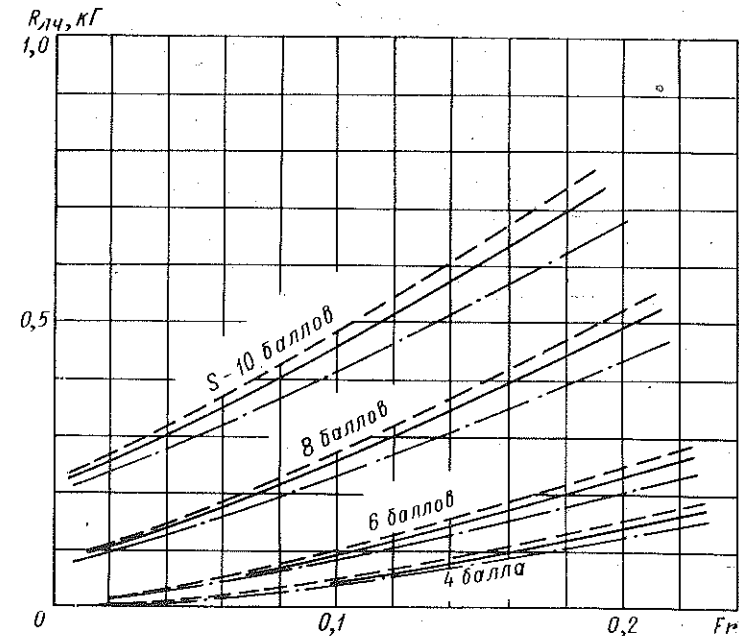


Рис. 58. Влияние отношения L/B на сопротивление модели в мелкобитых льдах.

--- $L/B = 3,8$; — $L/B = 4,3$; - - - $L/B = 5,1$.

фициента δ у указанных серий моделей охватывают практически весь реальный диапазон изменения этих характеристик морских судов ледового плавания.

Результаты расчетов показали, что влияние указанных параметров на величину $R_{лч}$ в целом невелико (около 20—30%). Обращает на себя внимание то обстоятельство, что характер влияния некоторых параметров на величину $R_{лч}$ зависит от сплоченности льда. Так, если при движении во льду сплоченностью 4 балла величина $R_{лч}$ модели № 8 с коэффициентом общей полноты $\delta = 0,45$ меньше, чем у модели № 9 ($\delta = 0,55$), то при сплоченности льда 10 баллов наблюдается противоположная картина (рис. 60). То же самое отмечается и для серии моделей, отличающихся отношением B/T (рис. 59).

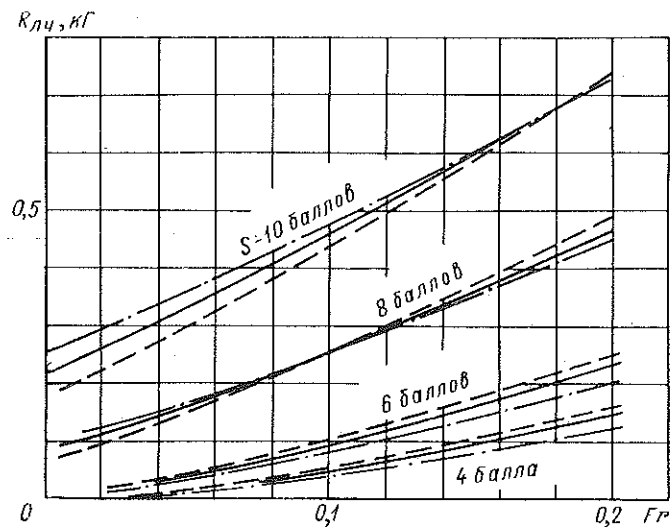


Рис. 59. Влияние отношения V/T на сопротивление модели в мелкобитых льдах.
 - - - $V/T = 2,0$; — $V/T = 2,68$; - · - $V/T = 3,5$.

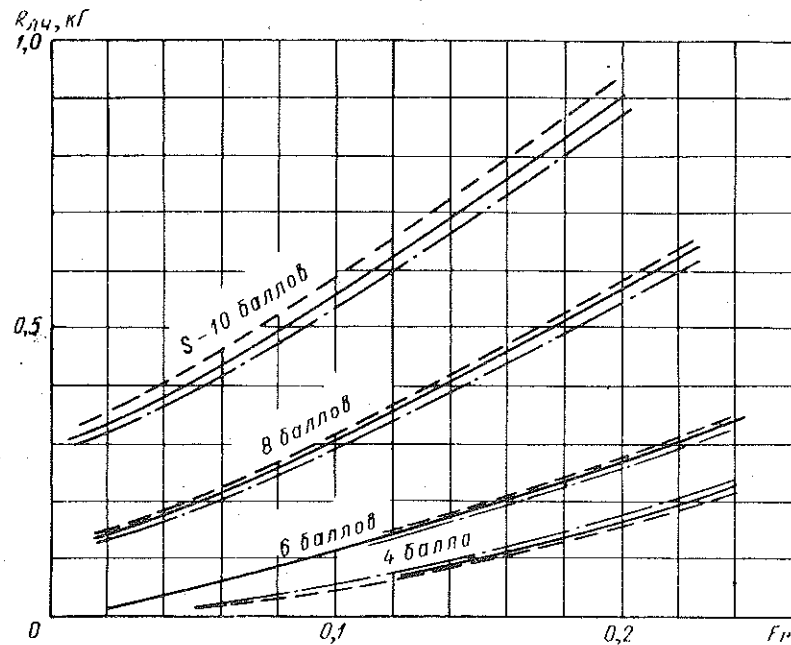


Рис. 60. Влияние коэффициента общей полноты на сопротивление модели в мелкобитых льдах.
 - - - $\delta = 0,45$; — $\delta = 0,50$; - · - $\delta = 0,55$.

Результаты анализа, проведенного в настоящем параграфе, позволяют сделать основной, важный в практическом отношении вывод о том, что в целом характеристики судна (при их изменении в диапазоне реальных, встречающихся на практике величин) значительно меньше влияют на величину чистого ледового сопротивления судов, чем параметры льда.

§ 25. Расчет сопротивления судна при движении в напорных битых льдах

В предыдущем параграфе было показано, что параметры мелкобитого льда r , h и V_k оказывают существенное влияние на ледовое сопротивление, поэтому для практического решения задачи знание реальных величин этих параметров имеет первостепенную важность. Проиллюстрируем это на примере. Согласно ледовой классификации, протяженность мелкобитого льда составляет 2—20 м. Расчеты по формуле (109) показывают, что для мощного ледокола, движущегося со скоростью 5 узл. в мелкобитых льдах сплоченностью 8 баллов и толщиной 1 м, величина чистого ледового сопротивления соответственно при $r = 2$ м составляет 15 т, а при $r = 20$ м 106 т.

Протяженность и толщина мелкобитого льда известны (заданы) только для лабораторных регулярных льдов. При вычислении чистого ледового сопротивления судов в мелкобитых натуральных льдах следовало бы, строго говоря, использовать среднearифметические значения истинных величин этих параметров. Однако непосредственное их определение встречает значительные трудности, так как натуральный мелкобитый лед неравномерен по толщине и протяженности, а инструментальные методы измерения этих величин отсутствуют. Это обстоятельство затрудняет использование выражения (109) для практических расчетов ледопроеходимости судов в натуре. Поэтому в настоящее время разработан и используется метод, основанный на применении «условных» расчетных значений параметров льда, которые можно определить по результатам натуральных испытаний судов. Вычисленные таким путем расчетные значения параметров льда можно рассматривать как некоторые среднестатистические.

Возможность применения указанного метода базируется на том, что для «природных» мелкобитых льдов имеются некоторые характерные достаточно устойчивые среднестатистические значения параметров r и h . Аналогичное явление имеет место и для мелкобитых льдов, образующихся в канале за ледоколом. В этом случае, кроме r и h , характерным параметром будет также ширина канала битого льда V_k . Последняя, помимо параметров льда (толщины, формы, торосистости и т. п.), будет зависеть также от размерений ледокола и дистанции между проводимым судном и ледоколом.

Накапливание натуральных данных, необходимых для определения указанных расчетных параметров, не представляет принципиальных трудностей, поскольку методика натуральных испытаний в битых льдах позволяет получать такие данные (см. § 26).

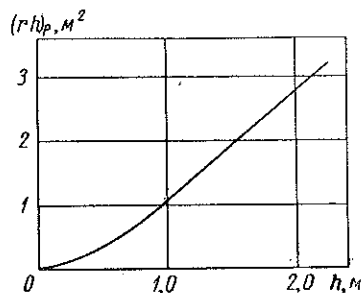


Рис. 61. График зависимости параметра $(rh)_p$ от толщины сплошного льда.

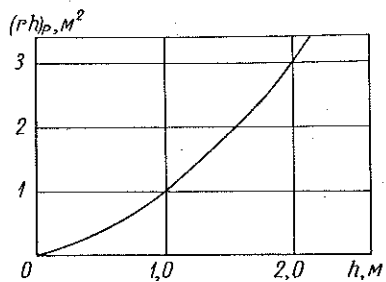


Рис. 62. График зависимости параметра $(rh)_p$ от толщины дрейфующего льда.

Параметры r и h входят во все члены выражения (109) в одинаковой степени, поэтому целесообразно ввести один расчетный параметр, равный их произведению. Обозначим его $(rh)_p$. При

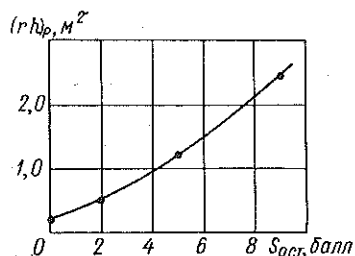


Рис. 63. График зависимости параметра $(rh)_p$ от сплоченности остаточного годовалого льда (сморози с молодым льдом толщиной 30—40 см).

заданных $R_{лч}$ и Fr величину этого параметра можно определить из уравнения, полученного с помощью формулы (109),

$$(rh)_p^2 (\bar{M} + \bar{N})^2 - (rh)_p [\bar{A}^2 + 2R_{лч} (\bar{M} + \bar{N})] + R_{лч}^2 = 0, \quad (116)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \bar{A} &= \gamma_{л} \left(\frac{B}{2}\right)^2 \left[\left(1 + 2\frac{L}{B} f_{т} \alpha_{п}\right) \bar{k}_1 + \bar{k}_4 f_{т} \frac{L}{B} \alpha_{сж} \right], \\ \bar{M} &= \bar{k}_2 \gamma_{л} B (f_{т} + \alpha_n \operatorname{tg} \alpha'_0) Fr, \\ \bar{N} &= \bar{k}_3 \gamma_{л} L \operatorname{tg}^2 \alpha'_0 Fr^2. \end{aligned} \right\} \quad (117)$$

Обработка обширного материала по натурным испытаниям судов в мелкобитых льдах, проведенная методом наименьших

квадратов с использованием формулы (116), позволила определить значения параметра $(rh)_p$ (рис. 61—63). Оказалось, что порядок величин расчетных значений параметров $(rh)_p$ соответствует наблюдаемому в природе.

Из параметров мелкобитого льда, входящих в формулу (109), сплоченность и сжатие льда обычно являются величинами заданными. Следует лишь помнить, что расчетное значение сплоченности при движении судна в канале за ледоколом надо принимать на 1—2 балла меньше сплоченности льда, в котором движется ледокол.

Определение расчетных значений ширины канала $n_{кр}$ встречает некоторые затруднения. Они обусловлены тем, что этот параметр зависит от ряда факторов: толщины и сплоченности льда, скорости движения ледокола, дистанции между ним и проводимым судном и т. д.

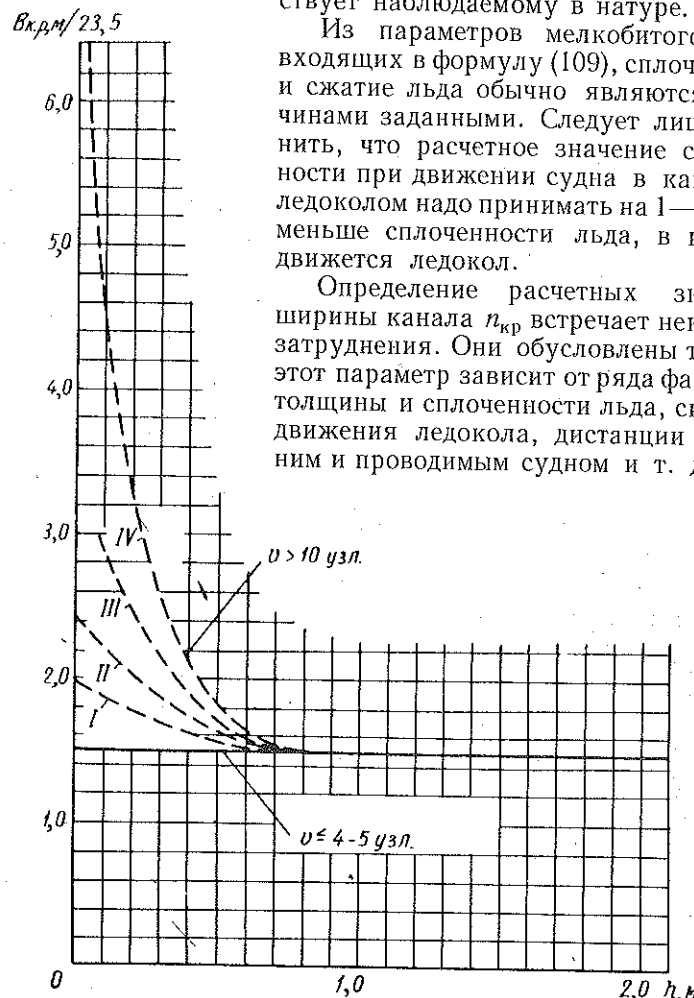


Рис. 64. График зависимости расчетной ширины канала $B_{к.р}$ от толщины сплошного льда и сплоченности остаточного льда s .
I — $s = 6 \div 8$ баллам; II — $s = 4 \div 6$ баллам; III — $s = 1 \div 2$ баллам; IV — $s = 0 \div 1$ баллу.

Определить ширину канала можно с помощью натуральных наблюдений. Учитывая ограниченное количество данных, можно использовать некоторые условные расчетные значения относительной ширины канала, приведенные на рис. 64 и 65. При построении

этих графиков были использованы результаты натуральных наблюдений за каналом, проложенным ледоколом шириной $B = 23,5$ м, а также расчеты по формуле (109) и ряд соображений умозрительного характера.

На рис. 64 приведен график зависимости расчетной ширины канала, проложенного ледоколом в сплошном льду, от толщины льда, скорости движения судна и количества годовалого остаточного льда, поскольку эти факторы оказывают преобладающее влияние на ширину канала. Следует отметить, что график учитывает лишь основные параметры, влияющие на относительную ширину канала. Так, строго говоря, ширина канала за ледоколом даже при $v \leq 4-5$ узл. зависит в какой-то степени от толщины льда. Однако в данном случае влиянием такого рода факторов можно пренебречь.

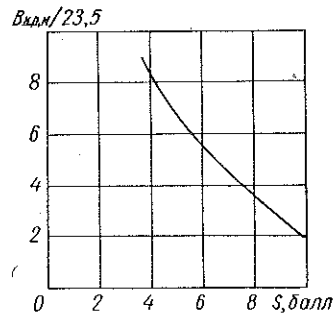


Рис. 65. График зависимости расчетной ширины канала, прокладываемого мощным ледоколом в дрейфующем льду, от сплоченности льда.

На рис. 65 приведен график зависимости расчетной ширины канала от сплоченности льда, которая является доминирующим фактором и определяет ширину канала. Число параметров, влияющих на ширину канала, проложенного ледоколом в дрейфующих льдах, больше, чем в сплошных льдах, поскольку дрейфующий лед является наиболее разнообразной формой морского льда. На ширину канала в дрейфующих льдах влияет также дистанция между проводимым судном и ледоколом, поскольку кромки канала в данном случае подвижны. В связи с этим график построен для случая, когда проводимое судно движется за ледоколом на дистанции, соответствующей оптимальной ширине канала.

Численные значения расчетных параметров мелкобитого льда будут уточняться по мере накопления данных по натурным испытаниям, однако уже в настоящее время приведенные диаграммы можно использовать для практических расчетов.

Движение судна в крупнобитых льдах и обломках полей относится к числу сложных нестационарных процессов, и общий теоретический анализ этого процесса в настоящее время сталкивается с неразрешимыми трудностями. До сих пор сравнительно подробно разработана лишь теория удара ледокола форштевнем о кромку ледяного поля. Этому вопросу посвящены работы Н. А. Заботкина [26], Ю. А. Шиманского [87], В. В. Давыдова [20], Л. М. Ногида [53], М. К. Таршиса [79], Ю. Н. Попова [69] и Д. Е. Хейсина [84]. Не останавливаясь на содержаниях и анализе этих работ, отметим лишь, что полученные решения

представляют собой более или менее громоздкие расчетные зависимости, не лишенные многочисленных условностей.

Более широкое исследование движения ледокола во льдах предпринял А. В. Бронников, который аналитически описал не только удар ледокола о льдину, но и последующие этапы: вползание на сплошной лед и его ломку. В результате Бронников получил сложные расчетные формулы, практическое использование которых для наших целей затруднительно.

Таким образом, присмелого для практических целей аналитического описания процесса движения судна в крупнобитых льдах и обломках полей в настоящее время не имеется. В то же время пути моделирования этого процесса также не разработаны. Поэтому приближенные полуэмпирические способы исследования, аналогичные приведенным выше для сплошного и мелкобитого льда, в данном случае также пока не осуществимы.

В настоящее время имеется единственная чисто эмпирическая зависимость для расчета сопротивления судна при движении в крупнобитых льдах и обломках полей, полученная на основании обработки данных натуральных испытаний,

$$R_{лч} = (c_k + 9,0v_{ср}^{1,3})h^{1,2}, \quad (118)$$

где $R_{лч}$ — чистое ледовое сопротивление, т;
 h — толщина льда, м;
 $v_{ср}$ — средняя скорость движения ледокола, м/сек;
 c_k — эмпирический коэффициент, зависящий от протяженности льда (рис. 66).

Формула (118) выведена на основании обработки материалов натуральных испытаний мощного ледокола в ледяных полях различной протяженности (от 20 м до 1,5 км) и толщины (от 0,8 до 2,0 м) при общей сплоченности льда 8—10 баллов и разрушенности 2—3 балла. Обработке подверглось около 500 натуральных экспериментальных точек, полученных в диапазоне скоростей хода ледокола $v_{ср} = 0,5-13$ узл.

Формула (118) может быть использована для приближенной оценки величины сопротивления мощных ледоколов в натуральных крупнобитых льдах, малых ледяных полях и обломках полей. Пределы ее применения ограничиваются перечисленными выше условиями.

Следует подчеркнуть, что вопрос о пределах применения расчетных формул (72), (109) и (118) имеет очень важное значение,

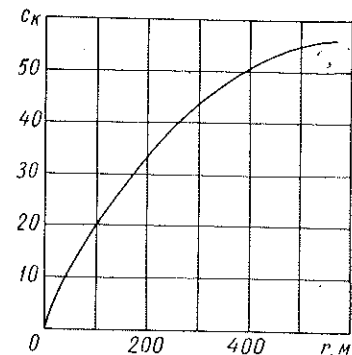


Рис. 66. График зависимости эмпирического коэффициента c_k от протяженности льда.

так как все эти выражения эмпирические. Проиллюстрируем на конкретном примере, основанном на материалах натурных испытаний мощного ледокола, пределы применения расчетных формул (72), (109) и (118).

На графике рис. 67 нанесены натурные кривые изменения чистого ледового сопротивления ледокола в зависимости от протяженности льдин в широком диапазоне изменения этого параметра. Толщина льда постоянна ($h = 1,2 \text{ м}$), скорость ледокола — от 2 до 10 узл. Как видно из рисунка, пределы применения формулы (109) для расчета сопротивления судна при движении в мелкобитых льдах ограничены областью, расположенной между осью ординат и ли-

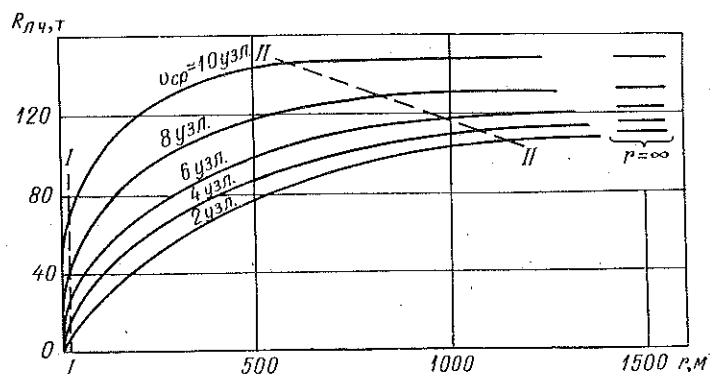


Рис. 67. График зависимости $R_{лч}$ от протяженности льда.

нией I—I. Область применения формулы (72) для сплошных льдов лежит справа от линии II—II, так как при протяженности 600—1200 м и более величина ледового сопротивления становится практически не зависящей от этого параметра. Соответственно формула (118) для случая движения судна в крупнобитых льдах и обломках полей должна применяться при значениях протяженности льдин, ограниченных линиями I—I и II—II.

Из анализа рис. 67 следует интересный вывод о том, что понятие «сплошной» лед (точнее минимальная протяженность полей, которые ледокол преодолевает как сплошной лед) зависит от скорости движения ледокола. Так, для рассматриваемого ледокола при движении во льду толщиной 1,2 м со скоростью $v_{ср} = 2$ узл. «сплошным» льдом можно считать поля протяженностью 1100 м и более, а при скорости 10 узл. — поля протяженностью 600 м и более.

Такую странную на первый взгляд взаимосвязь можно объяснить, если учесть, что силы сопротивления, обусловленные раздвиганием обломков разрушенного поля, зависят, помимо прочих факторов, от их протяженности и скорости раздвигания. Естественно, что ледокол при движении с заданной скоростью будет раздвигать

обломки поля, разделенного трещиной, до тех пор, пока работа, затрачиваемая на раздвигание, будет меньше работы, необходимой для ломки ледяного покрова.

Сказанное можно подтвердить приближенным расчетом. Приравняем работу, затрачиваемую ледоколом на раздвигание льдин толщиной 0,6 м и различной протяженности, работе, необходимой для разрушения сплошного льда той же толщины на пути, равном половине длины корпуса. На рис. 68 приведены результаты расчета, выполненного в соответствии с указанными условиями, причем величина усилий, необходимых для раздвигания льдин, заимствована из [80] и основана на экспериментальных данных буксировки льда разной протяженности, а силы сопротивления при ломке сплошного льда определялись по данным натурных испытаний ледокола. Как видно из рисунка, при скорости ледокола $v_{ср} = 10$ узл. работа, затрачиваемая на раздвигание льда толщиной 0,6 м, становится равной работе, необходимой для его ломки при $r = 300 \text{ м}$; а при $v_{ср} = 4,0$ узла это равенство наступает при $r = 700 \text{ м}$.

Таким образом, результаты приближенного расчета подтверждают выводы, сделанные выше; при этом порядок численных величин минимальной протяженности «сплошного» льда оказался близким к значениям, полученным с помощью графика рис. 67, что подтверждает возможность использования рис. 67 для определения границ применения расчетных формул (72), (109) и (118).

Следует иметь в виду, что пока сделаны лишь первые шаги в разработке методики расчета сопротивления судна при движении в крупнобитых льдах и обломках полей. Поскольку ощущается большая практическая потребность в такой методике, необходимо продолжить ее совершенствование, для чего необходимо накапливать данные натурных испытаний судов, а также продолжать теоретические исследования.

В заключение приведем несколько примеров расчета сопротивления судна при движении в битых льдах с помощью формул (109) и (118).

Пример 1. Определить величину чистого ледового сопротивления транспортного судна ледового плавания, движущегося со скоростью $v = 4$ узл. в канале, проложенном ледоколом в сплошных льдах толщиной $h = 1,5 \text{ м}$, $\gamma_{л} = 900 \text{ кг/м}^3$, $f_{т} = 0,1$.

Основные элементы судна: $L = 118 \text{ м}$; $B = 18,5 \text{ м}$; $L/B = 6,4$; $\alpha_{и} = 0,77$; $\text{tg } \alpha_0 = 0,427$; $\sqrt{gL} = 34,0$; $\text{Fr} = 0,058$.

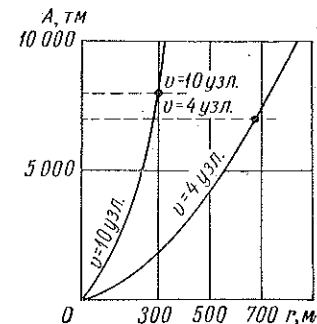


Рис. 68. Работа, затрачиваемая ледоколом на раздвигание и ломку льда толщиной 0,6 м.

— раздвигание льда различной протяженности;
- - - ломка сплошного льда.

Натурные испытания судов во льдах. Практические методы оценки ледопроеходимости

§ 26. Методика натурных испытаний судов во льдах

Натурные испытания судов имеют ряд важных преимуществ по сравнению с модельными экспериментами как по объему исследовательской работы, так и по достоверности получаемых данных. Однако за последние 25 лет была опубликована только одна монография, посвященная испытаниям мореходных качеств судов во льдах, до настоящего времени вообще не публиковались. Поэтому в настоящем параграфе освещается организация, методика и техника натурных исследований во льдах.

Впервые экспериментальное исследование движения ледокола в натуральных условиях было осуществлено С. О. Макаровым в 1900 г. [47]. Цель эксперимента — определить усилия, действующие на корпус ледокола «Ермак» при прохождении торосистой гряды, и провести прогрессивные испытания во льдах. Материалы этих испытаний были обработаны А. Н. Крыловым для определения усилий, действующих на ледокол при движении в ровном льду и торосах.

Затем в течение длительного времени изучение ходкости ледоколов ограничивалось попутными, преимущественно визуальными наблюдениями судоводителей, фиксировавших, как правило, лишь толщину льда, преодолеваемого ледоколом.

С 1933 по 1941 г. было сделано несколько попыток проведения натурных исследований проходимости судов во льдах. В 1933—1937 гг. Я. Я. Гаккель впервые провел измерения скорости движения во льду пароходов «Малыгин», «Моссовет» и др. [16], [17]. В 1935 г. Г. Е. Ратмановым были проведены наблюдения за проходимостью ледокола «Красин» [72].

Новый этап изучения проходимости судов в натуральных условиях начался с 1939 г., когда Арктическому институту была поручена организация специальных экспедиций для изучения ледовых качеств судов. Первая такая экспедиция в Арктику состоялась в на-

Согласно данным рис. 61 и 64 при $\frac{B_{к.р}}{23,5} = 1,5$, т. е. при $(n_{к})_p = \frac{1,5 \cdot 23,5}{18,5} = 1,92$, имеем $(rh)_p = 1,9 \text{ м}^2$.

С помощью рис. 52, 53 и табл. 11 определяем значения безразмерных коэффициентов: $\bar{k}_1 = 13,5 \cdot 10^{-2}$; $\bar{k}_2 = 8,4$; $\bar{k}_3 = 4,3$; $\bar{k}_4 = 0$.

Подставив расчетные значения этих величин в формулу (109), получим

$$\begin{aligned} R_{лч} &= \gamma_{л} V \sqrt{(rh)_p} \left(\frac{B}{2} \right)^2 \left[\bar{k}_1 \left(1 + 2f_{т} \alpha_{н} \frac{L}{B} \right) + \bar{k}_4 f_{т} \alpha \frac{L}{B} s_{сж} \right] + \\ &+ \bar{k}_2 (rh)_p \gamma_{л} B (f_{т} + \alpha_{н} \operatorname{tg} \alpha'_0) Fr + \bar{k}_3 (rh)_p \gamma_{л} L \operatorname{tg}^2 \alpha'_0 Fr = \\ &= 900 \sqrt{1,9 \cdot 9,25^2} [13,5 \cdot 10^{-2} (1 + 2 \cdot 0,1 \cdot 0,77 \cdot 6,4)] + \\ &+ 8,4 \cdot 1,9 \cdot 900 \cdot 18,5 (0,1 + 0,77 \cdot 0,427) 0,058 + 4,3 \cdot 1,9 \cdot 900 \cdot 118 \cdot 0,427^2 \cdot 0,058^2 = \\ &= 28\,000 + 6400 + 5200 = 39\,600 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Пример 2. Определить величину чистого ледового сопротивления транспортного судна ледового плавания, следующего со скоростью $v = 2$ узл. в канале за ледоколом в сморозях молодого льда толщиной 40 см и остаточного льда сплоченностью 2 балла при сжатии $s_{сж} = 2$ баллам.

Основные элементы судна: $L = 123 \text{ м}$; $B = 18,5 \text{ м}$; $L/B = 6,65$; $\sqrt{gL} = 34,8$; $Fr = 0,024$; $\alpha = 0,8$; $\alpha_{н} = 0,77$; $\operatorname{tg} \alpha'_0 = 0,43$.

Согласно рис. 63 и 64 $(rh)_p = 0,5 \text{ м}^2$; $(n_{к})_p = \frac{1,5 \cdot 23,5}{18,5} = 1,92$.

С помощью рис. 52, 53 и табл. 11 определяем значения безразмерных коэффициентов: $\bar{k}_1 = 13,5 \cdot 10^{-2}$; $\bar{k}_2 = 8,4$; $\bar{k}_3 = 4,3$; $\bar{k}_4 = 120 \cdot 10^{-2}$.

Подставив расчетные значения этих величин в формулу (109), получим:

$$\begin{aligned} R_{лч} &= \gamma_{л} V \sqrt{(rh)_p} \left(\frac{B}{2} \right)^2 \left[\bar{k}_1 \left(1 + 2f_{т} \alpha_{н} \frac{L}{B} \right) + \bar{k}_4 f_{т} \alpha \frac{L}{B} s_{сж} \right] + \\ &+ \bar{k}_2 (rh)_p \gamma_{л} B (f_{т} + \alpha_{н} \operatorname{tg} \alpha'_0) Fr + \bar{k}_3 (rh)_p \gamma_{л} L \operatorname{tg}^2 \alpha'_0 Fr^2 = \\ &= 900 \sqrt{0,5 \cdot 9,25^2} [13,5 \cdot 10^{-2} (1 + 2 \cdot 0,1 \cdot 0,77 \cdot 6,65)] + \\ &+ 120 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1 \cdot 0,80 \cdot 6,65 \cdot 2] + 8,4 \cdot 0,5 \cdot 900 \cdot 18,5 (0,1 + 0,77 \cdot 0,43) 0,024 + \\ &+ 4,3 \cdot 0,5 \cdot 900 \cdot 123 \cdot 0,43^2 \cdot 0,024^2 = 84\,000 + 720 + 250 = 84\,970 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Пример 3. Определить величину чистого ледового сопротивления мощного ледокола, движущегося со скоростью $v = 6$ узл. в дрейфующем льду, представляющем собой обломки полей средней протяженностью 350 м, толщиной 1,5 м, сплоченностью 8—10 баллов.

С помощью рис. 66 определяем величину коэффициента $c_{к} = 47,5$. По формуле (118) находим

$$\begin{aligned} R_{лч} &= (c_{к} + 9,0v_{ср}^{1,3}) h^{1,2} = (47,5 + 9,0 \cdot 3,0^{1,3}) 1,5^{1,2} = \\ &= (47,5 + 9,0 \cdot 4,16) 1,62 = 138 \text{ м}. \end{aligned}$$

вигацию 1939 г. на ледоколе «Сибирь» под руководством В. В. Давыдова. Во время испытаний проводились пробеги ледокола в сплошных и битых льдах с фиксированием мощности энергетической установки, скорости хода и параметров льда. В 1941 г. было организовано специальное исследование ходкости ледоколов «Ермак» и «Трувор» с целью выяснения возможности непосредственного использования результатов испытаний при проектировании ледоколов. Наряду с этим, в задачи испытаний входила проверка методики эксперимента, пригодности измерительной аппаратуры и т. д. Материалы этих испытаний в дальнейшем были успешно использованы В. И. Негановым, разработавшим на их основе оригинальную методику пересчета ледового сопротивления с прототипа на проектируемый ледокол.

В 1947 г. натурные испытания ходкости судов ледового плавания и ледоколов были возобновлены и в настоящее время проводятся регулярно. За прошедший период методика проведения испытаний во льдах и используемые приборы систематически совершенствовались, в результате чего за сравнительно небольшой срок удалось достигнуть существенного прогресса.

Натурные испытания могут быть как попутными, в процессе выполнения ледоколом основной работы, так и специальными — с выводом судна из эксплуатации. Практика показала, что попутные испытания не всегда обеспечивают качественное выполнение программы. Они растягиваются на длительный срок и приводят к непроизводительным затратам времени.

Натурные исследования ледовых качеств судов включают несколько взаимосвязанных видов испытаний: испытания ледовой ходкости (прогрессивные испытания во льдах); испытания ледовой прочности корпуса; маневренные испытания; испытания, связанные с проводкой судов; испытания специальных систем и устройств и ряд испытаний вспомогательного характера (швартовные, тяговые и др.).

Натурные испытания ходкости во льдах относятся к числу прогрессивных (скоростных) испытаний, цель которых — получить данные о скорости движения судна в заданных ледовых условиях в зависимости от мощности, развиваемой энергетической установкой, и параметров льда. В частности, на основании таких испытаний может быть определена предельная толщина сплошного льда, преодолеваемого ледоколом, и скорость движения ледокола во льдах заданной толщины.

Сложность прогрессивных испытаний во льдах обуславливается природой среды, которая отличается многообразием свойств и их нестабильностью даже на сравнительно небольших участках. Это требует тщательного выбора ледовых условий для испытаний и детального фиксирования параметров ледяного покрова.

Основное требование заключается в том, чтобы выбранный для прогрессивных испытаний участок обладал достаточно стабиль-

ными характеристиками в отношении толщины, торосистости, разрушенности льда и т. п. На практике установлено, что в зависимости от скорости судна и ряда других обстоятельств минимальная длина пробега с установившейся скоростью движения должна составлять 4—5 длин корпуса. Для получения кривой зависимости ледового сопротивления от скорости достаточно 6—10 точек (пробегов), при этом необходимо, чтобы ледовые условия каждого пробега были идентичными.

Началу испытаний предшествует разведка льда, промеры его толщины бурением по курсу предстоящих пробегов и их обвехование.

Во время пробегов фиксируется скорость движения судна, мощность энергетической установки, число оборотов гребных винтов, а также толщина, прочность, сплоченность, торосистость и прочие характеристики ледяного покрова.

Скорость движения судна измеряют с помощью специальных ледовых лагов. В настоящее время наиболее часто применяются лаг-визир и ледовый лаг ААНИИ.

Лаг-визир позволяет определять среднюю скорость прохождения судном некоторого расстояния, равного базе прибора (обычно 10—20 м). Прибор представляет собой визирный треугольник, устанавливаемый на крыле ходового мостика судна. Время прохождения базы «приметной точкой» на льду фиксируется секундомером либо отмечается регистрирующим прибором. Скорость определяется делением постоянной величины, равной длине базы прибора, на время.

При отсутствии лага-визира средняя скорость судна определяется при помощи «плашек», выбрасываемых на лед. Время прохождения каждой плашкой визиров, установленных на борту судна перпендикулярно к его диаметральной плоскости на известном расстоянии друг от друга, также измеряется секундомером.

Величина погрешности определения скорости судна с помощью лаг-визира зависит от точности измерения пути (базы) и времени. При прямолинейном движении ледокола абсолютная ошибка в измерении пути составляет приблизительно 0,5 м, а относительная ошибка в среднем равна 3—5%. При относительной погрешности отсчета времени, равной 5%, относительная погрешность определения скорости не превысит 10%.

Ледовый лаг системы ААНИИ позволяет определять мгновенную скорость судна или его среднюю скорость на сравнительно небольших участках пути (0,5—1,0 м). Измерение скорости судна производится следующим образом. С помощью якоря (груза) на льду закрепляется свободный конец нитки, пропущенной через калиброванный рабочий ролик лага. При движении ледокола нитка, разматываясь, вращает ролик, который замыкает электроконтактную систему прибора. Импульсы тока последней фиксируются осциллографом и позволяют определять скорость движе-

ния судна, длину пути, проходимого судном, и изменение скорости во времени на этом пути.

Погрешность измерения скорости ледовым лагом ААНИИ зависит от положения нити по отношению к поверхности льда и курсу судна. На рис. 69 показано изменение положения нити при перемещении судна из положения *I* в положение *II*. Из рисунка видно, что пройденный путь s_c равен отрезку $AB = KL$. Длина вытравленной нити на этом участке пути равна разности отрезков FB и FA (где F — точка закрепления нити лага на льду). Из геометрического расположения точек A , B , O и F следует, что

$$\begin{aligned}(FA)^2 &= (OA)^2 + (OF)^2 = (OA)^2 + a_n^2; \\(OA)^2 &= (AK)^2 + (OK)^2 = H_n^2 + (OK)^2; \\OK &= \sqrt{(FA)^2 - a_n^2 - H_n^2}; \\(FB)^2 &= (OB)^2 + (OF)^2 = (OB)^2 + a_n^2; \\(OB)^2 &= (BL)^2 + (OL)^2 = H_n^2 + (OL)^2; \\OL &= \sqrt{FB^2 - a_n^2 - H_n^2}.\end{aligned}$$

Тогда пройденный истинный путь

$$s_c = AB = KL = OL - OK = \sqrt{FB^2 - a_n^2 - H_n^2} - \sqrt{FA^2 - a_n^2 - H_n^2}.$$

Путь, измеренный по длине вытравленной нити $s_n = FB - FA$. Абсолютная погрешность измерения пути $\Delta s_c = s_n - s_c$, а относительная погрешность $\frac{\Delta s_c}{s_c} = \frac{s_n - s_c}{s_c}$. При $H_n = 5$ м, $a_n = 10$ м, длине вытравленной нити в положении судна *I* и *II*, равной соответственно 50 и 53 м, относительная погрешность определения длины пути составляет 3%. Величина погрешности зависит от длины вытравленной нити и при $s_n > 100$ мм становится пренебрежимо малой.

По сравнению с лагом-визиром ледовый лаг ААНИИ обладает более высокой точностью. Однако он менее мобилен и для его обслуживания требуется дополнительно 1—2 человека. Поэтому, как правило, лаг-визир используется при попутных испытаниях, а ледовый лаг — при более точных специальных испытаниях с выводом судна из эксплуатации.

Ледовый лаг и лаг-визир позволяют сравнительно точно измерить скорость только при прямолинейном движении судна. При рыскании погрешность измерений возрастает. Она может быть

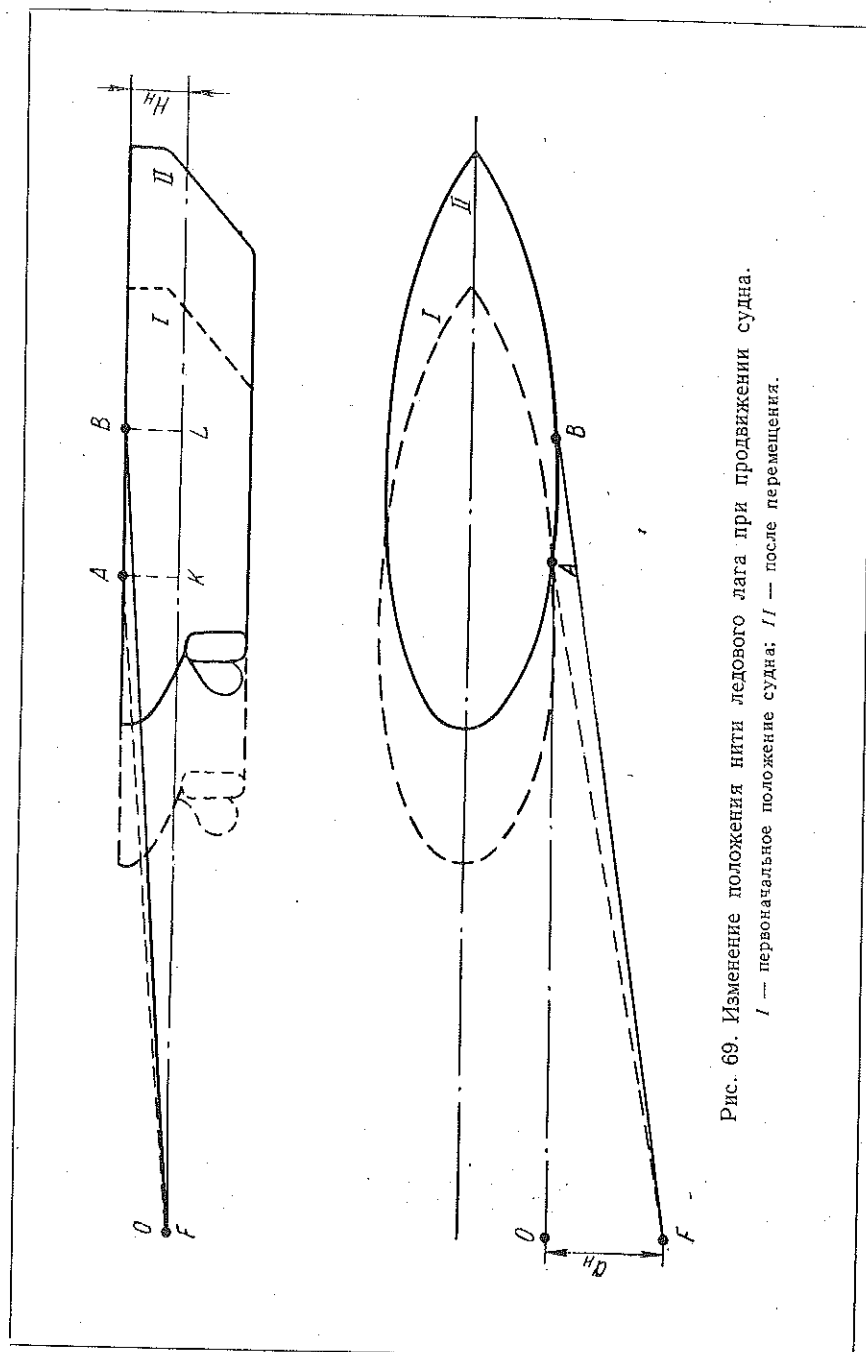


Рис. 69. Изменение положения нити ледового лага при продвижении судна.
I — первоначальное положение судна; *II* — после перемещения.

существенно уменьшена, если установить два лага на обоих бортах судна. При измерении скорости хода с правого и левого бортов средняя скорость вычисляется как $\frac{v_{\text{пр}} + v_{\text{лев}}}{2}$.

При проведении испытаний вблизи берегов на значительных участках протяженностью в несколько миль скорость движения судна во льду может быть определена по времени прохождения «мерных» участков, измеряемых с помощью методов счисления, подробно описанных в работах [18] и [19]. Этот способ аналогичен применяемому при испытаниях судна на «мерной миле».

Непосредственное измерение тяги гребных винтов в настоящее время не производится ввиду отсутствия надежных приборов (упоромеров). Поэтому при натурных испытаниях во льдах ограничиваются измерением мощности энергетической установки и числа оборотов гребных винтов.

Все современные ледоколы и транспортные суда ледового плавания оборудованы гребными электрическими установками, поэтому подводимую к гребному винту мощность можно определять с помощью зависимости

$$N_p = 1,36 \cdot 10^{-3} I U \eta_{\text{э}} \eta_{\text{в}}, \quad (119)$$

где I — ток, подводимый к гребному электродвигателю;
 U — напряжение тока на клеммах электродвигателя;
 $\eta_{\text{э}}$ — коэффициент полезного действия электродвигателя, зависящий от мощности и определяемый на основании данных стендовых испытаний или расчетным путем;
 $\eta_{\text{в}}$ — коэффициент полезного действия валопровода, обычно равный $0,98 \div 0,99$.

В процессе испытаний значения тока и напряжения фиксируются осциллографом. Для этого используются шунты штатных судовых приборов — амперметров и вольтметров. Непосредственное использование самих штатных судовых вольтметров и амперметров не рекомендуется, так как класс точности этих приборов недостаточно высок. Исключение можно сделать лишь для штатных ваттметров, измеряющих мощность, развиваемую гребным электродвигателем. Относительная погрешность измерения мощности обычно не превышает 5%.

Измерение числа оборотов гребных винтов $n_{\text{в}}$ производится с помощью датчика, монтируемого в виде выступа на гребном валу, который замыкает ток в электрической цепи осциллографа при каждом обороте гребного вала. Такой способ измерения позволяет с высокой степенью точности определять число оборотов винта для любого отрезка времени. Не рекомендуется использовать судовые электротометры для измерения числа оборотов винтов, так как эти приборы не обладают достаточной точностью. При наличии на судне нескольких гребных винтов обязательно фиксируется число оборотов каждого.

Поскольку все перечисленные выше параметры (скорость судна, ток и напряжение, число оборотов винтов) фиксируются одновременно, для их записи может потребоваться от 6 до 16 каналов регистрирующего прибора (осциллографа). На рис. 70 приведена осциллограмма с записью параметров пробега в ровных сплошных льдах двухвинтового ледокола.

Во время прогрессивных испытаний во льдах производится также оценка параметров ледяного покрова: толщины льда и снега, прочностных характеристик ледяного покрова, его торосистости, разрушенности, заснеженности и т. п. Толщина льда и

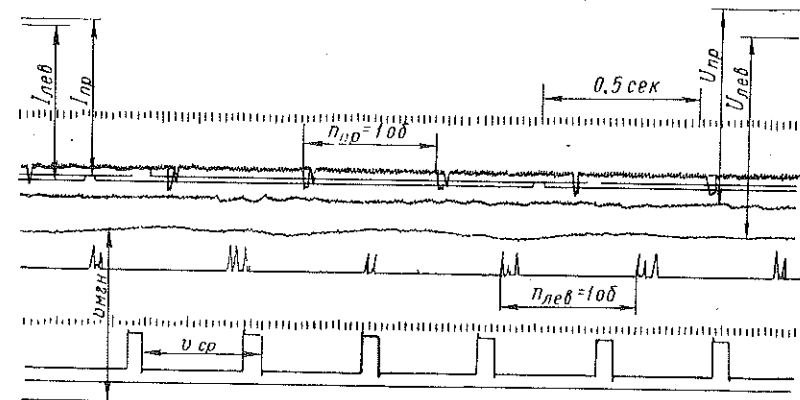


Рис. 70. Осциллограмма с записью параметров натурных испытаний ледовой ходкости.

снега измеряется как во время пробега с борта ледокола, так и после пробега со льда. Для измерения толщины льда и снега с борта судна применяются Т-образные ледомерные рейки, показания которых оцениваются визуально или фотографированием рейки и льдины с крыла мостика (рис. 71). Абсолютная погрешность измерения толщины льда с борта судна составляет ± 5 см, что при толщине льда в 1 м соответствует относительной погрешности 5%.

После окончания каждого пробега толщина ледяного покрова измеряется по кромкам канала стандартной ледомерной рейкой со льда. Иногда производится бурение кольцевым буром сквозных отверстий в ледяном покрове вблизи кромок канала. Абсолютная погрешность таких измерений ± 2 см.

Толщина снега измеряется снегомерной рейкой.

Прочностные характеристики ледяного покрова определяются после окончания каждой серии пробегов судна. Обычно измеряется предел прочности льда на изгиб; в некоторых случаях определяется модуль упругости, предел прочности при сжатии, фрикционные характеристики льда и т. д.

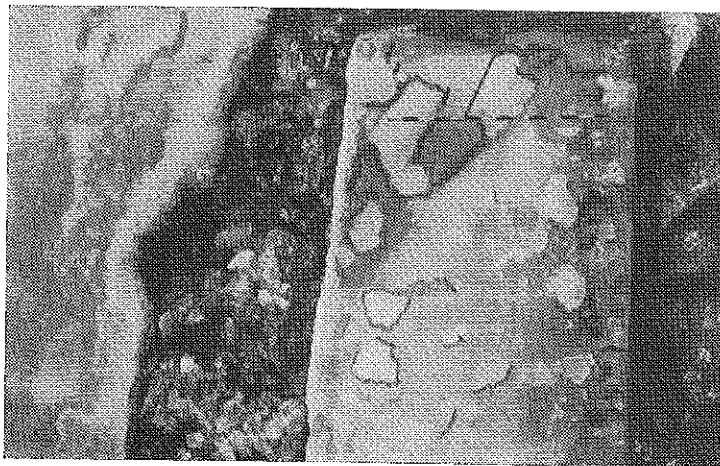


Рис. 71. Измерение толщины льда с борта судна ледомерной рейкой.

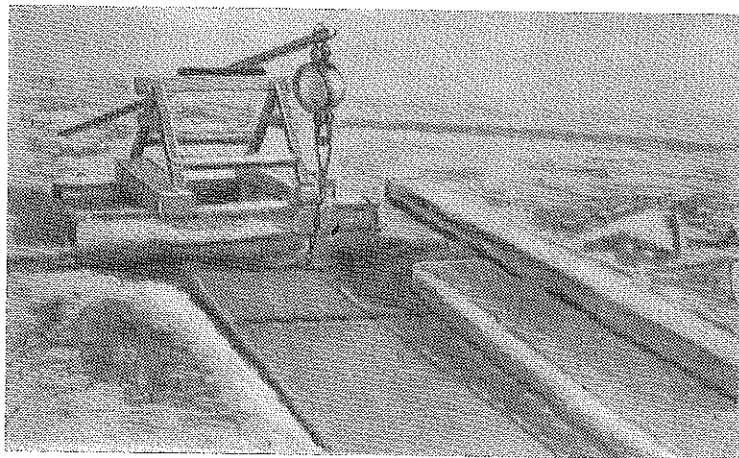


Рис. 72. Образец льда (консоль) для испытаний на плаву.

Прочность льда на изгиб определяется либо методом испытания консолей, либо с помощью испытаний так называемых «малых» образцов льда. Первый способ оценки прочности ледяного покрова более точен, но и более трудоемок. Кроме того, он сопряжен с длительной стоянкой судна, так как все работы по испытанию ледяных консолей производятся на льду. Испытания же «малых» образцов могут выполняться на борту судна.

Испытания консолей на плаву (рис. 72) практически возможны при толщине ледяного покрова от 0,15 до 0,8 м. Образец для испытаний выпиливается на таком участке поля, который находится на расстоянии, исключающем возможность появления напряжений и трещин, вызванных ледоколом. Оно обычно равно 20—30 м от борта. Размеры образцов должны соответствовать требованиям, приведенным в специальной инструкции по испытаниям прочности льда. Для замера разрушающего усилия применяются пружинные или другие механические динамометры, а также тензометрические динамографы. Последние в сочетании с электрическими датчиками линейных или угловых перемещений, используемых для фиксирования упругой линии образца, позволяют получить запись диаграммы разрушения ледяной консоли во времени и, следовательно, определить статический модуль упругости.

Предел прочности образца на изгиб σ_p определяется по формуле

$$\sigma_p = \frac{6P_k l_k}{b_k h^3},$$

где P_k — разрушающее усилие;
 l_k — длина консольной балки;
 b_k — ее ширина;
 h — толщина ледяного покрова;
 статический модуль упругости E

$$E = \frac{4P_k^3}{\omega_k b h^3},$$

где ω_k — прогиб консоли в месте приложения силы.

Малые образцы выпиливают из различных слоев льда и подвергают разрушению изгибом на прессе ПИМ-100 (рис. 73) как балки на двух опорах с усилием, приложенным посередине. Стандартный размер образца обычно $4 \times 4 \times 40$ см.

Величину σ_p для малых образцов определяют по формуле

$$\sigma_{p_m} = \frac{3P_m l_m}{2b_m h_m^2},$$

где P_m — разрушающее усилие;
 l_m — длина образца;
 b_m — ширина образца;
 h_m — толщина образца.

Определение модуля упругости при испытаниях «малых» образцов сопровождается большими погрешностями и поэтому нецелесообразно.

Одновременно с определением предела прочности льда измеряется температура воздуха, воды и льда, а также соленость. Последнюю определяют либо с помощью электросоленомера, либо титрованием.

Методика испытаний фрикционных характеристик ледяного покрова подробно описана в [74]. Испытания заключаются в буксировке ледяных и стальных образцов по ледяной поверхности (рис. 74). При этом стремятся к тому, чтобы условия испытаний по возможности наиболее близко соответствовали условиям работы судна во льдах.



Рис. 73. Разрушение «малых» образцов льда на прессе.

Замеряемыми величинами являются сила трения, скорость буксировки, а также температура воздуха, поверхности образца и льда. Запись силы трения и скорости буксировки во времени производится осциллографом. В качестве измерительной аппаратуры используются тензометрические динамографы и датчики скорости.

Торосистость, разрушенность, сплоченность льда и протяженность льдин фиксируются во время пробегов путем визуальных наблюдений с ходового мостика судна. Точность определения этих параметров, таким образом, невысока и в большой мере зависит от опыта наблюдателя. В особен-

ности это относится к определению протяженности льдин. Поэтому при испытаниях в мелкобитых льдах обычно пользуются методикой, основанной на определении «условных» расчетных значений протяженности и толщины льда, которая не требует фиксирования конкретных размеров льдин (см. § 25).

Помимо перечисленных параметров льда и характеристик судна, при проведении натуральных испытаний ходкости фиксируется также осадка носа и кормы судна в начале и после окончания испытаний, время начала и окончания каждого пробега, координаты места испытаний и т. п.

В процессе испытаний проводятся наблюдения за характером движения судна во льду и взаимодействием его корпуса с ледяным покровом. Наблюдения ведутся с борта ледокола (из специально оборудованной беседки, с выставленного за борт трапа и т. п.), а также со льда (рис. 75), с другого судна или с вертолета. При этом изучается процесс возникновения и развития трещин на льду (их характер, направление, протяженность); фиксируются очертания и размеры участка льда, сминаемого («прорезаемого») форштевнем, а также очертания и размеры секторов, обламываемых бортом, их расположение по отношению к корпусу; характер их прохождения вдоль борта и в районе расположения гребных вин-



Рис. 74. Определение коэффициента трения льда в натуральных условиях.

тов. Кроме того, определяется ширина и конфигурация канала, прокладываемого ледоколом, его засоренность льдом, расположение и размеры обломков льда в канале, протяженность участка чистой воды за кормой ледокола и т. д.

Маневренные качества судна тесно связаны с его ледопроницаемостью и основными характеристиками энергетической установки. Маневренные испытания производятся в сплошных и битых льдах различной толщины, торосистости и сжатия при различных видах загрузки и балластировки судна. К числу показателей маневренности, поддающихся количественной оценке, относятся диаметр и время циркуляции судна во льду (рис. 76) и инерционные характеристики.

Измерение диаметра циркуляции обычно осуществляется с помощью радиолокатора.

При инерционных испытаниях производятся выбеги судна во льду при реверсе, пуске и остановке энергетической установки. Длина и время выбегов определяются с помощью ледового лага системы ААНИИ либо с помощью «плашек» и секундомера.

Натурные испытания ледовой прочности корпуса связаны с испытаниями ледовой ходкости. Методика испытаний прочности

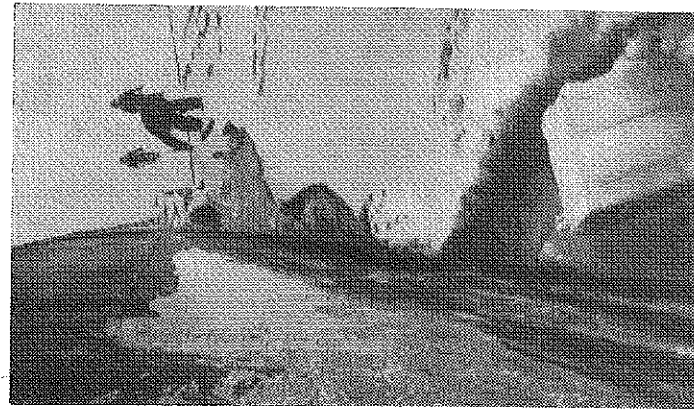


Рис. 75. Измерение параметров взаимодействия корпуса со льдом при натуральных испытаниях.

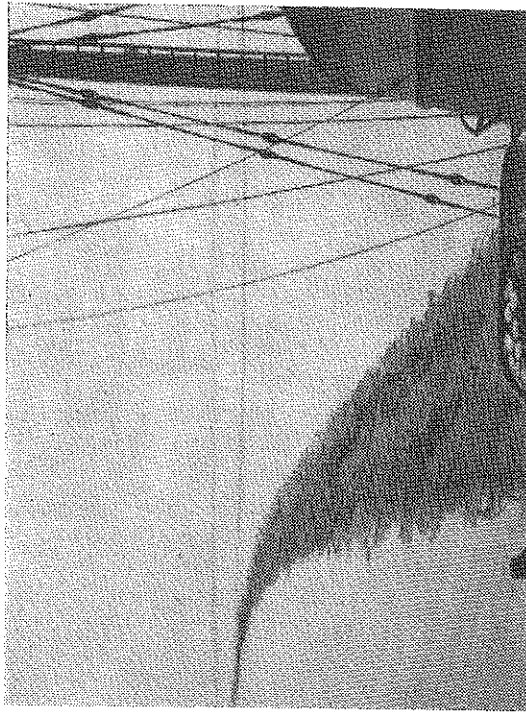


Рис. 76. Испытания циркуляции судна во льду.

судов во льдах подробно описана в работе [71]. Практикуется одновременное проведение испытаний ледовой ходкости и прочности, дающие наилучшие результаты.

Испытания специальных систем и устройств судна (гребные винты, креновая и дифференциальная системы, виброустановки, гидроомывающие устройства) носят характер сравнительных. В одинаковых ледовых условиях выполняются пробеги судна с работающим в заданном режиме соответствующим устройством. Во время пробегов производятся необходимые измерения и наблюдения ледовой обстановки и характеристик судна. Так, для изучения влияния режима работы винтов на качество канала за ледоколом проводились пробеги трехвинтового ледокола в ровном сплошном льду толщиной 1,0 м при различных режимах распределения мощности между винтами. Данные измерений характеристик судна и параметров льда приводятся в табл. 12. Для оценки качества канала производилось его фотографирование с вертолета.

По методу сравнительных испытаний производятся также натурные эксперименты, имеющие целью непосредственное сопоставление ледовых качеств двух или нескольких судов. Такой способ оценки дает наиболее наглядные результаты.

Эффективность проводки ледоколом судов во льдах оценивается временем, затрачиваемым на околку, буксировку и проводку судов в различных ледовых условиях. Испытания сводятся к измерению затрат времени ледокола на выполнение указанных операций с фиксированием ледовой обстановки и режимов работы энергетических установок ледокола и проводимых судов. Резуль-

Таблица 12

Результаты испытаний ледокола при различном распределении мощности между винтами

Распределение мощности между винтами, %	Толщина, см		Скорость ледокола, узлы	Число оборотов винтов в мин.			Мощность на винте, кет			Суммарная мощность на винтах, кет
	льда	снега		левый	средний	правый	левый	средний	правый	
33,3	100	15	4,0	105	90	105	4960	5 050	5000	15 010
25	100	15	4,0	105	108	102	3840	7 680	3840	15 360
16,5	100	15	4,0	85	111	85	2500	10 100	2500	15 100

таты наблюдений оформляются в виде таблиц. При накоплении достаточного количества данных они обрабатываются методами математической статистики для выявления общих закономерностей.

Необходимо учитывать, что, помимо собственно ледовых качеств судна (ледопроеходимости, маневренности и др.), на эффективность работы ледокола по проводке судов большое влияние оказывают мастерство судоводителя.

Швартовные и тяговые испытания относятся к числу вспомогательных и проводятся по общепринятой методике. Эти испытания необходимы для уточнения расчетных тяговых характеристик гребных винтов ледоколов. Специфика проведения швартовных испытаний в ледовых условиях заключается в следующем. Судно ставят таким образом, чтобы оно упиралось носом в лед, а за его кормой оставалось пространство свободной воды протяженностью не менее 2—3 длин корпуса. Замеряемые величины: сила и напряжение тока, подводимого к гребным электродвигателям, и число оборотов винтов.

При тяговых испытаниях измеряются дополнительно тяговое усилие на гаке и скорость буксировки. Для проведения таких испытаний необходимо второе судно, которое соединяется при помощи буксирного троса (корма к корме) с испытываемым и служит для его удержания. Тяговое усилие в буксирном тросе измеряется с помощью накладных и пружинных динамометров, тензодинамографов и т. п. Точное измерение скорости буксировки обеспечивается при проведении тяговых испытаний на мерной миле.

Техника и методика натурных испытаний во льдах в настоящее время еще несовершенна и нуждается в улучшении. Как показано выше, при испытаниях судов во льдах характеристики судна (скорость, мощность силовой установки, число оборотов винтов, посадка судна и др.) измеряются с довольно высокой степенью точности. Из параметров ледяного покрова лишь толщина льда и его физико-механические качества измеряются инструментальным путем. Торосистость, разрушенность, сжатие и другие параметры льда оцениваются визуально. Совершенствование натурных испытаний должно в первую очередь идти по пути устранения этого недостатка.

§ 27. Использование результатов натурных испытаний. Проверка рекомендуемых формул натурными данными

Первичная обработка данных прогрессивных испытаний во льдах заключается в расшифровке записей показаний приборов с использованием соответствующих тарифовочных характеристик. На основе этих данных строятся графики изменения основных характеристик судна и параметров льда для каждого пробега. Так, при прогрессивных испытаниях в сплошных льдах строится

график изменения скорости судна v , мощности энергетической установки N_p и толщины льда h (рис. 77). На этом графике выделяется участок установившегося движения, используемый для выбора средней скорости хода судна и соответствующих ей средних значений мощности и толщины ледяного покрова.

Полученные средние значения N_p , h , v и n_b принимаются в качестве исходных при расчете чистого ледового сопротивления, которое при установившемся движении судна будет

$$R_{лч} = \sum P_i (1 - t_i) - R_b, \quad (120)$$

где P_i — упор, развиваемый каждым гребным винтом;
 t_i — коэффициент засасывания соответствующего винта.

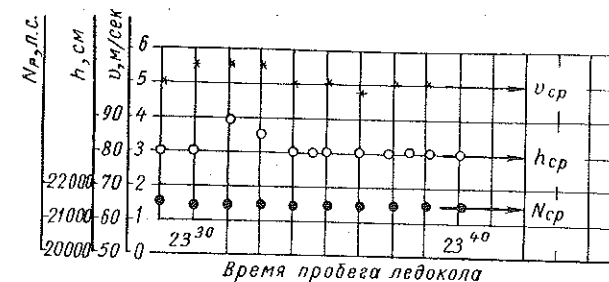


Рис. 77. График изменения v , h и N_p при пробеге во льду.

В первой стадии расчета делается предварительная проверка согласованности между собой первичных замеров N_p , n_b и v . Для этого вычисляют мощность либо по формуле (119), используя значения I и U , замеренные во время испытаний, либо по паспортной диаграмме винта типа приведенной на рис. 78 в функции от замеренных величин n_b и v .

Значения N_p не всегда совпадают с паспортной мощностью N'_p , что объясняется неточностью замеренных значений N_p и n_b или несоответствием геометрических элементов установленного винта проектным, положенным в основу расчета паспортной диаграммы. В первом случае разброс точек носит случайный характер, во втором имеется некоторая закономерность этого разброса. Точки, представляющие экспериментальный «брак», не подвергаются дальнейшей обработке.

Таким образом, сравнение N_p с N'_p позволяет оценить достоверность и взаимную согласованность данных эксперимента, а также в известной степени откорректировать паспортные диаграммы.

Расчет упора гребных винтов (каждого в отдельности) производится с использованием откорректированных паспортных диаграмм. Значения упора P_i определяются по диаграмме упора

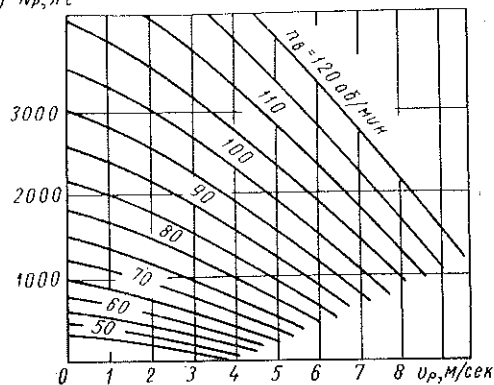
(рис. 78, б) по заданной скорости v_p и числу оборотов винта $n_{в.э}$, полученным при натурном эксперименте:

$$P_i = f(n_{в.э}, v_p),$$

где $v_p = v_a(1 - \omega)$,

ω — коэффициент попутного потока, определяемый по результатам пропульсивных испытаний судна или его модели.

а) $N_p, лс$



б) $P_i, кг$

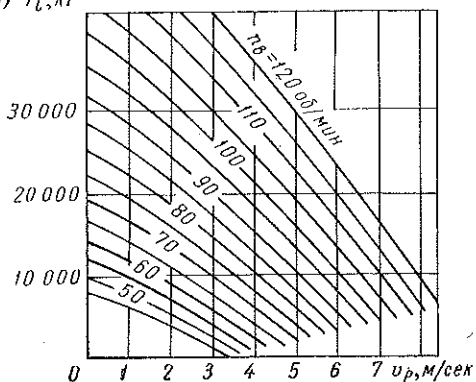


Рис. 78. Паспортная диаграмма бортового винта ледокола «Сибирь»: а — диаграмма мощности; б — диаграмма упора.

Чистое ледовое сопротивление $R_{лч}$ определяется как разность между суммарной тягой гребных винтов и сопротивлением воды движению ледокола $R_{в}$ при заданной скорости.

Погрешность определения сопротивления натурального судна по результатам испытаний в конечном итоге складывается из погрешностей замеров мощности и числа оборотов (которые сравнительно

Расчет упора по паспортной диаграмме можно производить и в иной последовательности: или найти по диаграмме мощности (рис. 78, а) паспортную скорость $v_{р.п} = f(N_{р.э}, n_{в.э})$ и по данным $v_{р.п}$ и $n_{в.э}$ определить по диаграмме упора $P_i = f(v_{р.п}, n_{в.э})$, или по диаграмме мощности определить число оборотов $n_{в.п} = f(N_{р.э}, v_{р.э})$ и по данным $v_{р.э}$ и $n_{в.п}$ по диаграмме упора вычислить $P_i = f(v_{р.э}, n_{в.э})$.

Из трех вариантов расчета упора основным является первый, в котором значения P_i и N_p определяются на основе измеренных значений числа оборотов и скорости.

Расчет тяги $P_e = P_i(1 - t_i)$ выполняется также отдельно для каждого винта. Коэффициент засасывания t_i определяется по данным пропульсивных испытаний как $t_i = f(t_0, \lambda_p)$, где t_0 — коэффициент засасывания при $\lambda_p = 0$, а λ_p — относительная поступь.

невелики), а также погрешности расчета тяги винтов. Последняя может достигать значительной величины, так как зависит от точности диаграмм и достоверности данных о коэффициентах взаимодействия винта с корпусом.

Результаты расчета $R_{лч}$ наносятся на диаграмму $R_{лч} = f(v)$ в виде экспериментальных точек, по которым строится кривая зависимости чистого ледового сопротивления от скорости.

Как отмечалось выше, результаты натурных испытаний ледовой ходкости судна могут быть использованы для непосредственной практической оценки ледопроеходимости судов, для изучения физики процесса движения судна во льдах, разработки на этом основании условий подобия и теоретического анализа законов ледового сопротивления, для проверки расчетных формул и результатов модельных пересчетов.

Способ непосредственной оценки ледовых качеств судов на основании натурных данных применяется при решении ряда практических задач, из которых основной является определение эксплуатационных характеристик ледовой ходкости судна. Для этого результаты испытаний представляются в виде графиков или таблиц, связывающих скорость движения судна с мощностью, развиваемой энергетической установкой (расчет ледового сопротивления в этом случае не производится), и параметрами ледяного покрова. Пример такого графика приведен на рис. 79.

Как правило, оценка ледопроеходимости указанным способом производится для головных судов новых серий ледоколов и транспортных судов ледового плавания. С этой целью организуются соответствующие натурные испытания, которые проводятся в ледовых условиях, типичных для эксплуатации судна данного класса. Непосредственное использование результатов натурных испытаний возможно также при сопоставительной оценке ледовой ходкости двух (или более) построенных судов. В этом случае, как правило, прибегают к совместным натурным испытаниям в одинаковых ледовых условиях с последующим сопоставлением результатов испытаний. На рис. 80 представлены результаты натурных испытаний двух транспортных судов. Из анализа графиков

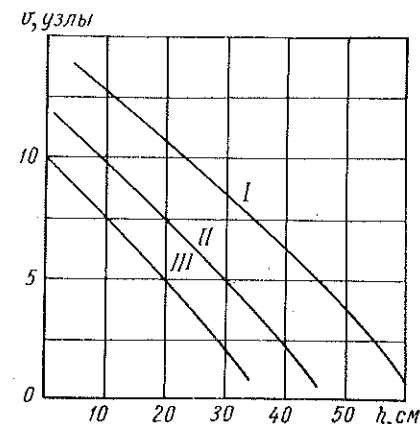


Рис. 79. График зависимости скорости ледокола от толщины сплошного льда и мощности энергетической установки N_p .

I — $N_p = 100\%$; II — $N_p = 66\%$; III — $N_p = 33\%$.

не производится для головных судов новых серий ледоколов и транспортных судов ледового плавания. С этой целью организуются соответствующие натурные испытания, которые проводятся в ледовых условиях, типичных для эксплуатации судна данного класса.

Непосредственное использование результатов натурных испытаний возможно также при сопоставительной оценке ледовой ходкости двух (или более) построенных судов. В этом случае, как правило, прибегают к совместным натурным испытаниям в одинаковых ледовых условиях с последующим сопоставлением результатов испытаний. На рис. 80 представлены результаты натурных испытаний двух транспортных судов. Из анализа графиков

следует, что судно типа дизель-электрохода «Амгуема» обладает более высокой ледопроеходимостью в сплошных льдах.

При использовании результатов натуральных испытаний для анализа физической картины движения судна во льдах и установлении

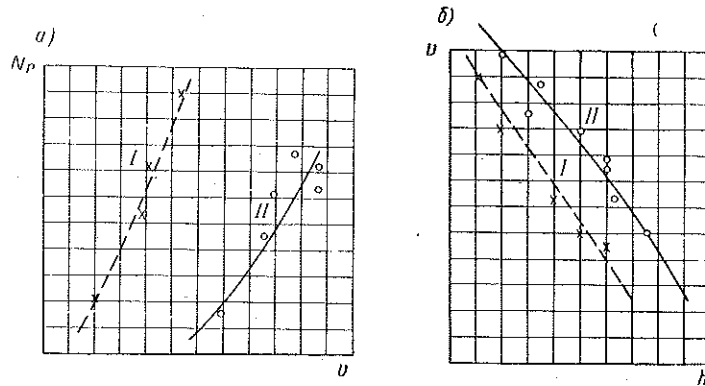


Рис. 80. Проходимость в сплошных льдах транспортных судов ледового плавания по данным натуральных испытаний: а — график зависимости $N_p = f(v)$, б — график зависимости $v = f(h)$.

I — дизель-электроход типа «Лена», II — дизель-электроход типа «Амгуема».

критериев подобия одинаково важное значение имеют как материалы наблюдений за процессом движения судна во льдах, так и результаты собственно испытаний ледовой ходкости. В зависимости от решаемой задачи форма обработки материалов испыта-

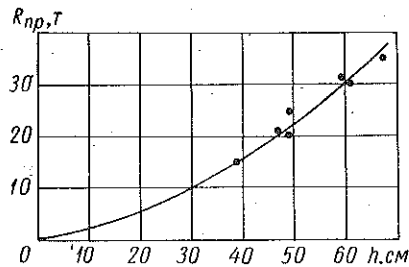


Рис. 81. График зависимости прямого сопротивления вспомогательного ледокола от толщины льда, полученный по результатам натуральных испытаний.

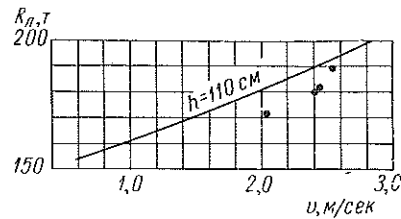


Рис. 82. Сопоставление результатов расчета ледового сопротивления мощного ледокола с данными его натуральных испытаний в сплошных льдах.

ний может быть различной. Так, при анализе закономерностей прямого сопротивления может быть построена зависимость, представленная на рис. 81.

Данные натуральных испытаний необходимы для проверки результатов расчета ледового сопротивления по рекомендуемым формулам. Обычно проверка заключается в построении графика зависи-

мости ледового сопротивления от скорости $R_{лч} = f(v)$, на который наносятся натурные точки и кривая, полученная путем расчета по формуле. Ниже приводятся несколько примеров такой проверки для случаев движения судна в сплошных и мелкобитых льдах.

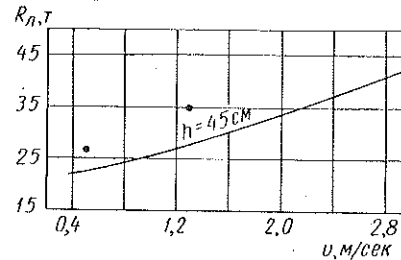


Рис. 83. Сопоставление результатов расчета ледового сопротивления среднего ледокола с данными его натуральных испытаний в сплошных льдах.

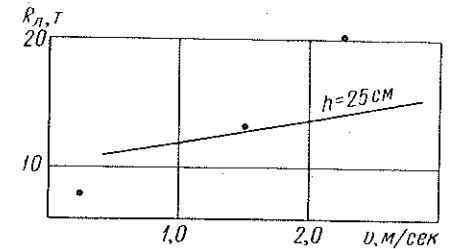


Рис. 84. Сопоставление результатов расчета ледового сопротивления вспомогательного ледокола с данными его натуральных испытаний в сплошных льдах.

На рис. 82, 83 и 84 приведены результаты натуральных испытаний мощного, среднего и вспомогательного ледоколов во льду толщиной 110, 45 и 25 см соответственно и кривые ледового сопротивления, рассчитанные по формуле (72). На рис. 85 и 86 приведены ре-

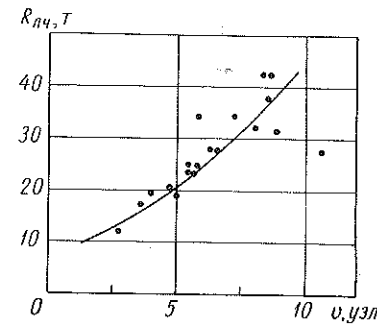


Рис. 85. Сопоставление результатов расчета ледового сопротивления мощного ледокола с данными его натуральных испытаний в мелкобитых льдах ($s = 9 \div 10$ баллов)

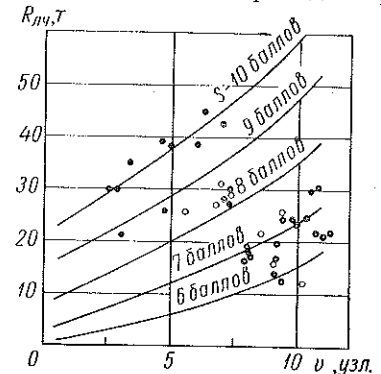


Рис. 86. Сопоставление результатов расчета ледового сопротивления транспортного судна типа УЛ (Аркт.) с данными его натуральных испытаний в мелкобитых льдах.

● — $s = 10$ баллов; ○ — $s = 9$ баллов; ⊙ — $s = 7 \div 8$ баллов.

зультаты расчета ледового сопротивления по формуле (109) и данные натуральных испытаний мощного ледокола и транспортного судна класса УЛ (Аркт.) в «природных» мелкобитых льдах различной сплошенности, а на рис. 87 и 88 данные натуральных испытаний и расчета сопротивления транспортного судна класса УЛ (Аркт.), идущего в канале за мощным ледоколом.

Для проверки рекомендуемых формул был использован также обширный материал, накопленный в период с 1948 по 1966 г. в процессе натуральных испытаний судов различных классов во льдах, таких как ледоколы «Капитан Белоусов», «Илья Муромец», «Москва», «Ленинград», «С. Челюскин», «Терек»; дизель-электроходы «Лена», «Куйбышевгэс», «Пенжина» и др.

Проверка показала, что в целом совпадение натуральных данных с результатами расчета можно признать удов-

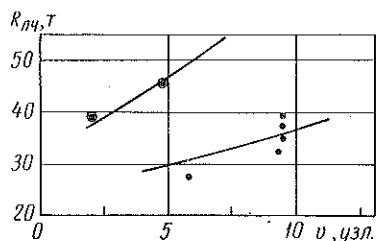


Рис. 87. Сопоставление результатов расчета ледового сопротивления транспортного судна класса УЛ (Аркт.) с данными его натуральных испытаний в канале, проложенном мощным ледоколом в сплошном льду.

● — $h = 1,0 \pm 1,7$ м, ○ — $h = 1,6 \pm 2,8$ м.

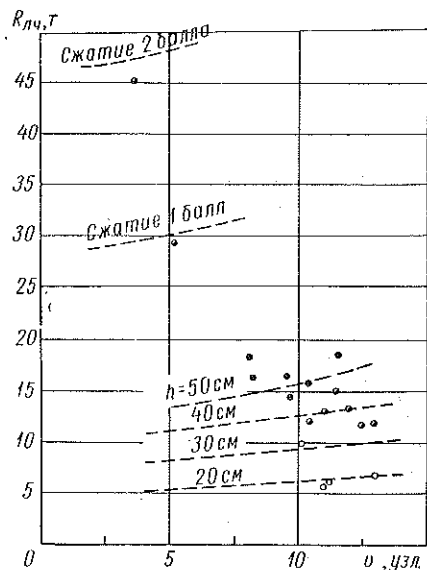


Рис. 88. Сопоставление результатов расчета ледового сопротивления транспортного судна класса УЛ (Аркт.) с данными его натуральных испытаний в канале, проложенном мощным ледоколом в молодом сплошном льду.

○ — $h = 20 \pm 25$ см; ● — $h = 25 \pm 30$ см;
● — $h = 40 \pm 50$ см.

летворительным, принимая во внимание точность, присущую натурным испытаниям во льдах. Это является подтверждением того, что рекомендуемые формулы (72), (109) и (118) можно уверенно использовать для практических расчетов ледопроеходимости.

§ 28. Практический метод расчета скорости судов во льдах. Ледовый паспорт судна

Скорость движения судна во льдах — один из основных показателей, определяющих эффективность эксплуатации флота в арктических и замерзающих неарктических морях.

Выше при описании закономерностей ледового сопротивления говорилось о «достижимых» скоростях, определяемых только условиями ледовой ходкости. Однако для практических целей необходимо достаточно обоснованно производить расчеты безопасной воз-

можной скорости, которая определяется мощностью энергетической установки и прочностью корпуса, воспринимающего ледовые нагрузки.

Прочность корпуса определяет так называемую безопасно допустимую скорость движения во льдах, с которой судно может двигаться без повреждения корпусных конструкций. Как показано в [71], ледовые нагрузки зависят от размерений судна, формы обводов корпуса, скорости движения, толщины и прочности льда. Следовательно, требования, предъявляемые к судну в отношении его ледовой ходкости и прочности, тесно связаны между собой и при определении безопасных возможных скоростей движения судов во льдах должны учитываться совместно. Только таким путем достигается наиболее полное использование мощности силовой установки в соответствии с ледовой прочностью корпуса.

Для практического определения безопасных возможных скоростей движения могут быть рекомендованы диаграммы ледопроеходимости, на которые наносят кривые ледовой ходкости в виде зависимости скорости движения судна от толщины льда (или его сплоченности, сжатия и т. п.) при различных режимах работы энергетической установки и кривые строительной и предельной прочности.

Кривые ледовой ходкости рассчитываются с помощью формул, приведенных в данной книге. Расчет сводится к определению ледового сопротивления для нескольких произвольно заданных значений скорости. На основании такого расчета строится график зависимости ледового сопротивления $R_{л}$ от скорости хода и параметров льда, например толщины сплошного льда (рис. 89). На этот же график наносится кривая изменения суммарной тяги винтов судна P_{Σ} в зависимости от скорости хода при заданной мощности N_p . Как известно, тяга, развиваемая гребным винтом при постоянной (заданной) мощности, не является постоянной величиной. Она зависит от скорости судна и уменьшается с увеличением последней. Характер этой зависимости обусловлен прежде всего типом энергетической установки судна и характеристиками гребного винта. Для ее построения необходимо располагать внешней характеристикой гребного двигателя и паспортными диаграммами гребного винта. Искомая скорость движения судна при

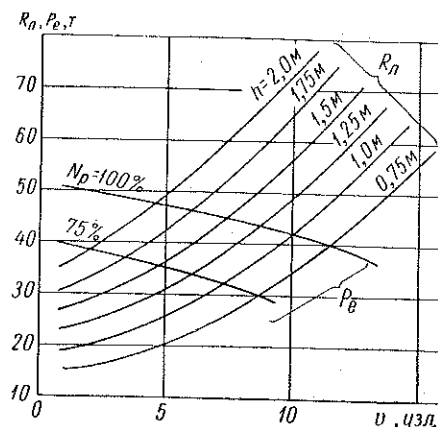


Рис. 89. График ходкости судна во льдах.

заданной мощности (тяге винтов) в заданных ледовых условиях может быть найдена с помощью графика, приведенного на рис. 89, как точка пересечения кривых $R_n = f(v, h)$ и $P_e = f(v)$.

Кривые строительной и предельной прочности рассчитываются по методике, предложенной в [71]. Кривая строительной прочности соответствует таким скоростям движения, при которых напряжения, возникающие в корпусных конструкциях во время

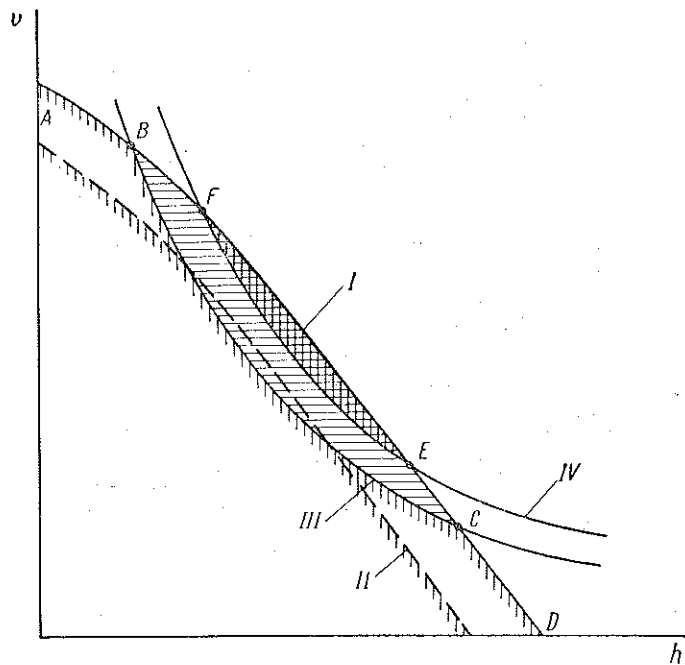


Рис. 90. Диаграмма ледопроеходимости судна.

I — ледовая ходкость (достижимая скорость) при $N_p = 100\%$; II — ледовая ходкость при $N_p = 75\%$; III — строительная прочность (безопасная допустимая скорость); IV — предельная прочность (предельная допустимая скорость).

взаимодействия судна со льдом равны пределу текучести материала. Кривая предельной прочности определяется на основании расчета конструкций в упруго-пластической зоне и соответствует скоростям движения, при которых несущая способность конструкции считается исчерпанной. С помощью этих кривых, нанесенных на диаграмму ледопроеходимости (рис. 90), можно определять безопасные возможные скорости движения судна в заданных конкретных или прогнозируемых ледовых условиях при различных режимах работы энергетической установки. Часть диаграммы, расположенная ниже области ABCD, соответствует безопасным скоростям движения, при которых конструкции корпуса не получают

остаточных деформаций. При этом на участке AB и CD ледопроежимость ограничивается мощностью энергетической установки, а на участке BC — прочностью корпуса. Область BCEF (заштрихована) отвечает скоростям движения, которые, вообще говоря, являются нежелательными ввиду возможности возникновения остаточных деформаций. Плавание с такими скоростями допустимо при соблюдении некоторых предосторожностей, исключающих, например, удары судна о выступающие кромки канала и т. п.

Часть диаграммы, отмеченная двойной штриховкой, соответствует условиям плавания судна, в которых оно при работе энергетической установки на полную мощность может получить серьезные повреждения корпуса аварийного характера.

На диаграммах ледопроежимости наносятся также кривые ледовой ходкости при парциальных мощностях энергетической установки. Так, на рис. 90 кривая ледовой ходкости II построена для $N_p = 75\%$.

Расположение кривых ледовой ходкости и ледовой прочности на диаграммах ледопроежимости может быть различным в зависимости от размерений и формы обводов корпуса судна, мощности энергетической установки и прочности корпуса, а также ледовых условий плавания.

Так, на диаграмме, изображенной на рис. 91, безопасные возможные скорости движения судна при всех режимах работы энергетической установки определяются только его ледовой ходкостью, т. е. достижимые скорости будут и безопасными. На рис. 92 приведена диаграмма, отвечающая случаю, когда безопасная скорость движения ограничивается требованиями ледовой прочности, хотя при работе энергетической установки на полную мощность судно могло бы продвигаться с большей скоростью.

На рис. 93 приведена диаграмма ледопроежимости, занимающая некоторое промежуточное положение между двумя описанными случаями.

Максимальной эффективности использования флота в арктических и замерзающих неарктических морях можно добиться в том случае, если все суда будут плавать со скоростями, близкими к без-

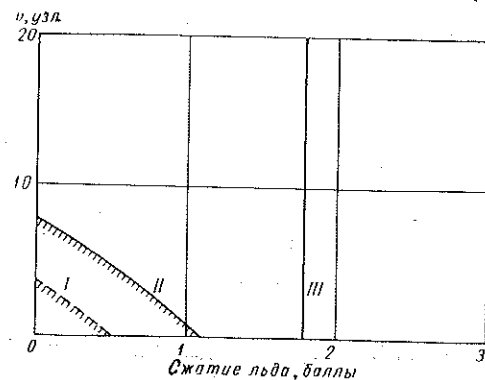


Рис. 91. Диаграмма ледопроежимости транспортного судна ледового плавания в канале за ледоколом, продвигающимся в дрейфующих льдах при сжатии.

I — ледовая ходкость при $N_p = 50\%$; II — ледовая ходкость при $N_p = 100\%$; III — строительная прочность.

опасно возможным. Поэтому представляется целесообразным, чтобы каждое судно ледового плавания имело специальный документ, позволяющий судоводителям, плано-экономическим организациям пароконств и руководству морских операций определять эти скорости.

Такой документ, который можно назвать ледовым паспортом судна, позволит назначать технически обоснованные скорости движения с учетом основных ледовых качеств судна, т. е. его ледовой ходкости и прочности, и особенностей ледовых условий плавания.

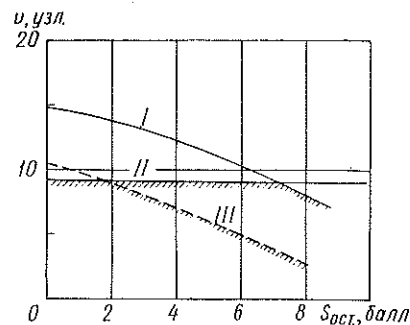


Рис. 92. Диаграмма ледопроеходимости транспортного судна ледового плавания в канале за ледоколом, продвигающимся в сморозях молодого и остаточного годовалого льда.

I — ледовая ходкость при $N_p = 100\%$;
II — строительная прочность; III — ледовая ходкость при $N_p = 50\%$.

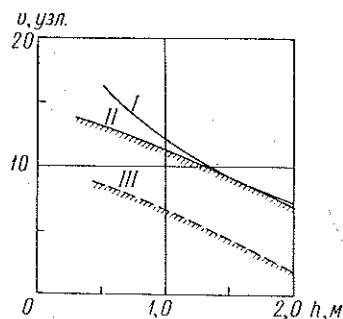


Рис. 93. Диаграмма ледопроеходимости транспортного судна ледового плавания в канале за ледоколом, продвигающимся в дрейфующих льдах.

I — строительная прочность; II — ледовая ходкость при $N_p = 100\%$;
III — ледовая ходкость при $N_p = 50\%$.

Для составления ледового паспорта могут быть использованы диаграммы, аналогичные приведенным на рис. 91—93. Ледовый паспорт судна должен включать комплект таких диаграмм, рассчитанных для различных видов работы судна во льдах (автономное плавание, движение в канале за ледоколом, буксировка), различных периодов навигации и ледовых условий (сплошной, дрейфующий лед и т. п.). В ледовый паспорт желательно также включать данные о маневренных качествах судна, надежности работы энергетической установки, прочности гребных валов и винтов, защищенности винтов и рулей, их соответствии ледовому классу судна. В случае несоответствия каких-либо элементов этим требованиям должны быть наложены ограничения на скорость движения судна.

Поправки на реальные условия плавания (например, метеорологические, не учитываемые в ледовом паспорте) неизбежны, но это не снижает ценности такого документа.

29. Учет природных характеристик ледяного покрова

Полуэмпирические формулы для расчета сопротивления сплошного льда выведены на основе ряда допущений в отношении среды, которые идеализируют ледяной покров и не учитывают различного рода неравномерности. Поэтому при практических расчетах ледопроеходимости по указанным формулам необходимо вводить поправки, основанные на данных натурных испытаний и учитывающие природные особенности ледяного покрова.

Ниже излагается способ учета природных характеристик при оценке проходимости судна в сплошных льдах [33]. Как известно, с помощью формулы (72) можно определить сопротивление ледокола при непрерывном движении в «стандартных» ледовых условиях, представляющих собой ровный бесснежный сплошной ледяной покров. Иными словами, из природных характеристик сплошного льда (см. § 1) формула учитывает лишь его толщину и прочность на изгиб. Однако сплошной морской лед характеризуется еще разрушенностью и торосистостью, которые оказывают существенное влияние на проходимость ледокола в этих льдах.

Анализ расчетов, проведенных по формуле (72), показывает, что влияние толщины и прочности льда на сопротивление судна неравномерно. Так, если на ледопроежимость судна решающее влияние оказывает толщина льда, то влияние прочности льда на изгиб сравнительно невелико. Этот вывод подтверждается результатами натурных испытаний ледоколов. В то же время анализ натурных данных показывает, что закономерной связи между ледопроежимостью и прочностью, полученной на основании испытаний «малых» образцов льда на изгиб $\sigma_{рм}$, не наблюдается. В одних случаях увеличение $\sigma_{рм}$ приводит к уменьшению скорости движения ледокола, в других — к ее увеличению. Из сопоставления данных испытаний малых образцов натурального льда на изгиб следует, что экспериментальный разброс значений $\sigma_{рм}$ имеет тот же порядок, что и отклонения его средних значений, обусловленные естественной неравномерностью льда. Это подтверждает вывод о том, что метод определения прочности натурального ледяного покрова путем испытаний малых образцов на изгиб неудовлетворителен, и при использовании выражения (72) расчетное значение σ_p принимается согласно рекомендациям § 2.

Многолетними натурными наблюдениями установлено, что прожимимость ледоколов в сплошных льдах существенно зависит от изменений, происходящих в ледяном покрове в процессе его таяния. В настоящее время состояние ледяного покрова при таянии принято оценивать визуальным способом с помощью пятибалльной шкалы разрушенности (см. § 1). При этом установлено, что между разрушенностью льда и ледопроежимостью имеется определенная связь. Это свидетельствует о том, что разрушенность льда более

полно, чем прочность на изгиб, отражает комплекс изменений, происходящих в ледяном покрове в процессе его таяния. В этот комплекс, по-видимому, входят изменения средней толщины льда и пределов его прочности, изменение коэффициентов трения, вязкости и т. п.

При оценке проходимости ледокола в зависимости от разрушенности ледяного покрова можно пользоваться диаграммами (рис. 94), построенными по данным натурных испытаний мощного ледокола. На каждой диаграмме представлена зависимость скорости движения ледокола от разрушенности льда в баллах при различных значениях его толщины и постоянной (заданной) мощности энергетической установки. Кривая $h_{пр}$ соответствует пре-

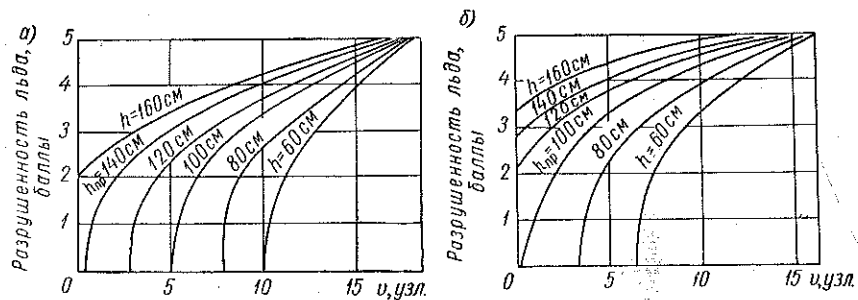


Рис. 94. Диаграммы разрушенности льда: а — $N_p = 100\%$; б — $N_p = 50\%$.

дельной толщине льда нулевой разрушенности, которую ледокол при заданной мощности энергетической установки способен преодолеть непрерывным ходом со скоростью 0,5—1,0 узла. Высота каждой диаграммы представляет в масштабе максимальную разрушенность льда, равную 5 баллам. Длина диаграммы в масштабе равна максимальной скорости, которую ледокол развивает при заданной мощности на свободной воде. По этим диаграммам можно определять проходимость ледокола любого типа во льдах различной толщины с учетом его разрушенности в пределах от 0 до 5 баллов. Результаты расчетов хорошо согласуются с натурными данными, соответствующими нулевой или однобалльной разрушенности льда.

Приближенную оценку проходимости ледоколов различных типов с учетом разрушенности ледяного покрова рекомендуется производить следующим путем. При заданной мощности энергетической установки N_p по формуле (72) производится расчет предельной толщины льда $h_{пр}$, преодолеваемого ледоколом со скоростью 1,0 узла. Затем подбирают диаграмму, соответствующую полученному значению $h_{пр}$ при разрушенности льда 0—1 балл. С помощью такой диаграммы определяют проходимость ледокола при любом заданном значении разрушенности льда и его толщины. Необходимо отметить, что комплект диаграмм для оценки прохо-

димости всех типов ледоколов должен состоять не из двух графиков, как это показано на рис. 94, а из такого числа графиков, который охватывал бы весь встречающийся на практике диапазон изменения $h_{пр}$ с интервалом через 10 см.

Изложенная выше методика может быть использована только при оценке проходимости ледоколов в ровном (неторосистом) сплошном льду. Между тем, состояние ледяного покрова характеризуется также торосистостью.

Оценка степени торосения производится визуально по пятибалльной шкале, которая учитывает соотношение между площадью, занимаемой торосистым льдом, и общей площадью наблюдаемого участка. Такой метод оценки торосистости не является совершенным, так как не учитывает ни вида торосения, ни его мощности (высоты торосов, размеров льдин и т. д.). Установлено, что торосистость сплошного льда оказывает существенное влияние на проходимость ледокола, и участки льда со значительным торосением являются наиболее тяжелыми для продвижения, так как обычно на этих участках ледокол вынужден работать набегам.

На рис. 95 приведена диаграмма для учета торосистости льда. На ней нанесены кривые зависимости скорости движения ледокола от торосистости сплошного льда различной толщины. Диаграмма построена по данным натурных испытаний мощного ледокола во льду различной торосистости (от 0 до 3—4 баллов) и толщины (от 80 до 140 см). Диаграмма может быть использована для приближенной оценки проходимости современных мощных ледоколов в сплошном торосистом льду. Недостаточное количество натурных данных не позволяет пока создать универсальных диаграмм для всех типов ледоколов.

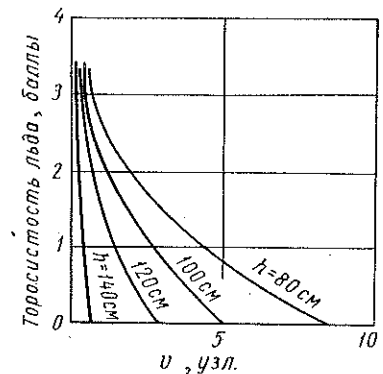


Рис. 95. Диаграмма торосистости льда.

Суда ледового плавания и некоторые особенности их проектирования

§ 30. Ледоколы

Основное назначение ледокола — разрушение ледяного покрова и проводка транспортных судов во льдах. Специфика работы ледокола определяет форму обводов корпуса, которому придается высокая общая и местная прочность (в особенности в районе оконечностей и ледовой ватерлинии). Ледоколы имеют мощную и высокоманевренную энергетическую установку, прочные, хорошо защищенные гребные винты и рули, а также ряд устройств и систем специального назначения (мощное буксирное устройство, креновые и дифферентные системы, подруливающие устройства). Конструкция ходового мостика ледокола обеспечивает хороший обзор в нос и корму.

Современные ледоколы имеют на борту средства ледовой разведки (вертолеты), совершенное навигационное оборудование и средства связи. На крупных ледоколах устанавливаются мощные водоотливные устройства, ремонтные мастерские, водолазные станции и т. п.

Ледоколы, как правило, работают в трудных климатических и метеорологических условиях, в районах, удаленных от портов и редко посещаемых другими судами. Поэтому при большой автономности плавания ледоколы должны иметь обитаемость, отвечающую самым высоким стандартам. Жесткие требования предъявляются также к непотопляемости и живучести ледоколов.

История ледоколостроения практически охватывает период в сто лет. Прототипом современных ледоколов следует считать ледокол «Пайлот» созданный в России в 1864 г. кронштадтским промышленником М. О. Бритневым.

В 1871 г. в Германии с использованием чертежей Бритнева был построен ледокол «Айсбрехер 1». Его носовая оконечность имела тупое «ложкообразное» очертание (рис. 96). В течение последующих 25 лет ледоколы «гамбургского» типа широко применялись в Западной Европе. Практика показала, что такие ледоколы малопригодны для работы в заснеженных и торосистых льдах.

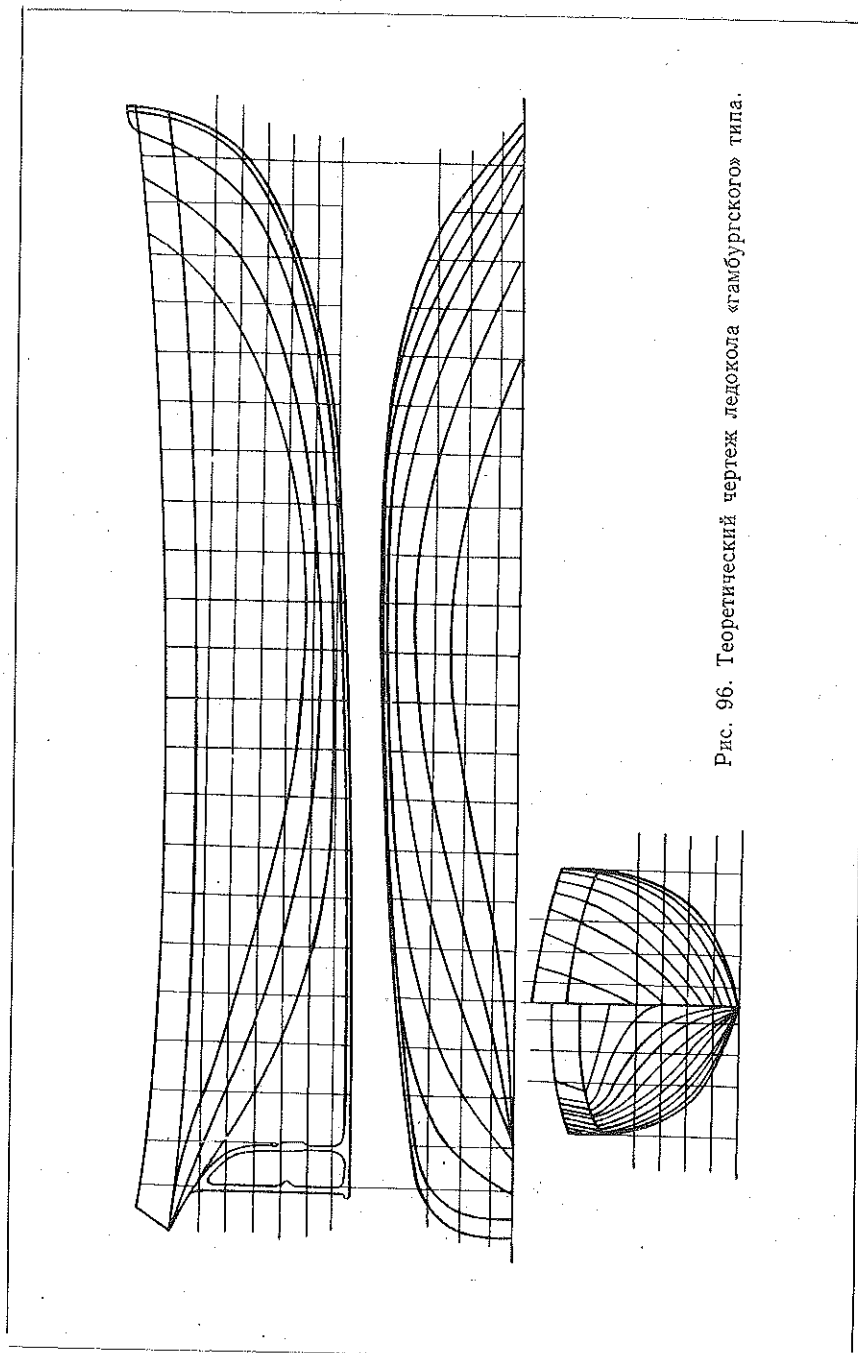


Рис. 96. Теоретический чертеж ледокола «гамбургского» типа.

В 1888 г. в США был построен паром-ледокол «Сан-Игнейс» — первый ледокол «американского» типа. Он имел специфическую форму носовой оконечности, обусловленную наличием носового винта, и мидель-шпангоут округлой формы (рис. 97). Основное назначение носового винта — отбрасывать льдины от носовой оконечности и размывать торосистые образования.

К концу XIX века было построено более 40 ледоколов. Это были сравнительно небольшие суда мощностью от 150 до 1300 л. с., длиной от 30 до 45 м: ледокольные буксиры, пароходы-ледоколы, ледоколы для работы в устьях рек, каналах и гаванях.

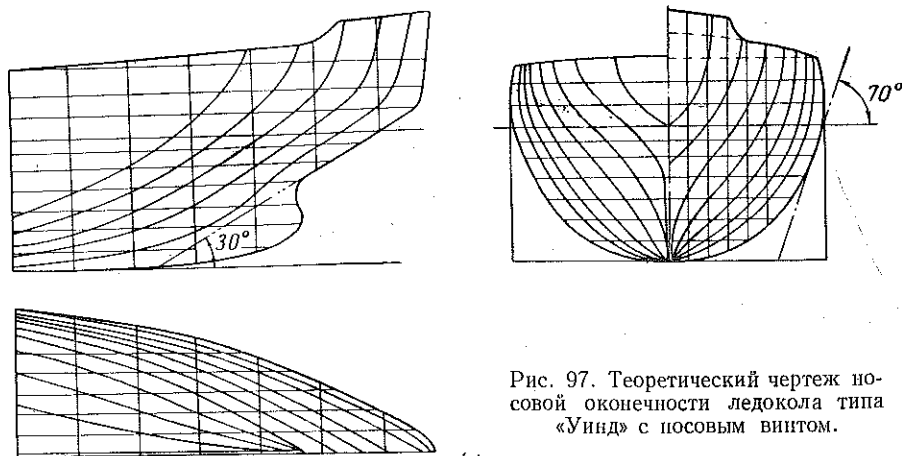


Рис. 97. Теоретический чертеж носовой оконечности ледокола типа «Уинд» с носовым винтом.

Значительным событием явилась постройка ледокола «Ермак» (1899 г.). Технические условия на постройку ледокола были разработаны адмиралом С. О. Макаровым при участии Д. И. Менделеева. «Ермак» представлял собой новый тип ледокола, отличавшийся от всех ранее построенных размерениями, мощностью, числом винтов (три кормовых винта), формой, конструкцией и прочностью корпуса, наличием ряда специальных устройств и систем (например, креновой системы). Форма корпуса ледокола удачно сочетала ледокольные и ледорезные свойства. Носовые шпангоуты имели форму клина, что способствовало разрушению ледяного поля вертикальным давлением и перемещению разломанных льдин вдоль борта. Очертание мидель-шпангоута было близким к трапеции (рис. 98).

Успешная работа «Ермака» во льдах подтвердила преимущества «русского» типа ледокола и оказала влияние на все дальнейшее ледоколостроение в Европе и Америке. Свое развитие «русский» тип ледокола получил в построенных в период первой мировой войны ледоколах «Святогор», «Александр Невский», «Степан Ма-

каров», «Кузьма Минин», «Добрыня Никитич» и др. Мощность энергетической установки этих ледоколов от 4000 до 10 000 л. с.

Необходимо отметить, что в этот период все ледоколы строились Россией на заграничных верфях. Исключение составили ледоколы «Таймыр» и «Вайгач», построенные в 1909 г. на Невском судостроительном заводе. В 1913—1914 гг. эти суда совершили выдающиеся плавания в Арктике, приведшие к открытию Северной Земли и пролива Б. Вилькицкого. Ледокол «Таймыр» успешно прослужил в общей сложности 45 лет [23].

Важной вехой в развитии ледоколостроения явилась постройка в Швеции в 1932 г. ледокола «Имер», впервые оборудованного дизель-электрической энергетической установкой, что позволило повысить энерговооруженность, улучшить маневренные и тактические качества ледокола. По типу «Имера» в Финляндии был построен ледокол «Сису» (1939 г.).

По строительству морских ледоколов СССР прочно занимает ведущее место в мире. С 1938 г. по настоящее время СССР были построены ледоколы типа «Сибирь», «Капитан Белоусов», мощные ледоколы типа «Москва» и, наконец, первый в мире ледокол с атомной энергетической установкой «Ленин». Продолжается строительство большой серии современных портовых ледоколов типа «Добрыня Никитич».

За границей строительство ледоколов сосредоточено главным образом в скандинавских странах, США и Канаде.

На рис. 99—106 приведены теоретические чертежи основных типов отечественных и зарубежных ледоколов.

Современные ледоколы в зависимости от назначения и тактико-технических характеристик могут быть подразделены на классы.

Ниже приводится рациональная, по нашему мнению, классификация ледоколов, заимствованная из [81].* Согласно этой классификации ледоколы подразделяются на три класса.

I класс — «мощный ледокол» — присваивается ледоколам, имеющим мощность энергетической установки свыше 12 000 л. с. Эти ледоколы предназначены для прокладки каналов, проводки, околки и буксировки судов и форсирования тяжелых ледяных перемычек и торосистых образований в арктических морях в течение всей навигации. Ледоколы этого класса могут быть использованы в зимний период в тяжелые по ледовитости годы в замерзающих неарктических морях. К таким ледоколам относятся атомоход «Ленин» и ледоколы типа «Москва» (рис. 107).

II класс — «средний ледокол» — присваивается ледоколам, мощность энергетической установки которых составляет 20 000—10 000 л. с. Они предназначены для прокладки канала, проводки,

* Аналогичная классификация ледоколов принята рядом иностранных классификационных обществ, в частности Английским и Норвежским. В Правилах Регистра СССР классификация ледоколов отсутствует.

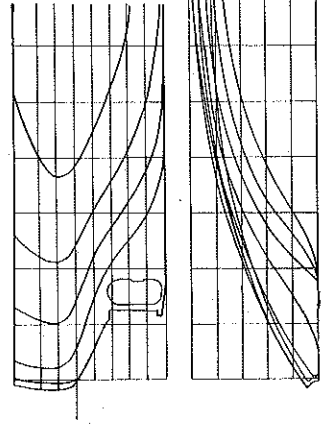


Рис. 98. Теоретический чертеж ледокола «Ермак».

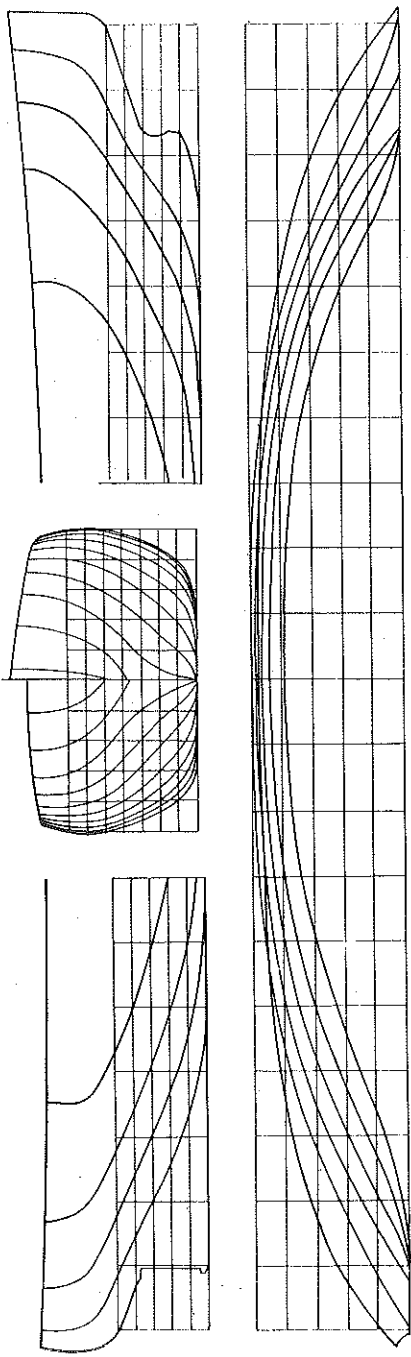


Рис. 99. Теоретический чертеж ледокола «Владимир Ильич».

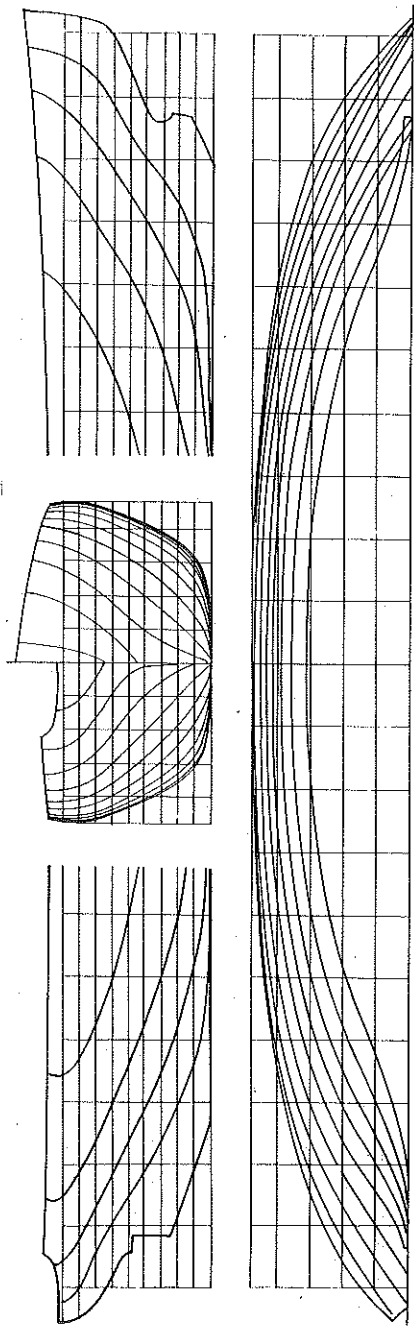


Рис. 100. Теоретический чертеж ледокола «Сибиряков».

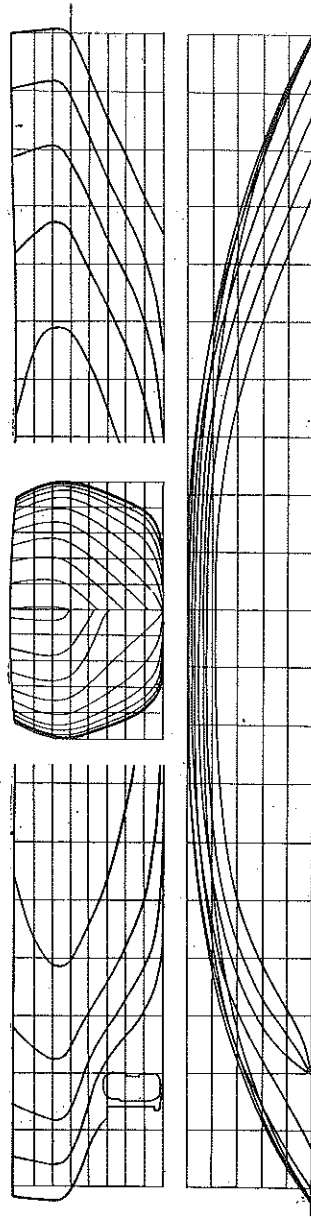


Рис. 101. Теоретический чертеж ледокола «Красин».

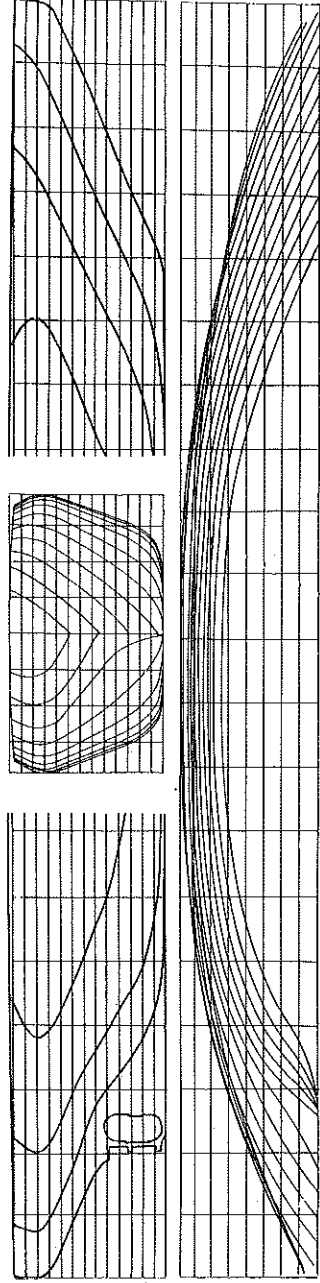


Рис. 102. Теоретический чертеж ледокола «Сибирь».

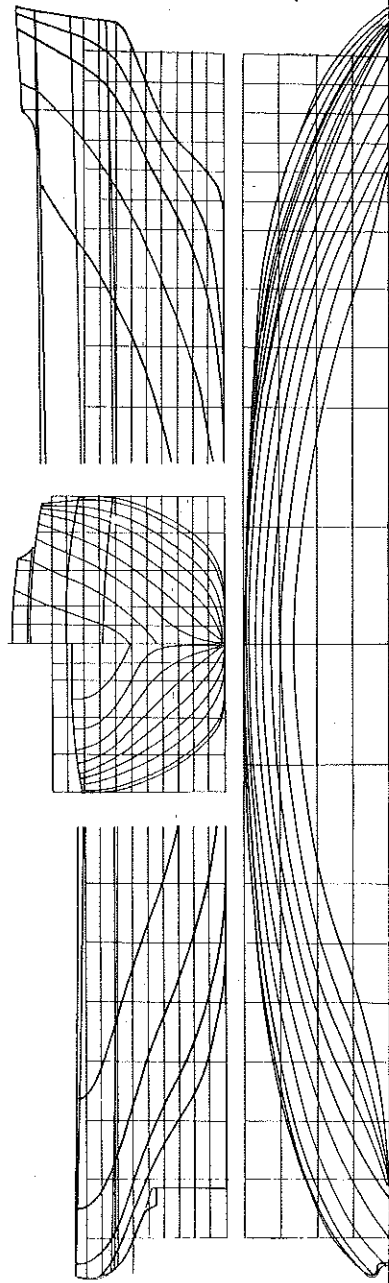


Рис. 103. Теоретический чертеж ледокола «Капитан Белоусов».

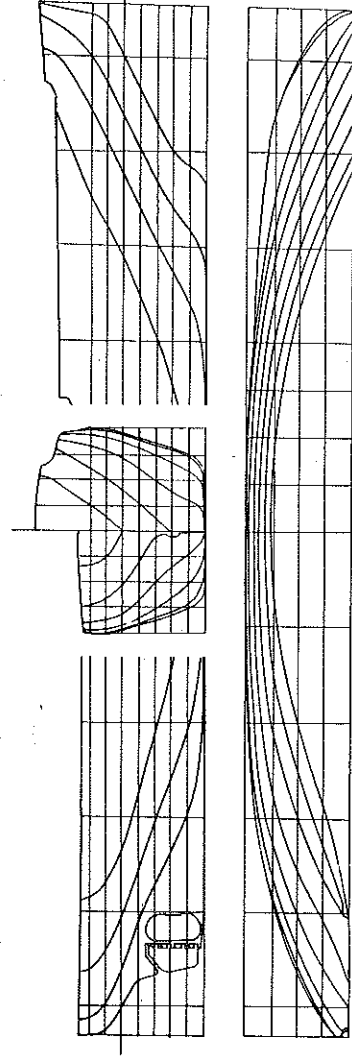


Рис. 104. Теоретический чертеж мощного ледокола.

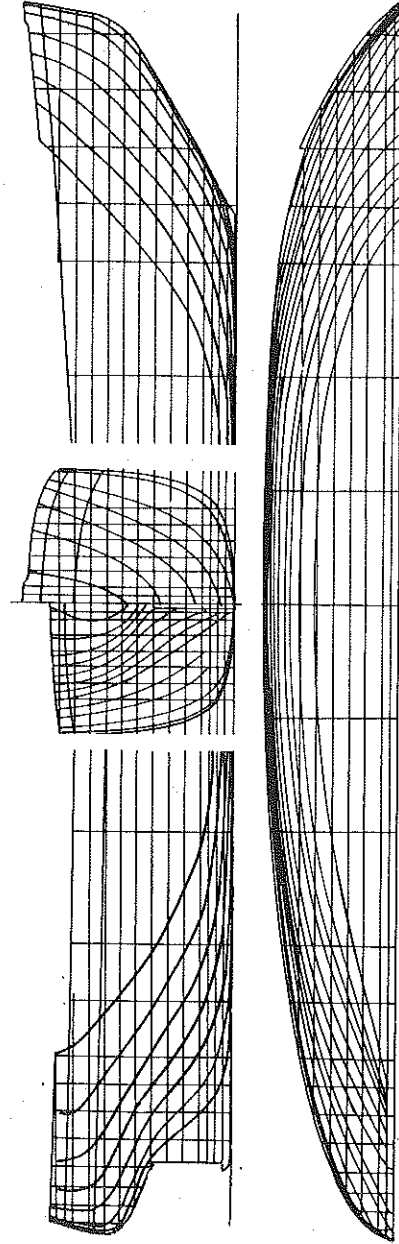


Рис. 105. Теоретический чертеж ледокола «Д.Ибервилль».

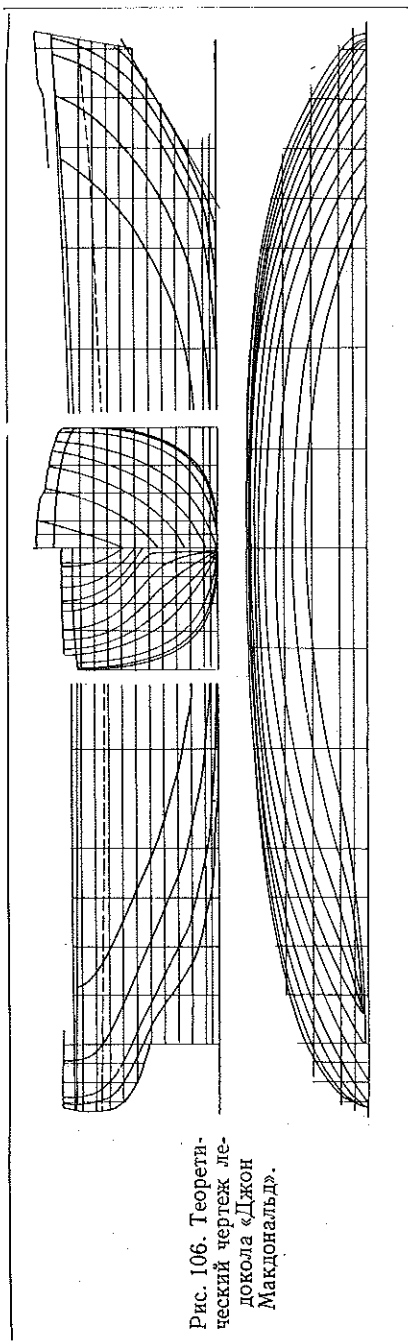


Рис. 106. Теоретический чертеж ледокола «Джон Макдональд».

околки, буксировки судов, форсирования ледяных перемычек и торосистых образований в арктических морях в летне-осенний период и в замерзающих неарктических морях в зимнюю навигацию. К судам этого типа относятся ледоколы «Красин» и ледоколы типа «Сибирь» (рис. 108).

III класс — «вспомогательный ледокол» — присваивается ледоколам, имеющим мощность энергетической установки около 3000—6000 л. с., предназначенным для работы в портах, гаванях и на рейдах арктических морей в летнеосенний период и неарктических замерзающих морей в зимний период, а также для работы по проводке судов совместно с ледоколами I и II классов. Ледоколами данного класса являются суда типа «Добрыня Никитич» (рис. 109).

Морские ледоколы значительно отличаются по своим главным размерениям и мощности. Так, длина корпуса ледоколов изменяется в пределах от 53 до 121 м, ширина — от 14,3 до 26,8 м, а водоизмещение — от 2000 до 16 000 т. Несмотря на такое расхождение в размерениях, форма обводов корпуса различных ледоколов сравнительно мало отличается друг от друга. В частности, значения коэффициентов общей полноты находятся в пределах 0,45—0,545 (для ледоколов без носовых винтов в пределах 0,51—0,545); угол наклона форштевня изменяется от 25 до 30°, угол наклона борта у миделя — от 17 до 20°. Разница

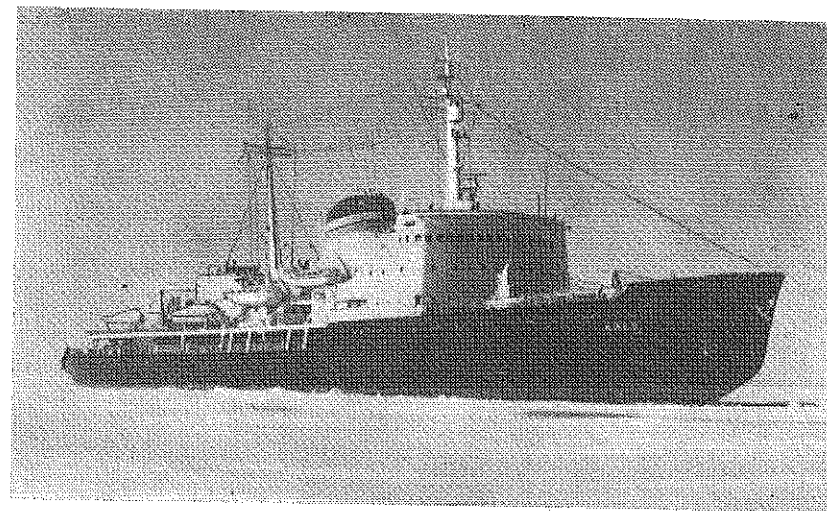


Рис. 107. Ледокол типа «Москва».

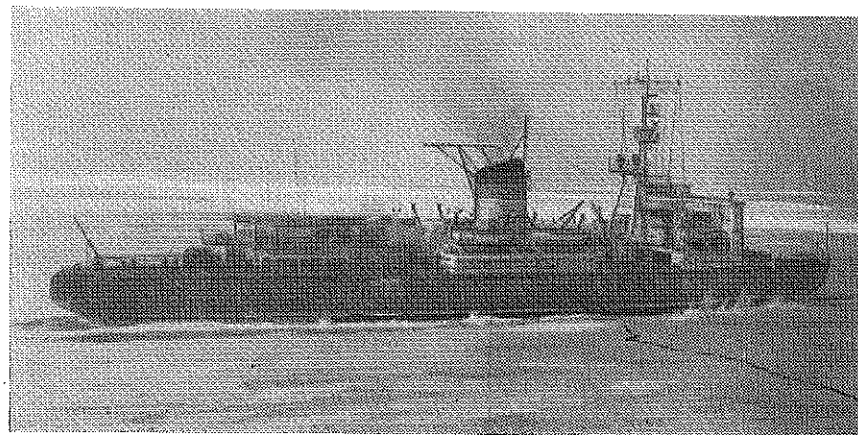


Рис. 108. Ледокол типа «Сибирь».

в энерговооруженности (т. е. относительной мощности на единицу водоизмещения) также невелика. Эти данные позволяют с полной уверенностью считать, что все ледоколы, независимо от их класса, могут быть охвачены единой методикой расчета ледового сопротивления.



Рис. 109. Ледокол типа «Добрыня Никитич».

По форме корпуса и его прочности к ледоколам приближаются ледокольные паромы и буксиры ледового плавания. Кроме того, во всех странах, в том числе в СССР, имеется большое количество речных ледоколов, обладающих рядом специфических особенностей.

§ 31. Транспортные суда ледового плавания

Под транспортными судами ледового плавания принято понимать суда, предназначенные для перевозки различных грузов по акваториям, в той или иной степени покрытым льдом. Таким судам присваиваются ледовые классы соответствующих классификационных обществ. Транспортные суда ледового плавания могут плавать во льдах самостоятельно либо с помощью ледоколов.

История создания и развития транспортных судов ледового плавания непосредственно связана с расширением мореплавания в замерзающих морях. Накопленный опыт ледового плавания свидетельствовал о том, что для успешной и рентабельной перевозки

грузов во льдах необходимы суда специальной конструкции, которые при достаточной грузоподъемности будут способны противостоять ледовым сжатиям и продвигаться в тяжелых ледовых условиях за ледоколом, а в более легкой ледовой обстановке плавать самостоятельно. К такому выводу советские моряки пришли еще в тридцатые годы. За границей, где опыт ледового плавания был меньшим, такой вывод был сделан значительно позднее.

Первыми современными транспортными судами ледового плавания следует, по-видимому, считать советские суда «Дежнев» и «Леваневский», построенные в 1937 г. (рис. 110). Эти суда успешно работают и в настоящее время. После второй мировой войны Советский Союз построил в Голландии серию транспортных судов ледового плавания типа дизель-электрохода «Лена». Эксплуатация этих судов подтвердила их высокие ледовые качества. Так, в 1955 г. судно этого типа за 27 суток совершило рейс из Белого моря в Охотское. Другое судно этого же типа за 15 суток прошло от Мурманска до бухты Провидения [78]. В настоящее время построена серия судов типа «Амгуема», которые следует считать наиболее совершенными из современных судов подобного класса, а также большое количество судов типа «Днепрогэс», «Боткин», «Станиславский», «Лениногорск», «Углеуральск», «Ленинский комсомол», «Павлин Виноградов», «Волголес», «Красноград», «Сибирьлес» и др.

За рубежом интенсивное строительство специализированных транспортных судов для плавания во льдах началось в пятидесятые годы этого столетия (Канада, США, Дания). Транспортные суда ледового плавания строятся также в Японии, Швеции, Финляндии, Польше, ГДР.

На рис. 111—114 приведены теоретические чертежи некоторых отечественных и зарубежных транспортных судов ледового плавания. Все современные транспортные суда ледового плавания имеют специальную форму обводов корпуса, обеспечивающую раздвигание и притапливание битого льда. Корпуса таких судов должны обладать высокой общей и местной прочностью. Для этого в носовой и частично в кормовой оконечностях судна ставят дополнительные промежуточные шпангоуты, а в районе действующей ватерлинии усиливают обшивку — так называемый «ледовый пояс». Мощность главной энергетической установки транспортных судов ледового плавания и ее маневренные качества, как правило, существенно выше, чем у обычных грузовых судов таких же размеров. При этом прочность корпуса и мощность установки у судов, плавающих во льдах, находятся в определенном соответствии между собой.

Транспортные суда ледового плавания снабжаются рядом специальных устройств и систем, например защитными устройствами, предназначенными для предупреждения ледовых повреждений рулей и винтов; автоматическими буксирными устройствами; мощ-

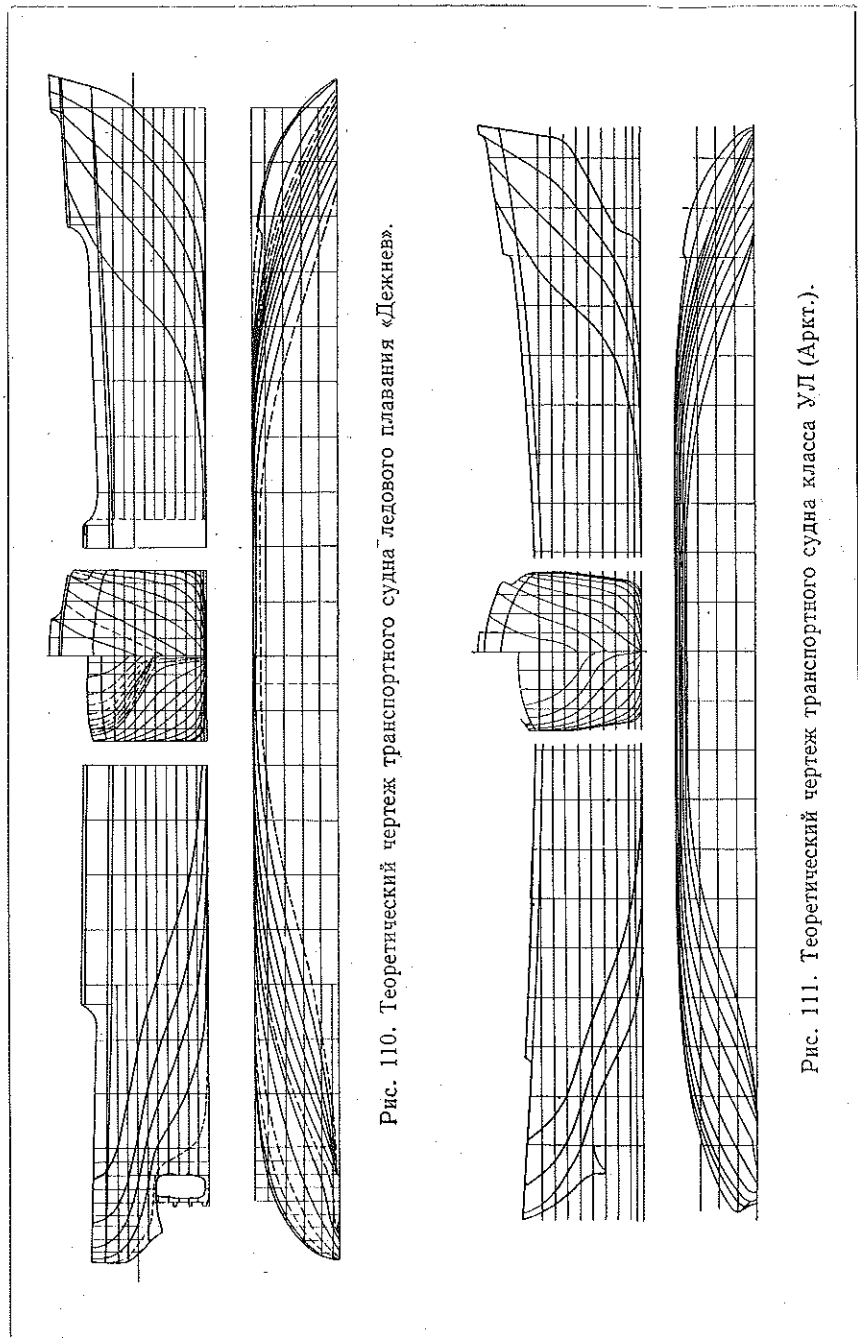


Рис. 110. Теоретический чертеж транспортного судна ледового плавания «Дежнев».

Рис. 111. Теоретический чертеж транспортного судна класса УЛ (Аркт.).

ными автономными погрузочно-разгрузочными средствами и т. д. Повышенные требования предъявляются к радио- и навигационной аппаратуре. Характерно, что все ледокольно-транспортные суда, построенные за последние 10—15 лет, являются грузо-пассажирскими.

Действующими Правилами Регистра СССР [50] транспортные суда ледового плавания подразделяются на три класса, обозначаемые символами: УЛ (Аркт.); УЛ и Л.

Следует отметить, что за последние годы многие классификационные общества внесли ряд поправок в свои правила. Так, в 1966 г. Английский Ллойд ввел новый ледовый класс Ice Class I* [94]. Аналогичный класс введен в финские и американские правила [92]. В настоящее время Регистр СССР также производит пересмотр правил классификации и постройки судов ледового плавания.

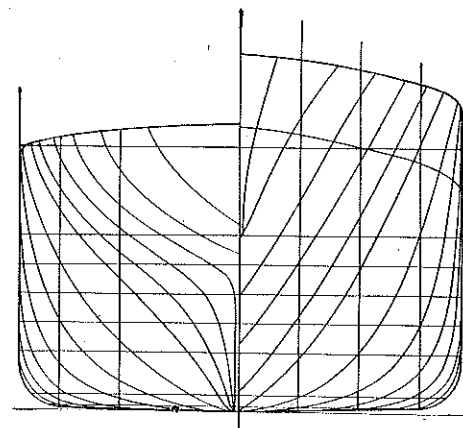


Рис. 112. Корпус транспортного судна класса УЛ.

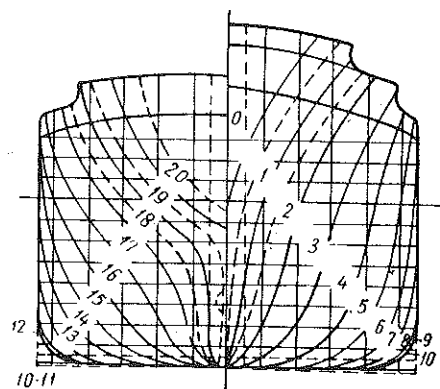


Рис. 113. Корпус транспортного судна класса Л.

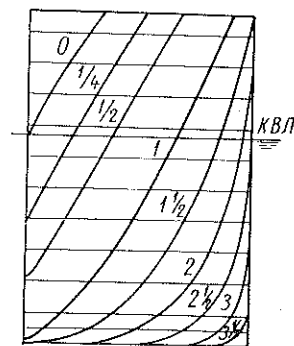


Рис. 114. Корпус носовой оконечности датского транспортного судна ледового плавания «Фенья Дан».

Поскольку новые Правила Регистра СССР еще не опубликованы, ниже приводится один из вариантов разбивки судов на классы, который нам представляется наиболее удачным [81].

Ледовый класс УЛ (Аркт.) присваивается судам, предназначенным для плавания в арктических и замерзающих неарктических морях в течение всего навигационного периода под проводкой ледоколов, а также для самостоятельного плавания в сплошных льдах толщиной до 0,4—0,5 м и битых льдах большой сплошности. Суда этого класса принято называть ледокольно-транспортными судами. К данному классу относятся суда типа дизель-электроходов «Лена» и «Амгуема» (рис. 115).

Ледовый класс УЛ присваивается судам, предназначенным для плавания в арктических и замерзающих неарктических морях в те-

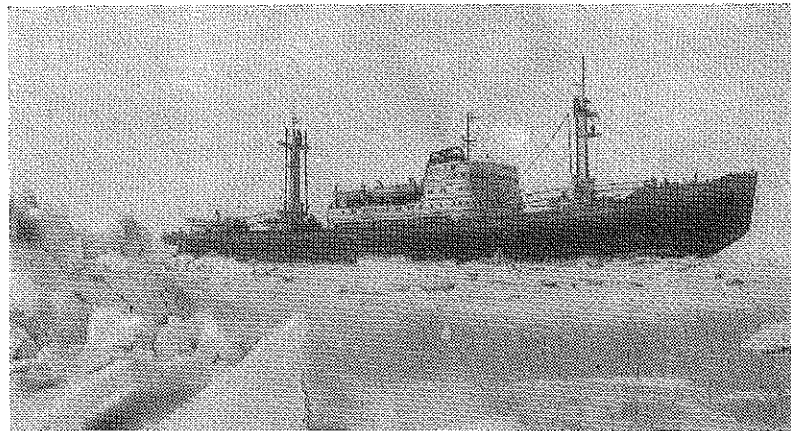


Рис. 115. Транспортное судно класса УЛ (Аркт.).

чение всего навигационного периода под проводкой ледоколов и самостоятельно в разреженных битых льдах. К этому классу относятся суда типа «Днепрогэс», «Станиславский», «Волголес» (рис. 116).

Ледовый класс Л присваивается судам, предназначенным для плавания под проводкой ледоколов в замерзающих неарктических и арктических морях в летне-осенний период в средние и легкие по ледовитости годы.

Длина современных отечественных морских транспортных судов ледового плавания изменяется в пределах от 93 до 156 м, ширина — от 14,0 до 21,8 м, коэффициент общей полноты водоизмещения — от 0,65 до 0,71, а водоизмещение — от 5800 до 22 000 т. Форма обводов корпуса всех транспортных судов ледового плавания более или менее идентична: для всех судов характерен наклонный форштевень, пологие батоксы в носу и ватерлинии в районе ледового пояса без ярко выраженной s-образности.

Все это дает основание полагать, что современные транспортные суда ледового плавания могут быть охвачены единой методикой расчета ледовой ходкости в битых льдах.

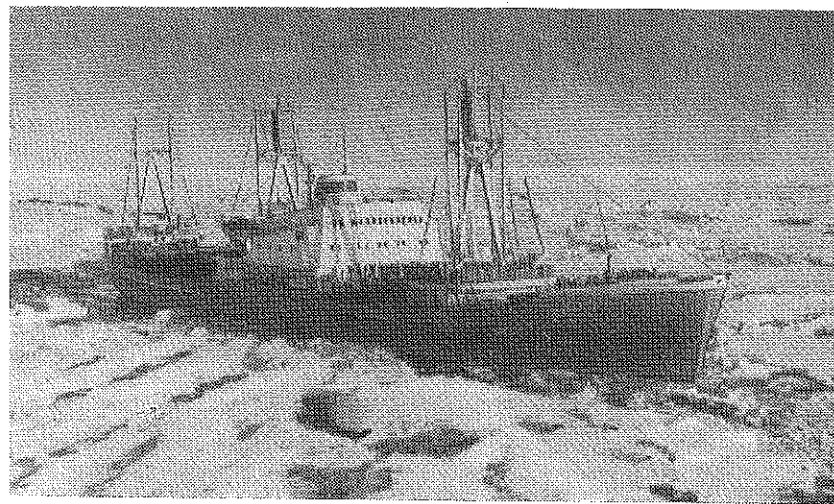


Рис. 116. Транспортное судно класса УЛ.

§ 32. Особенности плавания судов во льдах

В последние годы состав отечественного ледокольного и ледокольно-транспортного флота обновился почти полностью за счет вступления в строй новых судов. В связи с этим коренным образом изменился и характер ледового плавания. Если еще в недавнем прошлом характерным для арктических навигаций являлось неактивное ледовое плавание, то в настоящее время оно почти не имеет места.

Обобщению опыта ледового плавания посвящен ряд работ [61], [64], [68], [19], в которых подробно рассмотрены вопросы ледового плавания. Однако в настоящее время эти материалы несколько устарели, так как в них отсутствует анализ работы новых судов ледового плавания, представляющий интерес при проектировании. Учитывая это, остановимся на некоторых особенностях плавания современных судов во льдах.

Характер проводки судов, тактические приемы, скорость движения и другие особенности плавания судов во льдах определяются прежде всего ледовой обстановкой, отличающейся большим разнообразием и нестабильностью свойств и характеристик ледяного покрова. Естественно, что плавание в таких сложных условиях невозможно без четкого планирования операций,

наличия соответствующего флота и осуществления специальных мероприятий по обеспечению плавания. Часть таких мероприятий осуществляется заблаговременно, до начала ледовой навигации. К их числу относится основанное на прогнозах ледовой обстановки и данных по ледопроеходимости судов планирование операций и сроков их проведения, распределение ледоколов и судов и т. д. Непосредственно перед началом ледовых операций выбирается путь следования судов и назначается состав караванов. Для этого используются материалы преднавигационной и тактической авиаразведки (последняя предназначается для уточнения ледовой обстановки в районе предполагаемого плавания судов при известной общей ледовой обстановке). В процессе плавания судов во льдах периодически проводится оперативная авиаразведка с помощью самолетов (и вертолетов, базирующихся на мощных ледоколах), помогающая судам выбирать наиболее легкий путь.

Плавание судов во льдах бывает самостоятельным (одиночным) и караванным (групповым).

Самостоятельное плавание совершают и ледоколы, и транспортные суда ледового плавания. Самостоятельное плавание мощных ледоколов, как правило, имеет место в наиболее тяжелые периоды навигации. Цель этих плаваний — ледовая разведка и прокладка канала для последующей проводки судов в районах со сплошным льдом. Такое плавание протекает в наиболее тяжелой ледовой обстановке, для которой характерно наличие малоразрушенных форм льда. Наиболее тяжелым является сплошной лед мелководных районов, толщина которого достигает 1,5—2,5 м, а прочность — наибольших значений, характерных для опресненного льда, а также дрейфующий лед при наличии остаточного льда и ледовых сжатий.

Прокладка канала в сплошном льду связана с большими трудностями и требует длительной работы ледокола с использованием полной мощности энергетической установки. Значительную часть времени ледокол работает набегам. Для ускорения прокладки канала в особо тяжелых льдах применяется совместная работа двух мощных ледоколов, параллельная либо «танDEMом». В первом случае ледоколы продвигаются во льду непрерывным ходом или набегам, следуя параллельными курсами на расстоянии 150—300 м по траверзу между бортами. В результате образуется так называемый «двойной» канал (рис. 117), средняя часть которого заполняется крупными обломками льда. При совместной работе «танDEMом» один из ледоколов упирается в кормовую выемку другого. В этом случае канал получается «одинарным». В некоторых случаях прокладка «двойного» канала выполняется одним ледоколом (рис. 118).

При самостоятельном плавании мощных ледоколов в дрейфующих льдах, как правило, наиболее серьезным препятствием

является сплоченный торосистый лед в виде полей и их обломков, подверженный ледовым сжатиям. Самостоятельное плавание мощных ледоколов в замерзающих неарктических морях протекает в сплошных и дрейфующих льдах сравнительно небольшой толщины (до 1 м), не представляющих для таких судов серьезного затруднения. Для ледоколов II и III классов такие ледовые условия близки к их предельным возможностям.

Самостоятельное плавание транспортных судов ледового плавания во льдах ограничено. В сплоченных дрейфующих льдах

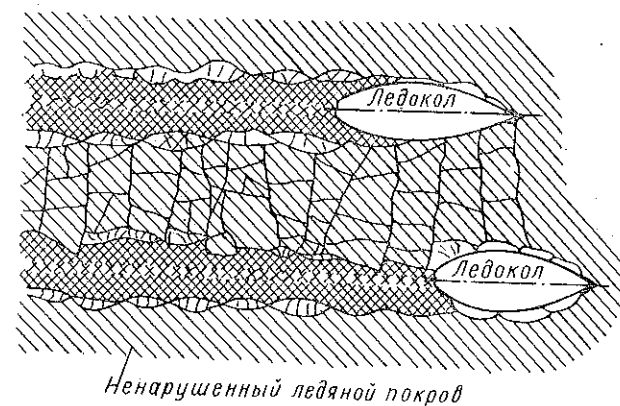


Рис. 117. Схема «двойного» канала, проложенного ледоколами в сплошном льду при параллельной работе.

самостоятельное плавание совершают лишь транспортные суда класса УЛ (Аркт.). Суда этого класса могут также самостоятельно следовать в сплошных льдах толщиной до 0,4—0,5 м. Практически такие суда могут плавать самостоятельно в легкие и средние по ледовитости годы в течение всей зимней навигации в замерзающих неарктических морях, например Балтийском. В легкие по ледовитости годы в летний период навигации они могут самостоятельно плавать по Северному морскому пути.

Суда ледовых классов УЛ и Л самостоятельно плавают лишь в разреженных дрейфующих льдах. В замерзающих неарктических морях суда класса УЛ могут самостоятельно плавать в начальный период зимней навигации, когда толщина молодого льда не превышает 10—15 см.

Караванное плавание (рис. 119) является основным видом плавания транспортных судов во льдах. В зависимости от ледовых условий и ряда других причин состав каравана может быть различным — от двух (ледокол и судно) до нескольких десятков единиц. Формирование караванов производится на основании плана

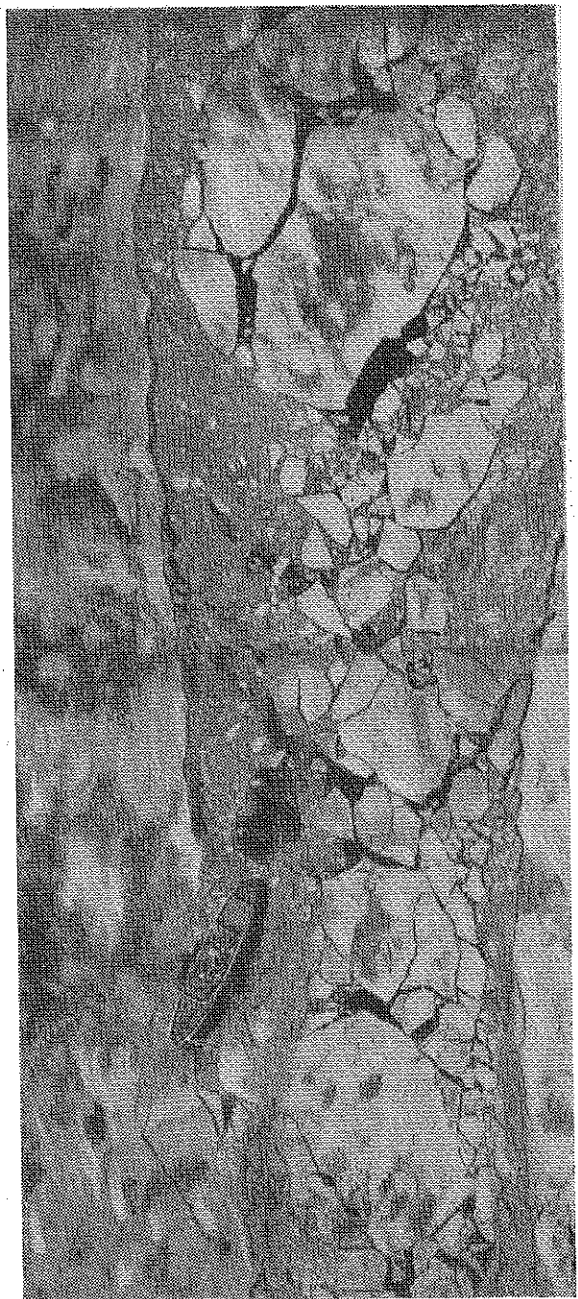


Рис. 118. «Двойной» канал в сплошном льду, проложенный одним ледоколом (вид с самолета).

грузоперевозок с учетом ледовой обстановки на трассе и ледовых качеств судов. При этом в состав каравана целесообразно назначать суда с равноценными ледовыми качествами. В зависимости от ледовых условий караваны обеспечиваются необходимыми ледокольными средствами. Так, в состав караванов, плавающих в ранние периоды арктической навигации, когда ледовые условия особенно сложны, назначаются мощные ледоколы и транспортные суда высших ледовых классов. В таких условиях на каждый



Рис. 119. Караванное плавание судов во льдах.

ледокол приходится не более одного-двух транспортных судов. Ледоколы II и III классов обычно в проводке не участвуют. Караван, формируемый для плавания в легких и средних ледовых условиях, включает один-два мощных ледокола, несколько ледоколов II и III классов и транспортные суда ледового плавания различных ледовых классов.

При караванном плавании основная задача заключается в проводке судов с максимальной безопасной скоростью. Для этого прежде всего необходимо правильно назначить место судна и ледокола в караване исходя из их ледовых качеств. Во время проводки суда должны соблюдать определенную дистанцию, назначаемую командованием ледокола. Наиболее выгодна наименьшая дистанция, но она не всегда безопасна, поэтому при назначении оптимальной дистанции учитываются ледовые и метеорологические условия плавания, ледопробиваемость, прочность корпуса судна и ледокола, а также их маневренные качества.

На скорость движения проводимых судов существенное влияние оказывает также качество канала, прокладываемого ледоколом: его прямолинейность, ширина, засоренность льдом, размеры отдельных льдин, их распределение в канале и т. д. Неблагоприятным для движения судов является канал с крутыми поворотами, неравномерно заполненный битым льдом (в виде чередующихся «пробок» и разрежений льда), сжатый канал, а также канал, в котором крупные льдины расположены близко к его середине (такая картина наблюдается, в частности, в «двойном» канале, проложенном в мощных сплошных льдах (рис. 118).

Поскольку на пути следования судов ледовая обстановка непрерывно меняется и плавание часто протекает в плохих метеорологических условиях при ограниченной видимости (туман, полярная ночь), знания и опытность судоводительского состава при караванном плавании во льдах играют весьма важную роль. Счисление, прокладка курса и определение местоположения судна при плавании во льдах имеют специфические трудности, вызванные дрейфом льда, частыми сменами курса, переменными скоростями движения, а также отсутствием навигационных лагов и т. д.

Характер караванной проводки определяется ледовыми условиями плавания.

В тяжелых сплошных льдах (толщиной свыше 1,5—2,0 м) проводка судов осуществляется по заранее проложенному ледоколом каналу; во всех остальных случаях суда следуют непосредственно за ледоколом. Транспортные суда всех ледовых классов следуют по каналу за ледоколами самостоятельным ходом либо на буксире. К буксировке судов, как правило, прибегают в особо тяжелой обстановке: при ледовых сжатиях силой 1—2 балла и выше, а также при движении по каналу, проложенному в тяжелых сплошных льдах и прохождении отдельных перемычек тяжелого торосистого дрейфующего льда. Суда, следующие в балласте, проводят на буксире чаще, чем грузеные. В подавляющем большинстве случаев буксировка судов во льдах осуществляется на коротком буксире «вплотную» (рис. 120). При этом нос буксируемого судна втягивается в кормовую выемку ледокола.

Работа, выполняемая ледоколами при караванной проводке, определяется их классом, обязанностями в караване и ледовыми условиями плавания.

Мощные ледоколы, как правило, выполняют обязанности ледокола-лидера, который, следуя во главе каравана, прокладывает канал во льдах. Капитан ледокола-лидера осуществляет непосредственное руководство проводкой: выбирает путь следования каравана, назначает «ордер» (порядок следования судов), дистанцию между судами и скорость следования каравана, дает распоряжения о взятии судов на буксир и т. п. На ледоколе-лидере ведется основная прокладка курса, сосредотачиваются данные по ледовой

обстановке и метеорологическим условиям плавания. В особо сложных ледовых условиях (например, при сжатиях льда) мощные ледоколы производят работы по околке судов каравана и их индивидуальной проводке.

Ледоколы II класса в тяжелых и средних ледовых условиях выполняют вспомогательные операции по проводке судов в канале, проложенном мощным ледоколом: они следуют в канале, разбивая крупные льдины и раздвигая их в стороны, осуществляют буксировку и околку застрявших судов. В замерзающих

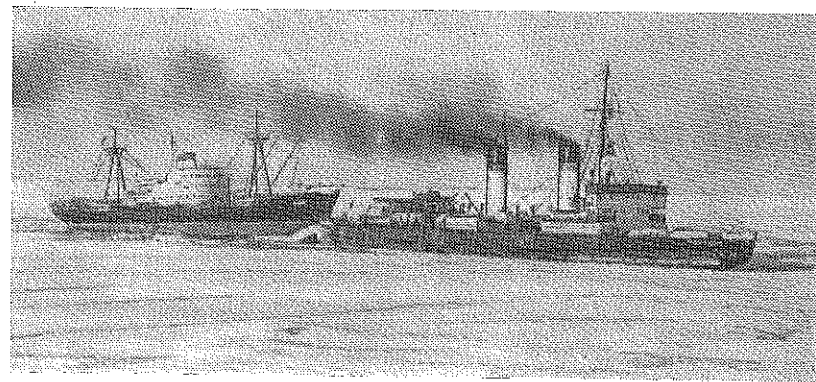


Рис. 120. Буксировка судна во льдах «вплотную» за ледоколом.

неарктических морях в средние и легкие по ледовитости годы ледоколы II класса могут выполнять самостоятельную проводку судов.

Ледоколы III класса выполняют вспомогательные работы по буксировке и околке судов. При работе в портах и бухтах они самостоятельно производят кантовку и расстановку судов, околку причалов и т. п.

Ледоколы всех классов в случае необходимости используются как суда-спасатели.

Таким образом, на основании анализа особенностей плавания судов во льдах можно сделать следующие выводы.

Самостоятельное плавание практически в любых ледовых условиях характерно лишь для мощных и отчасти средних ледоколов. Наиболее тяжелыми льдами, ограничивающими проходимость ледоколов, являются сплошные льды малой разрушенности и дрейфующие при наличии остаточного льда и сжатий. При назначении мощности проектируемых ледоколов следует ориентироваться на плавание в сплошных льдах.

Наиболее характерным видом работы транспортных судов во льдах является плавание в мелкобитых льдах в канале. При

проектировании транспортных судов и определении их проходимости эти ледовые условия плавания должны учитываться в первую очередь. Исключение составляют лишь суда класса УЛ (Аркт.), которые также предназначаются для самостоятельного плавания в дрейфующих и сплошных льдах.

§ 33. Некоторые особенности проектирования судов ледового плавания

Проектирование судов ледового плавания связано с рядом трудностей, обусловленных многочисленностью и разнообразием требований, предъявляемых к судам этого типа. Суда ледового плавания, кроме хороших ледовых качеств (ледовой ходкости, прочности, маневренности), должны также обладать достаточно высокими мореходными качествами. При этом ряд требований, предъявляемых к судну условиями плавания на свободной воде, может оказаться в противоречии с требованиями, обеспечивающими его ледовую ходкость. В свою очередь, требования, связанные с обеспечением ледовых качеств, также зачастую противоречивы. Так, увеличение ширины ледокола ухудшает его ледовую ходкость, но оно целесообразно с точки зрения эффективности проводки транспортных судов.

Решение задачи о совместимости всех требований, предъявляемых к судну при проектировании, сводится в основном к оптимальному определению главных размерений и формы его обводов. Предпочтение отдается тем элементам и свойствам судна, которые отвечают его основному назначению. Для ледоколов — это выполнение ледокольных операций по форсированию ледяного покрова и проводке судов, а для ледокольно-транспортных судов — перевозка грузов. В соответствии с этим при проектировании ледоколов стремятся в первую очередь удовлетворить требования, касающиеся ледовых качеств судна (ледовая ходкость, прочность и проч.), причем, определяя ледовую ходкость, ориентируются в основном на плавание в сплошных льдах. Пропульсивные качества при плавании на свободной воде в этом случае относят к числу второстепенных.

При выборе главных элементов транспортных судов ледового плавания в первую очередь стремятся обеспечить наибольшую экономическую эффективность грузоперевозок. Поскольку суда этого типа плавают с грузом и по свободной воде, и во льдах, искомые оптимальные решения должны учитывать требования, касающиеся как мореходных качеств, так и ледовой ходкости судна. В зависимости от ледового класса судна значение, придаваемое этим качествам, и их взаимное соотношение могут быть различными. При проектировании транспортных судов ледового плавания за основные ледовые условия принимают мелкобитые льды в канале за ледоколом.

В процессе решения ряда вопросов в начальной стадии проектирования можно пользоваться аналитическими зависимостями, связывающими элементы судна и скорость с сопротивлением льда, а также формулами для расчета ледовой прочности [71] и методической расчета винтов судов ледового плавания [27].

Для анализа экономических показателей работы транспортных судов ледового плавания можно рекомендовать практические методы определения скорости судна с помощью диаграмм ледопротимости, приведенных в § 28.

Методы пересчета ледового сопротивления, изложенные в § 12, также могут быть использованы в процессе проектирования. Такими методами удобно пользоваться при пересчетах с судна-прототипа на проектируемое судно.

Предлагаемые количественные методы оценки ледовой ходкости открывают возможности комплексного изучения вопроса о рациональном выборе главных элементов судна ледового плавания. Практические приемы, связанные с использованием указанных методов в процессе проектирования, не отличаются от общепринятых и описываются в курсах теории проектирования судов. Разумеется, рекомендуемые формулы не дают исчерпывающих ответов на многочисленные вопросы, возникающие при проектировании формы обводов судов ледового плавания. Это объясняется приближенным характером формул (72) и (109), учитывающих лишь основные факторы, влияющие на ледовую ходкость судна, а также тем, что некоторые важные ледовые качества судна в настоящее время еще недостаточно изучены и не могут быть выражены конкретными аналитическими или графическими зависимостями. Поэтому для окончательного выбора формы обводов корпуса и уточнения ряда факторов, не поддающихся расчетному обоснованию, прибегают к модельным испытаниям в Опытном ледовом бассейне.

§ 34. Определение главных размерений

Из числа главных размерений судна самым важным параметром, оказывающим наибольшее влияние на его ледовую ходкость, является ширина судна. Количественный анализ влияния изменения ширины проектируемого судна на его сопротивление в сплошных и битых льдах может быть сделан с достаточной для первоначальных стадий проектирования точностью с помощью формул (72) и (109). Из выражений (72) и (109) видно, что увеличение ширины приводит к возрастанию $R_{лч}$ судна при плавании в мелкобитых и особенно в сплошных льдах. Таким образом, из соображений ледовой ходкости выгодно, чтобы суда ледового плавания имели наименьшую возможную ширину корпуса. Однако, помимо требований ледовой ходкости, при выборе ширины судна нельзя не учитывать ряд других не менее важных факторов. Так, у транспортных судов ледового плавания ширина корпуса будет опре-

деляться размерами трюмов, грузовых люков и условиями размещения механизмов. Ширина ледокола должна быть достаточной для прокладывания канала требуемого размера. Для мощных ледоколов выполнение последнего требования не вызывает затруднений, так как их минимальная ширина, допустимая по условиям расположения механизмов, заведомо превышает ширину наиболее крупных современных транспортных судов ледового плавания. Таким образом, ширина мощного ледокола выбирается минимально возможной по условиям размещения и габаритам энергетической установки.

Выбор ширины средних ледоколов в основном также определяется условиями размещения главных механизмов и отчасти шириной проводимых судов. Стремление уменьшить амплитуду бортовой качки судов этого класса приводит к сокращению ширины судна до минимально возможных размеров.

При выборе ширины вспомогательных ледоколов принимаются компромиссные решения, основанные на конкретных особенностях задания на проектирование.

Практическое определение ширины транспортных судов классов УЛ и Л следует производить исходя из условий, общепринятых при проектировании грузовых судов. Требования, связанные с ледовой ходкостью, в этом случае не являются решающими, так как ширина судна оказывает существенное влияние на скорость его движения во льдах только при сплоченности льда в 9 баллов и более, а также при ледовых сжатиях [см. формулу (109) и рис. 59]. При плавании в мелкобитых льдах сплоченностью менее 8 баллов увеличение ширины судна практически не вызывает роста ледового сопротивления.

При выборе длины судна ледового плавания необходимо в первую очередь учитывать условия расположения механизмов, размеры грузовых трюмов и т. п. Наиболее жесткие требования предъявляются к современным ледоколам, имеющим мощные и сравнительно громоздкие энергетические установки, креновые, дифферентные и другие специальные системы, большие запасы топлива, воды, провизии и т. д. Изменение длины судна не оказывает существенного влияния на его ледовую ходкость, что подтверждается анализом формул (72) и (109), а также рис. 58. В наибольшей степени увеличение длины судна отрицательно сказывается на ледовой ходкости в том случае, если оно осуществляется за счет включения (или удлинения) цилиндрической вставки. Следует иметь в виду, что с увеличением длины судна и особенно его цилиндрической вставки существенно увеличивается вероятность заклинивания судна в тяжелых льдах и осложняется его освобождение.

Длина судна оказывает большое влияние на его маневренность и управляемость: с увеличением длины ухудшаются маневренные качества судна, но, с другой стороны, уменьшение длины судна

приводит к ухудшению его устойчивости на курсе, которая имеет особо важное значение для ледоколов, так как от нее зависит прямолинейность канала. Таким образом, чтобы судить о маневренности и управляемости судна необходимо определить оптимальное отношение его длины L к ширине B . В табл. 13 приводятся значения L/B для современных ледоколов и транспортных судов ледового плавания. Из таблицы видно, что отношение длины к ширине меняется у ледоколов в пределах от 3,5 до 4,8, а у транспортных судов ледового плавания — от 4,6 до 7,3. При этом мощные ледоколы и крупные транспортные суда имеют более высокие значения L/B . У всех современных отечественных транспортных судов ледового плавания отношение L/B несущественно превышает значения, характерные для обычных грузовых судов [52], [56], [13].

Для мощных ледоколов, предназначенных для прокладки канала и проводки судов, отношение L/B следует принимать равным 4,6—5,0. Увеличение L/B свыше 5,0 следует считать нецелесообразным, хотя некоторые специалисты это рекомендуют. Так, И. В. Виноградов для мощных ледоколов предлагает увеличить отношение L/B до 6,5 [13], а в работе [102] рекомендуется увеличить L/B до 5,0—5,5. По нашему мнению, такое увеличение L/B нежелательно, так как при этом возрастает опасность заклинивания ледокола и ухудшается его маневренность. Добавим, кстати, что по данным исследований М. С. Яковлева оптимальное с точки зрения ледовой ходкости отношение L/B для ледоколов всех типов составляет 3,0—5,0 [91].

Для средних ледоколов отношение L/B следует принимать в пределах 4,0—4,5.

Длина вспомогательных ледоколов должна быть минимальной ($L/B = 3,5 \div 4,0$), т. е. определяться условиями расположения энергетической установки. Это необходимо для обеспечения наилучших маневренных качеств.

Длина транспортных судов ледового плавания всех классов назначается на основании правил, общепринятых при проектировании грузовых судов. При этом не рекомендуется превышать значения L/B , приведенные в табл. 13.

Осадка и высота борта принадлежат к числу главных размеров судна, не оказывающих непосредственного влияния на ледовую ходкость, маневренность и ряд других ледовых качеств. Однако выбор этих элементов для судов ледового плавания имеет свою специфику.

Ледоколы и ледокольно-транспортные суда должны иметь значительную осадку, так как это позволяет устанавливать винты большого диаметра и обеспечивает лучшую защиту винторулевого комплекса от ледовых повреждений (подробнее см. § 38). Это особенно важно для ледоколов, имеющих сравнительно мощную энергетическую установку. По условиям работы во льдах

Таблица 13

Значения L/B для современных ледоколов и транспортных судов
ледового плавания

Ледоколы	Транспортные суда ледового плавания	L/B
«Добрыня Никитич», «Тор», «Туле»	—	3,5—3,8
«Мэскино», «Уинд», «Лабрадор», «Генерал Сан-Мартин», «Муртайя», «Войма», «Оден», «Д. Макдональд»	—	3,9—4,2
«Глэсье», «Капитан Белоусов», «Сибирь», «Ермак», «Красин»	—	4,3—4,5
«Ленин», «Москва», «Фуджи», «Д'Ибервилль», «Уильям Карсон»	«Магга Дан», «Анита Дан», Т-АОС-81, «Вальтер Фостер»	4,6—4,8
Паромы-ледоколы «Вакейшленд», «Абегвейт» и др.	«Элтани», «Бэффин», «А. Кросби»	4,9—5,2
—	«Киста Дан», «С. Д. Хоу», «Корнволлис»	5,3—5,7
—	«Ааллотар», «Кайса Дан», «Тора Дан»	5,8—6,2
—	«Амгуема», «Лена», «Станиславский», «Андижан», «Повенец», «Котласлес», «Фенья Дан», «Биверуок»	6,3—6,7
—	«Днепрогэс», «Сергей Боткин», «Лениногорск», «Углеуральск», «Ленинский комсомол», «Павлин Виноградов», «Волголес», «Красноград», «Сибирьлес»	6,8—7,3

винты ледоколов должны развивать максимальную тягу на режимах, близких к швартовному, а в этом случае, как известно, наиболее эффективное использование мощности можно получить применяя гребные винты большого диаметра. Для транспортных судов ледового плавания проблема заглубления винтов особенно важна при плавании порожнем. Защита винто-рулевого комплекса в этом случае должна обеспечиваться балластировкой. Серьезным фактором, ограничивающим осадку судов ледового плавания, является мелководье, встречающееся на некоторых участках трасс ледовых перевозок. Кроме того, при выборе осадки судна, особенно мощных ледоколов, следует также учитывать необходимость докования.

При выборе осадки и ширины судна удобно пользоваться отношением B/T . В табл. 14 приведены значения B/T для современных

Таблица 14

Значения B/T для современных ледоколов и транспортных судов ледового плавания

Ледоколы	Транспортные суда ледового плавания	B/T
«Д'Ибервилль»	«Днепрогэс», «Сергей Боткин», «Андижан», «Лениногорск», «Углеуральск», «Ленинский комсомол», «Павлин Виноградов», «Красноград», «Сибирьлес», «Повенец», «Киста Дан», «Ионна Дан», «Магга Дан», «Анита Дан», «Тора Дан», «Фенья Дан», «Кайса Дан», «Элтани», «Биверуок», «А. Кросби»	2,1—2,3
«Москва», «Сибирь», «Красин», «Глэсье», «Уинд», «Лабрадор», «Д. Макдональд», «Луи С. Сан-Лоран»	«Лена», «Станиславский», «Волголес», «Котласлес», «Корнволлис», «Амгуема»	2,4—2,6
«Ленин», «Ермак», «Капитан Белоусов», «Оден», «Муртайя», «Генерал Сан-Мартин», «Фуджи»	«Вальтер Фостер», «С. Д. Хоу», «Ааллотар»	2,7—2,9
«Добрыня Никитич», «Абегвейт», «Туле», «Войма», «Тор»	«Бэффин», Т-АОС-81	3,0—3,2
«Мэскино», «Уильям Карсон»		3,3—3,6

судов ледового плавания. Из таблицы видно, что у большинства ледоколов отношение B/T изменяется от 2,4 до 3,0, а у транспортных судов от 2,1 до 2,6, причем у отечественных судов значения B/T в пределах от 2,2 до 2,5 соответствуют значениям этого отношения для обычных грузовых судов.

При выборе высоты борта судов, плавающих во льдах, в основном руководствуются следующими положениями.

Надводный борт ледоколов и транспортных судов ледового плавания должен быть достаточно высок, чтобы при сжатиях предотвращать попадание льда на палубу. Как правило, этому требованию отвечает высота борта всех больших транспортных судов и ледоколов, выбранная по соображениям непотопляемости, прочности и т. д.

При назначении высоты борта ледоколов следует помнить, что погружение палубы в воду при бортовой качке влечет за собой потерю восстанавливающего момента. В работе [95] рекомендуется обеспечивать незаливаемость верхней палубы при угле крена в 25° . Кроме этого, надводный борт ледокола в корме должен иметь достаточную высоту, чтобы при вползании носа судна на лед его корма не погружалась в воду. В носу борт должен быть высоким, но он не должен существенно ухудшать обзор из рулевой рубки.

Таблица 15

Отношение H/T современных ледоколов и транспортных судов ледового плавания

Ледоколы	Транспортные суда ледового плавания	H/T
«Капитан Белоусов», «Глэсье», «Уинд», «Гор»	«Амгуема», «Лена», «Днепрогэс», «Станиславский», «Сергей Боткин», «Андижан», «Углеуральск», «Ленинский комсомол», «Павлин Виноградов», «Волголес», «Красноград», «Сибирьлес», «Котласлес», «Повенец»	1,1—1,3
«Москва», «Сибирь», «Красин», «Добрыня Никитич», «Мэкинно», «Вакейшлэнд», «Д. Ибервилль», «Лабрадор», «Д. Макдональд», «Луи С. Сан-Лоран», «Абегвейт», «Войма», «Оден», «Муртайя», «Генерал Сан-Мартин», «Фуджи»	«Лениногорск»	1,4—1,6
«Ленин», «Ермак», «Туле», «Уильям Карсон»		1,7—1,8

Суда класса УЛ (Аркт.), как правило, имеют избыточную высоту надводного борта, что объясняется в основном необходимостью сохранить требуемую вместимость грузовых помещений при наличии большой энергетической установки. В то же время избыточный надводный борт на судах этого класса обеспечивает повышенную непотопляемость и плавную бортовую качку. Высота борта судов класса УЛ и Л может назначаться согласно общепринятым требованиям.

В табл. 15 приведены значения отношения высоты борта к осадке H/T , которыми можно пользоваться при проектировании судов ледового плавания.

§ 35. Выбор формы обводов корпуса ледокола

Как известно, судовую поверхность принято характеризовать отношениями главных размерений и коэффициентами теоретического чертежа, которые во многом определяют мореходные и ледовые качества судна. К числу параметров, оказывающих непосредственное влияние на ледовые качества судна, в первую очередь относятся углы наклона борта к вертикали β' , углы наклона ватерлинии к плоскости батокса α' , угол наклона форштевня ϕ , угол входа КВЛ α_0 и др.

Выбор параметров ледокольных обводов — чрезвычайно сложная задача, и научно обоснованного метода, который позволил бы сделать всестороннюю оценку качества ледовых обводов судна, еще не существует. В свое время попытку создать такой метод предприняли Р. И. Рунберг [73] и И. В. Виноградов [13], однако предложенные ими аналитические выражения, связывающие силы, действующие на судно со стороны льда, с элементами формы обводов корпуса, не получили практического применения, так как они недостаточно полно учитывали влияние формы корпуса на ледовые качества судна (это влияние учитывалось лишь в районе форштевня).

В настоящее время при выборе формы обводов корпуса ледоколов проектировщики используют опыт эксплуатации судов в ледовых условиях. Однако в большинстве случаев эти данные носят обобщенный характер и не позволяют выделить влияние отдельного элемента формы обводов корпуса судна на его ледовые качества.

Сложность процессов взаимодействия корпуса судна со льдом и многообразие параметров формы обводов корпуса затрудняют получение количественных показателей влияния элементов формы на ледопродоходимость даже применительно к одним и тем же ледовым условиям.

При выборе формы обводов корпуса судов ледового плавания существенную пользу могут принести рассмотренные выше выражения (72) и (109), которые связывают элементы судна с сопротив-

лением льда. Использование этих выражений на первой стадии проектирования позволяет в общих чертах произвести оценку принятой формы обводов корпуса. Детальная оценка и отработка формы обводов корпуса может быть выполнена на основе модельных испытаний в ледовом бассейне.

В настоящем параграфе производится анализ элементов формы обводов корпуса ледокола, в частности его носовой оконечности, с точки зрения ледовой ходкости.*

Как известно, ледовые и мореходные качества судна зависят от обводов корпуса в целом. Однако характерные особенности обводов, имеющие существенное значение для определенных качеств судна, тесно связаны с очертаниями некоторых сечений корпуса [58]. Для судов ледового плавания таким определяющим сечением следует считать носовую часть конструктивной (ледовой) ватерлинии и шпангоуты на участке, прилегающем к КВЛ. Форма обводов этого района характеризуется углом наклона борта к вертикали (β') и углом наклона КВЛ к плоскости батокса (α'). Величина этих углов оказывает большое влияние на ледовое сопротивление. Такой вывод логически вытекает из сущности процессов, имеющих место при движении судна в сплошном и битом льду. Для района КВЛ наиболее характерными процессами при движении в сплошном льду являются разрушение и притапливание льда под действием вертикальных усилий, а при движении в битом льду — раздвигание льда горизонтальными усилиями. Поэтому форма обводов корпуса ледокола в районе ледовой ватерлинии должна обеспечивать получение наибольших вертикальных усилий, действующих со стороны корпуса на лед. Это может быть достигнуто увеличением углов β' и α' .

При движении ледокола в сплошном льду разрушение ледяного покрова происходит в основном в носовой оконечности на участке 0—5 теоретических шпангоутов. Однако нет необходимости создавать значительный развал борта у КВЛ по длине всей указанной зоны. Как показывают исследования, целесообразно увеличивать углы наклона борта в первую очередь в районе 0—2 теоретических шпангоутов, где происходит облом первого сектора, расположенного непосредственно за зоной прорезания льда форштевнем. Этим облегчаются условия ломки льда в других районах борта, в частности на участке 4—5 теоретических шпангоутов.

Угол наклона борта к вертикали в районе 1-го теоретического шпангоута у существующих ледоколов отечественной и иностранной постройки изменяется от 38 до 40°. По нашему мнению, для мощных ледоколов можно увеличить угол β' на участке 0—2 теоретических шпангоутов до 45—50°.

* Проблемы, относящиеся к проектированию формы кормовой оконечности, рассматриваются в § 38, поскольку они в основном связаны с проектированием винто-рулевого комплекса.

Форма носовых шпангоутов с 1-го по 4-й включительно у ледоколов современной постройки может быть выпуклой (рис. 105) или прямолинейной (рис. 98). Поскольку при работе мощных ледоколов в тяжелом льду наблюдается сравнительно большой дифферент на корму, величина углов наклона этих шпангоутов к вертикали должна быть сохранена и в подводной части корпуса ниже КВЛ. Этому требованию отвечает форма носовых шпангоутов, близкая к прямолинейной, которую можно рекомендовать для мощных ледоколов. Для средних и вспомогательных ледоколов также можно рекомендовать близкую к прямолинейной форму носовых шпангоутов, но с меньшим, чем у мощных ледоколов, развалом у КВЛ. Недостаток шпангоутов такой формы заключается в том, что при переворачивании и притапливании разрушенного льда последний может всей плоскостью прилегать к наружной обшивке, увеличивая трение (особенно при наличии снегового покрова) [47]. В некоторых зарубежных работах предлагается отказаться от плоских и вогнутых поверхностей в носовой части корпуса ледокола [101], [96]. Так, канадские ледоколостроители отдают предпочтение выпуклой форме носовых шпангоутов с меньшим развалом бортов. Целесообразность такой формы шпангоутов обосновывается, по мнению Г. Германа [96], также тем, что при меньших углах наклона борта лед разрушается под действием сжатия, вследствие чего образуются меньшие обломки льда, которые якобы не представляют опасности для винторулевого комплекса ледокола.

Следует отметить, что применение выпуклых носовых шпангоутов при сохранении сравнительно больших углов наклона борта может привести к ложкообразной форме носа, которая, как показала практика, не может быть рекомендована для морских ледоколов, так как это значительно ухудшает проходимость судна в сплоченных битых льдах.

Углы наклона борта к вертикали у КВЛ в средней части корпуса ледокола изменяются от 5 до 20°. При движении ледокола в сплошных льдах в этом районе корпуса происходит притапливание и поворачивание льдин, взломанных носовой частью ледокола. Поэтому влияние углов наклона борта на ледовое сопротивление не должно быть таким существенным, как в носовой части. В то же время при больших значениях этих углов в районе миделя обычно возникают затруднения, связанные с размещением энергетической установки.

Угол наклона борта в средней части корпуса у большинства существующих ледоколов близок к 20°. Исключение составляют ледоколы, построенные в Канаде, у которых $\beta'_x = 5 \div 10^\circ$. По нашему мнению, угол наклона борта ледокола к вертикали на миделе должен быть равен 18—20°.

Что касается формы мидель-шпангоута в целом, то в настоящее время применяются в основном трапециевидная (ледоколы оте-

чественной и финской постройки) и округлая (канадские и отчасти американские ледоколы) формы. Для мидель-шпангоута трапециевидальной формы характерным является плоский борт и плоское днище со скуловым переходом значительной кривизны (рис. 100); у мидель-шпангоутов округлой формы плоские участки отсутствуют (рис. 105). Каждая из этих форм имеет свои преимущества и недостатки. При округлой форме улучшаются условия освобождения судна от заклинивания. Однако при движении ледокола в сплошном льду округлая форма шпангоутов в средней части корпуса способствует попаданию льда под днище судна и, следовательно, к винтам. Как показали модельные испытания, канал

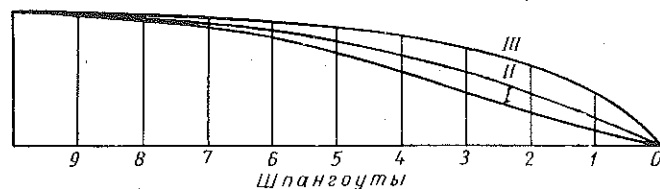


Рис. 121. Очертания КВЛ ледоколов.
I — S-образная; II — прямая; III — выпуклая.

в этом случае в большей степени заполнен битым льдом, что создает дополнительные трудности для проводки транспортных судов.

Трапециевидальная форма позволяет получить несколько большие значения коэффициента общей полноты δ и коэффициента полноты миделя β , чем округлая, поэтому она рациональнее. Кроме того, при трапециевидальной форме шпангоутов в средней части корпуса значительно упрощается технология постройки ледокола. Наконец, трапециевидальная форма оказывает благоприятное влияние на бортовую качку. Сказанное позволяет сделать заключение, что при проектировании ледоколов всех классов есть основание отдать предпочтение этой форме мидель-шпангоута.

Как указывалось выше, эффективность разрушения льда корпусом ледокола можно повысить, изменяя углы наклона ватерлинии к плоскости батокса. Форму ватерлинии определяют ее угол входа в носу (α_0) и характер изменения α' по длине носовой части корпуса на участке 0—5 теоретических шпангоутов (рис. 121, 122). Носовая ветвь КВЛ ледокола может быть спроектирована выпуклой, близкой к прямой или S-образной. Как показали модельные испытания, выпуклая форма ватерлинии, обеспечивающая некоторое увеличение проходимости ледокола в сплошных льдах, нежелательна по ряду других обстоятельств. При более полной ватерлинии увеличивается вероятность заклинивания судна во льдах и вследствие больших углов заострения в носовой части ухудшается закальваемость ледокола в кромку. Выпуклая форма

отрицательно сказывается на проходимости в битых льдах. S-образная форма КВЛ, которая характеризуется сравнительно малыми углами α_0 , рациональна с точки зрения ходкости судна в битых льдах. Однако при движении в сплошных льдах s-образная форма КВЛ является причиной увеличения сопротивления.

В настоящее время в практике мирового ледоколостроения не существует единого мнения относительно формы конструктивной ватерлинии. Канадские ледоколостроители отдают предпочтение выпуклой форме КВЛ с углом входа, близким к 30° ; советские,

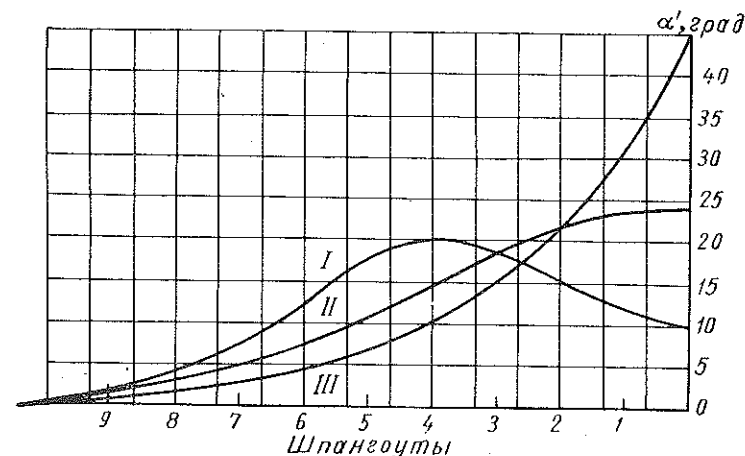


Рис. 122. Изменение угла наклона КВЛ к плоскости батоксов в носу.
I — S-образная ватерлиния; II — прямая ватерлиния; III — выпуклая ватерлиния.

американские и финские — умеренно выпуклой с углом входа, несколько меньшим 30° . На наш взгляд, эта форма КВЛ для ледоколов наиболее оптимальна.

Опыт эксплуатации судов ледового плавания показывает, что форма обводов корпуса в районе форштевня и непосредственно прилегающих к нему участков бортов существенно влияет на ледовую ходкость судна. Это подтверждается также результатами специальных испытаний в ледовом бассейне, из которых следует, что при движении судна в сплошном льду сопротивление, отнесенное к форштевню, в общем ледовом сопротивлении занимает существенную долю. Поэтому при проектировании ледоколов и транспортных судов ледового плавания форме обводов корпуса в районе форштевня и, в частности, элементам самого форштевня должно быть уделено особое внимание.

К числу элементов форштевня, влияющих на ледовые качества судна, относятся угол его наклона к КВЛ (ϕ), форма форштевня и ширина его передней грани. До сих пор в практике проектиро-

вания еще не установилось единого мнения относительно выбора угла φ для ледоколов. Предполагается, что уменьшение φ должно способствовать более успешному разрушению льда. В то же время известно, что при малых значениях этого угла происходит вылезание носовой оконечности корпуса на ледяной покров и, как следствие, заклинивание ледокола. Кроме того, при движении в сплошном льду увеличивается рыскание ледокола.

Угол наклона форштевня к КВЛ существенно влияет также на проходимость судна в битых льдах: с уменьшением φ возрастает

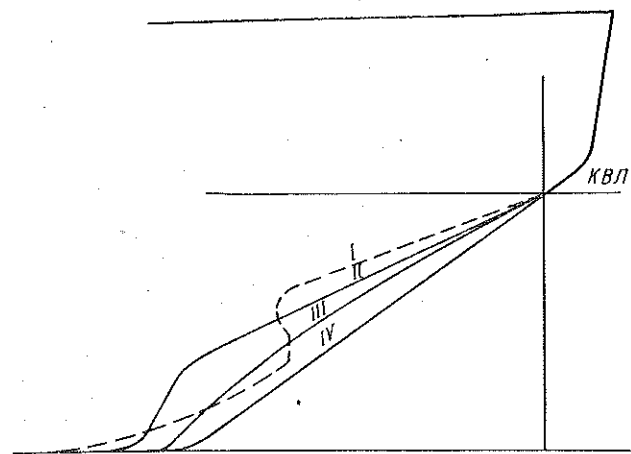


Рис. 123. Очертания форштевней ледоколов.

I — форштевень ледокола с носовым винтом; II — форштевень прямой формы с «выступом» в нижней части; III — форштевень вогнутой формы; IV — форштевень прямой формы без «выступа».

число льдин, буксируемых форштевнем, что приводит к увеличению ледового сопротивления.

Угол наклона форштевня к КВЛ мощных и средних отечественных ледоколов равен $25-30^\circ$. У американских ледоколов угол наклона форштевня близок к 30° [104]. Канадские специалисты считают, что угол наклона форштевня, равный 30° , обеспечивает ледоколу хорошую устойчивость на курсе при прокладке канала и удовлетворяет всем другим требованиям [96]. По нашему мнению, угол наклона форштевня к КВЛ у мощных и средних ледоколов следует принимать равным $\varphi = 25^\circ$.

Форштевень может быть выполнен с постоянным или переменным углом наклона (рис. 123). В последнем случае форма форштевня может быть вогнутой или выпуклой. Выпуклая криволинейная форма форштевня в подводной части корпуса обеспечивает более острое притыкание нижних ватерлиний к диаметральной плоскости, а вогнутая форма придает носовым ветвям ватерлиний

большую полноту. Поэтому вогнутая форма форштевня несколько упрощает технологию постройки носовой оконечности. Выпуклая форма форштевня в настоящее время на морских ледоколах, как правило, не применяется.

В отечественной практике при проектировании ледоколов без носовых винтов подводную часть форштевня, как правило, делают прямолинейной на значительном участке длины, что обеспечивает судну сохранение ледокольных качеств при изменении осадки.

В районе днища форштевень должен плавно переходить в «выступ» (рис. 123), который уменьшает попадание льда под днище, особенно при движении в битых льдах. Кроме того, при работе ледокола в тяжелых льдах выступ ограничивает вползание носовой оконечности судна на ледяной покров и, следовательно, уменьшает вероятность заклинивания. Высота этого выступа, считая от основной линии, на существующих ледоколах без носового винта меняется в сравнительно широких пределах от 0,4 до 0,1 T (где T — осадка по КВЛ). На вновь проектируемых ледоколах высота выступа должна лежать в указанных пределах.

В настоящее время установлено, что увеличение ширины передней грани форштевня не улучшает ледокольных качеств судна. Специальные исследования, проведенные в натуральных условиях и в ледовом бассейне, показали, что форштевень лыжеобразной формы разрушает лед прорезанием, как это делает форштевень с обычной треугольной формой сечения. С точки зрения сопротивления движению в сплошных льдах указанные формы форштевня оказались практически равноценными. При движении судна в битых льдах форштевень с уширенной передней гранью способствует буксированию льдин носом, что увеличивает ледовое сопротивление. Поэтому на вновь проектируемых ледоколах форма форштевня должна быть треугольной, как это имеет место у большинства существующих ледоколов.

Приведенные выше особенности проектирования формы обводов корпуса носовой оконечности относились в основном к ледоколам без носового винта. Наличие в носу гребного винта предъявляет к носовым обводам дополнительные требования, связанные с обеспечением эффективности работы винта и защитой его от повреждения льдом. Известно, что полезные свойства носового винта заключаются в основном в омывании корпуса струями воды, отбрасываемыми винтом, что уменьшает трение льда о корпус. Поэтому для повышения эффективности работы носового винта целесообразно размещать его ближе к КВЛ. С другой стороны, для защиты винта от поломок необходимо обеспечить возможно большее его заглубление и отдаление от носового перпендикуляра.

В существующей практике ледоколостроения установлены определенные соотношения между заглублением носового винта и осадкой, а также между отстоянием «яблока» форштевня от носового

перпендикуляра и длиной судна [34]. Угол наклона форштевня к КВЛ у ледоколов с носовым винтом несколько меньше, чем у ледоколов без носовых винтов (рис. 123). Это, в свою очередь, приводит к более полным обводам носовых ветвей ватерлиний.

Остановимся теперь на выборе коэффициентов теоретического чертежа δ , α и β , которыми характеризуется форма обводов корпуса ледокола.

Как известно, форма обводов корпуса ледокола отличается сравнительно острыми образованиями носовой оконечности, обусловленными значительным наклоном форштевня, развалом бортов и остротой носовых ветвей ватерлиний. Эти особенности обуславливают довольно низкие значения коэффициента общей полноты, которые у существующих ледоколов изменяются в пределах от 0,46 до 0,53. У мощных и средних ледоколов отечественной постройки его значения близки к верхнему пределу, а у вспомогательных — к нижнему. Наиболее высокие значения коэффициента общей полноты у ледоколов канадской постройки — до 0,58. Уменьшение коэффициента общей полноты способствует улучшению ледовой ходкости ледокола, поэтому желательно принимать возможно меньшие значения δ (с учетом размещения энергетической установки), а именно: для мощных и средних ледоколов не более 0,52—0,54, а для вспомогательных — 0,45—0,47.

Коэффициент полноты конструктивной ватерлинии ледокола α зависит от многих элементов формы обводов корпуса, в частности от коэффициента общей полноты δ , углов входа ватерлиний, углов развала шпангоутов и т. д., оказывающих существенное влияние на ледовую ходкость судна. Большие значения этого коэффициента характерны для мощных ледоколов ($\alpha \approx 0,75$), малые — для вспомогательных ($\alpha \approx 0,68$). Значения коэффициентов полноты площади ватерлинии для средних ледоколов близки к 0,71. В настоящее время не представляется возможным обоснованно рекомендовать оптимальные значения коэффициента полноты площади ватерлинии ледоколов. На первой стадии проектирования следует пользоваться приведенными выше цифрами. Уточненные значения этого коэффициента могут быть получены при более детальной разработке проекта: после выбора главных размерений и других элементов формы, в частности, после выбора наклона шпангоутов и углов заострения ватерлиний.

Коэффициент полноты площади мидель-шпангоута β не оказывает непосредственного влияния на ледовую ходкость судна. Но поскольку его величина зависит от коэффициента общей полноты δ , можно считать, что коэффициент β также оказывает влияние на ледовую ходкость. Основными требованиями, которыми необходимо руководствоваться при выборе значений коэффициента β , следует считать условия размещения энергетической установки и сохранения заданных размеров помещений.

В заключение остановимся на проблемах, связанных с распределением водоизмещения по длине ледокола. Оно характеризуется положением центра величины по длине ледокола, которое, в свою очередь, зависит от главных размерений, коэффициента общей полноты, расположения по длине наиболее полного шпангоута и т. д.

Сравнительно острые образования носовой оконечности ледокола обычно приводят к смещению абсциссы центра величины x_c от миделя в корму. В каждом конкретном случае при распределении водоизмещения, т. е. при выборе положения центра величины по длине ледокола, приходится исходить из требований, связанных с его дифферентовкой. Если по условиям дифферентовки необходимо несколько сдвинуть центр величины по направлению к носу судна, то для этого следует сместить наиболее полный шпангоут в нос от миделя. По нашему мнению, на ледоколах всех классов можно переносить указанный шпангоут в нос от миделя на расстояние, равное 5% длины судна. Такое изменение положения наиболее широкого сечения по длине ледокола не оказывает отрицательного влияния на ледовую ходкость и, кроме того, способствует уменьшению вероятности заклинивания судна в тяжелых льдах. Можно также ожидать, что смещение наиболее широкого сечения в нос от миделя улучшит условия защиты гребных винтов, так как в этом случае создается больше возможностей для всплытия обломков льда до подхода к винто-рулевому комплексу.

§ 36. Выбор формы обводов транспортных судов ледового плавания

Экономические показатели работы транспортного судна определяются скоростью перевозки грузов, поэтому форма обводов корпуса транспортных судов ледового плавания должна выбираться на основе компромиссного решения, учитывающего ходкость судна на чистой воде и во льдах. Чем выше ледовый класс судна (т. е. чем больше навигационного времени оно работает в тяжелых условиях), тем больше его форма обводов должна быть приспособлена для плавания во льдах. Очевидно, что в наибольшей степени условиям работы во льдах отвечает форма обводов корпуса современных ледоколов (см. § 35).

Вопрос о том, в какой степени форма обводов транспортных судов ледового плавания должна соответствовать ледокольной, решается по-разному. Так, в Канаде, где для перевозки грузов иногда используются ледоколы, а транспортные суда зачастую выполняют ледокольные операции, провести резкую грань между формой обводов корпуса ледокола и транспортного судна не представляется возможным. Отечественные транспортные суда ледового плавания предназначаются исключительно для перевозки грузов, поэтому форма обводов отечественных транс-

портных судов ледового плавания существенно отличается от ледокольной. Как отмечалось в § 34, соотношения главных размерений современных отечественных морских транспортных судов ледового плавания (Л/В, В/Т и Н/Т) незначительно отличаются от общепринятых для обычных грузовых судов.

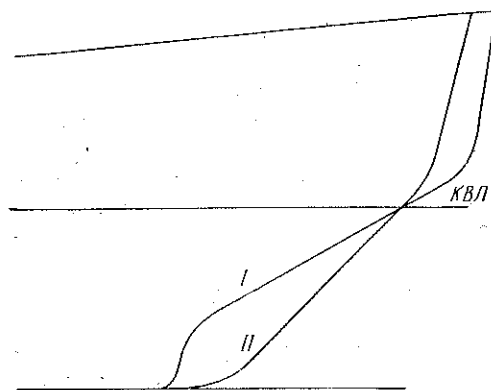


Рис. 124. Очертания форштевней транспортных судов.

I — класс УЛ (Аркт.); II — класс УЛ.

В табл. 16 приведены значения основных коэффициентов теоретического чертежа δ , α и β и углов α_0 , φ , $\beta_{\text{ж}}$ современных советских транспортных судов ледового плавания. Как видно из таблицы, форма обводов корпуса транспортных судов класса УЛ (Аркт.) существенно отличается от обводов судов классов УЛ и Л. Типичным судном класса УЛ (Аркт.) является дизель-электроход «Амгуема», форма обводов которого может считаться образцовой для судов подобного типа. Отличительные черты формы обводов корпуса судов этого класса следующие. Форштевень у КВЛ наклонен к горизонту под углом около 30° . Обводы форштевня в подводной части плавно переходят в выступ (рис. 124). Его высота составляет около $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{4}$ осадки судна. Батоксы в районе КВЛ проектируются прямыми, параллельными форштевню, а в подводной части корпуса — выпуклыми с целью сохранения

заданной величины водоизмещения. КВЛ и ватерлинии, расположенные вблизи нее, делаются прямыми в районе 0—1 теоретических шпангоутов, а по мере удаления от носа к миделю они становятся выпуклыми и плавно переходят в цилиндрическую вставку, длина которой составляет около $\frac{1}{4}$ корпуса. Мидель-шпангоут имеет трапециевидную форму с плоскими бортами, наклоненными к вертикали под углом 6 — 8° , со сравнительно небольшим радиусом скулового закругления. В надводной части (у миделя) борта судна вертикальны. Носовые шпангоуты с первого по третий имеют V-образную форму, их наклон к вертикали у КВЛ на первом теоретическом шпангоуте равен 30 — 40° ; по мере удаления от носа к миделю этот угол постепенно уменьшается. Корма судов класса УЛ (Аркт.), как и судов классов УЛ и Л, мало отличается от кормы обычных грузовых судов. Ахтерштевень снабжен выступом (зубом) для защиты винта и руля от ледовых повреждений при заднем ходе. Впереди винта могут быть установлены защитные перья. Как видно из табл. 16, коэффициент общей полноты судов класса УЛ (Аркт.) составляет $0,64$ — $0,66$, т. е. значительно больше, чем у ледоколов.

Суда классов УЛ и особенно Л по форме обводов приближаются к обычным транспортным судам, отличаясь от последних лишь некоторыми специфическими особенностями. Форштевень таких судов делается наклонным ($\varphi = 40$ — 50°) (рис. 124). Батоксам в носовой оконечности стремятся придать форму, подобную очертаниям форштевня, избегая по возможности вогнутых образований. Ватерлиниям вблизи КВЛ не рекомендуется придавать s-образность. Относительная длина цилиндрической вставки судов класса УЛ и Л больше, чем у судов класса УЛ (Аркт.). Борты в районе цилиндрической вставки вертикальные, поэтому коэффициент полноты мидель-шпангоута β и коэффициент общей полноты δ у таких судов выше, чем у судов класса УЛ (Аркт.) (табл. 16).

По сравнению с обычными судами суда ледового плавания всех классов имеют более низкий коэффициент общей полноты и, следовательно, при равных размерениях меньше водоизмещение и грузоподъемность. В связи с этим для судов класса УЛ (Аркт.) принимается избыточный надводный борт. О мореходных качествах судов ледового плавания можно судить на основании следующих данных. На рис. 125 приведены буксировочные кривые сравнительных испытаний на свободной воде двух моделей, одна из которых имеет обычные для грузовых судов обводы, а другая — обводы судна ледового плавания (рис. 126). Нетрудно убедиться, что ходкость сравниваемых моделей на спокойной воде и при волнении практически одинакова. Аналогичные результаты были получены при испытании ряда других моделей транспортных судов.

Более общие выводы позволяет сделать диаграмма, приведенная на рис. 127, на которой сопоставлены кривые оптимальных

Таблица 16

Элементы формы обводов современных отечественных ледоколов и транспортных судов ледового плавания

Элементы формы	Ледоколы	Транспортные суда ледового плавания		
		УЛ (Аркт.)	УЛ	Л
δ	0,45—0,53	0,640—0,660	0,66—0,71	0,66—0,73
α	0,69—0,76	0,800—0,810	0,80	0,80
β	0,78—0,89	0,930—0,950	0,97	0,97
φ , град.	25—30	29—30	40—50	40—50
α_0 , град.	22—30	22,5—23,5	20—30	20—30
$\beta_{\text{ж}}$, град.	15—20	7,5	0	0

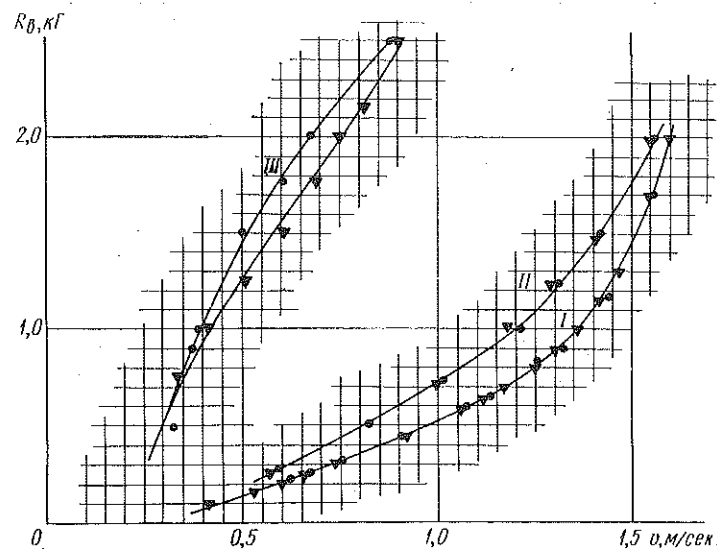


Рис. 125. Буксировочные кривые сопротивления на свободной воде моделей транспортных судов.

I — спокойная вода; II — попутное волнение; III — встречное волнение.
 ● — модель с обычными обводами, ▲ — модель с «ледовыми» обводами.

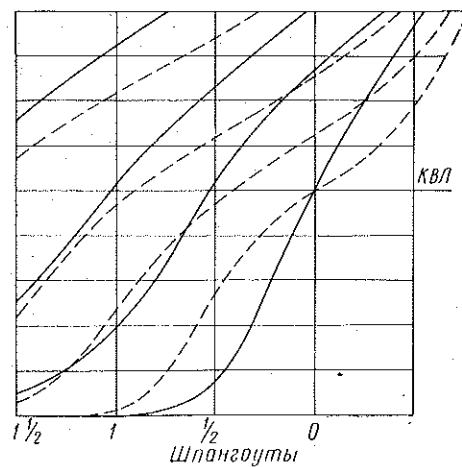


Рис. 126. Обводы носовых оконечностей двух моделей транспортных судов.

— модель с обычными обводами; - - - модель с «ледовыми» обводами.

(экономических) значений коэффициентов общей полноты $\delta_{\text{эк}}$ грузовых судов* с коэффициентами δ современных судов ледового плавания. Из диаграммы видно, что в отличие от ледоколов, имеющих невыгодные с точки зрения пропульсивных качеств на свободной воде значения δ , у транспортных судов ледового плавания значения коэффициента общей полноты δ близки к оптимальным. Этот вывод подтверждается также результатами модельных испытаний. Все это дает право считать, что изменения, вносимые в форму обводов корпуса грузовых судов с целью приспособить их для плавания во льдах, не влияют отрицательно на их мореходные качества. (Как указывалось выше, соотношения главных размерений ледокольно-транспортных судов мало отличаются от общепринятых.)

Что касается скорости грузоперевозок во льдах, то транспортные суда ледового плавания, имеющие специальные ледокольные обводы, получают несомненные преимущества перед судами с обычными обводами корпуса. Таким образом, применение для транспортных судов, плавающих во льдах, специальной формы обводов корпуса с целью получения наибольшего экономического эффекта становится очевидным.

§ 37. Определение мощности энергетической установки

Правильный выбор мощности энергетической установки имеет важное значение, так как в конечном счете этим во многом определяется экономическая эффективность работы судна в ледовых условиях. Мощность главных двигателей энергетической установки транспортных судов ледового плавания определяется из условия достижения заданной скорости хода на свободной воде. Практические методы определения мощности энергетической установки

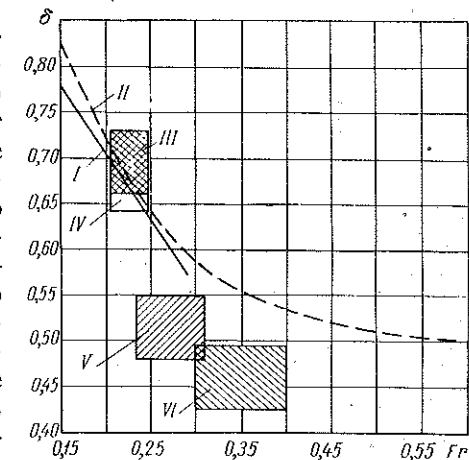


Рис. 127. Коэффициенты δ транспортных судов и ледоколов.

I — $\delta_{\text{эк}}$ грузовых и грузо-пассажирских судов (по данным Хэкшира); II — $\delta_{\text{эк}}$ грузовых и грузо-пассажирских судов (по данным Эйра); III — ориентировочные пределы изменения δ транспортных судов класса Л и УЛ; IV — то же судов класса УЛ (Аркт.); V — то же мощных и средних ледоколов; VI — то же вспомогательных ледоколов и буксиров.

* Эта часть диаграммы заимствована из книги Л. М. Ногиды [52].

по заданной скорости на свободной воде общеизвестны, поэтому в данной книге они не рассматриваются.

В техническом задании на проектирование транспортных судов ледового плавания, кроме скорости хода на свободной воде, дополнительно может оговариваться скорость движения в ледовых условиях (обычно в канале за ледоколом). В этом случае после определения необходимой мощности энергетической установки судна из условия достижения заданной скорости хода на свободной воде необходимо произвести поверочный расчет ледовой ходкости судна. Для этой цели может быть использовано выражение (109) или диаграммы ледопроеходимости (см. § 28). Если в результате расчета выбранная мощность не обеспечивает заданной скорости хода во льдах, то ее увеличивают до значения, полученного по расчету ледовой ходкости.

Мощность энергетической установки ледокола определяется из условия преодоления ледоколом заданной предельной толщины сплошного льда (при непрерывном ходе). Для этого может быть использована рекомендованная выше формула (72).

Приведем практический пример расчета мощности энергетической установки ледокола.

Пример. Определить мощность главных двигателей энергетической установки ледокола при заданной толщине сплошного ледяного покрова $h = 1,3$ м и скорости 1,5—2 узла. Ширина ледокола не менее 22 м, осадка — не более 8,5 м. Принимаем: $B = 22$ м; $\sigma_p = 80$ т/м²; $\gamma_l = 0,9$ т/м³; $\mu_0 = 1,34$.

По выражению (72) определяем сопротивление R_L (третьим и четвертым слагаемыми формулы (72) пренебрегаем, так как при $v = 1,5 \div 2$ узл. они малы):

$$R_L = 0,004 B \sigma_p h \mu_0 + 3,6 B h^2 \mu_0 \gamma_l = \\ = 0,004 \cdot 22 \cdot 80 \cdot 1,3 \cdot 1,34 + 3,6 \cdot 22 \cdot 1,3^2 \cdot 1,34 \cdot 0,9 = 12,3 + 161 = 173 \text{ т.}$$

При трех гребных винтах и распределении мощности между ними в соотношении 1:1:1 определяем суммарный упор винтов, приняв согласно [27] коэффициент засасывания $t_0 = 0,08$:

$$P_e = \frac{R_L}{(1 - t_0)} = \frac{173}{(1 - 0,08)} = 190 \text{ т.}$$

Согласно принятому распределению мощности каждый винт на швартовном режиме должен развить упор, равный 63,3 т.

По заданной осадке 8,5 м выбираем диаметр среднего винта с учетом требований по его заглублению, согласно которым отстояние оси винта от конструктивной ватерлинии должно быть не менее диаметра винта [71]. Учитывая, что высота пятки ахтерштевня согласно Правилам Регистра СССР составляет $0,035 d_B$, а зазор между пяткой ахтерштевня и концом лопасти винта равен $0,04 d_B$ [81], выражение для максимального допустимого значения диаметра винта запишем в виде

$$d_B (0,5 + 1,0 + 0,035 + 0,04) = T, \quad (121)$$

откуда

$$1,575 d_B = 8,5 \text{ м, т. е. } d_B = 5,4 \text{ м.}$$

Принимаем диаметр винтов 5 м.

Определим мощность N_p , которую следует подвести к винтам, чтобы они развили необходимый упор, воспользовавшись для этого графиками гребных вин-

тов ледоколов, разработанными М. А. Игнатьевым (рис. 128). Находим, что мощность, подводимая к каждому винту, равна 5000 л. с. Суммарная мощность на винтах составляет $5000 \times 3 = 15\,000$ л. с.

С учетом потерь в валопроводах и в передаче определим мощность на фланцах главных двигателей $N_{эф}$. Полагая, что энергетическая установка ледокола дизельная с электрическим приводом к винтам на постоянном токе, задаемся величинами к. п. д. передачи и валопровода.

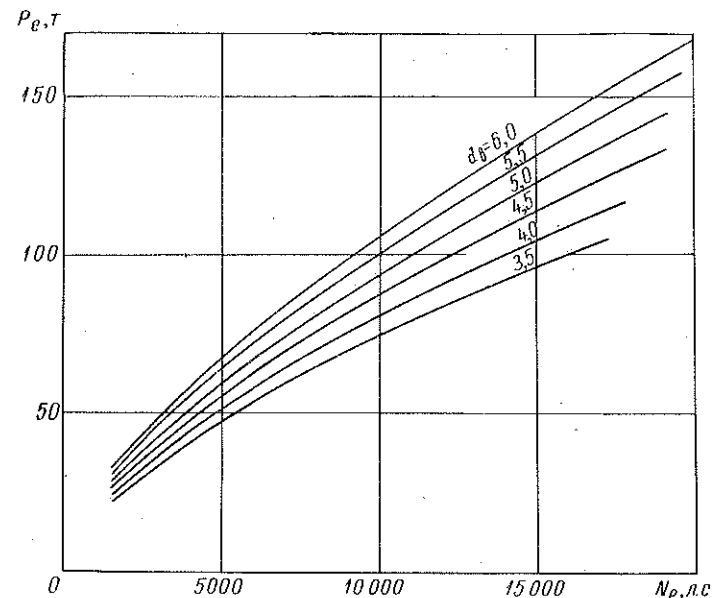


Рис. 128. Зависимость $P_e = f(N_p, d_B)$ для ледоколов.

К. п. д. передачи выражается формулой

$$\eta_{п} = \eta' \eta'' \eta''', \quad (122)$$

где η' — к. п. д. гребного электродвигателя;

η'' — к. п. д. генераторов;

η''' — коэффициент, учитывающий потери в электросети.

Принимаем следующие значения к. п. д. электропередачи [52]: $\eta' = 0,94$; $\eta'' = 0,94$; $\eta''' = 0,99$.

По формуле (122) определяем $\eta_{п} = 0,87$.

Если принять, что к. п. д. в валопроводе равен 0,98, то суммарные потери мощности составят 15,0%, а мощность силовой установки ледокола будет

$$N_{эф} = 17\,250 \text{ л. с.}$$

В качестве главных двигателей на ледоколах применяются паровые поршневые машины, дизель-электрические установки на постоянном токе и турбоэлектрические установки на ядерном топливе. Кроме того, на ледоколах могут найти применение газотурбинные установки с электропередачей к гребным винтам, дизель-гидротрансформаторные и т. д. В настоящее время наибольшее применение на ледоколах всех классов получила дизель-

электрическая установка на постоянном токе. На современных транспортных судах ледового плавания в качестве энергетических используются дизельные установки (с ВРШ и без него), турбинные, газотурбинные и дизель-электрические установки.

Для транспортных судов классов Л и УЛ может быть рекомендована любая из указанных установок. Для судов класса УЛ (Аркт.) рекомендуются дизель-электрические и дизель-гидротрансформаторные установки. Защиту двигателей от ледовых нагрузок, которые возникают в результате взаимодействия винта со льдом (удары винта о лед, фрезерование льда лопастью, клинение винта льдом), целесообразно осуществлять с помощью гидравлических или магнитных муфт.

В заключение упомянем об энерговооруженности судна — отношении мощности главных механизмов к водоизмещению. По мнению некоторых авторов, энерговооруженность служит критерием, позволяющим судить о техническом совершенстве ледокола. Однако это оправдано лишь в отношении энергетической установки. Так, энерговооруженность ледоколов, имеющих в качестве главных двигателей паровые поршневые машины, равна примерно 1,0; у дизель-электрических ледоколов с силовыми установками на ядерном топливе — 2,4 и выше. Энерговооруженность ледоколов определенных классов с энергетическими установками одинакового типа изменяется в сравнительно узких пределах. Это позволяет в предварительных стадиях разработки проекта приблизительно оценить мощность проектируемого ледокола. Однако в качестве критерия для оценки совершенства ледокола в целом, определяемого эффективностью его работы во льдах, энерговооруженность неприемлема, так как она не учитывает ряд важнейших качеств судна: удельный полезный упор винтов, размерения и форму обводов корпуса, его прочность, дальность плавания и автономность, маневренность энергетической установки и т. п. Действительно, если ориентироваться на энерговооруженность, то небольшие ледоколы (в частности, вспомогательные) более совершенны, чем мощные ледоколы, построенные с применением новейших достижений техники. Так, небольшой датский ледокол «Эльбёрн» имеет энерговооруженность 2,6 л. с./т, т. е. больше, чем мощные современные ледоколы типа «Москва». Поэтому энерговооруженность как критерий для оценки эффективности работы ледокола во льду лишена физического смысла.

§ 38. Требования к форме обводов корпуса с точки зрения защиты винтов. Специальные устройства и системы судов ледового плавания

Винто-рулевой комплекс, а также специальные устройства и системы, устанавливаемые на судах ледового плавания, оказывают существенное влияние на ледовую ходкость и маневренность судна.

Винты и рули судов ледового плавания работают в сложных условиях, поэтому их защите уделяется особое внимание. Меры, принимаемые для защиты винтов, направлены на уменьшение размеров отдельных льдин и общего количества льда, попадающего к винтам и рулям, а также на изменение траектории движения льдин. Наилучший эффект дает отведение льдин от корпуса под кромку ненарушенного ледяного покрова. Эти меры, помимо защиты винтов, способствуют уменьшению размеров льдин и общей сплоченности битого льда в канале. Таким образом, защита винтов и очистка канала должны рассматриваться совместно.

Эффективная защита винто-рулевого комплекса и улучшение очистки канала достигаются рациональным проектированием формы обводов корпуса, в частности, кормовой оконечности,* а также созданием специальных устройств в виде наделок на корпусе, отводящих плоскостей, выступов, решеток, насадок Корта и т. п.

Форма обводов кормовой оконечности должна обеспечить такое заглубление винтов, при котором их кромки не выступали бы за основную линию, а со стороны бортов — за линию, образуемую проекцией КВЛ в плоскости дисков винтов. Следует, однако, заметить, что последнее положение не разделяется некоторыми ледоколостроителями.

В принятых в отечественном ледоколостроении правилах защиты винтов указывается, что заглубление винта от поверхности воды должно быть произведено не менее, чем на диаметр винта, считая от его центра [81]. В работе [34] заглубление винтов характеризуется отношением диаметра винта к осадке, которое равно 0,55—0,6. Отстояние кромок винта от основной линии может быть определено на основании требований [81] аналогично тому, как это сделано в § 37.

Корма ледокола по возможности должна иметь более полные образования в надводной части. Это позволит защитить винты при столкновениях во время буксировок и околосудов, а также обеспечить достаточную плавучесть и остойчивость при погружении кормы во время вползания носа судна на лед.

Все ледоколы и транспортные суда ледового плавания имеют, как правило, крейсерскую корму сравнительно полных образований, так как они должны работать во льду задним ходом. Для этого корме в районе КВЛ придают форму, близкую к обводам носовой оконечности (наклонный ахтерштевень с углом наклона 20—30°, пологие батоксы, прямые или слегка выпуклые ватерлинии). При проектировании некоторых судов ледового плавания были попытки создать специальную форму кормовых обводов, однако пока в этом отношении удачных решений не найдено.

* Вопросы, касающиеся особенностей проектирования собственно винтов и рулей, подробно изложены в работах [27], [34] и др.

К числу устройств, предназначенных для защиты винтов и очистки канала, относятся различного вида наделки (выступы), располагаемые ниже КВЛ в кормовой, средней, а иногда даже в носовой и днищевой частях корпуса. На рис. 129 показана кормовая оконечность модели морского ледокольного буксир-кантовщика, оборудованного винто-рулевым комплексом, который состоит из винтов регулируемого шага, расположенных в поворотных насадках. Такая необычная конструкция движителей судна потребовала принятия специальных мер по ледовой защите.

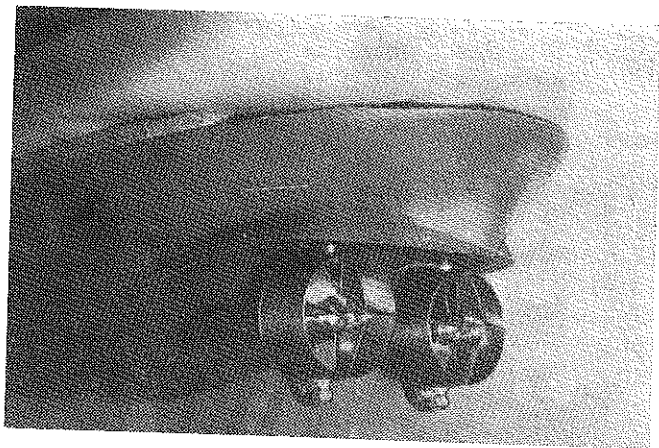


Рис. 129. Кормовая оконечность модели ледокольного буксир-кантовщика.

С этой целью кормовая оконечность судна снабжена объемными наделками, свисающими ниже КВЛ. Модельные испытания в ледовом бассейне и натурные испытания во льдах подтвердили правильность принятого оригинального конструктивного решения. Судно показало хорошую ходкость и маневренность во льдах на переднем и заднем ходах при надежной работе движительно-рулевого комплекса.

В практике проектирования ледоколов имели место также попытки использования булевых наделок для очистки канала, которые устанавливали в средней части корпуса. Модельные испытания показали, что применение таких наделок дает некоторый положительный эффект по очистке канала и защите движителей, однако при этом значительно увеличивается ледовое сопротивление судна в сплошных льдах.

В качестве примера использования ледоотводящих наделок в носовой части ледокола можно указать на наделку «ледолом». Помимо очистки канала и защиты винтов, эта наделка предназна-

лась для разрушения льда новым, отличным от применяемого на всех ледоколах способом — приложением давления снизу вверх.

На рис. 130 приведен теоретический чертеж наделки «ледолом», которая была испытана в 1952 г. на речном буксире «Иван Вазов» мощностью 600 л. с. Ожидалось, что после разрушения льда надводная часть наделки, спроектированная со значительным развалом бортов, будет отбрасывать лед на кромку. Однако в натуре льдины, следуя обводам бортов, поднимались вверх (рис. 131), а затем сползали вниз и попадали в канал.

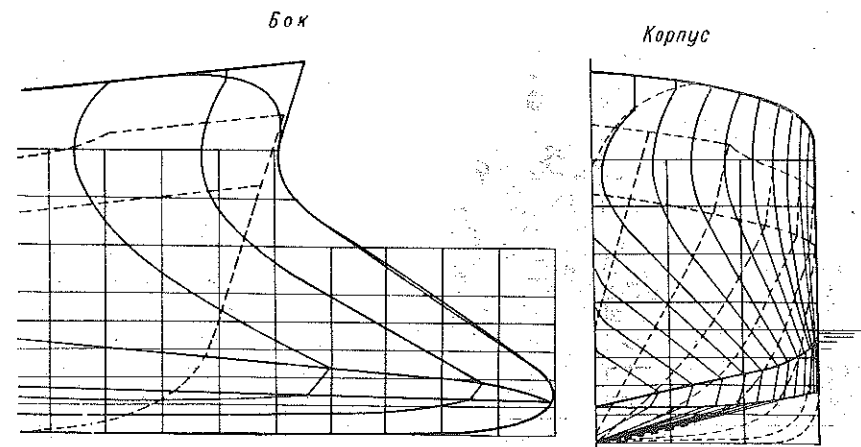


Рис. 130. Теоретический чертеж наделки «ледолом».

При этом лишь небольшое количество льдин оказывалось на ненарушенном ледяном покрове. Такой результат испытаний, возможно, объясняется недостаточной мощностью буксира.

М. С. Яковлев предложил для защиты винтов и очистки канала наделку, расположенную в днищевой части корпуса речного ледокола. Такой ледокол в сочетании со специальными обводами носа имеет ледоотводящий клинообразный выступ, расположенный на днище (рис. 132). По мнению автора, такая форма корпуса является перспективной для мелкосидящих ледоколов [90].

Более простой способ защиты винто-рулевого комплекса, широко применяемый на судах ледового плавания, — установка в районе движителей различного рода отводящих плоскостей и выступов. Так, впереди винтов устанавливают ледоотводящие плоскости — «перья», несколько перекрывающие диск винта по его ширине (рис. 133). Для защиты руля (и отчасти винтов) на заднем ходу ахтерштевень судов ледового плавания снабжается объемным выступом — «ледовым зубом». Основное требование,

предъявляемое к форме зуба, заключается в том, чтобы наружная кромка пера руля не выходила за пределы ледового зуба. (В деталях форма ледового зуба может несколько отличаться). Опыт эксплуатации показал, что защитные устройства в виде ледоотводящих «перьев» и «ледового зуба» достаточно эффективны, однако их применение не исключает ледовых повреждений рулей и особенно винтов. Это заставляет ледоколостроителей искать новые более эффективные защитные средства.

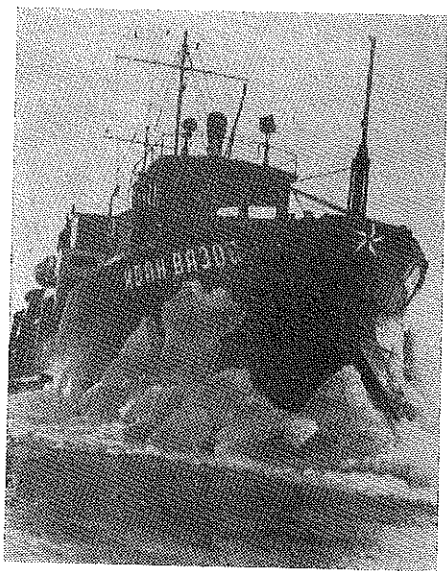


Рис. 131. Испытания наделки «ледолом» в сплошных льдах.

креновые и дифференциальные системы, гидроомывающие и подруливающие устройства, вибрационные установки и т. п.

Креновые системы состоят из бортовых цистерн, соединительных каналов и насосов. Цистерны располагаются в средней части корпуса между наружной обшивкой и бортовыми переборками. Отечественные мощные ледоколы имеют креновые цистерны объемом 660—970 м³, зарубежные мощные ледоколы — 320—350 м³, отечественные и зарубежные современные средние и вспомогательные ледоколы — 130—300 м³. Время перекачки балласта с борта на борт составляет обычно 90—120 сек, а создаваемый при этом угол крена на чистой воде достигает 4—8°. Транспортные суда ледового плавания, как правило, креновых систем не имеют.

Объем дифференциальных цистерн на ледоколах изменяется в широких пределах. Время перекачки балласта составляет 10—30 мин.

В качестве одного из таких средств следует упомянуть о насадках Корта на гребных винтах ледоколов. Поскольку в Советском Союзе такие насадки устанавливались лишь на небольших судах [70], окончательные выводы о целесообразности их применения на морских ледоколах в настоящее время сделать затруднительно. По мнению американских специалистов, применение насадок Корта приведет к увеличению упора винтов, но при этом пострадает маневренность во льдах и ухудшится ледовая ходкость [102]. Это мнение разделяет также Тиле [106].

К числу специальных устройств, повышающих ледовую ходкость и маневренность ледоколов, относятся

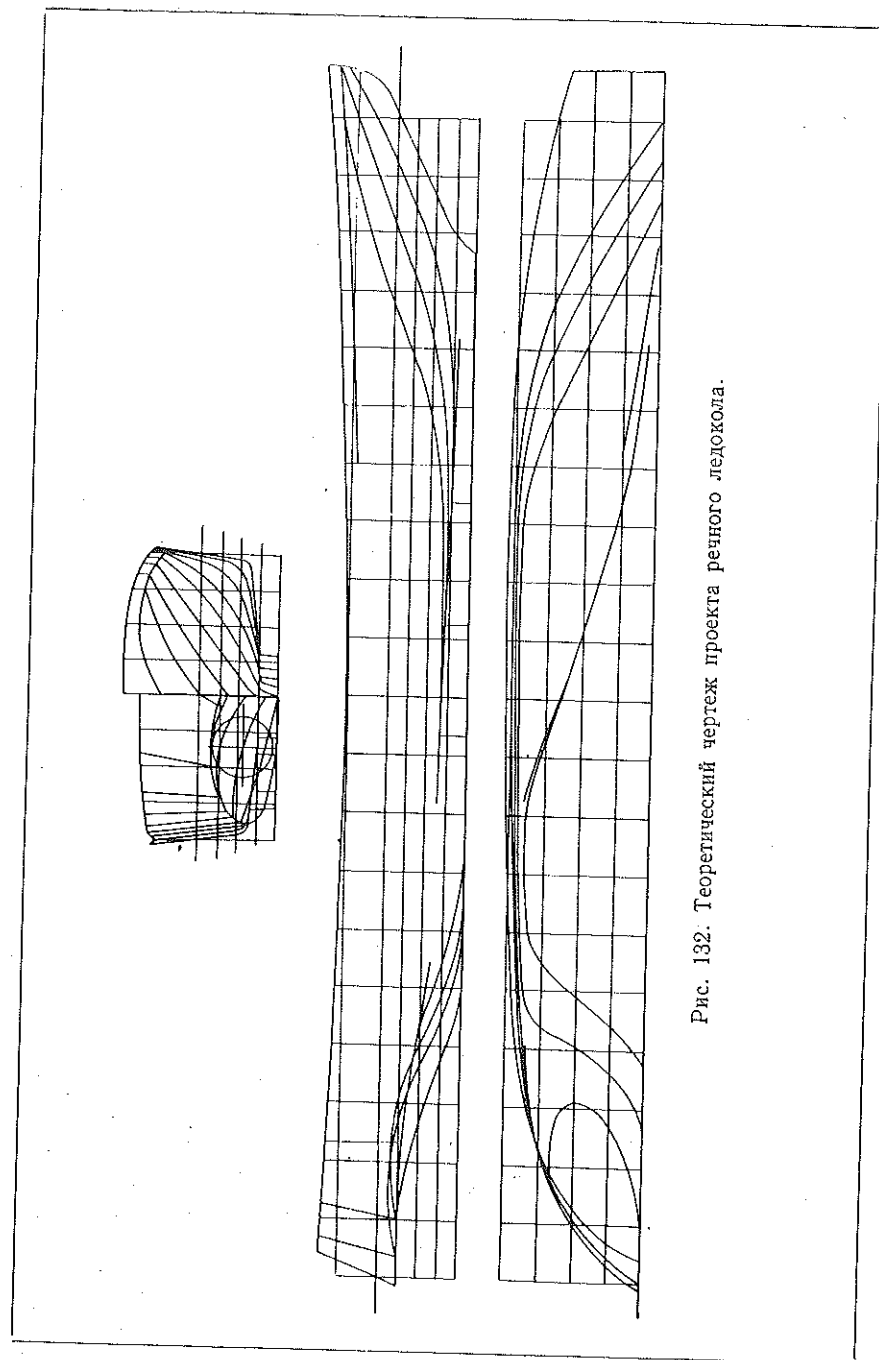


Рис. 132. Теоретический чертеж речного ледокола.

Транспортные суда ледового плавания оборудованы дифференциально-балластными цистернами с автономным приемом воды из-за борта. Функции дифференциальной системы по изменению посадки при работе во льдах имеют особо важное значение.

В настоящее время не существует единого мнения в отношении эффективности работы креновой системы на ледоколах. Натурные испытания опровергли мнение некоторых специалистов [101] о том, что кренование судна при непрерывном ходе во льду улучшает проходимость. Это объясняется тем, что общий характер разрушения льда при движении судна с работающей креновой

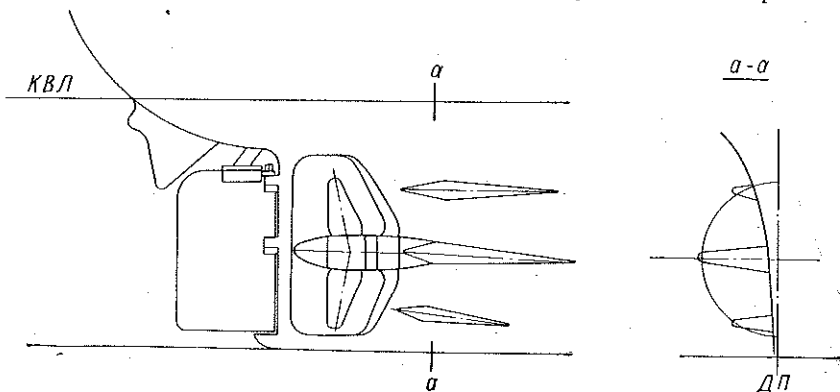


Рис. 133. Ледоотводящие защитные плоскости и «ледовый зуб» на корпусе транспортного судна ледового плавания.

системой принципиально не отличается от обычного (см. § 4). Наблюдения показали, что наклоненный борт ледокола за счет больших углов наклона к вертикали интенсивнее ломает лед изгибом, тогда как ломка льда другим бортом затруднена. Это вызывает рыскливость судна, вследствие чего прокладываемый канал становится непрямолинейным. Средняя же скорость движения по курсу практически не увеличивается.

Креновая и дифференциальная системы используются также для борьбы с заклиниванием судна.

Заклинивание ледокола, как правило, имеет место при работе набегам в тяжелых льдах. Ледокол с разбега вползает на лед, всплывает, приобретает дифферент на корму, теряет скорость и, наконец, останавливается. Отходу судна назад препятствует сила трения обшивки бортов о лед, обусловленная давлением ледокола на ледяной покров в результате действия силы веса ледокола, всплывшего на некоторую величину $\Delta T_{ср}$ (рис. 134, а). При неблагоприятном сочетании величины всплытия судна, расположения, размеров льдин и коэффициентов трения сила тяги винтов при работе на задний ход может оказаться меньше суммарной силы трения. Ледокол заклинивается во льду.

Несколько иным представляется механизм заклинивания транспортного судна, имеющего большую относительную длину корпуса и цилиндрическую вставку с вертикальными бортами. Транспортные суда часто заклиниваются в канале битого льда (рис. 134, б). И здесь причиной заклинивания является сила трения бортов о лед. Однако в данном случае сила трения (при отсутствии всплытия) обусловлена действием не сил веса судна, а «упругих» сил, возникающих в битом льду, сжатом между вертикальным бортом судна и кромкой канала.

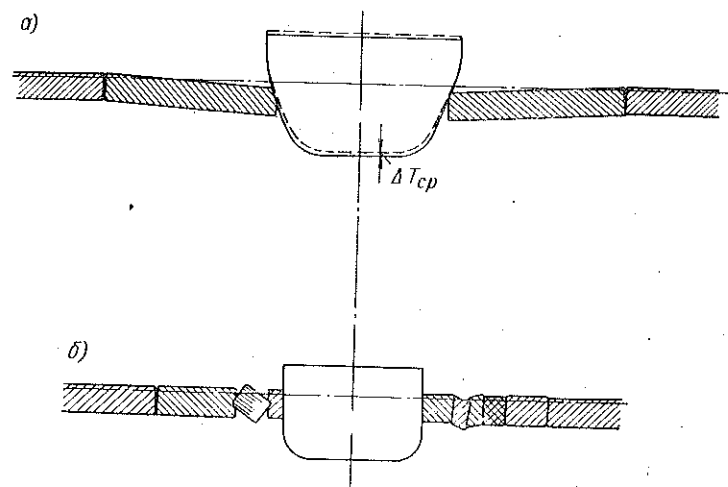


Рис. 134. Схема заклинивания судна во льдах: а — ледокол, б — транспортное судно ледового плавания.

Для освобождения судна от заклинивания используют попеременные реверсы винтов в сочетании с перекладками руля с борта на борт, креновые и дифференциальные системы (на ледоколах), режим работы бортовыми винтами враздрай и, наконец, прибегают к взрывам льда. Освобождение судна от заклинивания иногда занимает несколько часов. В тяжелых случаях транспортные суда освобождают с помощью ледоколов. Ледокол же вынужден освобождаться самостоятельно.

В настоящее время составить обоснованное мнение об эффективности применения креновой и дифференциальной систем для освобождения судна от заклинивания затруднительно. Работа дорогостоящих креновых и дифференциальных систем нуждается в тщательном изучении. Опубликованные по этим вопросам исследования [65] и [66] пока не имеют прикладного характера и не позволяют произвести обоснованный выбор параметров этих систем.

В последнее время появилась тенденция к отказу от применения креновых систем [107], [110] либо к совмещению функций

креновой системы и устройства для успокоения качки [102]. По нашему мнению, креновые и дифференциальные системы не отвечают предъявляемым к ним требованиям как к средству быстрого освобождения ледокола от заклинивания и нуждаются в усовершенствовании.

Поиски средств повышения эффективности работы ледоколов привели в последние годы к созданию ряда специальных устройств, предназначенных для улучшения ледовой ходкости и маневренности. К их числу относятся гидроомывающие, подруливающие устройства, и вибрационные установки.

По своему назначению гидроомывающее устройство, предложенное М. А. Игнатьевым и И. И. Позняком [28], аналогично носовому винту ледокола: оно предназначено для повышения ледовой ходкости и маневренности судна за счет интенсивного принудительного омывания носовой оконечности корпуса струями воды. Гидроомывающее устройство состоит из насосной установки и трубопровода с выходными соплами, расположенными в обшивке носовой части ледокола ниже ватерлинии. Проверка эффективности работы гидроомывающего устройства, проведенная в бассейне, дала положительные результаты. С помощью этого устройства можно увеличить ходкость судна в сплошных и битых льдах. Ожидается, что гидроомывающее устройство улучшит чистоту канала за ледоколом и повысит его маневренные качества [27].

В последнее время имеют место попытки улучшить маневренные качества ледоколов с помощью подруливающих устройств, устанавливаемых в носовой части корпуса. Такими устройствами оборудован, например, канадский ледокол «Луи С. Сан-Лоран» и один из ледокольных паромов отечественной постройки. Об эффективности работы подруливающих устройств во льдах надежных данных пока не имеется.

Современным средством повышения ледовой ходкости и маневренности речных ледоколов являются также вибрационные установки. Такие устройства успешно применяются на речных ледоколах в Австрии и ФРГ.

Вибрационная установка сообщает корпусу ледокола вертикальные колебания, которые помогают сравнительно маломощным ледоколам преодолевать лед значительной толщины без работы набегами. Для возбуждения колебаний используется принцип вращения неуравновешенных масс.

Не останавливаясь на вопросах, связанных с проектированием вибрационных установок, освещенных подробно в работах [44], [45], [46], [97] и других, опишем вкратце физическую сущность вибрационного воздействия судна на ледяной покров. Прежде всего уточним, что колебания судна, возбуждаемые вибрационной установкой, не могут быть отнесены по своей природе к общесудовой вибрации. В этом смысле название «вибрационная установка» является условным. В данном случае мы имеем дело с вынужден-

ными колебаниями судна как твердого тела, а не с изгибными колебаниями корпуса как упругой балки. Рассматриваемые колебания являются одним из видов вертикальной и килевой качки с высокой частотой (около 160—200 колебаний в минуту, т. е. на порядок выше соответствующей частоты собственных колебаний судна).

Наблюдениями за работой «виброледокола» на чистой воде и во льду установлено, что колебания судна не вызывают резонансных колебаний свободной поверхности воды и ледяного покрова. Общая картина разрушения сплошного льда при работе вибра-

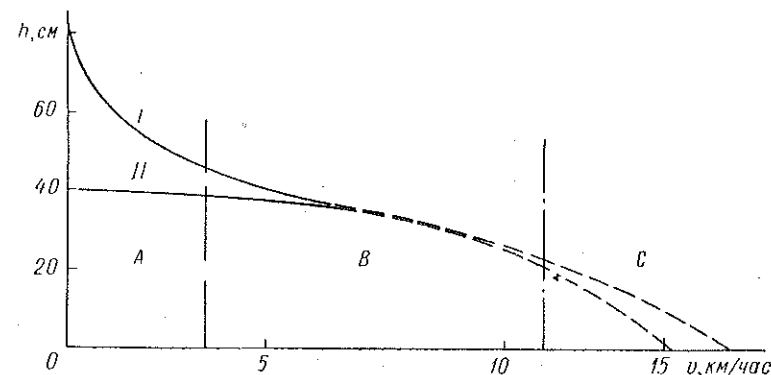


Рис. 135. Скорость движения ледокола с вибрационной установкой во льду различной толщины.

I — с работающей установкой, II — с неработающей установкой.

ционной установки в основных чертах сходна с наблюдаемой у обычного ледокола. Это отмечает также один из изобретателей вибрационных установок Ваас [109].

Характерно, что скорость непрерывного хода судна с работающей вибрационной установкой в сплошных тяжелых льдах близка к средней скорости продвижения того же судна без вибрационной установки, работающего набегами. На рис. 135 приводится график зависимости скорости движения судна с работающей и неработающей вибрационной установкой от толщины льда, построенный на основании модельных и натурных испытаний (сплошные линии) и ряда теоретических соображений (пунктир). Из рисунка видно, что вибрационная установка дает положительный эффект лишь при большой толщине льда и малой скорости (область A на рис. 135). При средних значениях толщины льда и скорости она не эффективна (область B), а на большой скорости вредна, так как энергия вибрационной установки расходуется на дополнительное волнообразование, затрудняющее продвижение судна (область C).

Результаты наблюдений за работой «виброледокола» и специальные эксперименты по изучению трения льда позволяют объяснить механизм взаимодействия «виброледокола» с ледяным покровом следующим образом. Силой, препятствующей вползанию носа ледокола на лед, является сила трения. При уменьшении скорости до очень малой величины коэффициент трения наружной обшивки резко возрастает, превращаясь из динамического в статический (см. § 2). Ледокол останавливается и для продолжения движения вынужден отойти назад для разбега. При работе вибрационной установки, даже при очень малой скорости, трение обшивки о лед остается динамическим (это подтверждается данными экспериментов). Носовая оконечность ледокола медленно вползает на лед и разрушает его в основном силой своего веса.

Приведенное объяснение механизма взаимодействия «виброледокола» со льдом, разумеется, не является исчерпывающим и может быть уточнено по мере накопления данных.

Эффективность применения вибрационных установок на речных ледоколах несомненна, так как применение таких устройств намного сокращает необходимость работы ледокола набегами, уменьшает вероятность заклинивания и повышает маневренность. В условиях мелководья, узких фарватеров, близости судов и сооружений указанные преимущества «виброледокола» представляют большую ценность. Однако даже для речных ледоколов применение вибрационных устройств обходится дорого и причиняет ряд серьезных неудобств в эксплуатации.

Оборудование вибрационными установками крупных морских ледоколов в настоящее время представляется нецелесообразным, за исключением, может быть, вспомогательных ледоколов.

Литература

1. Арнольд-Алябьев В. И. Опыты по внешнему трению льда. ЖТФ, 1937, т. VII, вып. 8.
2. Арнольд-Алябьев В. И. Научная работа в Карско-Ленской экспедиции на борту ледокола «Мальгин». Бюллетень АНИИ, 1935, № 5—6.
3. Арнольд-Алябьев В. И. Исследования прочности льда Финского залива (1923, 1927 и 1928 гг.). Изв. ГГО, 1929, № 2.
4. Афанасьев В. И. Статьи в газетах «Кронштадтский вестник», 1895, № 123 и 124; «Котлин», 1897, № 49, 52, 105, 120, 124.
5. Ашик В. В. М. В. Ломоносов и морское дело. «Судостроение», 1962, № 3.
6. Бернштейн С. А. Ледяная железнодорожная переправа. Сб. ниж. исследований НТК НКПС, 1929, № 18.
7. Богородский В. В. Упругие характеристики льда. Акустический журнал, 1958, т. IV, вып. I.
8. Бронников А. В. Исследование сопротивления транспортного судна при движении в битых льдах. Труды ЛКИ, 1959, вып. XXVII.
9. Будневич С. С., Дерягин Б. В. О скольжении твердых тел по льду. ЖТФ, 1952, т. XXII, вып. 12.
10. Бутягин И. П. Прочность льда и ледяного покрова. «Наука», Новосибирск, 1966.
11. Вейнберг Б. П. Лед. Гостехтеориздат, 1940.
12. Вейнберг К. Б. Скользкость. ЖТФ, 1924, № 1—4.
13. Виноградов И. В. Суда ледового плавания. Оборонгиз, 1946.
14. Войтковский К. Ф. Механические свойства льда. АН СССР, 1960.
15. Войткунский Я. И. Сопротивление воды движению судов. «Судостроение», 1964.
16. Гаккель Я. Я. Плавание парохода «Моссовет» в 1937 г. «Проблемы Арктики», 1938, № 1.
17. Гаккель Я. Я. Опыт оценки проходимости льдов на трассе Северного морского пути за навигацию 1933—1935 гг. «Проблемы Арктики», 1937, № 1.
18. Гирс И. В., Русецкий А. А., Нецветаев Ю. А. Испытания мореходных качеств судов. «Судостроение», 1965.
19. Готский М. В. Опыт ледового плавания. «Морской транспорт», 1957.
20. Давыдов В. В. Теоретические исследования удара корабля о льдину. «Проблемы Арктики», 1938, № 5—6.
21. Дерягин Б. В. Что такое трение? АН СССР, 1963.
22. Дремлюг В. В., Лактионов А. Ф. Анализ скорости движения судов во льдах арктических морей. «Проблемы Арктики», 1944, № 1.
23. Дубравин А. И. Выдающаяся полярная экспедиция. «Судостроение», 1965, № 9.
24. Дубравин А. И. Деятельность М. В. Ломоносова в кораблестроении и полярном мореплавании. «Судостроение», 1966, № 9.
25. Дубровин О. В. Определение сопротивлений при движении в битых льдах в канале на основании модельных испытаний. Труды ЛКИ, 1966, вып. II.

26. Заботкин Н. А. Удар ледокола о ледяное поле и вползание его на льдину. Труды ЛКИ, 1951, вып. IX.
27. Игнатъев М. А. Гребные винты судов ледового плавания. «Судоостроение», 1966.
28. Игнатъев М. А., Позняк И. И. Гидроомывающее устройство для ледоколов. Бюллетень изобретений и товарных знаков, 1965, № 13.
29. Инструкция для наблюдений над льдами с корабля. «Морской транспорт», 1956.
30. Карташкин Б. Д. Экспериментальные исследования физико-механических свойств льда. Труды ЦАГИ, 1947, вып. 607.
31. Каштелян В. И. Приближенное определение усилий, разрушающих ледяной покров. «Проблемы Арктики и Антарктики», 1960, № 5.
32. Каштелян В. И. Исследования сопротивления сплошного льда движению судна методом модельных испытаний. Автореферат диссертации, ААНИИ, 1962.
33. Каштелян В. И., Рывлин А. Я. Учет природных характеристик сплошного льда при оценке его проходимости ледоколом. «Проблемы Арктики и Антарктики», 1966, вып. 22.
34. Кацман Ф. М., Кудреватый Г. М. Конструирование винтовых комплексов морских судов. Судпромгиз, 1963.
35. Кобеко П. П. и др. Пластическая деформация и вязкость льда. Пролом и грузоподъемность льда. ЖТФ, 1946, т. XVI, вып. 3.
36. Комаровский А. Н. Структура и физические качества ледяного покрова пресных вод. Госэнергоиздат, 1932.
37. Коржавин К. Н. Исследования механических свойств речного льда. Труды НИИЖТ, Новосибирск, 1940, т. IV.
38. Коржавин К. Н. Воздействие льда на инженерные сооружения. СО АН СССР, Новосибирск, 1962.
39. Костюков А. Л., Назаров В. С. Буксировочные испытания моделей ледоколов «Ермак» и «Разведчик». Труды Одесского института инженеров водного транспорта, 1941, вып. 67.
40. Крылов А. Н. Лекции о приближенных вычислениях. Собр. сочинений. АН СССР, 1949, т. III, часть 1-я.
41. Крылов А. Н. Предисловие к книге Г. Е. Павленко «Пропульсивные качества судов». М.—Л., Госстройиздат, 1932.
42. Кузнецов И. А. Действие льда на сооружения морских портов и защита от него. Л., ИО КБФ, 1939.
43. Лавров В. В. Вопросы физики и механики льда. Труды ААНИИ, 1962, т. 247.
44. Левит Б. М. Выбор основных характеристик «виброустановки» ледокола и оценка его проходимости. Труды ЛИВТ, 1964, вып. XII.
45. Левит Б. М. Выбор формы корпуса речных ледоколов с «вибрационной» установкой. Труды ЛИВТ, 1964, вып. XIII.
46. Левит Б. М., Тер-Акопов А. М. Испытания опытного ледокола с «вибрационной» установкой. Произв.-тех. сб. МРФ, 1963, № 8 (36).
47. Макаров С. О. «Ермак» во льдах. СПб., 1901.
48. Маслов А. И. Опыт расчета внешних усилий, действующих на корпус судна в ледовых условиях. Труды ВНИТОСС, 1937, т. II, вып. 3.
49. Менделеев Д. И. Высокие широты Северного Ледовитого океана. Собр. сочинений, АН СССР, 1960, т. I.
50. Морской Регистр СССР. Правила классификации и постройки морских стальных судов. Мортранспорт, 1956.
51. Назаров В. С. Свойства льда и его проходимость. Морской сборник, 1941, № 11, 12.
52. Ногид Л. М. Проектирование формы судна и построение теоретического чертежа. Судпромгиз, 1962.
53. Ногид Л. М. Об ударе судна о льдину. Труды ЛКИ, 1959, вып. XXVI.
54. Ногид Л. М. Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и битых льдах. Труды ЛКИ, 1959, вып. XXVII.
55. Ногид Л. М. Теория подобия и размерностей. Судпромгиз, 1959.
56. Ногид Л. М. Проектирование морских судов. Ч. 1-я, «Судоостроение», 1964.
57. Ногид Л. М., Дубровин О. В. О вязкостном сопротивлении ледоколов. «Судоостроение», 1962, № 6.
58. Овчаренко Е. С. О влиянии некоторых элементов формы корпуса на различные качества судна. Труды ОИИМФ, М., 1955, вып. XI.
59. Павленко Г. Е. Пропульсивные испытания судов. Госстройиздат, 1932.
60. Павлов Н. Трение по снежным поверхностям. «Метеорология и гидрология», 1940, № 4.
61. Панцержанский Э. С. Морская практика. Официальное руководство для военно-морских учебных заведений ВМС РККА. Молодая гвардия, 1932.
62. Папкович П. Ф. Теория упругости. Оборонгиз, 1939.
63. Песчанский И. С. Ледоведение и ледотехника. «Морской транспорт», 1963.
64. Петров Л. Е. Плавание во льдах. «Морской транспорт», 1955.
65. Петров Е. Ю. Определение усилий удержания при заклинивании ледокола. «Проблемы Арктики и Антарктики», 1965, вып. 20.
66. Петров Е. Ю. Определение величины всплытия корпуса при работе ледокола на бабелях. «Проблемы Арктики и Антарктики», 1966, вып. 29.
67. Пинегин В. Н. Предварительное сообщение о исследованиях прочности речного льда. Вестник сиб. инж., Томск, 1924, т. IV.
68. Полин Л. Е. Плавание во льдах морских транспортных судов. «Морской транспорт», 1956.
69. Попов Ю. Н. К вопросу удара судна о льдину. Труды ЛКИ, 1955, вып. XV.
70. Попов Ю. Н., Рывлин А. Я. О движительном комплексе ледокола-буксира. «Судоостроение», 1961, № 1.
71. Попов Ю. Н., Фаддеев О. В., Хейсин Д. Е., Яковлев А. А. Прочность судов, плавающих во льдах. «Судоостроение», 1967.
72. Ратманов Г. Е. Опыт непосредственных наблюдений над проходимостью льдов. Труды АНИИ, 1940, т. 137.
73. Рунеберг Р. И. О пароходах для зимнего плавания и о ледоколах. СПб., 1890.
74. Рывлин А. Я., Петров Е. Ю. К вопросу об экспериментальном определении коэффициентов трения льда в натуральных условиях, «Проблемы Арктики и Антарктики», 1965, вып. 21.
75. Рывлин А. Я. Метод определения ледопроеходимости судна в битых льдах. Автореферат диссертации, ААНИИ, 1963.
76. Слезкин Н. А. Динамика вязкой жидкости. Гостехтеориздат, 1955.
77. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. АН СССР, 1942.
78. Стефанович А. Н. Ледоколы. «Морской транспорт», 1958.
79. Таршиш М. К. Ледовое сопротивление судов. Труды Мурманского высшего мореходного училища, «Морской транспорт», 1957, вып. I.
80. Технические условия определения ледовых нагрузок на речное сооружение. СН, 76—59, М., 1960.
81. Требования к постройке судов ледового плавания и их классификации. ААНИИ, 1964.
82. Хейсин Д. Е. К задаче упруго-пластического изгиба ледяного покрова. Труды ААНИИ, 1964, т. 267.
83. Хейсин Д. Е. Определение контактных усилий при ударе судна форштевнем о лед. «Проблемы Арктики», 1961, № 8.
84. Хейсин Д. Е. Динамика ледяного покрова. Гидрометиздат, 1967.
85. Цуриков В. Л. Методы судовых наблюдений над проходимостью льдов. Труды ЦГОИН, М., 1952, вып. 22.
86. Шванштейн З. И. Лаборатория для исследования льда и испытаний моделей ледоколов и судов ледового класса. «Проблемы Арктики», 1957.

87. Шиманский Ю. А. Условные измерители ледовых качеств судов. Труды ААНИИ, 1939, т. 130.
88. Ювенальев И. Н. Аэросани. Оборонгиз, 1939.
89. Яковлев М. С. К вопросу об экспериментальном исследовании формы корпуса речного ледокола. Труды ГПИ, 1960, т. XIV, вып. 10.
90. Яковлев М. С. Речной ледокол. Авторское свидетельство, класс 65а, З № 134149. Бюллетень изобретений, 1960, № 23.
91. Яковлев М. С. Приближенный расчет ледопроеходимости ледокольных судов. Влияние соотношений главных размерений ледокола и прочности льда на сопротивление движению в ледовом поле предельной толщины. ГПИ, 1967.
92. A. B. S. Adopte Ice rules based in Finnish Ice-Class. Holland Shipping, 1966, 14, No 12 (68).
93. Bouden and Hyges. The mechanism of sliding on Ice and Snow. Proceedings of the Bog. Soc., 1939, No 949.
94. Changes in Lloyd's Register rules. Fairplay Shipp. J., 1966, 218, No 4299 (57).
95. Ferris L. W. The Proportions and Forms of Icebreakers. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1959, vol. 67.
96. German G. Design and Construction of Icebreakers. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1959, vol. 67, pp. 26—69.
97. Henschke W. Schiffbautechnisches Handbuch. Band 2. VEB Verlag Technik, Berlin.
98. Jansson J. E. Icebreakers and their Design. European Shipbuilding, 1956, No 5, pp. 42—128 and 143—150.
99. Johnson H. F. Development of Icebreaking Vessels for U. S. Coast Guard. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1946, vol. 54, pp. 112—151.
100. Kingery W. D. Ice and Snow Properties. Processes and Applications. Cambridge, Massachusetts, 1963.
101. Landtmann C. Technische Gesichtspunkte über moderne Eisbrecher. Hansa, Dezember, 1961, 98 Jahrgang, Nr. 25, S. 2704—2711.
102. Lank S. W., Oaklay O. H. Application of Nuclear Power to Icebreakers. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1959, vol. 67, pp. 108—139.
103. Mantis. Review of Properties of Snow and Ice. University of Minnesota for U. S. Army. Snow, Ice and Permafrost Research Establishment, Report 1951, No 4.
104. McDonald. Our Icebreakers are not good enough. United States Naval Institute Proceedings, 1966, 11, vol. 92, No 2, pp. 60—69.
105. Milano V. R. Notes of Icebreaker Design. ASNE Journal, February, 1962, pp. 43—51.
106. Thiele E. H. Technical Aspects of Icebreaker Operation. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1959, vol. 67, pp. 162—179.
107. Transactions of Naval Architects and Marine Engineers. 1959, 11, vol. 71, p. 54.
108. University of Minnesota. Friction of Snow and Ice for U. S. Army. Snow, Ice and Permafrost Research Establishment, 1945.
109. Waas H. Eisbrecher mit Stampfanlagen. VDI — Zeitschrift 101 (1959). S. 1499—1502, 11 Abb.
110. Watson A. The Design and Building of Icebreakers. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Feb. 1959, pp. 37—65.

Оглавление

От авторов	3
Глава I. Морской лед и его классификация. Ледовые качества судов	5
§ 1. Общие сведения о морском льде и его классификация	—
§ 2. Физико-механические свойства льда	13
§ 3. Ледовые качества судов. Основные понятия и определения	22
Глава II. Сопротивление сплошного льда движению судна	25
§ 4. Особенности движения судна в сплошных льдах и взаимодействие корпуса со льдом	—
§ 5. Составляющие сил ледового сопротивления	33
§ 6. Моделирование движения судна в сплошном льду	36
§ 7. Анализ условий моделирования	44
Глава III. Испытания моделей судов во льду	48
§ 8. Ледовый бассейн	—
§ 9. Модель ледяного поля	57
§ 10. Методика модельных испытаний	63
§ 11. Экспериментальная проверка условий моделирования в ледовом бассейне	72
Глава IV. Методы определения сопротивления при движении судна в сплошных льдах	78
§ 12. Пересчет сопротивления с модели на натуру	—
§ 13. Полуэмпирический метод расчета сопротивления	82
Глава V. Силы сопротивления при движении судна в битых льдах	103
§ 14. Особенности движения судна в битых льдах	—
§ 15. Силы, действующие на судно. Условия подобия	107
§ 16. Модельные эксперименты в битых льдах	109
Глава VI. Аналитическое выражение сопротивления при движении судна в мелкобитых льдах	114
§ 17. Постановка задачи	—
§ 18. Импульсивное сопротивление	119
§ 19. Диссипативное сопротивление	123
§ 20. Статическое сопротивление	127
§ 21. Влияние ледового сжатия на сопротивление	128
§ 22. Сопротивление, обусловленное притапливанием и поворачиванием льдин	129
§ 23. Общее выражение для расчета ледового сопротивления	131
Глава VII. Методы определения сопротивления в натуральных битых льдах	136
§ 24. Влияние параметров мелкобитого льда и характеристик судна на сопротивление	—

§ 25. Расчет сопротивления судна при движении в натуральных битых льдах	143
<i>Глава VIII. Натурные испытания судов во льдах. Практические методы оценки ледопроеходимости</i>	<i>151</i>
§ 26. Методика натурных испытаний судов во льдах	—
§ 27. Использование результатов натурных испытаний. Проверка рекомендуемых формул натурными данными	164
§ 28. Практический метод расчета скорости судов во льдах. Ледовый паспорт судна	170
§ 29. Учет природных характеристик ледяного покрова	175
<i>Глава IX. Суда ледового плавания и некоторые особенности их проектирования</i>	<i>178</i>
§ 30. Ледоколы	—
§ 31. Транспортные суда ледового плавания	188
§ 32. Особенности плавания судов во льдах	193
§ 33. Некоторые особенности проектирования судов ледового плавания	200
§ 34. Определение главных размеров	201
§ 35. Выбор формы обводов корпуса ледокола	207
§ 36. Выбор формы обводов транспортных судов ледового плавания	215
§ 37. Определение мощности энергетической установки	219
§ 38. Требования к форме обводов корпуса с точки зрения защиты винтов. Специальные устройства и системы судов ледового плавания	222
Литература	233

**Каштелян Вячеслав Ильич, Позняк Игорь Иванович,
Рывлин Александр Яковлевич**

Сопротивление льда движению судна

Рецензенты: кандидаты техн. наук *О. В. Дубровин, Ф. М. Кацман*

Редактор *М. И. Никитина*. Технический редактор *Ю. Н. Коровенко*

Корректоры: *С. Х. Кумачева, Л. Н. Степнова*

Переплет художника *К. А. Карпошевича*

Сдано в набор 5/ХІ 1967 г. М-20736 Подписано к печати 24/І 1968 г.
 Формат издания 60×90^{1/16} Печ. л. 15 Уч.-изд. л. 14,6 Изд. № 1943—66
 Бумага типографская № 1 Тираж 1500 экз. Цена 1 р. 56 к. Зак. № 1768
 Издательство «Судостроение», Ленинград, Д-65, ул. Гоголя, 8

Ленинградская типография № 6 Главполиграфиром
 Комитета по печати при Совете Министров СССР
 Ленинград, ул. Моисеенко, 10

Рекомендуем вам новые книги

Ногид Л. М. Остойчивость судна и его поведение на взволнованном море.

13 л., ц. 50 к.

В книге, являющейся продолжением первой части курса проектирования судов, изданной в 1964 г., рассматриваются практические вопросы остойчивости и мореходности судна. Наряду с теорией приводятся результаты экспериментальных исследований влияния различных факторов на поведение судна в условиях регулярного и нерегулярного волнения.

Вследствие прикладного характера работы исходные положения из области теории корабля, теории вероятностей, спектральной теории волнения и статистической теории качки, на которых базируется изложение, приводятся в основном без выводов.

Книга является учебным пособием для студентов кораблестроительных вузов и может служить пособием при разработке курсовых и дипломных проектов; она может быть использована инженерами-кораблестроителями при проектировании судов.

Федяевский К. К. и др. Гидромеханика.

33 л., в ледер. перепл., ц. 1 р. 45 к.

В книге рассматриваются вопросы статики и динамики жидкости, теории пограничного слоя, теории крыла, специальных задач гидромеханики, связанных с процессом глиссирования. Освещаются экспериментальные методы гидро- и газодинамики.

Учебник предназначен для студентов кораблестроительных и машиностроительных факультетов, а также будет полезен для специалистов проектно-конструкторских и научно-исследовательских организаций судостроительной промышленности.

Русецкий А. А. Гидродинамика винтов регулируемого шага.

13 л., ц. 1 р.

В книге освещаются современные методы гидродинамического расчета и выбора геометрических элементов судовых гребных винтов регулируемого шага [ВРШ]. Рассматриваются вопросы ра-