

А. Я. РЫВЛИН
Д. Е. ХЕЙСИН

ИСПЫТАНИЯ СУДОВ ВО ЛЬДАХ

00263464

ЛЕНИНГРАД
«СУДОСТРОЕНИЕ»

1980

БИБЛИОТЕКА
Новосибирского института



Рывлин А. Я., Хейсин Д. Е. Испытания судов во льдах.— Л.: Судостроение, 1980.— 208 с., ил.— ИСБН.

В книге проанализирован опыт проведения натурных испытаний судна во льдах, сформулированы основные положения методики испытаний, описана их техника. Проведен всесторонний анализ процесса взаимодействия корпуса судна со льдом, который служит основой для правильного подхода к выполнению испытаний и оценки их данных. Освещены принципы обработки экспериментальных данных и возможные пути их использования. Значительное внимание уделено вероятностным приемам оценки основных ледовых качеств судна: ледовой ходкости, прочности и маневренности. Проиллюстрированы пути их практического внедрения.

Ил. 72. Табл. 20. Литерат. 106 назв.

Рецензенты: д-р техн. наук **Г. В. БОЙЦОВ**,
д-р техн. наук **В. С. ШПАКОВ**

© Издательство «Судостроение», 1980 г.

31805—042
Р 048[01]—80 53-26-13-80 3605030000

Желать истинной, то есть с помощью кораблей, победы над полярными льдами Россия должна еще в большей мере, чем какое-либо государство, потому что ни одно государство не владеет столь большим протяжением берегов в Ледовитом океане... Победа над его льдами составляет один из экономических вопросов будущего Северо-Востока России и почти всей Сибири.

Д. И. Менделеев

ПРЕДИСЛОВИЕ

Наша страна занимает ведущее место в области ледоколостроения. Один из источников успеха — систематический сбор и анализ натурных экспериментальных данных. В создании теории модельного эксперимента и практических приемов оценки ледовых качеств судна принимали участие такие выдающиеся отечественные ученые, как С. О. Макаров и А. Н. Крылов, Ю. А. Шиманский и Л. М. Ногид. В СССР зародились и получили развитие современная методика натурных исследований, осуществляемых с использованием различных способов измерений и современной аппаратуры. Проведение ледовых испытаний пока не предусматривается соответствующими стандартами, однако фактически испытываются все транспортные суда категорий УЛ, УЛА, а также ледоколы. Именно эти испытания служат основным источником информации для изучения ледовых качеств судна и разработки практических способов их оценки, поскольку чисто теоретические и модельные методы исследований ограничены из-за большой сложности процесса движения судна во льдах. Надо отметить, что и за рубежом (в США, Канаде и Финляндии) в последнее время уделяется большое внимание натурным испытаниям судна во льдах. Так, в США в 1969—1970 гг. проведены обширные исследования в Арктике супертанкера «Манхаттен» совместно с ледоколами; испытываются ледоколы в Антарктике и на Великих озерах.

Ряд практических задач можно решать только с помощью натурных испытаний судов. Анализ, в свою очередь, способствует совершенствованию и развитию научно обоснованной единой методики проведения эксперимента.

В настоящей книге сделана попытка всесторонне проанализировать и оценить ледовые качества судов.

В первой главе в достаточно общем виде проанализировано взаимодействие корпуса судна со льдом при различных видах движения. Приведен ряд данных о свойствах льда, которые необходимы для правильного понимания процесса. Причем основное внимание уделено сведениям, ранее редко освещавшимся в литературе, например, прочности и трению снега. Впервые подробно и всесторонне рассмотрено взаимодействие корпуса со льдом при движении судна в сплоченных

и разреженных мелкобитых, а также сплошных льдах. Так, исследованы поворачивание и притапливание льдин бортом, трение борта судна о лед, удар судна об отдельную плавающую льдину, о неразрушаемую и разрушаемую кромки ледяного поля. Особенности взаимодействия корпуса со льдом играют первостепенную роль при оценке строительной и ледовой прочности корпуса судна. Аналогичным образом трактуется взаимодействие судна с ледяным покровом при сжатии.

Вторая глава полностью посвящена методике и технике натурных исследований движения судна во льдах. Проанализированы методические принципы, положенные в основу испытаний ледовой ходкости при непрерывном движении судна и при работе набегам. Рассмотрена методика испытаний маневренности судна во льдах (поворотливости, инерции, устойчивости на курсе), а также тензометрических испытаний ледовой прочности и фиксирования ледовых повреждений корпуса. Изложены принципы измерений параметров ледовой среды, гидрометеорологической обстановки и характеристик судна, оценены погрешности измерений и точность проведения эксперимента.

В третьей главе приведены результаты испытаний. На ряде примеров, имеющих практическое значение, показаны способы применения детерминационных и вероятностных методов анализа, в том числе построения математической модели взаимодействия корпуса судна со льдом. Исследованы некоторые задачи оценки ледовой ходкости и маневренности судна, а также ледовой прочности корпуса (распределения амплитуд ударных ледовых импульсов, их частоты и вероятности попадания в тот или иной участок борта судна и др.).

В четвертой главе подробно освещены способы оценки ледовой ходкости и маневренности судна, в том числе позволяющие учитывать влияние параметров ледовой среды: толщины льда и снежного покрова, прочности льда, его разрушенности, торосистости, а также характеристик судна: эксплуатационной осадки и водоизмещения, крена, дифферента и т. п.

Пятая глава посвящена методам оценки строительной и ледовой прочности корпуса судна. В ней поставлена проблема общей оценки эффективности работы судна в ледовых условиях и обоснованы ее критерии: безопасная возможная скорость движения и безопасная эффективная дистанция проводки. Полученные результаты научного анализа и натурных испытаний взяты за основу при составлении ледового паспорта судна, получившего признание судоводителей.

В пределах сравнительно небольшой работы трудно в равной мере осветить все затронутые вопросы, поэтому основное внимание уделено наиболее важным и практически разработанным.

В заключении сформулированы задачи, которые предстоит решить исследователям ледовой прочности судов.

§ 1.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА КАК СРЕДЫ, ПРЕОДОЛЕВАЕМОЙ СУДНОМ

1.1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Лед, покрывающий в течение более или менее длительного времени замерзающие моря, определяет условия эксплуатации судов в этих районах. Одной из основных особенностей ледяного покрова является его изменчивость, как сезонная, так и годовая. Замерзающие неарктические моря зимой могут полностью покрываться льдом, который к лету исчезает. Центральная Арктика практически круглогодично заполнена льдом. Характеристики морских льдов в настоящее время оценивают с помощью специальной номенклатуры [46]. Ее основные положения, представляющие наибольший интерес для судоходства, рассмотрены ниже.

Морские льды классифицируют по динамическим, морфологическим и возрастным признакам. По динамическим признакам они делятся на неподвижные — припайные льды — и подвижные — дрейфующие. *Припай* представляет собой сплошной ледяной покров, располагающийся у берегов материка или островов. Ширина зоны припая может значительно колебаться, достигая в некоторых районах ста километров и более. Отдельные участки акватории, например заливы, могут полностью покрываться припаем, а остальные участки моря либо свободны ото льда, либо заполнены дрейфующим льдом. *Дрейфующий лед*, как правило, состоит из льдин различной протяженности, а именно из тертого и мелкобитого льда и ледяных полей размерами 1—10 км.

Основными характеристиками припайных льдов являются толщина h , ширина зоны припая от берега, возраст и соленость. Дрейфующие льды характеризуются сплоченностью N , возрастом, толщиной h и протяженностью отдельных льдин r . Возраст, структура и соленость определяют физико-механические свойства льда как материала, а вместе с толщиной — его прочность. Геометрические параметры, к которым относятся сплоченность, протяженность и толщина льдов, определяют механические свойства ледяного покрова в целом, в том числе его

подвижность и деформируемость. Первая группа параметров в основном обуславливает особенности локального взаимодействия судна со льдом, в частности ломку льда бортом, контактные усилия при ударе судна о лед и т. п., вторая группа параметров характеризует ледовую ходкость.

Сплоченность льдов — это мера их сплошности, которую оценивают по десятибалльной шкале. Дрейфующий лед, сплоченность которого составляет 10 баллов (воды не видно), согласно ледовой номенклатуре [46], называют сплошным. Однако в дальнейшем под *сплошным льдом* будем понимать ледяной покров, который судно преодолевает путем ломки корпусом (это в основном припай, поля дрейфующего льда и обширные по площади образования молодого льда). Такое определение сплошного льда является привычным при изучении движения судна в ледовых условиях. Дрейфующий лед сплоченностью 7—8 баллов, состоящий из льдин, большинство которых соприкасается друг с другом, называется *сплоченным*, а сплоченностью 4—6 баллов, большинство льдин которого не соприкасается друг с другом, — *разреженным*. В ряде случаев приходится отказываться от общепринятой гидрологической характеристики сплоченности в баллах и измерять ее в долях единицы (сплоченности $N=1$ соответствует сплоченный десятибалльный лед, а $N=0$ — чистая вода). Можно дать статистическую характеристику сплоченности, полагая ее равной вероятности попадания в лед при случайной выборке.

В морфологическом отношении льды разделяют на *ровные* и *торошенные*. Торошенные льды различают по возрасту и разновидности торосистых образований: ропак, подсов, гряда торосов и т. д. Торосистость ледяного покрова оценивают по пятибалльной шкале, как отношение площади, покрытой торосами, к общей площади льда. При расчетах торосистость также приходится измерять в долях единицы.

По возрасту различают льды: *начальные*, *ниласовые* (их толщина меньше 10 см), *серые* (толщина 10—30 см), *белые* (толщина до 70 см) и т. д. Выделяют *однолетний* лед, прошедший годовой цикл нарастания и сохранившийся до начала нового осеннего нарастания, *двухлетний* лед и *паковый* (*многолетний* лед), просуществовавший более двух лет. Толщина однолетнего льда, как правило, не превышает 1,9—2,1 м, толщина пакового льда составляет 2,5 м и более. Вид и возраст льда в том или ином географическом районе плавания зависит от периода навигации. В неарктических морях зимой преобладают припай, поля, а весной — поля, обломки полей и крупнобитый лед, наконец, в летний период чаще всего встречаются обломки полей, крупномелкобитый лед и т. п. В Центральной Арктике и замерзающих морях Южного океана в любое время года можно встретить различные формы дрейфующего льда. При этом для антарктических льдов по сравнению с арктиче-

скими характерна большая подвижность и изменчивость. Это объясняется тем, что антарктические моря открыты в сторону больших пространств чистой воды, тогда как Северный Ледовитый океан представляет собой практически замкнутый водоем, вынос льдов из которого равен примерно 20 % общей массы плавающего ледяного покрова. Поэтому значительная площадь Центральной Арктики покрыта многолетними паковыми льдами, участвующими в генеральном дрейфе.

По данным Уитмэна и Шула [106], площадь чистой воды здесь составляет зимой 2 %, а летом — 15 %. Это означает, что Центральная Арктика круглый год практически полностью покрыта льдом, за исключением отдельных более или менее значительных участков окраинных морей. Это предъявляет специфические требования к эксплуатации и конструкции грузовых судов, плавающих по трассам Северного морского пути.

1.1.2. РЕЖИМЫ ПЛАВАНИЯ СУДОВ ВО ЛЬДАХ

Особенности процесса движения и требования, предъявляемые к прочности корпуса судов, позволяют выделить несколько режимов ледового плавания.

Непрерывное движение в сплошных льдах характерно в основном для ледоколов и в меньшей степени для грузовых судов, особенно высших ледовых классов. (Суда низших ледовых классов могут двигаться лишь в тонких молодых льдах.) Этот режим плавания сравнительно безопасен и представляет наибольший интерес при оценке ходкости ледоколов. Основным показателем их ледопроеходимости является предельная толщина ровного сплошного льда, преодолеваемого непрерывным ходом со скоростью примерно 1 уз. Во льдах большой толщины непрерывное движение становится неустойчивым, возможны остановки судна. При малой толщине лед взламывается корабельными волнами, и ломка корпусом практически отсутствует. Установившаяся скорость движения судна зависит от толщины и прочности льда.

Непрерывное движение в битых льдах — наиболее распространенный режим плавания ледоколов и грузовых судов ледового плавания всех классов. Особенности движения судна в этих льдах определяются их сплоченностью, толщиной и протяженностью отдельных льдин. При движении со сравнительно высокой скоростью возможны сильные удары об отдельно плавающие льдины, о кромки полей и их обломки. Особенно опасны удары о многолетние паковые льды, стамухи, ледяные острова и т. п. Данный режим является расчетным как при оценке ледовой ходкости судна, так и при определении ледовых нагрузок.

Движение в канале, проложенном ледоколом, характерно для грузовых судов. Их скорость при движении

в канале определяется либо возможностями ледокола, либо прочностью корпуса самого судна. Наиболее опасны прямые и так называемые отраженные удары корпуса судна о кромку канала при больших скоростях. Движение судна в канале, проложенном ледоколом, представляет большой интерес как для оценки его ходкости, так и для определения ледовых нагрузок на его корпус. Иногда суда не могут двигаться самостоятельно по каналу, проложенному ледоколом в тяжелых льдах. В этом случае ледоколы буксируют суда. Наиболее распространена буксировка вплотную.

Работа набегам — форсирование торосообразований, ледяных полей большой толщины — характерна для ледоколов. В редких случаях в этом режиме плавают грузовые суда высших ледовых классов. При работе набегам корпус судна получает сильные удары. Этот режим интересен для оценки ходкости и анализа прочности корпуса ледоколов.

Движение в редком льду, по полыньям и разводьям, которое, по существу, представляет лавировку судна, и при неудачном маневрировании может привести к сильным ударам корпуса о плавающие льдины, особенно об их выступающие подводные кромки. Это заставляет уменьшать скорость движения. При оценке ледовой ходкости судна этот режим не имеет большого значения, а при определении ледовых нагрузок должен приниматься во внимание.

Ледовое сжатие характерно для всех ледоколов и грузовых судов высших ледовых классов, корпуса которых должны противостоять его воздействию. Последствия сжатия льдами для недостаточно прочных судов могут иметь катастрофический характер. Движение судна в этих условиях сильно ограничено, поэтому данный режим представляет интерес лишь для расчетов прочности корпусов судов.

Разумеется, на практике встречаются промежуточные, смешанные режимы движения. Детальный теоретический или экспериментальный анализ взаимодействия корпуса со льдом для каждого из указанных режимов удобно проводить отдельно.

Предварительно следует охарактеризовать свойства льда и снега, в первую очередь толщину, размеры и форму ледообразований, а также физико-механические свойства льда как материала.

1.1.3. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЬДА И СНЕГА

Интересующие нас прочностные характеристики льда и слоя снега на нем, например пределы прочности льда на изгиб σ_r , сжатие $\sigma_{сж}$, срез τ_r , удельная энергия разрушения льда при раздроблении ϵ_v и др., а также плотность ρ и фрикционные характеристики подробно рассмотрены в работах [17, 35]. Здесь же приведены лишь те сведения, которые необходимы для дальнейшего ознакомления с предметом.

Значения физико-механических характеристик льда, используемые при расчетах гидротехнических сооружений, даны в соответствующих Строительных нормах и правилах [43]. Однако они не пригодны для определения прочности судовых конструкций вследствие своеобразия взаимодействия со льдом плавающих средств. Лед является материалом, физико-механические свойства которого обусловлены особенностями его молекулярного строения, а также структурой и текстурой. В основном эти особенности определяются гексагональной упаковкой атомов кислорода в кристаллической решетке льда и наличием водородных связей между ними [17]. Структура и текстура льда обычно характеризуются большим разнообразием размеров зерен, хаотическим расположением главных оптических осей и наличием большого количества посторонних включений: газовых, водяных и даже биологических [10]. Особенно много включений у морского соленого льда:

В естественных условиях температура плавающего льда, во всяком случае его нижней поверхности, близка к точке плавления. Морской лед включает в себя значительную долю жидкой фазы — ячейки с рассолом, а также выпавшие в осадок твердые гидратированные соли. При изменении температуры и времени нагружения состав и свойства морского льда резко изменяются в зависимости от температуры T , солёности S и продолжительности нагружения вследствие действия различных физических процессов, главным образом диффузии. Поэтому в технических расчетах обычно используют некоторые осредненные значения характеристик льда, соответствующие рассматриваемым рабочим режимам.

Наиболее важной характеристикой является прочность льда на изгиб, которая определяется пределом прочности σ_p . Из множества существующих способов определения этого параметра в настоящее время достаточно надежным можно признать метод ломки ледяных балок и консолей на плаву в естественных условиях [59]. В отличие от опытов на малых образцах этот метод позволяет получить достаточно надежные результаты, которые практически совпадают у разных исследователей¹. Средние значения σ_p прочных зимних льдов составляют 5—6 кгс·см⁻² (реже 7 кгс·см⁻²), очень прочных льдов $\sigma_p = 8$ кгс·см⁻². Для плавающей ледяной пластины с учетом некоторого запаса принимают $\sigma_p = 10$ кгс·см⁻², а летних соленых льдов, ослабленных таянием, $\sigma_p \approx 1,5 \div 3$ кгс·см⁻².

Прочность льда на сжатие $\sigma_{сж}$ экспериментально определяют путем раздавливания образцов льда в форме кубиков стандартных размеров на специальных прессах. Значение $\sigma_{сж}$ существенно зависит от скорости нагружения образца, его

¹ В работе физические величины приведены в единицах системы МКГСС для сравнения с результатами других исследователей.

размера, солености, ориентации кристаллов и т. д. Эксперименты показывают, что при увеличении скорости нагружения до определенных пределов $\sigma_{сж}$ возрастает для прочного зимнего льда с 10 до 40—50 кгс·см⁻². При сжатии в направлении вдоль оптических осей предел прочности льда увеличивается в несколько раз по сравнению со сжатием вдоль базисных плоскостей. По опытам Х. Р. Пейтона [47], для морского льда $\sigma_{сж}$ увеличивается с 20 до 80 кгс·см⁻². При взаимодействии с наклонным бортом судна сжатие подвергаются в основном верхние слои льда. Летом, когда лед ослаблен радиационным таянием, прочность этих слоев ничтожна, зимой значения прочности льда на сжатие будут значительно больше, чем на отдельных образцах, так как деформации верхних слоев льда при этом будут стесненными. По данным К. Н. Коржавина [31], коэффициент, учитывающий стесненную деформацию, равен 2,5—2,7, т. е. статические значения прочности льда при стесненном сжатии могут достигать $\sigma_{сж}=50\text{--}60$ кгс·см⁻², а в отдельных случаях и больших значений.

Прочность льда на сдвиг τ_p обычно определяют при кручении ледяных цилиндров. Она также зависит от ориентировки осей кристаллов [17]. Наименьшие значения τ_p получаются, когда сдвиги происходят по базисным плоскостям. Средние значения пределов прочности морского многолетнего льда на сдвиг, по данным И. Г. Петрова [48], составляют 3,9 кгс·см⁻² и однолетнего — 7 кгс·см⁻². Педж и Ли получили $\tau_p=10\text{--}12$ кгс·см⁻² при удельном содержании рассола во льду $v_b=0,04$ и $\tau_p=5$ кгс·см⁻² при $v_b=0,16$.

Очень важная характеристика льда — модуль нормальной упругости E — существенно зависит от времени деформации и температуры льда [35]. Меньшее влияние на величину E оказывает соленость льда S или удельное содержание рассола v_b . Модуль упругости E для динамических нагрузок, определенный сейсмическими или акустическими методами, составляет примерно 10^5 кгс·см⁻². При воздействии длительных нагрузок величина E в значительной степени зависит от скорости деформирования. По данным Голда и др. [90, 92], до скоростей нагружения порядка 1 кгс·см⁻²·с⁻¹ величина E убывает, но свойства ползучести льда еще не проявляются. При меньших скоростях нагружения явно сказываются пластические свойства льда.

Пластические свойства льда обусловлены главным образом ползучестью, т. е. непороговым механизмом деформирования, особенно при сравнительно высоких температурах льда. При постоянной температуре T скорость деформации $\dot{\epsilon}$ зависит от напряжений σ в степени n , причем $n \geq 1$. При постоянном напряжении

$$\dot{\epsilon} \approx \exp\left(-\frac{U}{kT}\right), \quad (1.1)$$

где U — энергия активации льда; k — постоянная Больцмана.

Из уравнения (1.1) ясно, что деформирование льда является термоактивированным процессом. Этот процесс в морском льду усугубляется фазовыми переходами, происходящими при замерзании рассола и выпадении в осадок гидратированных солей [17]. В соответствии с опытными данными $U \approx 10 \div 15$ ккал · моль.

Прочность при механическом раздроблении определяется величиной удельной энергии раздробления ε_k , т. е. энергии разрушения, отнесенной к единице массы разрушенного вещества. По данным натурных экспериментов [78], $\varepsilon_k = 1 \cdot 10^8$ эрг · г⁻¹ для зимнего пресного льда и $\varepsilon_k = 0,3 \cdot 10^8$ эрг · г⁻¹ для весеннего пресного и морского соленого.

При изучении ледовых качеств судна интерес представляют различные физико-механические свойства снега, такие, как плотность, прочность и трение о борт. Хотя природа трения снега, по-видимому, имеет много общего с природой трения льда, однако имеются и особенности. Диапазон изменения коэффициента трения у снега гораздо шире, чем у льда. Коэффициент трения зависит от таких параметров снежного покрова, как высота, плотность, структура и т. п. Установлено, что он увеличивается при уменьшении размеров зерен (частиц) снега. У снега, как и у льда, нет четко выраженной зависимости коэффициента трения от скорости скольжения, за исключением очень малых скоростей. Фактически коэффициент трения остается постоянным при изменении скорости от 1 до 8 м/с, но при скорости ниже 0,05 м/с он увеличивается. Это объясняется тем, что при скольжении льда и снега по металлу повышение температуры на величину около 15°, которое необходимо для образования жидкой прослойки в местах их действительного контакта, возможно лишь при скорости скольжения 10⁻¹ м/с и более. При очень низких скоростях начало скольжения и у льда, и у снега определяется силой, необходимой для появления ползучести в пределах очень тонкого слоя вблизи поверхности скольжения. У снега эта сила, как правило, оказывается большей, чем его прочность на сдвиг. В результате вначале вместо скольжения часто происходит разрушение снега. Слой снега, непосредственно прилегающий к поверхности металла, прилипает к нему. Этот процесс особенно часто отмечается при низких температурах.

Изменение нормального давления приводит к некоторому изменению коэффициента трения снега по стали. По некоторым данным, динамический коэффициент трения $f_{\text{дин}}$ уменьшается примерно на 30 % при увеличении нормального давления до 0,8 кгс/см² (при скорости 2,5 м/с и температуре 0 °С). Скольжение по снегу в отличие от скольжения по льду почти всегда сопровождается деформированием его поверхности, причем в значительном объеме. Контактное взаимодействие поверхностей при этом носит в основном пластический характер, который приводит к существенному увеличению

площади касания и соответствующему изменению фрикционных характеристик.

Опубликованные данные о прочности снежного покрова крайне немногочисленны и противоречивы. Приведем результаты

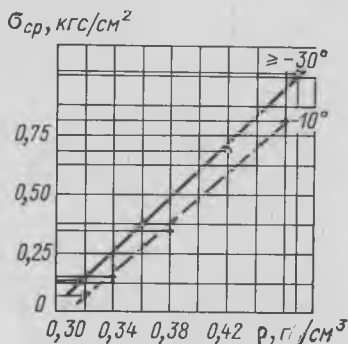


Рис. 1.1. Зависимость предела прочности снега на срез от плотности и температуры.

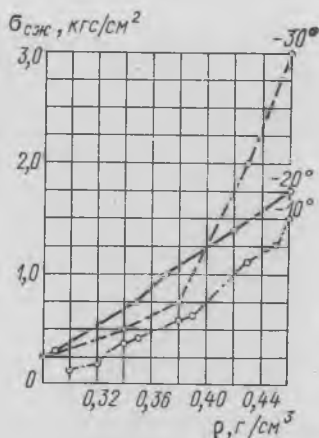


Рис. 1.2. Зависимость предела прочности снега на сжатие от плотности и температуры.

работы М. П. Козлова, который провел большое количество экспериментов в Арктике, испытывая образцы плотного ($\rho = 0,35\text{—}0,43 \text{ г/см}^3$) снега на срез (рис. 1.1), сжатие (рис. 1.2),

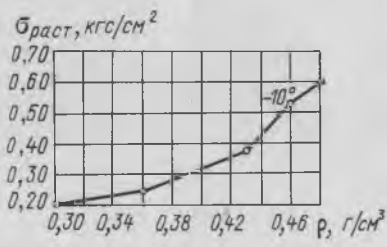


Рис. 1.3. Зависимость предела прочности снега на растяжение от плотности.

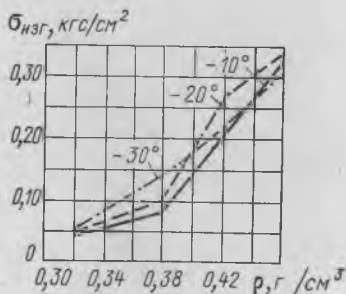


Рис. 1.4. Зависимость предела прочности снега на изгиб от плотности и температуры.

растяжение (рис. 1.3), изгиб (рис. 1.4) и смятие (рис. 1.5). Они показывают, что предел прочности снежного покрова зависит главным образом от его плотности и возрастает с ее увеличением. Изменение температуры в пределах от -10 до -30°C не оказывает значительного влияния на прочность снега. Плот-

ность снега претерпевает изменения в процессе его накопления и стаивания. В начале зимы происходит увеличение средней плотности снега, затем накопление снега несколько замедляется, однако плотность увеличивается довольно быстро. В начале весны снова отмечается быстрый рост накопления снега, а плотность уменьшается за счет слоя свежеснежавшего снега. Далее накопление снега резко понижается, а плотность растет. С этого времени начинается таяние снежного покрова, которое сопровождается его дальнейшим уплотнением.

Данные о плотности снега можно получить либо с помощью непосредственных измерений, что часто затруднено, либо путем определения по таблицам, графикам или формулам, построенным на основании обобщения материалов наблюдений. Наибо-

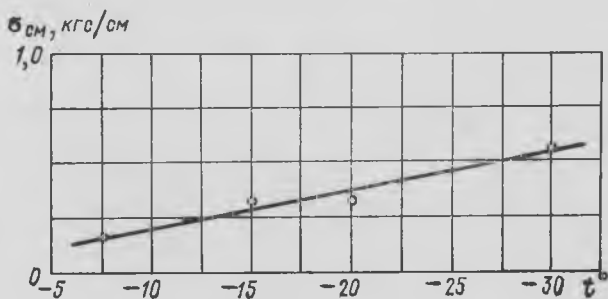


Рис. 1.5. Зависимость предела прочности снега на смятие от температуры.

лее простой способ определения плотности снега по внешним признакам разработан А. Шепелевским на основании обобщения многолетних наблюдений [79]. Им составлены таблицы, в которых приведены значения плотности снега в зависимости от его внешних признаков. Так, для свежеснежавшего рыхлого снега $\rho = 0,06 \div 0,10$ г/см³, свежеснежавшего крупинчатого $\rho = 0,13$, свежеснежавшего мокрого $\rho = 0,13$, свежеснежавшего с дождем $\rho = 0,16 \div 0,27$, свежего, уплотненного ветром $\rho = 0,14 \div 0,17$, свежего уплотненного сильным ветром $\rho = 0,18 \div 0,22$, старого, уплотненного сильным ветром $\rho = 0,24 \div 0,25$, для надува снега типа «снежной доски» или «ветрового фирна» $\rho = 0,26 \div 0,40$ и т. д. Плотность снега на арктических льдах можно вычислить также с помощью диаграмм, составленных В. С. Лоциловым [11], который обобщил данные многолетних наблюдений за снежным покровом на дрейфующих станциях, а также данные, относящиеся к дрейфующим льдам Арктики. Им установлено, что зависимость свойств снежного покрова от климатических особенностей различных районов Арктики выражена слабо. Поэтому диаграммы могут быть использованы для всех арктических морей.

Движение судов в сплошных и сплоченных крупнобитых льдах возможно лишь при ломке отдельных льдин и ледяных полей. Ледовые нагрузки на корпусные конструкции, очевидно, не могут превосходить предельные значения усилий, ломающих ледяной покров. Таким образом, эти усилия можно рассматривать как расчетные для конструкций.

При определении прочности ледяного покрова и обширных ледяных полей их обычно рассматривают как плиты на упругом основании. Как правило, используют линейную теорию слабого изгиба тонких пластин на гидростатическом основании. За критерий прочности при изгибе ледяного покрова принимают величину предельного растягивающего напряжения, действующего у верхней или нижней поверхности ледяной пластины, т. е. фибровую прочность

$$\sigma = \frac{6M}{h^2} = \sigma_p, \quad (1.2)$$

где M — изгибающий момент в данном сечении; h — толщина ледяной пластины.

Отсюда нагрузка, вызывающая разрушение льда изгибом, оказывается связанной с его толщиной очень простой зависимостью

$$P_p = k_p h^2, \quad (1.3)$$

где k_p — некоторая константа.

По существу, исследования прочности и несущей способности ледяного покрова сводятся к определению разумного значения постоянной k_p . Ее значения для различных видов льда и способов приложения внешней нагрузки приведены в работах И. С. Песчанского, Л. Голда [94], В. И. Каштеляна [28] и др. Для оценки ледовой ходкости и прочности судов следует определить усилие P_p , которое необходимо для ломки льда. При этом принимают повышенные значения постоянной k_p , иными словами, максимальные значения прочности льда. Одной из наиболее простых и в то же время экспериментально обоснованных формул для расчета разрушающего усилия P_p , является формула, предложенная в работе [28]:

$$P_p = \left(\frac{\varphi}{\pi} \right)^2 \frac{\sigma_p h^2}{0,966}, \quad (1.4)$$

где φ — угол «раствора» пластины, имеющей форму клина.

Значению $\varphi = 2\pi$ соответствует случай центрально загруженной пластины, $\varphi = \pi$ — нагрузка, приложенная к кромке полубесконечной ледяной пластины, и т. д. Для сравнительно тонких льдов формула (1.4) дает приемлемые результаты, тогда как для более толстого льда надо учитывать напряженное состояние в районе приложения силы P_p , принимать во внимание

сдвиги и т. п. При этом вместо максимальных растягивающих напряжений следует использовать другие критерии разрушения, включающие скалывающие напряжения. Исследование этого вопроса было произведено Майергофом, использовавшим критерий полного касательного напряжения Треска.

Для определения прочности бесконечной или полубесконечной ледяной пластины имеется большое количество различных решений, которые можно применять при анализе. Однако прочность плавающих льдин конечных размеров можно оценить лишь приближенно. Один из вариантов такой оценки можно получить, рассматривая плавающую льдину как однородную плоскую пластину постоянной толщины. Она выступает над водой на величину

$$\Delta h = h \left(1 - \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{в}}} \right), \quad (1.5)$$

где $\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{л}}$ — плотности воды и льда.

Несущая способность плавающей льдины определяется либо ее прочностью, либо запасом избыточных сил плавучести. Ясно, что несущая способность льдин малых размеров обусловлена лишь силами плавучести, а большие льдины сломаются раньше, чем будут полностью притоплены. Очевидно, для льдин каких-то средних размеров несущие способности, определенные из условий притапливания или разрушения, будут примерно одинаковыми.

Получение численных оценок можно проиллюстрировать на простейших примерах. С этой целью рассмотрим круглую льдину радиуса R_0 (рис. 1.6). При действии центрально приложенной силы P льдина погрузится в воду на величину

$$\omega = \frac{P}{\pi R_0^2 \rho_{\text{в}} g}. \quad (1.6)$$

Предельное значение центрально приложенной топящей нагрузки $P_{\text{т}}$ получим из очевидного условия $\omega = \Delta h$. Отсюда

$$P_{\text{т}} = \pi R_0^2 h g \Delta \rho, \quad (1.7)$$

где

$$\Delta \rho = \rho_{\text{в}} - \rho_{\text{л}},$$

т. е. топящая нагрузка линейно зависит от толщины льдины и квадратично от ее размера в плане.

Льдина под действием нагрузки, приложенной в ее центре, подвергается изгибу и, в конечном итоге, может разрушиться. Анализ напряженного состояния льдины обычно проводят, рассматривая ее как пластину конечных размеров на упругом основании гидравлического типа. Разрушающее усилие при этом зависит от линейных размеров льдины, прочности на

изгиб σ_p и квадрата толщины льда. Это видно из формулы (1.3), в которой

$$k_p = f(\sigma_p, R_0).$$

При $h < h_p$ (рис. 1.7)

$$P_p < P_t,$$

т. е. льдина разрушится прежде, чем будет полностью притоплена.

При $h > h_p$ льдина будет притоплена без разрушения. Очевидно, критическое значение толщины льдины h_p при фиксиро-

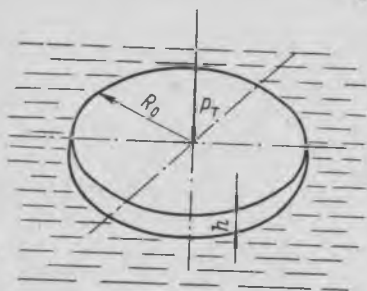


Рис. 1.6. Притапливание круглой льдины.

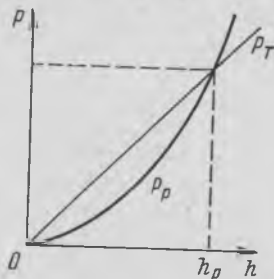


Рис. 1.7. Зависимость силы притапливания P_t и разрушающей силы P_p от толщины льдины h .

ванном значении радиуса R_0 определится из условия $P_p = P_t$, откуда

$$h_p = \frac{\pi R_0^2}{k_p} \Delta \rho g. \quad (1.8)$$

Для льдины заданной толщины h из формулы (1.8) можно найти критический радиус R_p , если известна функция $k_p = f(\sigma_p, R_0)$. При $R < R_p$ льдина будет притапливаться, а при $R > R_p$ — разрушаться на плаву. Основная трудность заключается в определении неизвестной функции $f(\sigma_p, R_0)$. С этой целью можно воспользоваться известными решениями об изгибе круглых пластин на упругом основании.

При взаимодействии борта судна со льдом нагрузка прикладывается к кромке льдины, что значительно усложняет схему расчета. Рассмотрим для простоты плоскую задачу (рис. 1.8). Льдина при действии вертикальной нагрузки dP на ее кромку будет притапливаться и повернется на угол $d\theta$. Искомые величины $d\theta$ и x_c координаты точки поворота O (рис. 1.8) определим из условий равновесия статики, не учитывая силы инерции обломков льда [97]. Последнее существенно усложняет задачу и вряд ли оправданно, поскольку требуется лишь определить структуру формул, в которых доминирует статическая компонента.

Приравняем избыточные силы плавучести внешней силе:

$$dP = 2R(R - x_c) \rho_B g d\theta. \quad (1.9)$$

Составим уравнение моментов относительно точки O и, используя формулу (1.9), получим $x_c = 2R/3$. Тогда

$$dP = \frac{2}{3} R^2 \rho_B g d\theta. \quad (1.10)$$

Рассмотренная схема справедлива до того момента, когда загруженная кромка уйдет под воду. Из этого условия (условия заливания) определим предельное значение угла поворота

$$d\theta_3 = \frac{3}{4} \frac{h}{R} \frac{\rho_B - \rho_A}{\rho_B}. \quad (1.11)$$

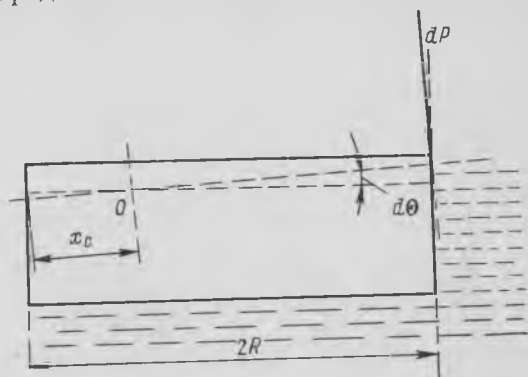


Рис. 1.8. К расчету поворачивания и притапливания льда.

Подставим это выражение в формулу (1.10):

$$dP = \frac{1}{2} Rh \Delta \rho g. \quad (1.12)$$

Если контакт осуществляется по длине l вдоль борта судна, то выражение суммарного усилия $P = l dP$ можно записать в виде

$$P = \frac{1}{2} Rhl \Delta \rho g. \quad (1.13)$$

Полученное выражение по своей структуре близко к формуле (1.7).

Для того чтобы рассчитать разрушающее усилие, рассмотрим равновесие пластины под действием внешней силы dP и сил плавучести (см. рис. 1.8). Для изгибающего момента, действующего в сечении x от кромки, получим

$$M(x) = \frac{Rh}{2} x \Delta \rho g - \frac{x^2}{2} h \Delta \rho g \left(1 - \frac{3}{4} \frac{x}{R}\right) - \frac{x^3}{4R} h \Delta \rho g. \quad (1.14)$$

Координаты точки действия максимального изгибающего момента определим из условия $M'(x_1) = 0$. Имеем $x_1 = \frac{2}{3} R$.

Максимальный изгибающий момент, действующий в сечении $x=x_1$ от кромки,

$$M_{\max} = \frac{4}{27} R^2 h \Delta \rho g. \quad (1.15)$$

При подобной постановке задачи не учитывается влияние прогибов пластины на величину гидростатического отпора, т. е. пластина считается абсолютно жесткой. Такое допущение приводит к несколько завышенному значению максимального изгибающего момента, однако для сравнительно малых размеров льдины R это несущественно. Предельный момент, разрушающий льдину изгибом,

$$M_p = \frac{\sigma_p h^2}{6}. \quad (1.16)$$

Из условия $M_p = M_{\max}$ получим следующие выражения для предельных значений толщины h_p и размера льдины R_p :

$$h_p = \frac{8}{9} \frac{R^2}{\sigma_p} \Delta \rho g; \quad (1.17)$$

$$R_p = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\sigma_p h}{2 \Delta \rho g}}. \quad (1.18)$$

Формула (1.17) по своей структуре близка к формуле (1.8) и совпадает с ней, если положить

$$k_p = 3,54 \sigma_p.$$

В общем случае можно с известным приближением написать

$$h_p = k \frac{R^2}{\sigma_p} \Delta \rho g, \quad (1.19)$$

где k — численный коэффициент.

Масса круглой льдины радиуса R

$$M_L = \rho_L \pi R^2 h.$$

Подставив в эту формулу выражение (1.18) для R_p получим следующее выражение для массы неразрушаемой льдины:

$$M_L = \frac{9}{8} \frac{\rho_L}{\Delta \rho} \frac{\pi \sigma_p h^2}{g}. \quad (1.20)$$

Для силы тяжести (веса) такой льдины имеем

$$P_L = k \sigma_p h^2 \frac{\rho_L}{\Delta \rho}, \quad (1.21)$$

где численный коэффициент k тот же, что и в формуле (1.19). Полагая $k=3,54$; $\rho_L=0,9$ г/см³; $\Delta \rho=0,1$ г/см³; $\sigma_p=4,0$ кгс/см²,

получим следующую простую формулу для силы тяжести (веса) льдины, не разрушающейся при контакте с бортом:

$$P_{\text{л}} \approx 1300h^2, \quad (1.22)$$

где $P_{\text{л}}$ — в тоннах; h — в метрах.

Формулу (1.22) можно использовать в практических расчетах. Численный множитель линейно зависит от предела прочности льда и изменяется примерно от 1000 при $\sigma_p = 3,0$ кгс/см², до 1600 при $\sigma_p = 5,0$ кгс/см². Льдины толщиной 0,5—1,0 м не разрушаются при ударе о борт судна, если их длина менее 20 м, что соответствует мелкобитым льдам. Движение в более крупных льдах, обломках ледяных полей и ледяных полях сопровождается их ломкой. Соответствующие эмпирические данные приведены в работе [8]. Там же на основе натурных исследований показано, что при переходе от движения в битых льдах к движению в сплошных размеры льдин, которые судно преодолевает путем разрушения изгибом, возрастают. Это возрастание неоднозначно и зависит также от скорости судна.

§ 1.2. ДВИЖЕНИЕ СУДНА В БИТЫХ ЛЬДАХ

1.2.1. ДВИЖЕНИЕ В СПЛОЧЕННЫХ МЕЛКОБИТЫХ ЛЬДАХ

Исследование плавания в битых дрейфующих льдах различной сплоченности (самостоятельно либо под проводкой ледокола) необходимо как для оценки ледовой ходкости судов, так и для обеспечения надлежащей прочности их корпусных конструкций. Опыт показывает, что наибольшее сопротивление движению судна оказывают сплоченные льды, а наибольшую опасность для конструкций представляет удар о крупную прочную льдину при движении с большой скоростью в разреженных льдах.

Во время движения судна в сплоченных битых льдах большие усилия расходятся на раздвигание льдин и преодоление сил трения льда о борт судна. Поворачивание и притапливание льдин заметны только при движении судов с большим наклоном борта (ледоколов). При раздвигании часть работы сил взаимодействия льда с бортом судна идет на сообщение кинетической энергии раздвигаемым льдинам и присоединенной массе воды, а часть диссипирует в результате действия неупругих сил взаимодействия между льдинами и их трения о воду. Возмущение охватывает значительный по площади район ледяного покрова, окружающего судно, и частично передается вперед. Такое движение неустойчиво и сопровождается разрывами направленными перпендикулярно пути следования, что довольно часто наблюдается в натурных условиях.

Результаты первых попыток изучения проходимости судов во льдах, т. е. визуальных наблюдений, приведены в работах

[16, 80 и др.]. Следующий шаг был сделан Л. М. Ногидом [44], который провел теоретический анализ и экспериментально исследовал силы, действующие на судно при движении в мелкобитых льдах. Им была предложена первая эмпирическая формула для расчета ледового сопротивления, полученная на основании данных испытаний моделей судов в моделированных льдах. Был разработан еще ряд эмпирических формул [83, 99], в которых, по существу, осуществлено более или менее умозрительное разделение сил взаимодействия судна со льдом на составляющие и использовалась теория подобия и размерностей. Окончательный вид расчетных формул устанавливался путем анализа результатов специальных испытаний в опытовом бассейне. Полученные формулы предназначались для конкретного судна и определенных ледовых условий, что существенно ограничивало область их применения.

Более общие зависимости были предложены в работе [58], которые основывались на использовании комбинированного полуэмпирического метода с привлечением данных натурных испытаний. На основе схематизированной модели процесса взаимодействия судна со льдом были получены аналитические выражения для отдельных составляющих силы ледового сопротивления, действующей на корпус судна при движении в сплоченных мелкобитых льдах. При этом мелкобитые льды фактически рассматривались как сплошной тонкий слой, покрывающий всю поверхность воды, а характер линий тока при обтекании корпуса судна льдом задавался на основании наблюдений.

Аналогичные представления обычно используют при анализе различных задач динамики ледяного покрова, например при исследовании дрейфа льдов, ледовых сжатий и т. п. Такая аналогия была обоснована теоретически [74], и движение мелкобитых льдов характеризовалось числом Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{Lv}{k_r}.$$

где L — характерный размер, в качестве которого принимается средний радиус льдины r ; v — осредненная скорость льдины; k_r — коэффициент, характеризующий степень взаимодействия льдин друг с другом, т. е. горизонтальный обмен импульсом, а также необратимые потери энергии вследствие трения льдин о воду. Величина k_r должна зависеть от толщины h и их протяженности r . Исходя из соображений размерности, получим

$$k_r = kh\sqrt{rg}, \quad (1.23)$$

где k — коэффициент, зависящий от сплоченности льдов N . Такое же выражение для коэффициента k_r получим, проанализировав полуэмпирическое выражение для диссипативной состав-

ляющей сил ледового сопротивления движению судна в мелкобитых льдах [30].

Используя выражение (1.23), запишем число Рейнольдса для льда в следующем виде:

$$\text{Re} = k_1 \frac{v}{h} \sqrt{\frac{r}{g}} \quad (k_1 = k^{-1}) \quad \text{либо} \quad \text{Re} = k_1 \frac{r}{h} \text{Fr}, \quad \text{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gr}}, \quad (1.24)$$

где Fr — число Фруда для льдины.

Из формулы (1.24) следует, что движение в мелкобитых льдах можно моделировать по законам гравитационного подобия.

Представим сплоченный мелкобитый лед как однородный слой вязкой жидкости. Тогда нетрудно установить структуру выражения для силы ледового сопротивления $R_{\text{л}}$ движению судна. Из соображений размерности следует

$$R_{\text{л}} = \frac{mv^2}{2} S f(\text{Re}^{-1}), \quad (1.25)$$

где m — поверхностная плотность льдов; S — имеет размерность площади; Re — число Рейнольдса, которое для движения судна в битых льдах

$$\text{Re} = k_1 \frac{v}{h} \sqrt{\frac{L}{g}},$$

где v — скорость судна; L — его длина.

Разложим функцию $f(\text{Re}^{-1})$ в степенной ряд, ограничившись тремя первыми членами ряда. Ледовое сопротивление

$$R_{\text{л}} = a_1 \rho_{\text{л}} g S L \text{Fr}^2 + a_2 \rho_{\text{л}} g S h \text{Fr} + a_3 \rho_{\text{л}} g \frac{Sh^2}{L}, \quad (1.26)$$

где a_1, a_2, a_3 — постоянные коэффициенты, зависящие от сплоченности льда, толщины и среднего размера льдин r ; должны измеряться эмпирически; $\text{Fr} = v/\sqrt{gL}$ — число Фруда для судна. Для параметра S можно принять следующее выражение:

$$S = B^n r^m h^p \quad (n + m + p = 2),$$

где B — ширина судна.

В выражении (1.26) член, не зависящий от скорости, определяет статическую составляющую чистого ледового сопротивления, обусловленную силами поворачивания и притапливания льдин, а также силами ледового сжатия. Второй член, линейно зависящий от скорости, описывает диссипативные составляющие сопротивления, возникающие вследствие необратимых потерь энергии при взаимодействии льдин друг с другом и трения льдин о воду. Наконец, первый член, зависящий от квадрата скорости, представляет инерционную составляющую сил ледового сопротивления, соответствующую кинетической энергии, сообщаемой раздвигаемым льдинам.

Нетрудно заметить, что в формулу (1.26) не входят параметры, характеризующие физико-механические свойства льда, кроме плотности и эмпирических коэффициентов. Это означает, что сила ледового сопротивления зависит главным образом от геометрических параметров, т. е. формы корпуса судна, размеров льдин и их сплоченности, а также от скорости судна и сил трения. Прочность льда практически не влияет на ледовое сопротивление при движении в мелкобитых льдах. Интересно отметить, что специальные эксперименты по исследованию течений двухмерных аналогов гранулированных материалов, представленных набором плоских дисков, подтвердили малую зависимость движения в целом от прочностных и упругих характеристик материала.

К аналогичным выводам в свое время пришел Л. М. Ногид, по инициативе которого проводились эксперименты в бассейне, где мелкобитый лед имитировали пластинками парафина. При этом горизонтальные размеры пластинок принимали в соответствии с масштабом модели, а разницу в коэффициентах трения учитывали расчетным путем. Многочисленные эксперименты были выполнены также в опытовом бассейне Горьковского политехнического института (ГПИ), где для имитации битых льдов использовали пластинки из парафина и полиэтилена [20, 84]. Особое внимание уделялось точному учету сил трения [55].

1.2.2. ДВИЖЕНИЕ В РАЗРЕЖЕННЫХ МЕЛКОБИТЫХ ЛЬДАХ

Взаимодействие корпуса судна со льдом при движении в мелкобитых льдах существенным образом зависит от их сплоченности. В разреженных льдах ($N=0,4 \div 0,6$) каждая льдина может свободно перемещаться, так как длина ее свободного пробега отлична от нуля. Характер «обтекания» судна льдом в этом случае показан на рис. 1.9. В отличие от сплошных льдов возмущения здесь не передаются вперед. Ширина зоны возмущения увеличивается постепенно от форштевня до начала цилиндрической вставки и далее остается постоянной. Переменную ширину зоны возмущения, где льдины контактируют с бортом судна и друг с другом, можно определить, если считать, что сплоченность в этой зоне равна единице. Тогда из условия равенства расходов через сечения I и II (рис. 1.9) получим

$$\Omega(x) = \frac{N y(x)}{1 - N}. \quad (1.27)$$

С увеличением сплоченности ширина зоны возмущения растет, что позволяет рассматривать движение в сплошных льдах как движение в сплошном слое бесконечной протяженности. Для разреженных льдов это не характерно. Поток им-

пульса, передаваемый судном при движении в разреженных мелкобитых льдах, складывается из следующих компонент:

а) импульса, затрачиваемого на сообщение кинетической энергии раздвигаемым льдинам. Ему соответствует инерционная составляющая силы ледового сопротивления, пропорциональная массе раздвигаемого льда, т. е. произведению $m\Omega$;

б) импульса, рассеиваемого в результате работы сил сопротивления воды и взаимодействия льдин друг с другом. Ему соответствуют диссипативные составляющие сопротивления. Статическая компонента отсутствует.

Обтекание судна льдинами при его движении в разреженных мелкобитых льдах формально аналогично обтеканию тела

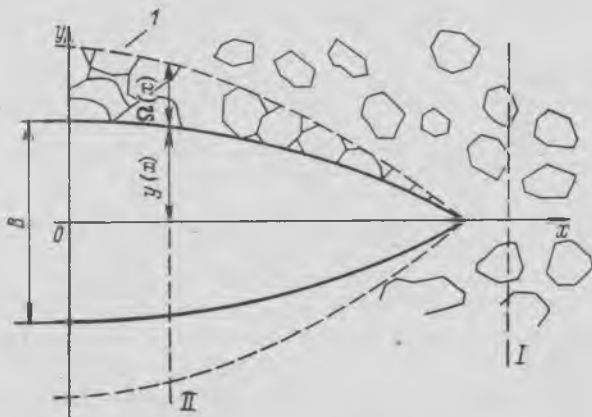


Рис. 1.9. «Обтекание» корпуса судна при движении в разреженных битых льдах.

I — границы зоны возмущения.

потоком газа со сверхзвуковой скоростью. В этом случае значительная часть работы упора винтов идет на сообщение кинетической энергии раздвигаемым льдинам. В суммарной силе ледового сопротивления будет преобладать инерционная составляющая.

С помощью простейших физических моделей, исходя из соображений размерности, нетрудно получить формулу для определения сопротивления при движении в разреженных битых льдах, аналогичную формуле (1.26). Как и при выводе этой формулы, рассмотрим движение прямобортного судна с постоянной скоростью v в направлении оси Ox . На элемент длины ватерлинии ds действует сила dp_{nn} , являющаяся суммой нормального усилия dp_n и пропорционального ему касательного усилия $|dp_\tau| = f_{\tau p} |dp_n|$. Проекция усилия dp_{nn} на ось Ox будет

$$dp_x = dp_n \frac{f_{\tau p} - y'(x)}{\sqrt{1 + (y')^2}}, \quad (1.28)$$

где $f_{\text{тр}}$ — коэффициент трения; $y(x)$ — уравнение действующей ватерлинии.

Для того чтобы определить неизвестную величину dp_n , положим, как это обычно делается при анализе удара бортом судна о лед, что передача кинетической энергии льдине продолжается до тех пор, пока скорости судна и льдины по направлению нормали n в точке контакта не сравняются. Кроме того, будем считать, что сумма работ контактного усилия dp_n и усилия трения dp_τ за время dt должна быть равна приращению кинетической энергии льдины. Учитывая, что в начальный момент скорость льдины была равна нулю,

$$dT = \frac{v_n^2}{2} dm = \frac{v^2 (y')^2}{2(1 + y'^2)} dm,$$

где dm — масса льдины, вошедшая в контакт с бортом на пути dx .

Эта величина, очевидно, пропорциональна $d\Omega$ [см. формулу (1.27)] и плотности льда. Тогда

$$dm = \frac{k_{1n} \rho_{\text{л}} N}{1 - N} dy.$$

Неизвестный коэффициент k_{1n} имеет размерность длины и может быть представлен в виде $k_{1n} = k_n r$, где r — характерный размер льдины. Из условия энергетического баланса получим для проекции контактного усилия на ось Ox следующее выражение:

$$dp_x = - \frac{k_n r \rho_{\text{л}} N}{1 - N} \frac{v^2 (y')^3}{1 + (y')^2} dx. \quad (1.29)$$

Знак минус означает, что в выбранной системе координат производная $y' < 0$. Интегрируя выражение (1.29) по всей длине носового заострения с обоих бортов и проведя подстановки, аналогичные сделанным в работе [30], выведем окончательную формулу для инерционной составляющей:

$$R_{\text{ин}} = \frac{k_n \rho_{\text{л}} g r N}{1 - N} BL \left(\frac{L}{B} \right)^2 \text{tg}^4 \alpha_0 \text{Fr}^2. \quad (1.30)$$

В формулу (1.30) параметры судна и льда, известные или поддающиеся измерению, входят в явном виде. Безразмерный коэффициент k_n — среднестатистическая величина, одинаковая для различных судов и зависящая, может быть, лишь от отношения r/h . Коэффициент k_n следует определять по данным натурных и модельных испытаний.

Для судна обычной формы можно полагать $\text{tg} \alpha_0 \approx B/L$, тогда

$$R_{\text{ин}} \approx \rho v^2 \left(\frac{B}{L} \right)^2,$$

что аналогично выражению для определения силы сопротивления заостренного тела при сверхзвуковом обтекании его плоским потоком, как этого и следовало ожидать.

В формулу (1.30) не входит коэффициент трения льда о борт судна. Учет силы трения приводит к тому, что вектор скорости льдины будет направлен не по нормали к борту судна, а под некоторым углом вперед. Поправка, вносимая этим в величину силы ледового сопротивления, является величиной второго порядка малости, так как она зависит от значения $f_{тр}^2 \ll 1$.

Подобным же образом можно найти диссипативные составляющие силы ледового сопротивления. Первая обусловлена силами сопротивления воды движению льдин и в первом приближении ее можно полагать пропорциональной скорости раздвижения и площади льдин в плане, т. е. $\Omega(x)$. Вторая составляющая, учитывающая силу взаимодействия льдин друг с другом, зависит от их относительной скорости dv_y/dx . Обе эти составляющие зависят линейно от скорости судна v , или числа Фруда Fr . Квазиупругие силы, не зависящие от скорости движения судна, в рассматриваемом случае отсутствуют.

Аналитическое выражение для диссипативной составляющей силы ледового сопротивления в разреженных битых льдах довольно близко ко второму члену из формулы (4.43) с введенным дополнительным множителем $N/(1-N)$. Безразмерный коэффициент пропорциональности, разумеется, также отличается от принятого в формуле (4.43).

Приведенные здесь рассуждения справедливы для разреженных льдов сплоченностью $N=0,4 \div 0,7$, когда импульс почти непрерывно передается от борта судна ко льду. Во льдах меньшей сплоченности взаимодействие борта со льдом сводится к сравнительно редким одиночным ударам об отдельно плавающие льдины. Здесь уже вопрос о ледовом сопротивлении стоять не может, необходимо лишь определить контактное усилие при ударе о кромку льдины.

1.2.3. УДАР ОБ ОТДЕЛЬНУЮ ЛЬДИНУ

Как уже говорилось ранее, при движении в битых дрейфующих льдах различной сплоченности наибольшую опасность для корпуса представляет удар об отдельную прочную льдину при сравнительно большой скорости судна.

Результаты исследования такого удара впервые были приведены в работе [50], где рассматривался внецентренный удар борта судна о плавающую льдину конечных размеров. Более подробные сведения изложены в работе [52], в которой при решении задачи учитывались все степени свободы судна и льдины, присоединенные массы воды и т. п. Предполагалось, что удар мгновенный и льдина в процессе удара не ломается. Трением льда о борт судна пренебрегали. В соответствии с классической теорией удара в конце его скорости судна и

льдины, направленные по нормали к борту в точке удара, считались одинаковыми. При ударе о льдину массой M_2 ударный импульс

$$s = \frac{M_1}{C_1} \frac{v_0 l}{1 + \frac{M_1}{M_2} \frac{C_2}{C_1}}, \quad (1.31)$$

где M_1 — масса судна; C_1 и C_2 — коэффициенты приведения массы судна и льдины; v_0 — скорость поступательного движения судна до удара; l — направляющий косинус нормали к борту в точке удара.

Коэффициенты приведения зависят от положения точки удара относительно осей координат, связанных с судном, формы корпуса судна, моментов инерции его массы, формы льдины, коэффициентов присоединенных масс воды и т. п. Аналитические выражения для коэффициентов приведения можно найти в работах [50, 52]. В них коэффициенты присоединенных масс воды определялись по довольно грубым приближенным формулам. В настоящее время значения коэффициентов приведения обычно рассчитываются на ЭВМ с использованием имеющихся программ, в которых учтены присоединенные массы воды и моменты.

Выражение (1.31) сводится к обычной формуле для центрального удара двух тел, если в качестве скорости соударения принимать приведенную скорость $v_0 l$, а массы судна и льдины поделить на соответствующие коэффициенты приведения C' . При $M_2 \rightarrow \infty$ получаем удар о неразрушаемую льдину бесконечной протяженности, т. е. о ледяное поле. Из формулы (1.3) следует, что при ударе о разрушаемое ледяное поле формулу (1.31) надо откорректировать, введя поправочный множитель $k < 1$.

Из решения, приведенного в подразделе 1.1.4, следует, что масса отдельно плавающей льдины конечной толщины h , не разрушающейся при ударе, ограничена [см. формулу (1.20)]. Тогда, как видно из формулы (1.31), ударный импульс s будет также ограничен, причем его значение не может быть больше получаемого при $M_2 \rightarrow \infty$.

По формуле (1.31) можно рассчитать ударный импульс для удара любой точкой борта о льдину конечных размеров. Если при этом из экспериментальных или теоретических данных известна продолжительность удара, то легко определить силу, действующую в зоне контакта борта со льдом. Эта основная задача теории взаимодействия корпуса судна со льдом анализировалась многими исследователями и в настоящее время получила удовлетворительное решение [32, 34].

В основу решения положены экспериментальные и теоретические разработки гидродинамической теории удара твердого

тела о лед [34]. Рассматривая вытеснение промежуточного слоя раздробленного льда из зоны контакта, удалось количественно описать процесс внедрения твердого тела в кромку льда. Полученные данные хорошо согласуются с экспериментальными.

Расчет удара судна о лед можно выполнить на основе этой теории с привлечением методов пересчета с прототипа [68]. Последнее необходимо по двум основным причинам. Во-первых, контактное усилие в значительной степени зависит от формы кромки льдины, которая является вполне случайной, независимой от сопутствующих факторов. Во-вторых, учет силы сопротивления воды раздвиганию льдин путем введения коэффициентов присоединенных масс нельзя для рассматриваемой нестационарной задачи считать достаточно точным. Кроме того, гидродинамическая модель обтекания льдины довольно грубая.

Положение осложняется тем, что на льдину, помимо плохо известных сил турбулентного трения на нижней поверхности, действует еще боковая сила, определить которую затруднительно. Теория обтекания отдельной льдины, плавающей на поверхности воды, находится еще в зачаточном состоянии, а эксперименты, определяющие сопротивление, в достаточно полном объеме до сих пор не проводились. Ясно, что для расчетов нужно иметь данные натурных испытаний.

§ 1.3. ДВИЖЕНИЕ СУДНА В СПЛОШНЫХ ЛЬДАХ

1.3.1. ЛОМКА ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Характер ломки сплошного ледяного покрова корпусом судна существенно зависит от толщины и прочности ледяной пластины, а также скорости движения судна. В свою очередь, скорость судна в сплошных льдах для каждого конкретного случая зависит от толщины и прочности (разрушенности) льда. Таким образом, величины контактного усилия P и скорости v при движении в сплошных льдах являются функциями двух внешних параметров: толщины льда h и его прочности σ :

$$P = f_p(h, \sigma); \quad (1.32)$$

$$v = f_v(h, \sigma). \quad (1.33)$$

Фиксируя либо h , либо σ , получим уравнения кривых $P(v)$ в параметрической форме. Ясно, что в области низких скоростей в предельных ледовых условиях эти кривые будут ограничены сверху зависимостью $P(v)$, полученной из условия удара о неразрушаемое ледяное поле.

Если скорость движения судна в сплошных льдах близка к скорости на чистой воде v_0 , то образуются две системы поверхностных волн [73]. Перед судном распространяются

изгибно-гравитационные волны, вызывающие изгиб ледяного покрова, позади и по бокам — обычные корабельные волны. Система корабельных волн в этом случае совпадает с аналогичной системой волн на чистой воде. Если судно движется достаточно быстро, то сплошной покров тонкого льда разрушается от изгиба на гребнях волн, не входя в контакт с бортом судна. Это явление хорошо известно судоводителям. Существует такая критическая скорость движения судна, при которой амплитуды образующихся волн максимальны [73]. Для мелководных водоемов эта скорость близка к скорости длинной гравитационной волны $v = \sqrt{gH}$, где H — глубина водоема. Для глубоководных водоемов она зависит от цилиндрической жесткости ледяной пластины [71]. Это свойство используется практически при

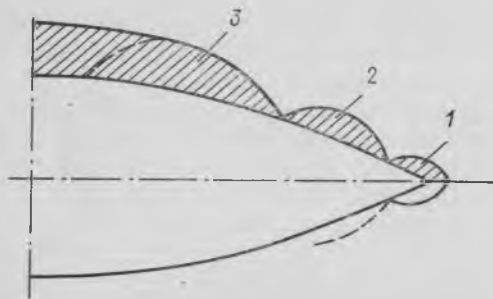


Рис. 1.10. Схема ломки сплошного льда.

1, 2, 3 — ряды секторов.

ломке ледяного покрова на реках и озерах Северной Америки с помощью судов на воздушной подушке, движущихся над поверхностью льда с критической скоростью. Подобный способ эффективен для ломки сплошных тонких льдов, однако до сих пор на практике его применяют редко.

По мере увеличения толщины льда амплитуда колебаний ледяной пластины резко уменьшается, и лед уже не разрушается подобным образом. Происходит ломка ледяных пластин, вошедших в непосредственный контакт с бортом судна, имеющий локальный характер. Форштевень судна частично прорезает лед, причем длина прорезания в зависимости от угла входа носовой ветви ватерлинии составляет 1—1,5 м и более. У судов с очень острыми носовыми образованиями прорезание льда достигает нескольких метров, что резко увеличивает сопротивление трения о лед. За форштевнем вдоль борта образуется два-три, (реже, четыре) сегмента, которые корпус судна отламывает от ледяной пластины (рис. 1.10). Для разных судов данного типа в идентичной ледовой обстановке общая картина ломки сплошного льда практически одинакова, лишь зоны контакта борта со льдом несколько смещаются по длине корпуса [30].

Процесс, таким образом, можно рассматривать как статистически однородный.

Размеры ледяных сегментов (обломков) увеличиваются от форштевня к средней части корпуса, т. е. от участков с большим углом наклона борта к участкам с прямостенным бортом. Кроме того, в середине корпуса уменьшается угол наклона ватерлинии α к диаметральной плоскости, следовательно, уменьшается скорость, приведенная к линии взаимодействия, т. е. к нормали в точке контакта. Теоретически описать реальную картину ломки сплошного ледяного покрова, используя статическую теорию изгиба тонких упругих плавающих пластин, как это делалось в работах [80, 83] и др., невозможно. Это объясняется тем, что даже при учете перерезывающих сил линия излома пластины в соответствии с этой теорией должна располагаться достаточно далеко от точки приложения силы, т. е. от борта. Фактически ширина ледяного сегмента составляет всего две-три его толщины. Только размеры последнего сегмента при очень медленном движении судна более или менее соответствуют результатам статической теории изгиба тонких пластин на упругом основании гидравлического типа.

В натуральных условиях картина ломки значительно сложнее, поскольку разрушение происходит в результате совместного действия нескольких динамических процессов. Увеличение жесткости упругого основания в результате динамичности контакта борта судна со льдом вряд ли значительно: время контакта (удара) по данным тензометрических испытаний довольно велико (около 0,1—1,0 с). За это время упругое основание не может существенно увеличить свою жесткость.

Можно предложить следующую физическую трактовку наблюдаемого процесса ломки ледяного покрова. При контакте борта судна с кромкой льда происходит удар. В ледяном покрове образуется система кольцевых трещин, не обязательно сквозных. Эти трещины возникают там, где происходит суммирование поверхностных упругих волн (волн Рэлея) и отраженных от нижней поверхности льда продольных упругих волн, движущихся со скоростью c_l [37]. Отношение расстояния l между точками, где происходит интерференция волн (рис. 1.11), к толщине льда

$$\frac{l}{h} = \frac{2c_R}{c_l \sqrt{1 - \left(\frac{c_R}{c_l}\right)^2}}, \quad (1.34)$$

где c_R — скорость волн Рэлея во льду.

Если рассматривать лед как однородный изотропный упругий материал, то отношение l/h будет зависеть только от коэффициента Пуассона μ для льда [37]:

$$\frac{l}{h} = 2 \sqrt{\frac{(1 - 2\mu) \xi^2}{2(1 - \mu) - (1 - 2\mu) \xi^2}}, \quad (1.35)$$

где ξ — коэффициент, также зависящий от μ . Для $\mu = 1/3$ имеем $\xi \approx 0,94$ [37]. Значение l/h , рассчитанное по формулам (1.34) и (1.35), близко к единице ($\sim 1,1$). Сравнительно часто расположенные кольцевые трещины хорошо видны при движении судна в сплошном льду, лишенном снежного покрова.

Не каждая кольцевая трещина развивается в сквозную с образованием сегмента льда, отделенного от кромки и притопленного бортом судна. Это зависит от ряда факторов и главным образом от угла наклона борта судна к вертикали β в точке удара. Как будет показано ниже (см. подраздел 1.3.2), чем больше угол наклона борта к вертикали, тем меньше мо-

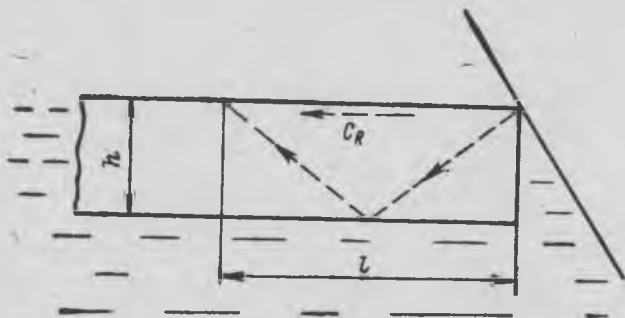


Рис. 1.11. Динамическая ломка льда в оконечностях судна.

жет быть отношение l/h , позволяющее не только обломить кромку льда, но и повернуть обломок на ребро и притопить.

Обычно минимальное значение отношения l/h находится в пределах 2—3, т. е. обламывание первого (ближнего к борту) ряда сегментов происходит по второй кольцевой трещине. Вследствие неоднородности ледяного покрова могут происходить обломы и по другим кольцевым трещинам. Часто при этом обломанный сегмент рассыпается на куски в соответствии с первичной сеткой трещин. При наличии снежного покрова, а также сильной разрушенности льда в результате таяния детали описанной картины могут измениться, однако общий характер ломки сплошного ледяного покрова сохраняется и в этих случаях.

1.3.2. КОНТАКТНЫЕ УСИЛИЯ ПРИ ЛОМКЕ

При движении в сплошных льдах борта судна входят в контакт со льдом, который в данном случае можно представить как полубесконечную плавающую ледяную плиту. Как упоминалось выше, контакт дискретен и носит динамический ударный характер. Его общая схема такова.

Сначала обминается кромка льда, обламываются выступы и т. п. (Деформация конструкции борта пренебрежимо мала по

сравнению с обмятием кромки и борт судна является абсолютно жесткой стенкой). По мере смятия кромки растет контактное давление, но в еще большей степени увеличивается суммарное контактное усилие. Судно теряет кинетическую энергию в направлении удара. Эта потеря равна работе суммарного контактного усилия на пути внедрения в лед. Если суммарное контактное усилие P достигает предельной нагрузки P_p , разрушающей данную ледяную пластину, то произойдет обламывание льда. Если в процессе удара $P < P_p$, то судно только сомнет кромку льда, не сломав его, и далее двигаться не сможет. Кинетическая энергия в направлении удара будет полностью погашена работой сил смятия.

Второй случай наиболее характерен для ледоколов, которые часто эксплуатируются в экстремальных ледовых условиях и работают набегами. Проекция относительной скорости на направление нормали к судовой поверхности в конце удара равна нулю $v_{1n} = 0$ [50, 52 и др.]. Значение контактного усилия P определялось из общего решения об ударе об отдельно плавающую льдину, причем масса льдины $M_2 \rightarrow \infty$. С помощью гидродинамической модели удара, представленной в работе [34], суммарное контактное усилие

$$P = 0,88 v_0^{7/12} M^{2/3} a_p^{2/3} (2R)^{1/6} F_p(x),$$

где a_p — параметр, характеризующий динамическую прочность кромки льда при смятии; F_p — так называемая функция формы [32], зависящая от обводов корпуса и относительной координаты точки удара x/L . В основном ее значения определяются двумя углами: наклона шпангоутов β и наклона ватерлинии α к ДП [31].

Транспортные суда, прочность бортовых конструкций которых существенно ниже прочности конструкций ледоколов, эксплуатируются в более легких условиях. Поэтому необходимо оценить прочность их корпуса при взаимодействии борта с ледяным покровом, сопровождающимся разрушением ледяной пластины. Удар и последующее разрушение можно описать, используя те же допущения, что были сделаны выше, но необходимо учесть, что скорость в направлении удара к моменту разрушения ледяного покрова не равна нулю. Будем полагать относительную скорость судна и льда в момент обламывания ледяного сегмента

$$v_{1n} = k v_n,$$

где v_n — проекция относительной скорости судна и льда на нормаль к борту в точке удара; k — численный коэффициент ($0 \leq k \leq 1$).

При $k=0$ имеем удар о неразрушаемый ледяной покров, рассмотренный еще в работе [52], при $k=1$ удара нет. Фактическое значение k зависит от отношения P/P_p . Ясно, что при

$P \leq P_p$ всегда $k=0$ и разрушения льда не происходит. Нетрудно показать, что при конечном значении коэффициента k выражение для ударного импульса s (1.31) принимает вид

$$s = \frac{M_1}{C_1} \frac{v(1-k)}{1 + \frac{M_1}{M_2} \frac{C_2'}{C_1'}}. \quad (1.36)$$

Кинетическая энергия судна, израсходованная в процессе удара,

$$\Delta T_{\text{кин}} = \frac{1}{2} \frac{M_1}{C_1'} \frac{v_n^2(1-k^2)}{1 + \frac{M_1}{C_1'} \frac{C_2'}{M_2}}. \quad (1.37)$$

Полученные выражения можно распространить и на случай вторичного (отраженного) удара.

Основная трудность состоит в определении значений k , для чего приходится делать ряд допущений. Прежде всего необходимо, как и раньше, пренебрегать податливостью ледяной пластины на изгиб вплоть до момента разрушения. Тогда контактное усилие можно найти из гидродинамической модели [34], как и в случае удара о неразрушаемое ледяное поле. Далее, как только суммарное контактное усилие достигнет величины P_p , разрушающей лед, удар мгновенно будет закончен. В этом случае значения максимальных контактных усилий P_{max} зависят от скорости судна v_0 , параметра динамической прочности льда a_p и других факторов. При непрерывном установившемся движении в сплошных льдах внедрение борта в лед происходит с постоянной скоростью $\dot{\xi} = vl$ до тех пор, пока суммарное контактное усилие не станет равным предельному усилию P_p , разрушающему ледяную пластину. Полагая разрушение происходящим в результате изгиба, приближенно получим

$$P_p = P \sin \beta = a_1 \sigma_p h^2, \quad (1.38)$$

где a_1 — коэффициент пропорциональности.

Для практических оценок этого достаточно. Однако для более точного анализа ценность формулы (1.38) ограничена. Дело в том, что разрушение льда, как и всякого другого хрупкого материала, зависит от коэффициента интенсивности напряжений [85]

$$K = \sqrt{ER}, \quad (1.39)$$

где E — модуль упругости льда; R — трещиностойкость (вязкость разрушения) льда.

В формуле (1.38) следовало бы учесть особенности хрупкого разрушения льда, однако для этого пока нет необходимых теоретических и экспериментальных данных. Коэффициент a_1

находят применительно к каждой конкретной задаче. Формула (1.38) раскрывает функциональную зависимость (1.32). Для второй зависимости (1.33) имеем

$$v = v_0 \left(1 - \frac{h}{h_{\text{пр}}} \right), \quad (1.40)$$

где v_0 — скорость движения на чистой воде; $h_{\text{пр}}$ — предельная толщина льда, преодолеваемого судном.

Исключив из формул (1.38) и (1.40) толщину льда h , получим

$$P_p = \alpha_1 \sigma_p h_{\text{пр}}^2 \left(1 - \frac{v}{v_0} \right)^2. \quad (1.41)$$

При $v = 0$ имеем $P_p = P_{\text{пр}} = \alpha_1 \sigma_p h_{\text{пр}}^2$. От прочности льда σ_p усилие P_p зависит линейно.

Для расчетов прочности, помимо контактного усилия, необходимо знать размеры зоны контакта борта со льдом. В данном случае их можно определить, воспользовавшись выражением для контактного давления p , полученного из гидродинамической модели удара о лед [34]:

$$p = (v l)^{1/4} a_p^{1/2} b^{1/2} (1 - \bar{x}^2)^{1/4}, \quad (1.42)$$

где b — половина высоты зоны контакта; $\bar{x} = x/b$ — безразмерная координата по высоте зоны контакта.

Суммарное контактное усилие P вычислим, проинтегрировав выражение (1.42) по всей площади зоны контакта F . При ударе наклонного борта о кромку льда округлой формы зона контакта имеет вид сильно вытянутого в длину параболического сегмента. Если его высота равна $2b_0$, то для половины длины

$$a \approx 2 \sqrt{R_0 b_0 \cos \beta},$$

где R_0 — радиус кромки.

В результате интегрирования

$$P = (v l)^{1/4} a_p^{1/4} I_1 \frac{16}{3} b_0 \sqrt{R_0 b_0 \cos \beta},$$

где

$$I_1 = \int_0^1 (1 - x^2)^{1/4} dx.$$

Используя это выражение и формулу (1.38), получим следующую зависимость для полуширины зоны контакта:

$$b_0 = \frac{3}{16 I_1} \left(\frac{\alpha_1 \sigma_p h^2}{(v l)^{1/4} a_p^{1/4} \sin \beta \sqrt{R_0 \cos \beta}} \right)^{2/3}. \quad (1.43)$$

Из формулы (1.43) видно, что b_0 существенно зависит от толщины и прочности льда и очень незначительно от скорости движения судна и формы кромки. Полученные формулы

справедливы для судов с наклонным бортом, причем угол наклона должен составлять не менее $6-8^\circ$. Для судов с прямостенным вертикальным бортом или близким к нему картина ломки существенно меняется, и формула (1.38) уже не будет справедлива.

1.3.3. ПРИТАПЛИВАНИЕ И ПОВОРАЧИВАНИЕ ОБЛОМКОВ ЛЬДА

Как уже говорилось, сплошной лед обламывается бортом судна в форме сегментов (см. рис. 1.10). Эти обломки, отделенные от основного массива сквозными трещинами, при продвижении судна скользят вдоль борта, поворачиваются на ребро и притапливаются. В начальной, наиболее стесненной фазе поворачивания сегмент льда одной кромкой скользит вниз по поверхности борта, вращаясь вокруг нижней точки трещины (точка O на рис. 1.12), которая практически остается непод-

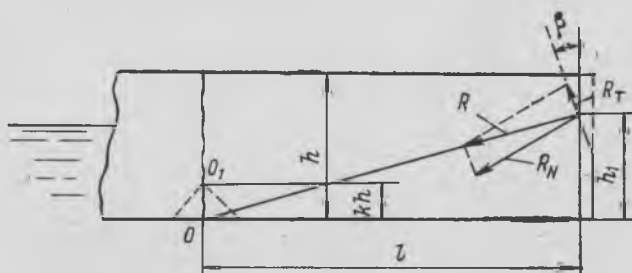


Рис. 1.12. К расчету усилия поворачивания обломка льда.

вижной. Для описания кинематики переворачивания в точке O можно поставить фиктивную свободную несмещаемую опору (шарнир). Это предположение подтверждается экспериментами, проведенными на гидротехнических сооружениях, в том числе при наплзании ледяного поля на отдельно стоящую коническую опору или наклонную стенку.

Для оценки усилий, необходимых для поворота льдины на ребро, рассмотрим плоский случай, когда сквозная трещина параллельна борту. Обламывается призматическая балка-полоска. Упрощенная схема действия сил на обломок приведена на рис. 1.12. Силой тяжести обломка, а также силами плавучести пренебрегаем как малыми по сравнению с величиной контактных усилий. Это позволяет исключить силы тяжести из уравнений равновесия. Для больших обломков такое допущение вряд ли справедливо, но большие обломки не переворачиваются.

Обломок льдины имеет виртуальное перемещение вниз по борту, следовательно, сила трения $R_T = f_{\text{тр}} R_N$ направлена вверх. (Здесь $f_{\text{тр}}$ — коэффициент трения льда об обшивку

борта). Вертикальная составляющая суммарной контактной силы, включая силу трения,

$$N = R_N (\sin \beta - f_{\text{тр}} \cos \beta). \quad (1.44)$$

Горизонтальная составляющая

$$T = R_N (\cos \beta + f_{\text{тр}} \sin \beta). \quad (1.45)$$

Момент относительно опоры в точке O

$$M_0 = R_N [l (\sin \beta - f_{\text{тр}} \cos \beta) - h' (\cos \beta + f_{\text{тр}} \sin \beta)]. \quad (1.46)$$

В предельном состоянии M_0 должно быть равно нулю, т. е. линия действия равнодействующей R должна проходить через

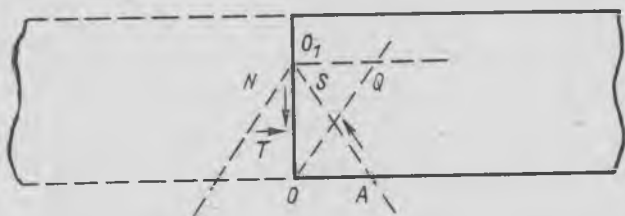


Рис. 1.13. К расчету усилий скалывания нижней кромки льда.

точку поворота O . Отсюда для предельного угла наклона борта β_0 получим выражение

$$\operatorname{tg} \beta_0 = \frac{1 + f_{\text{тр}} \frac{l}{h'}}{\frac{l}{h'} - f_{\text{тр}}}. \quad (1.47)$$

Знаменатель этого выражения не может быть нулем, так как величина l/h' во всяком случае больше единицы, а коэффициент трения $f_{\text{тр}} \approx 0,10 \div 0,15$.

Если линия действия силы R проходит выше точки O , то обломок повернуться не может. Положение изменится, когда сила R возрастет настолько, что произойдет скалывание нижней грани льда (см. пунктир на рис. 1.12). Тогда обломок льда будет поворачиваться уже вокруг точки O_1 и для предельного угла наклона β_k получим следующее выражение:

$$\operatorname{tg} \beta_k = \frac{1 + f_{\text{тр}} \frac{l}{h' - kh}}{\frac{l}{h' - kh} - f_{\text{тр}}}. \quad (1.48)$$

При скалывании нижней грани льда предельный угол наклона борта уменьшается, т. е. $\beta_k \leq \beta_0$ при $k \geq 0$. В табл. 1.1 приведены значения углов β_k , вычисленные по формуле (1.48)

для двух значений коэффициента трения льда о борт судна $f_{\text{тр}}=0,10$ и $f_{\text{тр}}=0,15$ [59]. Значения отношения l/h принимаются близкими к наблюдаемым в натуре. Значение h' , строго говоря, можно определить точно из условия смятия кромки, хотя принятое в таблице значение $h'=0,9h$ является хорошим приближением.

Таблица 1.1

Предельные значения угла наклона борта β_k

Значения l/h	Значения β_k					
	при $f_{\text{тр}}=0,10$			при $f_{\text{тр}}=0,15$		
	$k=0$	$k=0,10$	$k=0,20$	$k=0$	$k=0,10$	$k=0,20$
1,0	36°40'	33°48'	30°40'	39°28'	36°30'	33°31'
2,0	29 54	27 30	25 05	32 42	30 22	27 47
2,5	25 30	23 22	21 25	28 18	26 14	24 11
3,0	22 24	20 44	18 51	25 16	23 22	21 39
3,5	20 00	18 37	17 04	22 55	21 25	19 52

Можно поставить задачу несколько по-другому, а именно: определить относительные размеры поворачиваемого обломка при заданном угле наклона борта β . По формуле (1.48)

$$\frac{l}{h} = \frac{1 + f_{\text{тр}} \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta - f_{\text{тр}}} \left(\frac{h'}{h} - k \right). \quad (1.49)$$

Ясно, что при угле наклона борта β , равном углу трения, никакого проскальзывания с поворачиванием не будет, если, разумеется, $h'/h \neq k$. При углах наклона борта $\beta = \operatorname{arctg} f_{\text{тр}}$ происходит изменение процесса ломки: если $\beta > \operatorname{arctg} f_{\text{тр}}$, то обламываются малые секторы; если $\beta < \operatorname{arctg} f_{\text{тр}}$, то обламывается большой сектор. Зачастую такой сектор после обламывания рассыпается по первичным кольцевым трещинам. Значения углов β_k , приведенные в табл. 1.1, позволяют получить количественные характеристики для оценки ледокольных качеств каждого конкретного судна.

Неизвестный коэффициент k , входящий в формулы (1.48) и (1.49), можно в первом приближении найти из условия скалывания нижнего угла кромки льда (см. рис. 1.13). Будем считать, что скалывание происходит по плоскости, наклоненной под углом 45° к поверхности трещины. Лед разрушается в результате действия касательных напряжений τ , которые считаются равномерно распределенными по линии AO_1 :

$$S = \tau k h \sqrt{2}.$$

Из уравнения моментов относительно точки O получим

$$S = \frac{R_N}{\sqrt{2}} (\cos \beta + f_{\text{тр}} \sin \beta).$$

Скалывание произойдет, когда касательные напряжения будут равны предельным $\tau = \tau_p$. Тогда

$$R_N = \frac{2\tau_p kh}{\cos \beta + f_{\text{тр}} \sin \beta}. \quad (1.50)$$

Для судна с прямостенными вертикальными бортами при $\beta = 0$

$$R_N = 2\tau_p kh.$$

В этом случае лед должен скалываться под углом 45° к вертикали, а этого в натуральных условиях не наблюдается. Поэтому формулу (1.50) не следует использовать при малых углах β . Подставим в формулу (1.50) выражение для kh , которое можно получить из формулы (1.49):

$$R_N = 2\tau_p h \varphi_1(\beta, f_{\text{тр}}, l/h), \quad (1.51)$$

где

$$\varphi_1 = \left(\frac{l}{h} \frac{f_{\text{тр}} - \operatorname{tg} \beta}{1 + f_{\text{тр}} \operatorname{tg} \beta} + \frac{h'}{h} \right) \frac{1}{\cos \beta + f_{\text{тр}} \sin \beta}. \quad (1.52)$$

Значения вспомогательной функции φ_1 приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Значения вспомогательной функции φ_1 при $h' = 0,9h$

Значения l/h	Значения φ_1							
	при $f_{\text{тр}} = 0,10$				при $f_{\text{тр}} = 0,15$			
	20°	25°	30°	35°	20°	25°	30°	35°
1,5	0,523	0,395	0,245	0,068	0,606	0,460	0,315	0,144
2,0	0,391	0,211	—	—	0,497	0,305	0,100	—
2,5	0,257	0,026	—	—	0,392	0,150	—	—
3,0	0,123	—	—	—	0,285	—	—	—
3,5	—	—	—	—	0,143	—	—	—

По формуле (1.51) вычислим значения контактного усилия R_N , при котором начинается поворачивание льдины для заданного угла наклона борта β . Из формул (1.47) и (1.51) следует, что при $\beta = \beta_0$ начальное контактное усилие равно нулю, как

и следовало ожидать. Если угол наклона борта β равен углу трения $\beta_{\text{тр}} = \text{arctg } f_{\text{тр}}$, то

$$R_N = \frac{2\tau_p h'}{\sqrt{1 + f_{\text{тр}}^2}}. \quad (1.53)$$

Таким образом, при $\beta > \beta_0$ сопротивление поворачиванию льдины на ребро обусловлено только работой по преодолению сил тяжести и плавучести. При меньших значениях β необходимо приложить некоторое усилие, скалывающее нижние кромки трещины в ледяной пластине. Величина этого усилия быстро растет с уменьшением наклона борта. При угле наклона, равном углу трения, оно определяется по формуле (1.53). При малых углах наклона борта резко меняется характер ломки ледяного покрова, поскольку существенно возрастают горизонтальные составляющие контактных усилий, а перемещение льдин вниз или вверх по борту затруднено.

При движении судна в тяжелой ледовой обстановке слой притопленных льдин облегает борта судна симметрично, как правило, без разрывов и складок. Это установлено при визуальных наблюдениях в опытовом бассейне и в натурных условиях (с помощью подводного телевидения и аквалангистов). Граница зоны облегания определяется положением линии отрыва льда от корпуса, которая зависит от скорости судна. Положение нижней границы этой зоны определяется шириной судна, формой его обводов и толщиной льда.

Количественные оценки усилий, расходуемых судном на притапливание обломков льда, проводились либо энергетическим методом, либо аналитически с помощью некоторой условной физической модели [30, 80]. Вряд ли следует пытаться очень точно определять значение этой составляющей сил ледового сопротивления. При медленном движении во льдах предельной толщины основное сопротивление движению судна оказывают ломка и поворачивание льдин. При больших скоростях в тонких льдах преобладают динамические составляющие, зависящие от скорости движения судна. Судя по всему, на притапливание расходуется не более 10 % тяги, что вполне соизмеримо с естественным случайным разбросом значений силы ледового сопротивления.

1.3.4. ТРЕНИЕ КОРПУСА О ЛЕД

Наблюдения показывают, что силы трения корпуса о лед могут достигать больших значений. Часто именно они являются причиной остановки движения судна. Уже Р. И. Рунеберг [57] в своей формуле для оценки ледокольной способности судна при непрерывном движении в сплошных льдах учитывает коэффициент трения льда о корпус. Подобные выражения использовали Милано [99] и Уайт [105]. Силы трения при работе

ледокола набегами учтены и в работе [8]. В полуэмпирических выражениях для расчета силы ледового сопротивления, выраженной через отдельные составляющие, влияние сил трения, как правило, не определяется. Сопротивление трения здесь входит в неявном виде в компоненту, учитывающую силы тяжести [30]. При этом приходится вводить поправки на заснеженность, разрушенность и торосистость ледяного покрова, основываясь на данных натурных испытаний.

В методике расчета М. С. Яковлева [82], разработанной для речных ледоколов, сопротивление трения льда о корпус выделяется в качестве отдельной составляющей силы ледового сопротивления. Следует отметить, что это оказалось необходимым, поскольку испытания моделей проводились в парафиновых пластинках и сопротивление трения не моделировалось из-за значительного различия коэффициентов трения парафина и льда. Для пересчета на натуру в этом случае необходимо получить аналитическую зависимость, связывающую сопротивление трения с коэффициентом трения льда о корпус. Такая зависимость для пересчета сопротивления трения льда при различных значениях коэффициента трения $f_{\text{тр}}$ приведена в работе [30]. М. С. Яковлев предположил, что ледяной покров прилипает к борту непрерывно на всем протяжении носовой оконечности, а ледяную пластину рассматривал как балку-полоску. Действительности больше соответствует «трехточечная» схема ломки, подробно рассмотренная в работе [75]. Она предполагает дискретный контакт борта со льдом — одновременно в контакте со льдом находятся форштевень и по одной точке с каждого борта. Сила «прямого» ледового сопротивления

$$R_{\text{прям}} = 1,04 \tau_p h^2 k_f(x), \quad (1.54)$$

где

$$k_f(x) = \frac{l + f_{\text{тр}} \cos \alpha}{\sin \beta'} + \frac{\pi - \alpha_0}{\pi} (\operatorname{tg} \varphi + f'_{\text{тр}}) \quad (1.55)$$

— безразмерный коэффициент, характеризующий форму обводов корпуса судна, а приведенный коэффициент трения у форштевня

$$f'_{\text{тр}} = f_{\text{тр}} \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \varphi}{\operatorname{tg}^2 \alpha_0}}, \quad (1.56)$$

где α_0 — угол входа носовой ветви действующей ватерлинии; φ — угол наклона форштевня к горизонту; β' — угол наклона борта к вертикали в точке контакта с координатой x .

Численные оценки, полученные по этим формулам, показали, что если силы трения не учитывать, то силы ледового сопротивления будут меньше на 15—20 %. При этом уменьшение тем больше, чем ближе точка контакта к цилиндрической вставке в средней части судна.

Из анализа формулы (1.54) следует, что значительная доля общей силы сопротивления трения (до 30—40 %) приходится на район форштевня, прорезающий лед. Фрикционное усилие здесь в основном зависит от формы самого штевня и прилегающего участка борта, характеризующихся углами φ и α_0 . Обычно при исследовании этой задачи кривизной штевня и борта в этом районе пренебрегают, т. е. считают оба борта у форштевня плоскими. Такое допущение в совокупности с принимаемым простейшим законом трения Амонтона—Кулона

$$F_{\text{тр}} = f_{\text{тр}} N,$$

где $F_{\text{тр}}$ — сила трения; N — реакция, нормальная к борту; позволяет однозначно определить условия равновесия носовой оконечности судна. Силу трения следует направлять в сторону, противоположную виртуальной скорости смещения штевня.

Статическое равновесие судна при наклонном форштевне, прорезавшем лед на полную толщину, под действием горизонтальных усилий H и вертикальных сил V рассматривалось Скэртоном [101]. В этой работе были приняты несколько завышенные значения динамического ($f_h = 0,1 \div 0,2$) и статического ($f_s = 0,4 \div 0,6$) коэффициентов трения стального корпуса о лед. Был найден параметр D , определяемый геометрией штевня, при которой в зависимости от коэффициента трения судно будет либо «вылезать» на лед, либо остановлено силами трения:

$$D = \sin \varphi \cos \beta + f_{\text{тр}} (\sin \psi_s \sin \varphi \sin \beta + \cos \psi_s \cos \varphi) > 0, \quad (1.57)$$

где β — угол между нормалью к борту у штевня и диаметральной плоскостью; ψ_s — угол, характеризующий направление сил трения.

При выполнении неравенства (1.57) судно не будет закалываться в лед. Если знак неравенства меняется при замене динамического трения на статическое, то при остановке судна дальнейшее его перемещение будет приостановлено силами статического трения. Это хорошо известно судоводителям, которые при работе в тяжелых ледовых условиях стремятся не допустить остановки судна. Эффективность работы виброустановок или виброприставок также во многом связана с переходом от статического трения к динамическому и облегчению вползания корпуса на лед (см. подробнее в работе [37]).

В 1961 г. была рассмотрена аналогичная, но более сложная динамическая задача об ударе форштевнем о лед [69]. При этом учитывались силы инерции судна и присоединенных масс воды. Автору удалось получить аналитические выражения для определения контактных усилий, а также для приведенного коэффициента трения $f_{\text{тр}}$. Незвестная глубина прорезания ледяного покрова штевнем определялась в процессе расчета.

Из формулы (1.56) следует, что при уменьшении угла входа ватерлинии α_0 значение приведенного коэффициента трения су-

существенно возрастает. Соответственно растет сила ледового сопротивления.

Трение средней части корпуса играет существенную роль при движении судна в сплошных льдах, при ледовых сжатиях и при заклинивании корпуса во льдах. Вопрос о влиянии трения средней части корпуса судна при различных случаях заклинивания во льдах рассмотрен в работе [40]. Почти все практические меры по освобождению судна, заклинившегося во льду, сводятся к переводу статического трения в динамическое. При этом исходят из того, что динамический коэффициент трения в два-три раза, а по некоторым данным, даже на порядок меньше статического ($f_k \ll f_s$) [35, 60]. Для перевода статического трения в динамическое трение на практике производят взрывы льда, используют виброустановки либо креновые или дифференциальные системы и т. п.

Трение средней части корпуса судна о лед при ледовых сжатиях может послужить причиной остановки его движения. Действительно, даже при сравнительно умеренных сжатиях ($q = 5-10$ тс/м) сила трения для судна длиной $L = 120$ м

$$R_{\text{тр}} = 2qkLf_{\text{тр}} \approx 120 \text{ тс},$$

(здесь $q = 10$ тс/м, $k = 0,5$ и $f_{\text{тр}} = 0,1$), т. е. примерно в два раза превосходит тягу винта современных транспортных судов категории УЛА. При очень сильных сжатиях вследствие сил трения может остановиться даже мощный ледокол. Картина, похожая на имеющую место при сжатиях, наблюдается при движении сравнительно широкого судна в канале, забитом льдом. В этом случае возникают усилия распора, вызванные льдинами, попадающими между бортом судна и стенками канала. Подобные ситуации в процессе эксплуатации возникают довольно часто, именно поэтому конструкторы стремятся уменьшить величину усилий трений между бортом и льдом за счет применения новых материалов, специальных покрытий, систем гидро- и пневмообмыва и т. п. К сожалению, все эти средства пока малоэффективны. Это и неудивительно — сила трения, противодействующая движению, достигает значительной величины.

§ 1.4. ЛЕДОВЫЕ СЖАТИЯ СУДОВ

1.4.1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЛЕДОВЫХ СЖАТИЙ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

При дрейфе сплоченных льдов в ледяном покрове возникают внутренние усилия, приводящие к подвижкам и сжатию льдов. Ледовые сжатия препятствуют судоходству. Даже сравнительно слабые сжатия существенно уменьшают скорость движения судов. Очевидно, что корпус судна должен им противостоять.

Поэтому очень важно уметь предвычислять время и место ледовых сжатий, а также оценивать их интенсивность. Прогноз

ледовых сжатий в том или ином виде абсолютно необходим для обеспечения оперативного планирования движения судов во льдах. Зная нагрузки, действующие на корпусные конструкции судов, можно определить прочность корпуса, т. е. рассчитать его конструкцию, затраты металла и т. п. Имеет практический интерес также обратная задача, т. е. определение значения допустимого сжатия для конкретного судна, что фактически означает оценку условий его эксплуатации во льдах.

Сжатия подразделяют на термические и механические. К механическим сжатиям относятся ветровые, приливные и т. п. Наибольший интерес для судоходства представляют механические сжатия, вызванные движением льдов. Рассмотрим основные закономерности их возникновения и развития.

Если поле скоростей дрейфа v_i неоднородно, то тензор-градиент скоростей $d_j v_i$ отличен от нуля. При этом ледяной покров деформируется и возникают усилия взаимодействия между льдинами — внутренние напряжения σ_{ij} . Для расчета ледовых сжатий в первую очередь необходимо установить движение (дрейф) льдов. Оно обусловлено системой сил, действующих на лед, и граничными условиями, зависящими главным образом от морфологии водоема. В общем виде

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} + m\vec{\Omega} \times \vec{v} = \vec{t} + \vec{f}, \quad (1.58)$$

где первый член выражает адвективную и локальную составляющие силы инерции массы льда; второй — силу Кориолиса; m — поверхностная плотность льда; $\vec{t}$ — внутренние силы, действующие в ледяном покрове; $\vec{\Omega}$ — вектор удвоенной угловой скорости вращения Земли; $\vec{f}$ — внешние силы.

К внешним силам относятся касательные усилия со стороны ветра и воды τ_a и τ_w , а также усилия, вызванные изменениями уровня моря ξ и давления p , пропорциональные $\text{grad} \xi$ или $\text{grad} p$. К внутренним силам относятся напряжение сжатия, касательные усилия при сдвиге льдин друг относительно друга, а также усилия, связанные с рассеянием энергии в процессе выравнивания скоростей по типу сухого или вязкого трения.

Наблюдения показывают, что механические сжатия относятся к числу сравнительно непродолжительных аperiодических процессов, протекающих в течение примерно нескольких часов (10^3 — 10^4 с). Сжатия продолжительностью свыше суток (10^5 с) возникают реже. Поэтому задача расчета сжатия представляется чисто механической. В работах [74, 77 и др.] эта задача

сводится к определению перемещений u или скорости $\vec{v}$, т. е. «течения» льдов, внутренних усилий t и поверхностной плотности m как функций пространственных координат и времени. Для этого используется простейшая схематизация: ледяной по-

кров рассматривается как плоский однородный изотропный сплошной слой. Под действием внешних сил $\vec{f}$ в нем реализуется плоское напряженное состояние, поскольку вертикальные компоненты напряжений, действующих во льду, малы по сравнению с горизонтальными, а деформации однородны по толщине льда. Заметим, что деформация в направлении оси z , перпендикулярной к ледяному покрову, не обязательно равна нулю. Она соответствует увеличению средней толщины льда при изменении его сплоченности и торошения.

Внутренние напряжения в ледяном покрове определяются тензором напряжений σ_{ij} (под σ_{ij} понимаются осредненные по толщине ледяного покрова h компоненты напряжения). Это соответствует так называемому обобщенному плоскому напряженному состоянию, описание которого относится к числу двумерных задач. Тензор напряжений здесь плоский, а вектор перемещений $\vec{u}$ двумерный. Тензор σ_{ij} будет симметричным, если пренебречь внутренним моментом количества движения в ледяном покрове. Это справедливо для сплоченных льдов, где вращение льдин мало.

Если компоненты тензора напряжений известны, то в каждой точке ледяного покрова можно провести два главных направления, вдоль которых действуют главные напряжения σ_1 и σ_2 . Одно из них является наибольшим, а другое — наименьшим. Касательные напряжения в этих направлениях отсутствуют.

Рассмотрим плоскость главных напряжений (σ_1, σ_2) (рис. 1.14). Прямой $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$, проходящей через точку O и называемой гидростатической осью (прямая $I-I$), соответствует напряженное состояние гидростатического давления

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2}. \quad (1.59)$$

Сумма нормальных напряжений ($\sigma_{xx} + \sigma_{yy}$) не зависит от выбора осей и является первым инвариантом тензора напряжений $I_1(\sigma)$.

Прямая $\sigma_1 = -\sigma_2$ соответствует чистому сдвигу ($II-II$). Здесь $\sigma = 0$. Пусть положительные значения напряжений на

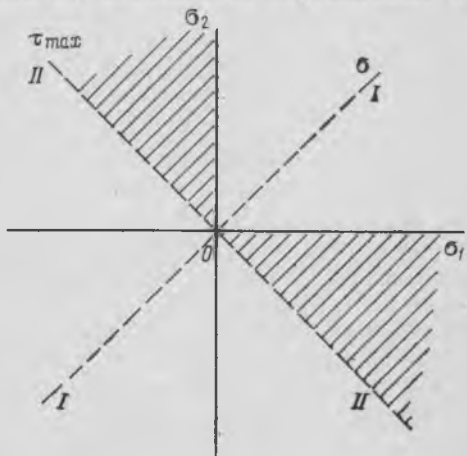


Рис. 1.14. Плоскость главных напряжений при ледовом сжатии.

рис. 1.14 соответствуют сжатию льда, а отрицательные — растяжению. Вследствие дискретности строения ледяной покров не может воспринимать растягивающие напряжения. Поэтому все напряженные состояния, лежащие левее прямой $II-II$, не реализуются (в этой зоне $\sigma < 0$).

Полуплоскость $\sigma > 0$ можно разбить на три характерные зоны. В одной $\sigma_1\sigma_2 > 0$, в двух других $\sigma_1\sigma_2 < 0$. Здесь главные напряжения имеют разные знаки, а напряженное состояние характеризуется наложением гидростатического давления σ и чистого сдвига $\tau_{\max}$. Максимальные касательные напряжения действуют по площадкам, нормальным к плоскости (x, y) , т. е. в ледяном покрове, и делящим пополам угол между главными осями. На плоскости (x, y) можно выделить два ортогональных семейства линий скольжения, касательными к которым являются направления максимальных напряжений сдвига $\tau_{\max}$.

В области, где σ_1 и σ_2 имеют одинаковые знаки, например $\sigma_1 > \sigma_2 > 0$, максимальное касательное напряжение

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1}{2}.$$

Оно действует по площадкам, параллельным оси σ_2 , наклоненным под углом 45° к поверхности льда.

Таким образом, при одном и том же уровне максимальных сжимающих напряжений касательные напряжения в данном случае меньше. Кроме того, они действуют не вдоль линий наименьшего сопротивления, как в случае $\sigma_1\sigma_2 < 0$.

Понятно, что подвижность льдов в случае напряженного состояния, соответствующего области, заштрихованной на рис. 1.14, значительно больше, нежели для области $\sigma_1\sigma_2 > 0$. Здесь происходят значительные сдвиги, а изменение средней толщины льда, вызванное образованием торосов, мало. В районах, где $\sigma_1\sigma_2 > 0$, имеют место всесторонние сжатия и наблюдается интенсивное торошение.

1.4.2. ДЕФОРМАЦИЯ ЛЬДА И ТОРОШЕНИЕ ПРИ СЖАТИИ

Деформирование ледяного покрова обусловливается двумя самостоятельными механизмами — деформациями самих льдин и ледяных полей, а также взаимным смещением отдельных льдин или их блоков. Эти процессы протекают одновременно и накладываются друг на друга лишь во льдах достаточно большой сплоченности ($N \approx 1$). Взаимные смещения характерны для дрейфующих битых льдов сравнительно небольшой сплоченности. По мере увеличения сплоченности ($N \rightarrow 1$) взаимная подвижность льдин уменьшается на несколько порядков.

В зависимости от направления различают *деформации сдвига*, связанные с касательными напряжениями τ в ледяном покрове, и *линейные деформации сжатия* ϵ_x, ϵ_y , связанные главным образом с нормальными напряжениями σ . Деформиру-

вание сплошных и сплоченных льдов возможно лишь, если льдины сами так или иначе деформируются. Не следует путать деформации дрейфующих льдов с деформациями льда как материала, например, со сжатием сплошной ледяной пластины. Первые неизмеримо больше упругих и даже неупругих деформаций льда как материала и вызваны его разрушением, т. е. практически необратимы. В конечном итоге, они определяются геометрической структурой ледяного покрова, его толщиной h и прочностью.

Деформирование ледяного покрова сопровождается торошением льдов, поскольку его разрушение происходит не сразу по всей площади, а вдоль некоторой системы линий, как правило, совпадающих с границами более прочных включений и блоков. Возникающие при этом нагромождения льда — торосы и гряды торосов — достигают иногда значительных размеров и могут покрывать значительные по площади участки поверхности моря.

Торосы хорошо заметны при визуальном наблюдении. В зависимости от типа деформации различают сравнительно *небольшие торосы сдвигового происхождения*, состоящие из мелкораздробленного и тертого льда, а также *мощные нагромождения*, возникающие при наплывании льдин друг на друга. В сравнительно тонких льдах образуются *подсовы*. В районах моря малой глубины подошва тороса при интенсивном торосообразовании может достигать грунта. Такие торосы, сидящие на мели, встречаются в различных областях окраинных морей. Все виды торосов препятствуют мореплаванию.

Исследования процессов торошения и морфологии самих торосов проводятся уже давно. В работе [17] отмечается доминирующая роль сил сжатия в процессе торошения. Свежий торос, состоящий из обломков льда, не успевших смерзнуться, должен быть уравновешен по вертикали (изостатическое равновесие) и в горизонтальном направлении.

При теоретическом анализе торосы аппроксимируют обычно призмами. Условие изостатического равновесия для гряды торосов треугольной формы записывается так:

$$\left(\frac{B_{\text{над}}}{B_{\text{над}}} \right)^2 = \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{л}}} \frac{\psi_{\text{над}} \operatorname{tg} \theta_{\text{над}}}{\psi_{\text{под}} \operatorname{tg} \theta_{\text{под}}}, \quad (1.60)$$

где $B_{\text{над}}$, $B_{\text{под}}$ — ширина надводной и подводной частей тороса соответственно; $\psi_{\text{над}}$, $\psi_{\text{под}}$ — коэффициенты заполнения; $\theta_{\text{над}}$, $\theta_{\text{под}}$ — углы естественного ската.

Отношение потенциальной энергии надводной части тороса к потенциальной энергии его подводной части составляет

$$\frac{U_{\text{над}}}{U_{\text{под}}} = \frac{B_{\text{над}} \operatorname{tg} \theta_{\text{над}}}{B_{\text{под}} \operatorname{tg} \theta_{\text{под}}}. \quad (1.61)$$

При подстановке реальных значений B и θ получим, что на образование подводной части тороса расходуется в два-три раза больше энергии, чем для образования его надводной части.

Условие равновесия в горизонтальном направлении записывается из предположения об уравниваемости сил внутреннего распора (рис. 1.15) в торосе внешними силами сжатия P_c . Если горизонтальные сжимающие усилия отсутствуют, то под тяжестью средней части тороса (призма $ABCD$ на рис. 1.15) ледяной покров разойдется в разные стороны, а средняя часть обрушится. Если сплошность нарушена всюду по прямой EF , то вся надводная часть тороса обрушится.

Призма $ABCD$ рассматривается в состоянии предельного равновесия, причем ее полагают как бы затвердевшим клином с плоскими сторонами — плоскостями обрушения AB и AD (см.

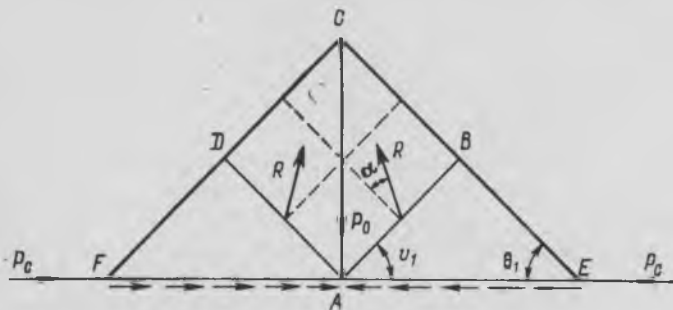


Рис. 1.15. К выводу условия равновесия тороса при действии распора и усилий ледового сжатия.

рис. 1.15). Реакции R на этих плоскостях уравнивают силу P_0 , равную силе тяжести призмы:

$$R = \frac{P_0}{2} \frac{1}{\cos(\vartheta_{\text{над}} - \alpha_{\text{над}})}, \quad (1.62)$$

где $\vartheta_{\text{над}}$ — угол обрушения; $\alpha_{\text{над}}$ — угол внутреннего трения в торосе.

Сила тяжести (вес) призмы

$$P_0 = \rho_l g \psi_{\text{над}} \frac{H_{\text{над}}}{\lg \vartheta_{\text{над}} + \lg \theta_{\text{над}}}. \quad (1.63)$$

Тогда горизонтальная компонента реакции R , т. е. для силы распора, действующей в торосе,

$$P_c = \frac{\rho_l g \psi_{\text{над}} H_{\text{над}}}{2} \frac{\lg(\vartheta_{\text{над}} - \alpha_{\text{над}})}{\lg \vartheta_{\text{над}} + \lg \theta_{\text{над}}}. \quad (1.64)$$

Обычно $\vartheta > \theta > \alpha$. Формулу (1.64) можно записать следующим образом:

$$P_c = \rho_l g \psi_{\text{над}} H_{\text{над}}^2 k_r, \quad (1.65)$$

где k_r — коэффициент, изменяющийся от нуля при $\vartheta_{\text{над}} = \alpha_{\text{над}}$ до некоторого максимального значения, если внутреннее тре-

ние отсутствует совсем ($\alpha_{\text{над}}=0$). При $\vartheta_{\text{над}}=\theta_{\text{над}}$, как это обычно принимают, $k_T=0,25$. Случай $\vartheta_{\text{над}}=\alpha_{\text{над}}$ возможен, когда торос начинает смерзаться и силы сцепления, действующие между отдельными кусками льда, увеличивают эффективное значение внутреннего трения.

Таким образом, при смерзании, начиная с некоторого момента, торос будет устойчивым и при отсутствии сжимающих внешних сил. Несмерзающийся торос устойчив лишь при действии усилий сжатия. При этом высота его надводной части $H_{\text{над}}$ ограничена, и отношение $H_{\text{над}}/h$ заключено в пределах 1,5—6,0.

Сходная картина наблюдается при воздействии обломков льда (ледяной каши) на гидротехнические сооружения и при сжатии судов в ледяной каше. При этом вертикальный или наклонный борт судна можно уподобить твердой стенке, а лед — сыпучему грунту. По существу, формулу (1.64) можно использовать в этом случае практически без изменений. Как показывают численные оценки, величина усилий сжатия в ледяной каше с торошением обломков у борта может достигать десятка тонн на погонный метр. Она достаточна для замедления или остановки движения судна, но, как правило, безопасна для прочности бортовых конструкций.

1.4.3. ДЕЙСТВИЕ ЛЬДА НА КОРПУС СУДНА ПРИ СЖАТИИ

Характер воздействия льда на корпус судна при сжатии зависит от вида напряженного состояния ледяного покрова, т. е. от соотношения между главными напряжениями σ_1 и σ_2 . В соответствии с принципами статики судно, попавшее в сжатие, разворачивается так, чтобы действие усилий сжатия на него было минимальным (рис. 1.16).

При всестороннем сжатии, когда главные сжимающие напряжения равны ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma$), касательные напряжения $\tau_{\text{max}}=0$, а шаровые $p=(\sigma_1+\sigma_2)/2=\sigma$ максимальны, любое положение судна статически уравновешено. При несимметричном напряженном состоянии, например при одноосном сжатии ($\sigma_1=p$; $\sigma_2=0$), судно будет стремиться развернуться так, чтобы его диаметральной плоскостью была направлена вдоль линии действия максимальных напряжений сдвига τ_{max} (см. рис. 1.14). По нормали к борту здесь действует усилие сжатия, равное $p/2$. При главных напряжениях разного знака усилие сжатия, нормальное к борту, будет убывать. Следовательно, при всестороннем сжатии судно неподвижно относительно льда и дрейфует вместе с ним. Усилия сжатия, нормальные к борту, максимальны. В начальный момент происходит обламывание и обминание неровностей кромки льда и ледяной покров плотно прилегает к корпусу судна практически по всей его длине. При дальнейшем усилении сжатия льдины будут давить на корпус

судна, начнется интенсивное торшение и нагромождение обломков льда у борта. Тенденция к развороту судна в направлении действия сдвиговых напряжений появляется и усиливается по мере увеличения несимметричности напряженного состояния. В условиях одноосного сжатия или при взаимно перпендикулярном сжатии — разрежении судно разворачивается в соответствующем направлении. Возможны подвижки льда вдоль борта судна, относительное перемещение судна вдоль линии действия напряжений $\tau_{\max}$ и т. п. Для судов с недостаточными ледовыми подкреплениями такое сжатие может представлять большую опасность.

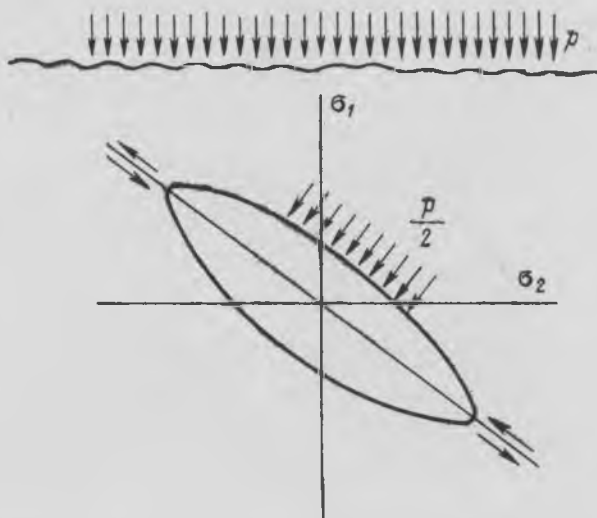


Рис. 1.16. Разворачивание судна при ледовом сжатии.

Корпусные конструкции средней части судов при плавании в ледовых условиях подвержены статическим и динамическим нагрузкам. Воздействие ледовых сжатий на корпус следует рассматривать как процесс, носящий статический характер. Значение усилий, действующих на корпус судна при сжатии, зависит от общей интенсивности сжатия, толщины льда, его прочности и формы обводов корпуса. При сжатиях малой интенсивности суда, как правило, не могут продвигаться во льдах. Усиление сжатия приводит либо к разрушению льда, либо к повреждениям бортов судна в зависимости от того, что из них окажется прочнее. Максимальные усилия ледовых сжатий, очевидно, равны усилиям, разрушающим лед. Корпусные конструкции судов должны быть спроектированы так, чтобы воспринимать эти усилия без значительных остаточных деформаций.

В оконечностях, где борта судна имеют большой наклон, ледяной покров ломается от изгиба, т. е. при сравнительно небольших значениях контактных сил. Обычно эти усилия меньше динамических, возникающих при ударе оконечности о лед. Поэтому рассчитывают прочность на сжатие лишь средней части корпуса, особенно у судов, имеющих цилиндрическую вставку. У ледоколов наклон борта в средней части достаточно велик, и лед при сжатии разрушается здесь от изгиба. В средней части корпуса транспортных судов борт, как правило, вертикальный, и значения контактных усилий, ломающих лед, могут быть очень большими.

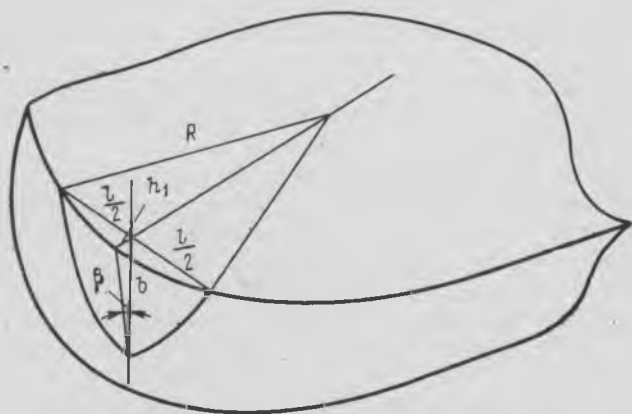


Рис. 1.17. Смятие закругленной кромки льдины.

Как уже отмечалось, сжатие — статический процесс. Особенно велики нагрузки, развивающиеся при сжатии судна ледяными полями. Наблюдения показывают, что при сжатии судна с наклонным бортом происходит смятие кромки льда до тех пор, пока суммарное контактное усилие не достигнет величины, при которой лед разрушается от изгиба.

Пусть кромка льдины в районе контакта с бортом судна имеет плавное закругленное очертание (рис. 1.17). В пределах зоны контакта радиус кривизны кромки льда R меняется незначительно. Тогда длина зоны контакта

$$l \approx 2\sqrt{2Rb \sin \beta}, \quad (1.66)$$

где b — ширина зоны контакта; β — угол наклона борта к вертикали.

Давление льда p в пределах зоны контакта считается постоянным и равным эффективному пределу прочности льда на

смятие $\sigma_{см}$. Суммарная ледовая нагрузка, действующая на бортовое перекрытие в пределах зоны контакта,

$$P = \frac{2}{3} l b \sigma_{см} = \frac{4}{3} b \sigma_{см} \sqrt{2 R b \sin \beta}.$$

Приравнивая эту нагрузку усилию, разрушающему ледяной покров заданной толщины h , например полубесконечную ледяную пластину, получим

$$p = \frac{0,276 \sigma_p h^2}{\sqrt{R (b \sin \beta)^3}}, \quad (1.67)$$

где σ_p — предел прочности льда на изгиб. Радиус R принимается фиксированным, равным 40 м, величина σ_p известна.

Таким образом, задача сводится к выбору расчетных значений b и h при заданных R , β и σ_p для расчета давления p и длины зоны контакта l .

Расчетные значения b и h зависят от ледовой категории судна и выбираются путем пересчета с прототипа [68]. Обычно принимается ширина зоны контакта $b = 0,4 \div 1,0$ м, а прочность льда $\sigma_p = 5 \div 8$ кгс/см² [53]. Расчетные значения толщины льда принимаются различными для разных судов. Например, для ледоколов высшего класса рекомендуемая толщина $h = 3,5$ м, а для портовых ледоколов $h = 1,8$ м. Предельную толщину льда при сжатии для транспортных судов обычно принимают $b = (0,7 \div 1,5)s$, где s — расстояние между шпангоутами. В средней части корпуса судна с цилиндрической вставкой и вертикальным бортом разрушение ледяного поля малой толщины напоминает разрушение пластины вследствие потери устойчивости. Нагрузки, действующие на корпус в этом случае, значительно превосходят усилия, разрушающие лед за счет изгиба, и представляют большую опасность. Для полубесконечной балки — полоски на упругом основании гидравлического типа критическое усилие может быть определено (в тс/м) по формуле

$$q_{кр} = \sqrt{\gamma D},$$

где D — цилиндрическая жесткость пластины.

Полагая $\gamma = 1$ тс/м³; $E = 4 \cdot 10^4$ тс/м²; $\mu = 0,34$, получим

$$q_{кр} = 62h \sqrt{\bar{h}}, \quad (1.68)$$

где h — толщина льда.

При сжатии судна во льдах большой толщины ледяная пластина не теряет устойчивости. В ней образуются трещины, направленные нормально к борту, а далее лед обламывается в форме сегментов. Этот случай разрушения должен быть рассмотрен особо.

Можно принимать нагрузку, разрушающую лед большой толщины, исходя из решения задачи о вдавливании жесткого штампа в усеченный клин из жесткопластического материала. Разрушение льда при этом происходит от касательных напряжений. Усилия

$$q = 2\tau_p h (1 + \alpha), \quad (1.69)$$

где τ_p — предельные скалывающие напряжения; α — половина угла при вершине усеченного клина.

Примем $\alpha = 0$ и $\tau_p = 30 \div 40$ тс/м²; тогда

$$q = (60 \div 80) h. \quad (1.70)$$

Из сравнения выражений (1.58) и (1.60) следует, что $q = q_{кр}$ при $h \approx 1,0$ м.

Таким образом, при сжатии во льдах толщиной $h < 1,0$ м расчетной будет нагрузка, вызывающая потерю устойчивости, а при $h \geq 1,0$ м — пластическую деформацию кромки ледяного покрова. При расчете бортовых перекрытий средней части корпуса судна нагрузка считается приложенной на длине всего перекрытия.

**§ 2.1. ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРИНЦИПЫ
ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ СУДОВ ВО ЛЬДАХ**

Организация натурных испытаний судов во льдах имеет ряд особенностей по сравнению с обычными испытаниями на чистой воде. Для испытаний ходкости и маневренности новых судов на чистой воде используется стандартная мерная миля, оборудованная необходимыми техническими средствами, а ледовые испытания¹ проводят на неподготовленных ледовых полигонах, отыскать которые нелегко, поскольку вблизи порта или завода они обычно отсутствуют. К тому же их наличие обусловлено сезонностью.

Ледовые испытания судна, как правило, проводят по специально разработанной программе. Они позволяют решить следующие практические задачи:

1. Установить тактико-технические элементы новых судов при работе в ледовых условиях и проверить выполнение требований технического задания на проектирование и постройку.
2. Оценить эффективность работы ледокольных систем и устройств.
3. Определить перспективы продления навигации в тех или иных районах Арктики или других замерзающих водоемах страны.

4. Получить данные научно-исследовательского характера.

Испытания судов во льдах проводят либо по принципу активного эксперимента, либо пассивного. *Активный эксперимент* заключается в том, что исследователь измеряет отклик на варьируемые им переменные. В *пассивном эксперименте* фиксируют отклик, который обусловлен не только изучаемыми, но и ненаблюдаемыми переменными, поскольку в любой реальной ситуа-

¹ Официальные требования о проведении сдаточных испытаний судов во льдах пока отсутствуют, однако по сложившейся в нашей стране практике им подвергают все ледоколы и головные серийные ледокольно-транспортные суда.

ции, встречающейся при испытании судна в природных ледовых условиях, всегда имеется ряд независимых переменных, которые по тем или иным причинам нельзя включать в рассмотрение.

При активном эксперименте наблюдаемые переменные практически некоррелированы с ненаблюдаемыми. Поэтому оценки коэффициентов регрессии при анализе результатов испытаний оказываются несмещенными. В пассивном эксперименте обе категории переменных коррелируются друг с другом, что ведет к смещению ошибок. Ясно, что активный эксперимент имеет неоспоримые преимущества по сравнению с пассивным и при испытаниях судов ему желательно отдавать предпочтение. Однако при его реализации в натурных условиях часто возникают трудности. Одна из них связана с необходимостью на более или менее продолжительное время отвлекать суда от выполнения рейсовых заданий, что связано с большими расходами. Кроме того, не всегда удастся варьировать интересующие экспериментатора переменные, а также стабилизировать ряд параметров опыта. В силу этого часто приходится проводить натурные испытания по схеме пассивного эксперимента, которые принято называть *попутными*, ибо они проводятся без вывода судна из эксплуатации. Данные этих испытаний можно использовать для получения информации о среднем значении и дисперсии той или иной изучаемой случайной величины.

Испытания судов, проводимые по схеме активного эксперимента, принято называть *режимными*, или *специальными*.

Практически каждая конкретная программа испытаний судна включает как попутные, так и специальные наблюдения. Испытания транспортных судов чаще, чем испытания ледоколов, приходится проводить как попутные, так как их работа регламентируется сроками доставки груза и режимом ледокольной проводки. По принципу активного эксперимента проводится большая часть испытаний ледовой ходкости и маневренности судов; тензометрические испытания прочности корпуса обычно носят характер попутных наблюдений.

§ 2.2. ИСПЫТАНИЯ ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ СУДНА

2.2.1. ИСПЫТАНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ДВИЖЕНИИ СУДНА

Процесс непрерывного движения судна во льду наиболее тщательно изучается в ходе натурных и модельных испытаний. Научная и практическая ценность результатов испытаний в значительной степени зависит от соблюдения единых условий опытов, методики их проведения и обработки материалов.

В основу методики экспериментов положено допущение о квазистационарности процесса движения судна, а сами испытания проводят по принципу активного эксперимента: в стабильных ледовых условиях выполняют пробеги судна при

различных заданных значениях мощности энергетической установки.

Таким образом, всем переменным эксперимента, кроме одной, задают постоянные значения. Часть этих переменных относится к категории переменных с фиксированным уровнем, а часть — со случайным. Основная характеристика ходкости судна во льдах — средняя скорость непрерывного движения.

Ледовый полигон должен иметь достаточно большие размеры и быть однородным по толщине, торосистости, заснеженности и другим параметрам. Природный лед всегда в той или иной степени неоднороден, поэтому важно сформулировать и в процессе испытаний соблюдать требования в отношении допустимых пределов изменений его параметров, в первую очередь толщины. Неоднородность природного ледяного покрова имеет случайный характер, так что для обоснования указанных требований следует применять вероятностные методы анализа. С этой целью удобно воспользоваться математической моделью, которая представлена в разделе 3.2. В ней непрерывное движение судна в сплошном льду рассматривается как случайный процесс. При этом вероятность обращения скорости судна в нуль в течение некоторого времени t или на более или менее значительном участке пути $l_0 = tv_{\text{ср}}$ (где $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость непрерывного движения судна задается). Обычно принимают $l_0 = 3L$ (где L — длина судна), откуда следует, что

$$t = \frac{3L}{v_{\text{ср}}} \quad (2.1)$$

Формула для определения значения дисперсии скорости непрерывного движения судна во льду имеет вид

$$\sigma_v^2 = \frac{v_{\text{ср}}^2}{2U^2\lambda t}, \quad (2.2)$$

где U — аргумент функции $\Phi(U)$, который вычисляют с помощью таблиц по заданной вероятности неостановки судна $\omega_0(v_{\text{ср}}/0, t)$ за время t ; λ — средняя плотность распределения ударных импульсов ледовой нагрузки во времени.

Между средней скоростью непрерывного движения судна при заданной мощности, развиваемой энергетической установкой, и толщиной сплошного льда h имеет место линейная корреляционная зависимость [см. формулу (4.3) в подразделе 4.1.1]. Учитывая это обстоятельство, можно получить следующее выражение для допустимого значения дисперсии толщины льда при натурных испытаниях судна:

$$\sigma_h^2 = \frac{\left[v_{\text{ч. в}} - (v_{\text{ч. в}} - v_{\text{мин}}) \frac{h}{h_{\text{нр}}} \right]^2}{2U^2\lambda t (v_{\text{ч. в}} - v_{\text{мин}})^2} \cdot h_{\text{нр}}^2 \quad (2.3)$$

где $h_{\text{пр}}$ — предельная толщина льда, которую судно в состоянии преодолевать при непрерывном движении с минимальной устойчивой скоростью $v_{\text{мин}} \approx 1,0$ уз при полной мощности энергетической установки; $v_{\text{ч. в}}$ — скорость судна по чистой воде при полной мощности энергетической установки.

Соответственно среднеквадратическое отклонение толщины льда

$$\sigma_h = \frac{\left[v_{\text{ч. в}} - (v_{\text{ч. в}} - v_{\text{мин}}) \frac{h}{h_{\text{пр}}} \right] h_{\text{пр}}}{U \sqrt{2\lambda t} (v_{\text{ч. в}} - v_{\text{мин}})} \quad (2.4)$$

Для случая движения судна в сплошном льду, толщина которого близка к предельной, имеем

$$\sigma_h = \frac{v_{\text{мин}} h_{\text{пр}}}{U \sqrt{2\lambda t} (v_{\text{ч. в}} - v_{\text{мин}})} \quad (2.5)$$

В первом приближении при непрерывном движении судна в сплошном льду

$$\lambda = \frac{v_{\text{ср}}}{\Delta x}, \quad (2.6)$$

где Δx — длина сегментов, образующихся при ломке сплошного льда бортами судна. Она связана с толщиной льда линейной эмпирической зависимостью вида $\Delta x = ah$, где a — коэффициент, равный в среднем 30.

Результаты расчета, выполненного по формуле (2.5), показывают, что для малых судов σ_h в два-три раза меньше, чем для больших (табл. 2.1), причем увеличение скорости

Таблица 2.1

Допустимое значение σ_h для различных судов при испытаниях в сплошных льдах предельной толщины

Судно	λt	Значения σ_h , см					
		$w_0 = 0,99$	$w_0 = 0,90$	$w_0 = 0,80$	$w_0 = 0,70$	$w_0 = 0,60$	$w_0 = 0,50$
Ледоколы	8,0	0,60	1,00	1,20	1,80	2,00	2,70
	8,0	0,44	0,70	1,00	1,20	1,50	2,00
Транспортные суда	12,5	0,25	0,44	0,50	0,70	0,90	1,10
	20,0	0,10	0,16	0,20	0,30	0,40	0,50
	24,0	0,05	0,07	0,10	0,15	0,20	0,25
	40,0	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05

приводит к возрастанию допустимого значения σ_h . Практическую оценку неравномерности ледяного покрова при выборе полигона для натурных испытаний судна можно получить с помощью номограмм, приведенных на рис. 2.1, которые построены по формулам (2.1) — (2.6).

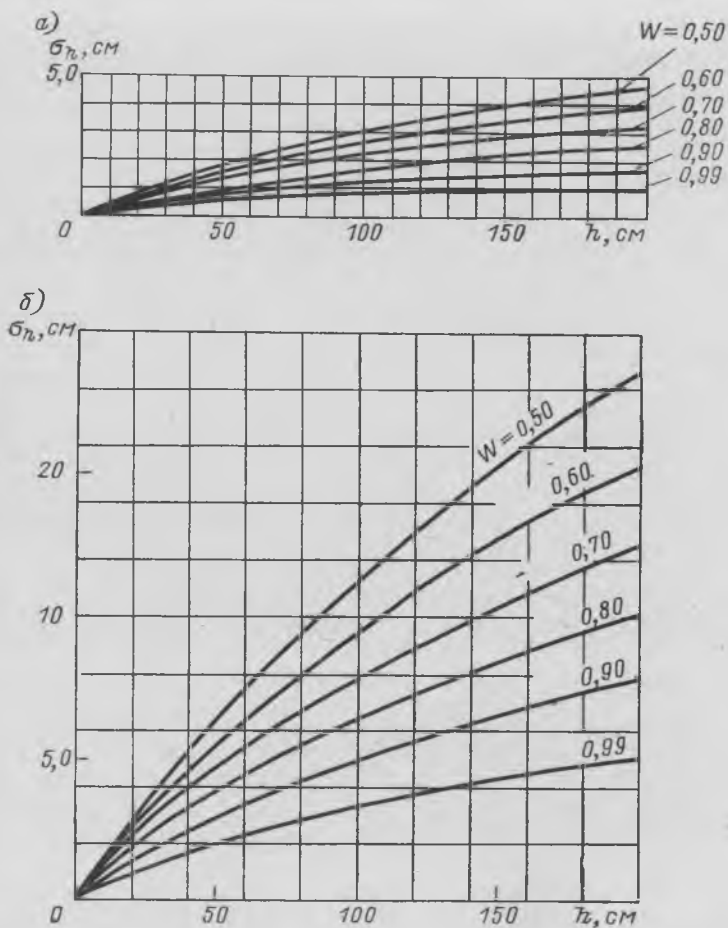


Рис. 2.1. Номограммы для допустимых значений σ_h при различной вероятности $W=w_0$: а — при скорости 1,0 уз; б — при скорости 5,0 уз.

Результаты натурных испытаний обычно представляют в виде зависимости мощности от скорости судна $N_B = f(v)$ при заданном (постоянном) значении параметров ледяного покрова (толщины льда $h = \text{const}$). Результаты испытаний судна в сплошных льдах удобно выражать в виде зависимости

$v = f(h)$ при $N_B = \text{const}$. Следует отметить, что в натуральных условиях для получения кривой $N_B = f(v)$ при $h = \text{const}$ требуется достаточно большой полигон с однородным по толщине ледяным покровом, тогда как зависимость $v = f(h)$, при $N_B = \text{const}$ можно получать на небольших полигонах с разной толщиной льда. В некоторых случаях, например при испытаниях в битых льдах, полученные результаты целесообразно свести в таблицу

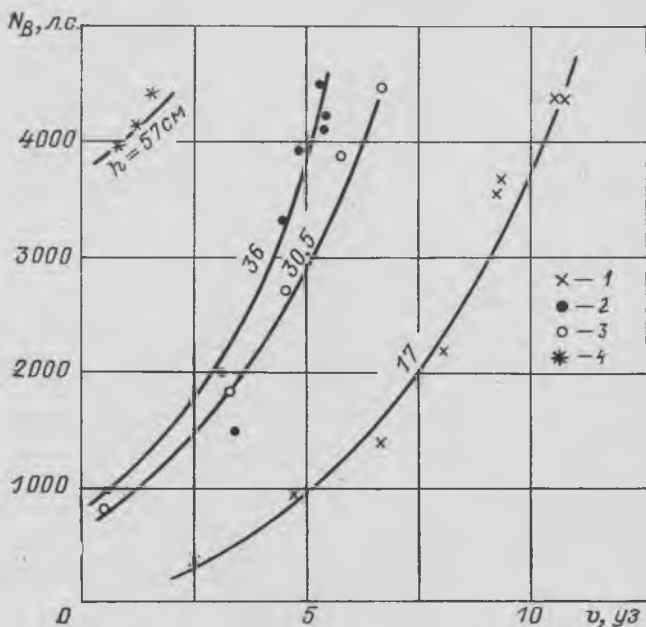


Рис. 2.2. Натурная экспериментальная зависимость $N_B = f(v)$ для малого ледокола при непрерывном движении в ровных сплошных льдах различной толщины.

1—4 — экспериментально полученные точки.

ледовой ходкости, в которой фигурируют скорость и мощность судна, а также параметры ледовой среды. Натурные кривые строят по экспериментальным точкам, каждую из которых получают в течение одного пробега судна во льду при заданном режиме работы гребной установки. Количество точек из-за ограниченных размеров полигонов, как правило, приходится лимитировать: тремя-четырьмя для построения зависимости $N_B = f(v)$ при $h = \text{const}$ во льду, толщина которого близка к предельной для данного судна, и восьмью-десятью — при испытаниях во льду малой толщины (рис. 2.2).

Экспериментально полученные точки на каждой кривой располагают таким образом, чтобы они охватывали весь диапазон

изменения скорости от минимально устойчивой до максимальной. При назначении интервалов между точками исходят из того, что кривая должна иметь одинаковую точность на всем своем протяжении. На участке с меньшей точностью (при малой скорости) располагают большее количество точек.

Длина каждого пробега судна во льду, толщина которого близка к $h_{пр}$, должна составлять не менее трех длин корпуса (т. е. около 200 м для малых ледоколов и 400 м для больших ледоколов и ледокольно-транспортных судов). При скорости 8—10 уз продолжительность пробега должна быть не менее 4—5 мин независимо от размеров судов.

Определенное значение имеет и проведение пробегов судна. Как известно, их можно выполнять по последовательному или рандомизированному плану. Последние планы более оправданны, так как в этом случае легче исключить влияние второстепенных факторов на результаты опытов, уменьшить значение систематических ошибок. Однако для испытаний судна в ледовых условиях по полностью рандомизированным планам требуется больше времени, так как возрастает длительность маневров, длина разгонных участков и т. п. При испытаниях по последовательному плану потери времени снижаются, однако увеличивается вероятность временного дрейфа, обусловленного изменениями внешних неконтролируемых условий опыта. Поэтому целесообразно эксперимент проводить по частично рандомизированному плану: основную часть характеристик получать при последовательном изменении мощности энергетической установки судна, а после этого выполнить несколько контрольных пробегов.

Изменять мощность энергетической установки можно от наименьшего к наибольшему значению, и наоборот. Методически оба способа равноценны. Следует только помнить, что если важно получить данные о предельных возможностях судна, то испытания выгодно начинать с пробегов при максимальной мощности энергетической установки. Во втором случае (при повышении мощности) потребуется больше времени и места, так как длина неустановившегося пробега при разгоне судна во льду, больше чем при его торможении.

Длину и продолжительность разгонных участков при ледовых испытаниях обычно заранее не определяют, хотя при необходимости это можно сделать в соответствии с методикой, приведенной в подразделе 4.4.2. (Длина разгонных участков ледоколов невелика, так как их двигатели развивают большой момент при пониженной частоте вращения гребного винта.)

При испытаниях во льду, так же как и на мерной миле, стремятся к тому, чтобы движение судна было прямолинейным, а амплитуда перекладки руля минимальной. Характеристики устойчивости на курсе при движении судна во льдах практи-

чески не отличаются от обычных (см. подробнее в подразделе 4.4.3), поэтому можно пользоваться нормами и инструкциями, применяемыми при испытаниях на чистой воде.

Важно также исключить влияние ветра, волнения и течения на результаты испытаний. Общепринятого способа учета перечисленных факторов нет. Волнение во льдах практически отсутствует, а влиянием течения обычно пренебрегают, так как оно невелико. Тем не менее проводить ледовые испытания в районах с сильным течением не рекомендуется.

Ветер же, направленный под тем или иным углом к курсу судна, оказывает влияние на его скорость. Поэтому обычно при обработке результатов испытаний вводят поправки на ветер. Однако при их вычислении возникают погрешности. Очевидно, что следует предусмотреть некоторое ограничение предельной силы ветра при испытаниях. Это необходимо сделать и потому, что при сильном ветре невозможно проводить ряд наблюдений, выполняемых на открытом воздухе. Расчеты показывают, что при движении во льду предельной толщины у мощных ледоколов встречный ветер силой до 8—9 баллов вызывает увеличение дополнительного сопротивления на 3—5 %. У малых ледоколов сопротивление той же величины имеет место при ветре силой до 6—7 баллов. Такое значение силы ветра можно принять в качестве предельно допустимого.

Влияние глубины моря на скорость судна во льдах изучено лишь в самых общих чертах. Например, установлено, что влияние мелководья на скорость движения судна во льдах предельной толщины начинает сказываться лишь, когда глубина воды под днищем судна уменьшается до одной-полутора его осадок. Так как плавание на меньших глубинах недопустимо по условиям безопасности, данную глубину можно считать предельной при испытаниях.

Произвольно задавать эксплуатационную осадку и водоизмещение судна обычно не представляется возможным, и испытания приходится проводить при их фиксированном значении. Как показано в разделе 4.2.1, эксплуатационная осадка оказывает существенное влияние на скорость движения судов во льдах. Поэтому в процессе испытаний должен осуществляться тщательный контроль за ее изменением, а при обработке результатов необходимо вводить соответствующие поправки. Нельзя проводить испытания при такой осадке, которая не гарантирует достаточного заглубления гребного винта.

Тщательный контроль за состоянием наружной обшивки корпуса во время испытаний во льдах не обязателен; наблюдениями установлено, что подводная часть наружной обшивки корпуса любого судна, которое проработало хотя бы несколько часов во льдах, полностью освобождается от обрастания и ржавчины (см. подраздел 4.2.3) и становится практически гладкой.

Исследование работы судна набегами, при которой скорость все время изменяется, связано с большими трудностями. В настоящее время теоретически удалось исследовать лишь отдельные стороны этого процесса: удар судна о кромку льда, инерцию при движении судна в канале и др. [50, 75]. Смоделировать движение судна во льду набегами также сложно. Поэтому натурные испытания в данном случае имеют особое значение.

Работа судна набегами состоит из отдельных повторяющихся циклов, каждый из которых включает следующие этапы:

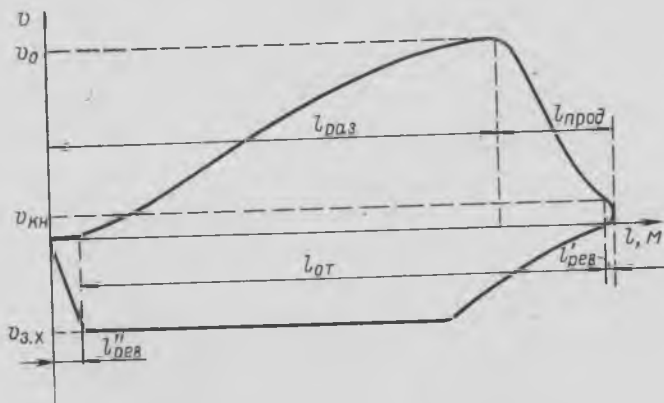


Рис. 2.3. Изменение скорости судна на протяжении одного цикла его работы набегами.

1. Разбег судна по каналу. (Его длина $l_{\text{раз}}$ равна обычно одной—пяти длинам корпуса судна L , а время $t_{\text{раз}}$ достигает 1—4 мин). Скорость судна в процессе разбега плавно возрастает от нуля до некоторого значения v_0 , с которой оно входит в контакт с ненарушенным ледяным покровом (рис. 2.3). Выбор величин $l_{\text{раз}}$ и v_0 во многом определяет эффективность работы судна.

2. Продвижение с разбега в ненарушенном ледяном покрове. (Его длина $l_{\text{прод}}$ может изменяться от нескольких метров до двух-трех длин корпуса судна в зависимости от толщины льда, торосистости, заснеженности, а также от начальной скорости v_0 судна, водоизмещения и т. п.). Скорость в конце участка продвижения во льду $v_{\text{кн}}$ может быть равной нулю либо составлять 0,5—1,0 уз в зависимости от ледовых условий и тактики работы, применяемой судоводителем. При работе набегами в ровном сплошном малозаснеженном льду, когда вероятность заклинивания минимальна, реверс двигателей выгодно проводить вскоре после остановки судна, т. е.

при $v_{\text{кн}}=0$. В торосистых льдах реверс часто начинают, не дожидаясь остановки судна, когда $v_{\text{кн}}$ снижается до величины порядка 0,5—1,0 уз с тем, чтобы избежать заклинивания корпуса. В сильно заснеженном льду реверс зачастую дается не сразу после остановки судна, а спустя некоторое время, в течение которого движители судна, работающие на передний ход, промывают канал за кормой. (Выбор того или иного приема работы зависит от опыта судоводителя.)

3. Реверс с переднего хода на задний, в процессе которого судно практически неподвижно, т. е. $l'_{\text{рев}}=0$. Время реверса $t_{\text{рев}}$ обычно составляет 5—15 с, и лишь при заклинивании корпуса судна во льду может достигать нескольких минут и более.

4. Отход судна назад по каналу на участке пути $l_{\text{от}}=l_{\text{прод}}+l_{\text{рев}}$. Скорость ледокола в начале этого маневра $v_0=0$, а затем возрастает до некоторого значения $v_{\text{з. х}}$, которое выбирается в основном из условий безопасности движительно-рулевого комплекса.

5. Реверс с заднего хода на передний, для выполнения которого требуется больше времени, чем для реверса с переднего на задний ход, из-за опасности повреждения движителей. Обычно $t^*_{\text{рев}}=20 \div 40$ с.

Суммарное время, затрачиваемое на один цикл работы судна набегам,

$$t_{\text{цк}}=t_{\text{раз}}+t_{\text{прод}}+t'_{\text{рев}}+t_{\text{з. х}}+t^*_{\text{рев}}. \quad (2.7)$$

Средняя скорость продвижения судна

$$v_{\text{наб}}=\frac{\sum l_{\text{прод}i}}{\sum t_{\text{цк}i}}. \quad (2.8)$$

Практический интерес представляет определение средней скорости продвижения судна $v_{\text{наб}}$, а также решение задачи об оптимизации всего процесса работы набегам. (Натурные наблюдения показывают, что средняя скорость продвижения ледокола при работе набегам может быть увеличена на 60—70 % за счет рационального выбора элементов, перечисленных выше.) Для решения первой задачи достаточно знать математическое ожидание $v_{\text{наб}}$, которое можно получить в ходе обработки материалов попутных наблюдений. Для решения второй задачи, которую можно сформулировать как задачу на условный экстремум, требуется постановка специальных экспериментов. Все натурные наблюдения, проводившиеся до настоящего времени, выполнялись попутно по принципу пассивного эксперимента. Это ограничивает возможности их анализа. Существенно новые возможности открываются при применении так называемого

факторного эксперимента, когда одновременно варьируются все переменные. Это имеет ряд преимуществ: коэффициент регрессии определяется по результатам всех n экспериментов и дисперсия коэффициентов регрессии оказывается в n раз меньше дисперсии ошибки опыта. Важно, что эффективность данного метода исследования тем выше, чем сложнее изучаемая система.

На первом этапе натурных исследований целесообразно включать в число независимых переменных эксперимента лишь характеристики, оказывающие наиболее существенное влияние на скорость продвижения судна. Это прежде всего эксплуатационная осадка судна, длина разгона, скорость судна при входе в лед, толщина льда, торосистость, разрушенность.

Основная задача начального периода исследований — получение приближенной информации о процессе при минимальной продолжительности испытаний. При составлении плана испытаний на этом этапе целесообразно использовать так называемые дробные реплики от полного факторного эксперимента. В частности, можно применить план эксперимента в виде полуреплики типа 2^{6-1} и т. п. Общее число опытов при подобном планировании составит не более 15—63. Натурные опыты, основанные на указанных принципах планирования, позволяют получить общие приближенные сведения о процессе работы ледокола набегам. При более глубоких исследованиях можно применить рототабельное планирование второго порядка. Однако разработка таких планов — сложная математическая задача и на данном этапе натурных исследований ее решение представляется преждевременным.

2.2.3. ШВАРТОВНЫЕ, ТЯГОВЫЕ И ХОДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Исследования основных пропульсивных качеств судна часто приходится включать в программу испытаний ледовой ходкости в качестве вспомогательных, поскольку такие данные необходимы при их обработке и анализе. Скоростные испытания судов ледового плавания на чистой воде проводят лишь в тех случаях, когда отсутствуют данные модельных или сдаточных испытаний. Методика их проведения подробно освещена в работах [14, 26, 27]. Их результаты используют для определения «чистого» ледового сопротивления

$$R_{л. ч} = R_{л} - R_{ч. в}, \quad (2.8a)$$

где $R_{л}$ — полное ледовое сопротивление; $R_{ч. в}$ — сопротивление судна на чистой воде.

Тяговые характеристики необходимо знать при вычислении сопротивления $R_{л}$ по замеренным в процессе ледовых испытаний мощности, скорости судна и частоте вращения винта. По-

этому в программу ледовых исследований часто приходится включать тяговые и швартовные испытания. В большинстве случаев ограничиваются швартовными испытаниями. Реже проводят динамометрические швартовные испытания и ходовые динамометрические испытания судна с возом.

Для проведения швартовных испытаний, которые проводят для каждого винта отдельно, нос судна упирают в ледяное поле, толщина которого должна быть больше $h_{пр}$. Важно, чтобы при этом за кормой судна имелось пространство воды, свободное от льда, шириной не менее $1,5 B$, где B — ширина корпуса, и длиной не менее 150—200 м. В число независимых переменных опыта включают частоту вращения винта и мощность, развиваемую энергетической установкой. Помимо этого, фиксируют внешние условия (глубину и температуру воды), осадку судна. Конечная цель испытаний — построение зависимости мощности на швартовном режиме от частоты вращения гребного винта (рис. 2.4, а).

Более полные тяговые характеристики судна можно получить в ходе швартовных динамометрических испытаний. Однако организация таких испытаний достаточно трудна из-за необходимости предусмотреть возможность закрепления буксирного троса, натяжение в котором у современных ледоколов достигает 200—300 т и более. Для решения этой задачи в отечественной практике корму испытываемого судна счаливают буксирным тросом с кормой другого судна, служащего для его удержания. На буксирный трос устанавливают динамометр (чаще всего накладной). В процессе испытаний режимы работы гребных установок обоих судов подбирают таким образом, чтобы они не трогались с места. Длина буксирного троса при этих испытаниях должна быть не менее 400—500 м, чтобы исключить взаимное влияние струй винтов обоих судов. Независимые переменные эксперимента — те же, что и в предыдущем случае, как и усилие в буксирном тросе, которое равно тяге гребного винта на швартовном режиме. Конечная цель испытаний — построение натурной кривой тяги гребного винта на швартовном режиме в функции от частоты вращения (рис. 2.4, б) и мощности.

Ходовые динамометрические испытания с возом позволяют получить сведения о пропульсивных качествах судна. Однако для их проведения необходимо выделить судно на длительный срок и, кроме того, воз, составленный из одного или нескольких судов достаточно большого водоизмещения. Его подбирают из условия, чтобы скорость судна с возом при полной мощности составляла не более 30—60 % скорости собственного свободного хода. Так, например, при испытаниях речного ледокола «Терек», мощность энергетической установки которого равна 1800 л. с., в качестве воя использовали две баржи водоизмещением по 3000 т каждая [51]. Пробег судна с возом при

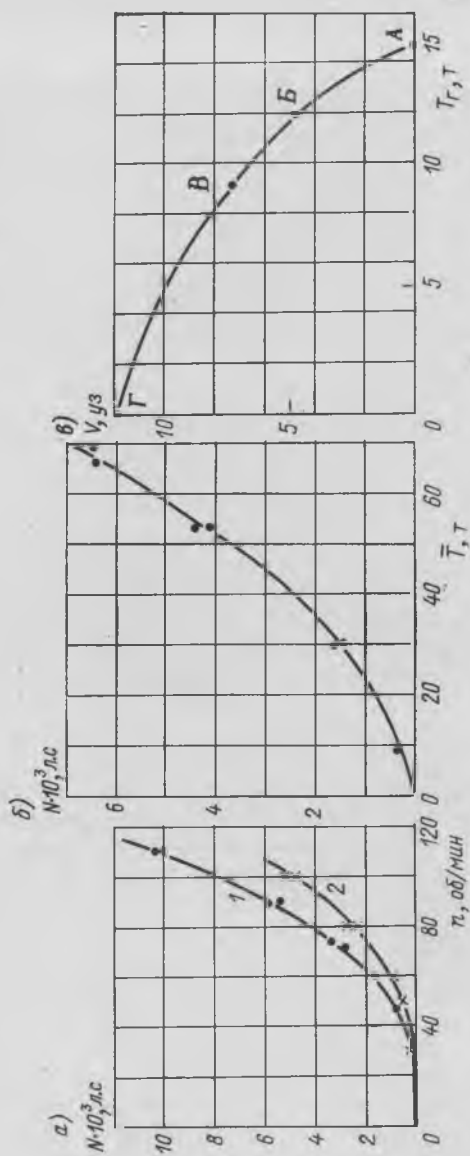


Рис. 2.4. Зависимости, построенные по данным швартовых испытаний среднего ледокола (а), швартовых динамометрических испытаний д/з «Пенжина» (б) и ходовых динамометрических испытаний ледокола «Терек» (в): А — швартовый режим; В — ходовой режим с возом из двух барж; Г — то же с возом из одной баржи; Г — то же без воза.

1 — средний винт; 2 — бортовой винт.

различных значениях мощности установки проводят на мерной миле. К числу переменных эксперимента, которые были перечислены выше, в данном случае добавляется средняя скорость движения судна с возом. На основе полученных данных строят зависимость тяги на гаке от скорости судна (рис. 2.4, в).

§ 2.3. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАНЕВРЕННОСТИ СУДНА ВО ЛЬДАХ

2.3.1. ИСПЫТАНИЯ ПОВОРОТЛИВОСТИ

При плавании в ледовых условиях наиболее высокие требования предъявляют к поворотливости судна, которая существенно отличается от поворотливости при плавании в обычных условиях. Так, в качестве основного приема разворота судна помимо обычной циркуляции применяют «елочку». Ее выполняют с помощью последовательных закалываний судна носом и кормой в лед за счет реверсирования гребной установки и одновременно перекладки руля. Циркуляция и развороты «елочкой» на 180° служат основными стандартными маневрами при натурных испытаниях поворотливости. В качестве полигона для испытаний судна на циркуляции выбирают участок однородного ледяного покрова, размеры которого позволяют выполнить заданный маневр без сколов льда в направлении кромок. Обычно выбирают поля сплошного льда протяженностью не менее 8—10 длин корпуса судна. Толщина льда должна составлять 50—75 % предельной для данного судна, ибо в более толстом льду развороты циркуляцией выполнять не принято. При испытаниях фиксируют время, положение пера руля, курсовой угол, угловую и линейную скорость судна, угол крена, частоту вращения винтов, мощность, развиваемую энергетической установкой, а также параметры ледовой среды. После завершения циркуляции измеряют ее диаметр, обычно с помощью судового радиолокатора.

Испытания судна при выполнении маневра «елочка» до настоящего времени проводили лишь попутно, в эксплуатационных условиях. При этом фиксировали только число закалываний корпуса в лед носом и кормой и общее время разворота. Для более детальных исследований следует проводить активный эксперимент с применением современных методов планирования, которые описаны в подразделе 2.2.2. В число независимых переменных при этом целесообразно включать число закалываний корпуса, протяженность разворота в поперечном и продольном направлениях, мощность энергетической установки, а также параметры ледовой среды — толщину и прочность льда, торосистость, высоту снежного покрова, разрушенность. Основная характеристика разворота «елочкой» — время, затраченное на его выполнение.

Инерционные характеристики в значительной степени определяют маневренность судна и оказывают влияние на безопасность плавания во льдах. Для их оценки принято использовать те же параметры, что и при измерении инерции судна на чистой воде: длину и время пробега, необходимые судну для выполнения ряда стандартных маневров, а именно останов (т. е. случай, когда режим работы гребной установки изменяется с «полного вперед» на «стоп»), торможение («полный вперед» — «полный назад») и разгон («стоп» — «полный вперед»). Перечисленные маневры выполняют в различных ледовых условиях — в сплошных и битых льдах разной толщины, сплоченности и т. п. При этом фиксируют время и длину пробега судна, частоту вращения гребных винтов и изменение скорости судна в ходе выполнения того или иного маневра, а также параметры ледовой среды. В качестве вектора наблюдений обычно выбирают длину пробега судна.

Устойчивость на курсе при плавании во льдах не является столь важным качеством, как поворотливость и инерция. По этой причине ее тщательные исследования проводят в ледовых условиях сравнительно редко. Методика испытаний судна не отличается от применяемой при обычных испытаниях на чистой воде: во время движения судна по заданному курсу в тех или иных ледовых условиях измеряют курсовой угол и положение пера руля. Такие измерения делают как при самостоятельном движении судна, так и при следовании в канале за ледоколом. По результатам измерений определяют средний период и амплитуду рысканий судна, а также среднюю частоту и угол перекадки руля в заданных ледовых условиях. Испытания устойчивости на курсе при плавании во льдах, как правило, выполняют попутно по схеме пассивного эксперимента.

§ 2.4. ИСПЫТАНИЯ ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТИ СУДНА

2.4.1. ЛЕДОВЫЕ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Натурные исследования ледовой прочности судов осуществляют с помощью тензометрирования набора и обшивки корпуса, как правило, попутно по схеме пассивного эксперимента. Лишь в отдельных случаях представляется возможность назначить такие условия опыта, как скорость судна при ударе о льдину, район соударения и т. п. При тензометрировании фиксируют деформации элементов набора и обшивки корпуса, возникающие под действием ледовой нагрузки. Из внешних параметров отмечают характеристики ледового покрова. В качестве датчиков используют электрические тензометры сопро-

тивления, которые по определенной схеме располагают на элементах набора корпуса и на наружной обшивке. Обычно предусматривается несколько вертикальных и горизонтальных групп датчиков (рис. 2.5). Горизонтальные группы располагают на транспортных судах — вдоль грузовой и балластной ватерлиний на 0,5—1,0 м ниже их уровня, а на ледоколах — вдоль носовой ветви ватерлинии, соответствующей нормальному водоизмещению. Датчики размещают на внутренней стороне ледового пояса наружной обшивки корпуса, а на наборе — на поясах стрингеров и шпангоутов. Обычно принимается интервал, равный одной-двум шпациям, т. е. не превышающий длину зоны распределения ледовой нагрузки при динамических контактах борта судна со льдом. Только в этом случае тензометрические датчики горизонтальной группы могут регистрировать каждый удар о лед на всем протяжении носовой части борта судна. Вертикальные группы датчиков предназначены для фиксирования уровня приложения ледовой нагрузки по высоте. Число и расположение датчиков в вертикальных группах выбирают с таким расчетом, чтобы можно было построить эпюру распределения ударных напряжений по пролету шпангоута. Чаще всего группы датчиков располагают на шпангоутах, расположенных в тех районах борта, где можно ожидать появления наибольших напряжений. На транспортных судах, как правило, в середине пролета бортового перекрытия в первом или втором грузовых трюмах.

Общее количество тензометрических датчиков обычно составляет 20—50 шт. Их разбивают на несколько групп, каждую из которых вводят в действие по мере необходимости. При выборе общего числа датчиков учитывают трудоемкость и продолжительность их монтажа, а при определении их количества в каждой группе — число каналов регистрирующей аппаратуры. На ледоколах монтаж датчиков и измерительной схемы затруднен из-за двойного борта, а на транспортных судах из-за наличия грузов в трюме.

В процессе испытаний судна в тех или иных ледовых условиях проводят сеансы записи деформаций корпуса, каждый из которых разбивают на отдельные кадры. Продолжительность кадров обычно не превышает 20—40 с, так как ледовые нагрузки при движении судна во льдах имеют четко выраженный дискретный динамический характер, и их приходится фиксировать при высокой скорости протяжки ленты осциллографа. Лишь при испытаниях, проводимых во время ледовых сжатий, ледовая нагрузка прикладывается статически. В этом случае длительность кадров может достигать 10 мин и более. Независимые переменные эксперимента — скорость судна, координаты места удара о лед, а также характеристики льда: толщина, сплоченность, торосистость, разрушенность, прочность. В процессе обработки данных определяют значение максимальных

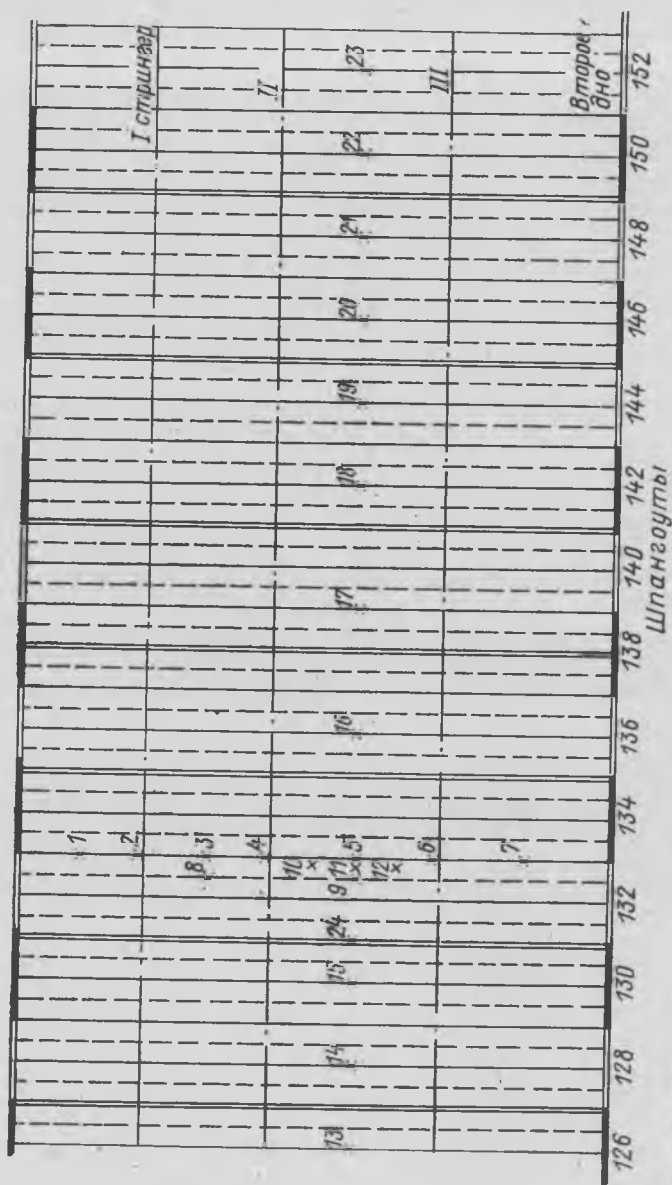


Рис. 2.5. Схема расположения тензодатчиков (1—24) на бортовом наборе и обшивке транспортного судна ледового плавания.

напряжений в наборе и обшивке, статистики распределения, уточняют характер приложения нагрузки в вертикальной и горизонтальной плоскостях, устанавливают плотность распределения ударных импульсов, приходящихся в заданный район носовой оконечности и т. п.

Испытания ледовой ходкости, прочности корпуса и маневренности на практике проводят либо порознь, либо совместно (комплексно). Комплексные исследования наиболее эффективны.

2.4.2. ИЗУЧЕНИЕ ЛЕДОВЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОРПУСА СУДНА

Тензометрические испытания, о которых шла речь в предыдущем разделе, кратковременны, и по полученным в этот период данным нельзя уверенно судить об экстремальных ледовых нагрузках. В какой-то мере их дополняют сведения о ле-

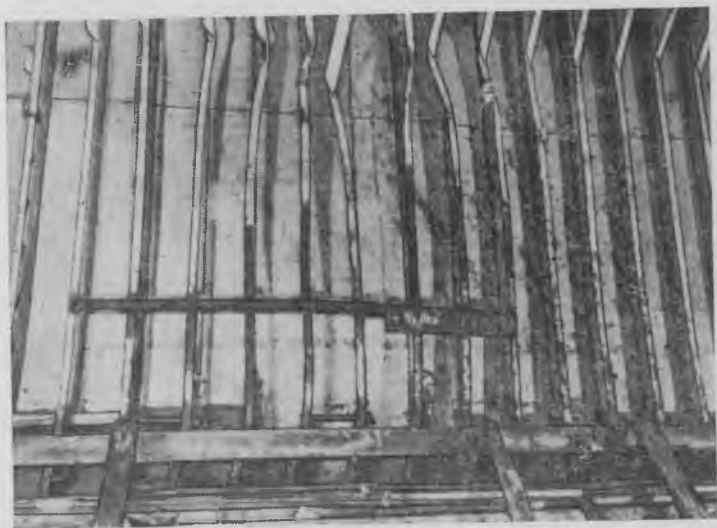


Рис. 2.6. Ледовые повреждения набора корпуса судна, полученные при плавании во льдах Антарктики.

довых повреждениях корпуса, которые получают при осмотрах корпусов судов ледового плавания. Такие осмотры проводят периодически в процессе работы судна во льдах на плаву, а также при его доковании, в ходе которых выявляют и фиксируют ледовые повреждения корпуса (рис. 2.6). Осматривают корпус судов на плаву судоводители и специалисты, проводящие ледовые испытания. Внутренние осмотры выполняют только в доступных для обзора местах, т. е. там, где отсутствуют

двойные борта, зашивка набора и т. п., наружные — со льда, причала или катера после каждого плавания в ледовых условиях по окончании выгрузки, когда судно имеет минимальную осадку. Наилучшие результаты дает наружный осмотр подводной части корпуса при доковании судна. Первоначальная задача осмотров — выявление повреждений наружной обшивки и корпусных конструкций. Каждое выявленное повреждение необходимо, зафиксировать, обмерить и классифицировать, причем последнее требует от наблюдателя известного

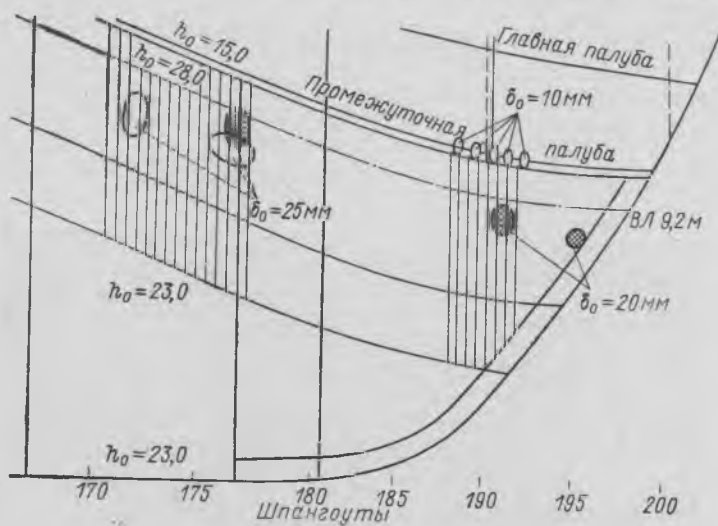


Рис. 2.7. Растяжка наружной обшивки танкера с ледовыми повреждениями, зафиксированными при работе в Арктике (без штриховки — левый борт, со штриховкой — правый); h_0 — толщина обшивки; δ_0 — стрелка прогиба вмятин наружной обшивки.

опыта. Особенно трудно отличить ледовые повреждения днища от последствий касаний грунта. Для того чтобы отличить ледовое повреждение от неледовых, в первую очередь приходится учитывать их характер и расположение по длине и высоте корпуса. Как правило, ледовые повреждения, полученные при движении судна, располагаются в носовой оконечности корпуса вблизи действующей ватерлинии (грузовой или балластной) и несколько ниже (рис. 2.7). Их протяженность по длине обычно невелика. Значительную протяженность (до нескольких десятков метров) имеют повреждения, полученные судном при ледовом сжатии. Они обычно располагаются в средней части корпуса.

Обнаруженные ледовые повреждения фиксируются на чертеже наружной обшивки корпуса или конструктивном разрезе.

Там же указываются их размеры по длине и высоте и стрелка прогиба. Наиболее характерные повреждения фотографируют. Все повреждения классифицируют по характеру, происхождению, локализации и размерам. Наиболее сложно установить причины повреждений и выяснить обстоятельства, при которых они получены, так как в судовых журналах, как правило, отсутствуют соответствующие записи. Этот важный вопрос приходится решать «задним числом», используя зачастую не очень достоверные сведения, что намного снижает ценность информации о ледовых повреждениях для научного анализа. Желательно, чтобы судоводители регистрировали скорость судна и ледовые условия, при которых были получены повреждения.

Немаловажное значение имеет методика осмотра корпуса и фиксирования повреждений. Только полные и систематизированные данные о ледовых повреждениях судов можно эффективно использовать для анализа ледовой прочности корпуса. Однако в настоящее время такая работа не ведется в нужном объеме. Для ее организации необходимо придерживаться при осмотрах корпуса судов ледового плавания методической инструкции. Все выявленные повреждения следует наносить на стандартные эскизы растяжек наружной обшивки корпуса и конструктивные разрезы, кодировать по единой системе и направлять в центр сбора информации для депонирования и последующей обработки. Система кодирования данных по ледовым повреждениям должна позволять их обработку на ЭВМ. Общие принципы обработки информации по ледовым повреждениям и ее анализ базируются на приемах, используемых при пассивном эксперименте.

§ 2.5. ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СУДНА И ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

2.5.1. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СУДНА

В процессе ледовых испытаний обычно фиксируют элементы судна, параметры ледовой среды и гидрометеорологические факторы, проводятся наблюдения за характером движения судна и особенностями взаимодействия корпуса со льдом.

К числу элементов судна, которые учитывают в первую очередь, относятся его осадка и водоизмещение, частота вращения гребных винтов, мощность, развиваемая гребной установкой, скорость. Осадка фиксируется до начала и по окончании каждой серии пробегов судна. В большинстве случаев измеряют ее по маркам углубления на корпусе в носу T_n , на миделе T_m и в корме T_k . Измерения выполняют во время стоянки судна с катера или со льда. Для повышения точности отсчетов пользуются рейкой с сантиметровой шкалой. На судах, оборудованных штатным осадкомером, допускается измерять осадку

с помощью этого прибора. Среднюю осадку судна лучше всего определять по формуле

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_{\text{н}} + T_{\text{к}}}{2} + x_{\text{с}} \frac{T_{\text{к}} - T_{\text{н}}}{L} + \frac{2}{3} \left[T_{\text{ж}} - T_{\text{н}} - \frac{\alpha}{2} (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}) \right], \quad (2.9)$$

где $x_{\text{с}}$ — абсцисса центра величины; L — длина судна по КВЛ; α — коэффициент полноты действующей ватерлинии.

Водоизмещение вычисляют по кривым площадей шпангоутов (по масштабу Бонжана) или кривым элементов теоретического чертежа с использованием значения $T_{\text{ср}}$, найденного по формуле (2.9). На точность определения осадки влияют волнение, наличие льда и др., а также погрешности нанесения марок углубления. На практике точность измерения осадки судна с помощью осадкомера и по маркам углубления составляет ± 5 см, или около 1,0 %, а при использовании рейки — 0,5 %.

Частоту вращения винта $n_{\text{в}}$ фиксируют при всех пробегах судна во льду. Ее измеряют либо с помощью штатных судовых электротаксметров, либо механических или фотоэлектрических тахоскопов. Во всех случаях показания приборов могут записываться на ленту осциллографа или самописца. На современных морских судах во время плавания во льдах при так называемых маневренных режимах работы энергетической установки частота вращения обычно изменяется от 40—50 до 180—200 1/мин. Точность измерения ее с помощью судовых тахметров сравнительно невысока: обычно ± 5 1/мин, т. е. в среднем 4 %. По этой причине судовые тахметры применяют в основном при попутных испытаниях. Точность измерения тахоскопов высокая: примерно ± 1 1/мин, или в среднем 0,5 %. В общем точность измерения частоты вращения винта характеризуется не только приборной погрешностью, но и случайной ошибкой, которую лучше всего оценивать с помощью среднеквадратичного отклонения. Как показывают результаты статистической обработки данных натурных испытаний, случайная погрешность $n_{\text{в}}$ при работе судна во льдах сравнительно невелика — примерно 6—10 %. Большие отклонения $n_{\text{в}}$ имеют место лишь при попадании в гребные винты крупных льдин, т. е. при их частичных или полных заклиниваниях. Однако во время испытаний судна в ровных сплошных льдах и в разреженных битых льдах это случается крайне редко.

Измерение мощности гребной установки на современных ледоколах и ледокольно-транспортных судах, которые оборудованы гребным электроприводом, не представляет затруднений. На некоторых из этих судов имеются штатные судовые ваттметры, позволяющие непосредственно регистрировать мощность на гребном электродвигателе с точностью около 1,0—1,5 %. При отсутствии этих приборов мощность определяют по замеренным силе и напряжению тока в цепи гребного электродвигателя. Для этого используют штатные судовые амперметры

и вольтметры. Погрешность измерения силы тока и напряжения составляет в среднем 1,0—1,5 %. Случайная погрешность определения мощности при ледовых испытаниях не превышает 5—8 %, так как гребной электродвигатель судов ледового плавания обычно, автоматически поддерживает постоянную мощность. На судах с дизельными гребными установками мощность измеряют методом индигирования цилиндров двигателя. Непрерывную запись в этом случае обеспечить невозможно.

Непосредственно измерять упор гребных винтов судна в процессе испытаний можно лишь при наличии надежного упоромера. Штатный судовой прибор для измерения упора гребного винта впервые был установлен на ледоколе «Ермак», построенном в 1974 г. в Финляндии. Разрабатывается ряд экспериментальных образцов упоромера в нашей стране. Опыт непосредственного измерения упора в натурных условиях небольшой, и на практике его значение в настоящее время рассчитывают по замеренной мощности гребных двигателей, частоте вращения винта и скорости судна. Тягу на гаке определяют при швартовных и динамометрических испытаниях, а также при буксировках судов во льдах с помощью пружинных или тензометрических динамометров. Они позволяют измерять усилие в буксирном тросе с погрешностью около 1,0—1,5 %.

Скорость судна во время ледовых испытаний определяют либо с помощью ледового лага, либо по времени прохождения заданных участков пути, длину которых вычисляют по карте на основании навигационных определений местоположения судна. Первый способ чаще применяют при режимных испытаниях, а второй — при попутных. В некоторых случаях, например при изучении работы судна набегами, используют оба способа одновременно. Значение скорости судна при плавании во льдах обычно изменяется в пределах от 1—2 до 8—10 уз. На основе измеренной скорости движения судна по навигационным определениям можно найти ее среднее значение на сравнительно больших участках пути (обычно не менее 0,5—1,0 мили). На погрешность этих измерений влияют такие факторы, как отдаленность береговых ориентиров, навигационное оснащение судна, видимость и т. п. Наименьшая ошибка определения места судна достигает ± 20 м [16]. Если скорость вычисляют на участке пути судна длиной 1 миля, то погрешность будет равна 1,0—1,5 %. Ледовые лаги, применяемые в настоящее время, отличаются по своей конструкции и возможностям. Наиболее известны лаг-визир и ледовый лаг, применяемый в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ), а из иностранных — лаг финской фирмы Вяртсиля. Все эти приборы измеряют скорость судна относительно ледяного покрова.

Лаг-визир применяют при ледовых испытаниях чаще всего. Несмотря на примитивность конструкции, он имеет ряд важных

преимуществ. Он отличается прежде всего простотой, надежностью в работе. Кроме того, ошибка визирования любой приметной точки на льду зависит от так называемой линейной чувствительности прибора и разрешающей способности глаза наблюдателя. Последняя в среднем равна одной угловой минуте [14], а линейную чувствительность визира (в метрах) можно вычислить по формуле

$$w_{\text{виз}} = 2\alpha_0 D_0 (1 + k'), \quad (2.10)$$

где α_0 — угол разрешающей способности глаза; D_0 — расстояние до приметной точки на льду; k' — коэффициент, равный D_0/d ; d — расстояние между визирами прибора.

Из формулы (2.10) видно, что линейная чувствительность прибора зависит от его геометрических размеров и высоты установки над ледяным покровом $H_{\text{виз}}$, которая связана с параметром D_0 соотношением

$$H_{\text{виз}} = D_0 \cos \varphi', \quad (2.11)$$

где φ' — угол наклона плоскости лаг-визироа к вертикали.

Результаты расчета показывают, что при изменении D_0 от 5 до 50 м величина $w_{\text{виз}}$ меняется от 0,03 до 2,50 м соответственно. Относительная погрешность результата измерения скорости с помощью лаг-визира будет складываться из относительных погрешностей измерения пути ε_s и времени пробега ε_t :

$$\varepsilon_v = \pm 100 \sqrt{\varepsilon_s^2 + \varepsilon_t^2}. \quad (2.12)$$

Выражая относительные ошибки ε через вероятные ρ и учитывая, что средняя скорость (в метрах в секунду)

$$v = \frac{S_{\text{виз}}}{t}, \quad (2.13)$$

где $S_{\text{виз}}$ — длина пути судна, равная базе лаг-визира, м; t — время, с, получим

$$\rho_v = \pm \frac{100}{S_{\text{виз}}} \sqrt{\rho_s^2 - (\rho_t v)^2}. \quad (2.14)$$

Вероятная погрешность измерения пути при условии, что чувствительность обоих визиров одинакова и равна их полусумме,

$$\rho_s = 2 \sqrt{\frac{w_{\text{виз}}^2}{2}}, \quad (2.15)$$

а погрешность измерения времени $\rho_t = 0,1$ с.

Учитывая это, имеем

$$\varepsilon_v = \pm \frac{1}{S_{\text{виз}}} \sqrt{(140 w_{\text{виз}})^2 + (10 v)^2}. \quad (2.16)$$

Из формулы (2.16) видно, что значение ошибки измерения скорости судна лаг-визиром зависит от чувствительности визи-

ров, длины базы прибора D_0 и скорости судна. Расчеты показывают, что при $D_0=10$ м погрешность уменьшается при снижении скорости судна с 7,6 % при $v=15$ уз до 1,1 % при $v=1,0$ уз. При такой базе удобно проводить испытания судна во льдах, толщина которых близка к предельной.

В ледовом лаге ААНИИ для измерения скорости судна используется гибкая нить, свободный конец которой закрепляют на ледяном покрове с помощью якоря (груза), сбрасываемого с борта. Нить, разматываясь с барабана прибора, вращает калиброванный ролик и тахогенератор. Импульсы, поступающие от них, фиксируются на ленту самописца. Погрешность измерения скорости с помощью ледового лага ААНИИ складывается из погрешности, которая является следствием отклонения нити лага от истинного курса судна, а также погрешности, связанной с работой датчика времени и механических узлов прибора. Как показывают расчеты, при длине нити более 100 м первая компонента погрешности становится пренебрежимо малой (менее 0,5 %). Суммарная погрешность лага при скорости судна выше 5,0 уз составляет примерно $\pm 0,1$ уз, или около 1—2 %. При малых скоростях судна (1—2 уз) точность прибора существенно снижается вследствие неравномерности вращения рабочего ролика лага, связанной с колебаниями нити, и других причин. Лаг плохо работает при сильном ветре. Однако он позволяет получать практически мгновенные значения скорости, которые удобно фиксировать на ленту осциллографа синхронно с другими переменными опыта (мощностью, частотой вращения винта и т. п.).

Опыт применения ледового лага фирмы Вяртсиля и других, принцип действия которых основан на доплеровском эффекте, весьма ограничен. Их погрешность, так же как лага ААНИИ, увеличивается при снижении скорости судна. Все сказанное выше относится к приборной погрешности измерения скорости судна. Значение случайного изменения скорости судна во льдах, особенно тяжелых, близких к предельным, как правило, значительно больше, чем погрешность самих лагов. Это связано с неоднородностью толщины и других параметров ледяного покрова.

При испытаниях инерции судна и при изучении работы набегам измеряют длину и время пробега судна чаще всего с помощью плашек, сбрасываемых на лед с борта судна. На верхней палубе размечают шкалу с метровыми делениями. Плашки служат ориентиром для измерения пути, пройденного судном при выполнении того или иного маневра. Абсолютная погрешность измерения длины пробега судна с помощью плашек достигает ± 2 —3 м, или 2—3 %.

Более прост и надежен способ измерения длины пробега штатным судовым радиолокатором. С его помощью можно фиксировать расстояние до заданного неподвижного ориентира

(приметной точки берега, айсберга или судна, расположенного в зоне действия локатора). В этом случае длина пробега судна вычисляется как разность между отсчетами локатора в начале и конце маневра. С помощью радиолокатора измеряют также диаметр циркуляции судна во льду. Погрешность этих измерений составляет в среднем $\pm 0,1$ кабельтова, или примерно 1—3 %.

Деформацию элементов конструкций корпуса судна в ледовых условиях определяют с помощью электрических тензометров сопротивления. Последние монтируют на внутренней поверхности ледового пояса наружной обшивки и на наборе борта в зоне действия ледовых нагрузок. По технологии, разработанной в ААНИИ [41], каждый тензометр предварительно наклеивается в лабораторных условиях на полоски стальной фольги площадью около 8×30 мм. Затем полоски с датчиками приваривают к набору или обшивке корпуса судна с помощью специального сварочного аппарата для точечной сварки. Приварку выполняют по периметру датчика с шагом 1—1,5 мм. В комплект аппаратуры для тензометрических испытаний входят также усилители (8АНЧ-7М или др.) и шлейфные осциллографы (К-12-22 или др.). Измеряют деформации набора и обшивки корпуса с приборной точностью около 1—3 %. Случайные изменения значений деформаций, как правило, значительно больше, так как даже при плавании судна в ровных сплошных льдах напряжение в заданной точке корпуса в течение небольшого интервала времени изменяется в широких пределах — от нуля до максимальных значений. Это происходит вследствие особенностей взаимодействия корпуса со льдом и неравномерности свойств ледяного покрова.

Из изложенного выше видно, что приборная погрешность измерения всех элементов судна при натуральных испытаниях во льдах примерно одинакова — 1—3 %. Случайные погрешности (неопределенности) играют наиболее существенную роль при определении скорости судна во льдах, деформации элементов набора и обшивки корпуса и в несколько меньшей степени при фиксировании мощности и частоты вращения гребных винтов. Уменьшить влияние случайной погрешности на результаты опытов можно частично за счет повышения количества замеров, однако полностью устранить ее не удастся, поскольку процесс движения судна в ледовой среде имеет случайный характер.

2.5.2. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛЕДОВОЙ СРЕДЫ

В число параметров, которые в первую очередь учитывают при проведении ледовых испытаний, входят толщина ледяного покрова, его сплоченность, торосистость, разрушенность, сжатие, а также прочность льда, высота и плотность снежного покрова.

В ряде случаев также определяют фрикционные характеристики льда.

В процессе натуральных испытаний измеряют толщину льда либо с борта судна, либо непосредственно с ледяного покрова в основном с помощью ледомерных реек. С борта судна толщину измеряют с помощью длинной Т-образной рейки, снабженной шкалой с ценой делений 5 см. Преимущество измерений толщины льда с борта в том, что они выполняются попутно, без задержки судна. Как правило, при этом удается визуально контролировать состояние нижней кромки льдины, которая часто имеет сколы. Однако при этом количество измерений не может быть значительным из-за трудности снятия отсчетов при большой скорости судна. Правда, момент измерения можно фиксировать на фотопленку, а затем обрабатывать в камеральных условиях. Погрешность измерения составляет: при визуальном снятии отсчетов $\pm 2,5$ см, или 2—3 %, а при фиксировании на пленку — ± 1 см, или примерно 1 %.

Толщину со льда измеряют с помощью небольших Г-образных реек, которые опускают в воду у кромки канала или в специально пробуренное во льду отверстие. Отсчет толщины ведут от нижней поверхности ледяного покрова. Можно сделать достаточно большое количество замеров (100 и более), однако это неизбежно связано с задержкой судна, что не всегда допустимо. Им пользуются в основном при режимных испытаниях судна в сплошных льдах, тогда как при попутных испытаниях приходится ограничиваться измерениями с борта. Погрешность измерения толщины со льда составляет ± 1 см, т. е. примерно 1 %. Анализ данных этих измерений показывает [5, 6], что случайный естественный разброс толщины так называемого ровного ледяного покрова в несколько раз превышает инструментальную ошибку. Поэтому детальный анализ погрешности измерений толщины льда затрудняет то, что исследователь фактически имеет дело с неопределенностью: истинное значение толщины неизвестно. Поскольку величина случайного отклонения в рассматриваемом случае более чем в три-пять раз превосходит приборную ошибку, повысить точность можно в основном за счет увеличения числа измерений. Существенного увеличения числа замеров толщины льда можно добиться лишь за счет применения аппаратуры, позволяющей выполнять измерения с борта судна неконтактным способом. В настоящее время такие приборы — толщиномеры — лишь создаются.

Сплоченность, торосистость, разрушенность и сжатие ледяного покрова фиксируют визуально в баллах сплоченности (по десятибалльной шкале), торосистости (по пятибалльной шкале), разрушенности (по пятибалльной шкале) и сжатия (по трехбалльной шкале). Методика ледовых наблюдений, основанная на применении официальной номенклатуры морских льдов [11], подробно изложена в Инструкции для наблюдения над

льдами с корабля [24]. Не вдаваясь в подробности, отметим, что точность наблюдений всех перечисленных параметров льда невелика, и равна примерно $\pm 0,5$ балла, что эквивалентно относительной погрешности 5 % при измерении сплоченности, 10 % при измерении торосистости и разрушенности, 15 % при измерении сжатия льда. Инструментальные методы измерения этих параметров льда пока отсутствуют.

Прочность ледяного покрова при изучении ледовой ходкости и маневренности судна принято характеризовать пределом прочности на изгиб. При определении этого параметра проводят механические испытания образцов ледяного покрова, которые берут на всю толщину и разрушают на плаву. Измеряют разрушающие усилия динамометрами пружинного или тензометрического типа. Кроме этого, определяют температуру воздуха, воды и льда, соленость воды и льда, а также деформацию образца. Визуально фиксируют структуру льда и характер разрушения образца. Суммарная приборная погрешность измерения предела прочности льда на изгиб составляет в среднем 3—5 %. Случайный разброс его значений значительно превышает приборную погрешность. Это объясняется в основном природной неравномерностью распределения прочности льда. Повысить точность определения предела прочности льда за счет существенного увеличения количества измерений в данном случае практически невозможно из-за большой сложности проведения испытаний. Косвенные методы измерения этого параметра пока не дают удовлетворительных результатов.

В ряде случаев оценивают динамическую прочность ледяного покрова. Ее принято характеризовать ударной энергией дробления льда при ударе. Экспериментально определяют эту характеристику льда по оригинальной методике, подробно описанной в работе [78]. При этом измеряют глубину внедрения рабочего тела в виде полусферы в лед, ускорение и ряд других параметров. Суммарная погрешность измерения этой величины составляет примерно 4—6 %, а случайный естественный разброс значений, так же как и при определении предела прочности на изгиб, в несколько раз больше.

При экспериментальном определении фрикционных характеристик льда — статического и динамического коэффициента трения — проводят опыты, основанные на применении трибометра Кулона. Ледяные или стальные образцы буксируют по ледяной поверхности морского или пресноводного водоема. С помощью кольцевого тензометрического динамометра измеряют тяговое усилие, которое равно силе трения, а также скорость буксировки образца. При этом фиксируют температуру воздуха и льда, шероховатость поверхности и т. п. Суммарная приборная погрешность определения коэффициента трения льда составляет в среднем 3—5 %, а случайная ошибка — в два—шесть раз больше.

Высоту снежного покрова измеряют со льда с помощью специальной снегомерной рейки (точность равна $\pm 0,5$ см, т. е. примерно 2—3 %), а при измерении с борта судна — обычной ледомерной рейкой (точность составляет ± 2 см, т. е. 8—10 %). Случайная ошибка при определении высоты снежного покрова достигает примерно 20—30 %.

Плотность снега обычно определяют весовым плотномером с точностью до $\pm 0,01$ г/см³, или примерно 3—5 %. Эту величину можно установить и путем взвешивания образцов, вырезанных из снежного покрова достаточно высокой плотности (точность до 2—3 %).

Проведенный анализ показывает, что ряд параметров ледовой среды, таких, как толщина льда, высота снежного покрова и его плотность, в процессе натурных испытаний судна измеряют со сравнительно высокой приборной точностью (около 1—3 %). Физико-механические характеристики льда, такие, как прочность под действием статической и динамической нагрузки и коэффициенты трения, определяют с точностью около 3—5 %. При визуальной оценке сплоченности, разрушенности и сжатия ошибка достигает 10 % и более. При проведении опытов надо стремиться к тому, чтобы относительные ошибки измерений каждого звена были примерно одинаковы. В противном случае общая погрешность результата задается той величиной, точность измерения которой наименьшая. Наиболее строго это требование выполняется при режимных испытаниях судна в ровных сплошных льдах. При испытаниях судна в неоднородной ледовой среде, особенно при наличии торосистости, сжатия льда и т. п., общая погрешность эксперимента возрастает до указанных выше значений. Для повышения точности измерений необходимо в первую очередь усовершенствовать методы ледовых наблюдений.

2.5.3. ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Гидрометеорологические характеристики при натурных испытаниях судна относятся к числу так называемых внешних переменных эксперимента. Обычно в процессе ледовых испытаний ограничиваются измерением температуры воздуха, воды и льда, глубины акватории, силы и направления ветра, видимости. Все измерения проводят в начале и по окончании каждой серии пробегов судна обычно с помощью приборов, имеющихся на судне: эхолота, анемометра, компаса и т. п., а также специальных: термометров для воздуха, воды и льда, соленомеров и т. п. Погрешность определения температуры воздуха составляет обычно $\pm 0,5^\circ$. При измерении температуры забортной воды, которая обычно близка к 0°C , пользуются штатным судовым термометром (температурным градиентом в поверхностном слое воды, равном осадке судна, при этом пренебрегают).

При проведении опытов по изучению физико-механических свойств льда температуру воды и льда часто измеряют с помощью термопар или электрических термометров сопротивления. Погрешность определения температуры воды и льда составляет $\pm 0,1^\circ$, или примерно 2—5 %, а термоэлектрическими датчиками — $\pm 0,05^\circ$, или 1—2 %. Соленость воды и льда определяют с помощью электросоленометра или методом титрования по хлору. Первый способ проще, но менее точен (его погрешность $\pm 0,1\%$, или около 3—6 %), второй сложнее, но точнее (его погрешность $\pm 0,02\%$, или 1,5—3,0 %).

Глубину акватории определяют перед началом ледовых испытаний с помощью судового эхолота. Эти измерения не требуют высокой точности за исключением случаев, когда опыты проводят на малых глубинах: применяют специальный мелководный эхолот, точность которого составляет примерно $\pm 0,5\%$, или 2—3 %. Из числа характеристик ветрового режима в процессе испытаний регистрируют силу и направление ветра не только истинного, но также относительного, т. е. значения, характеризующие воздушный поток на ходу судна. Регистрирующие приборы помещают на высоте не менее 5 м над ходовым мостиком. Замеры выполняют дистанционно с помощью специальной установки типа М-12 либо с помощью ручного анемометра или анемометра для автоматического измерения средней скорости ветра типа М-61. Для определения направления ветра используют судовой флюгер с градуированной шкалой, которую ориентируют по компасу. Истинную скорость ветра фиксируют с помощью круга П. А. Молчанова или строят треугольник скоростей.

2.5.4. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПРОЦЕССОМ ДВИЖЕНИЯ СУДНА ВО ЛЬДУ

Наблюдения за процессом движения судна имеют важное значение при изучении ледовых качеств и могут в зависимости от целей испытаний быть самостоятельными либо попутными. В первом случае их проводят с помощью специальной аппаратуры и технических средств, а во втором ограничиваются визуальными наблюдениями. В том и другом случае они в значительной степени имеют субъективный характер и их качество зависит от опыта исследователя.

Различают два основных аспекта наблюдений: один направлен на изучение характера движения судна во льду, а другой — на исследование взаимодействия корпуса с ледяным покровом. В первом случае основное внимание уделяют наблюдениям за параметрами, которые характеризуют траекторию перемещения корпуса при работе судна в различных ледовых условиях. Для того чтобы иметь полное представление о траектории движения судна как твердого тела, достаточно располагать данными о плоских линейных перемещениях двух любых точек корпуса

либо о линейном и угловом перемещении одной из них. При наблюдениях, проводимых с борта испытываемого судна, такие данные получают с помощью курсографа, компаса, осадкомера, акселерометра, вибрографа и гировертикали. Правда, наблюдатель и приборы связаны с самим движущимся объектом, что ограничивает возможности изучения элементов перемещений. Поэтому лучше наблюдения выполнять с поверхности ледяного покрова, который практически неподвижен, что, однако, не всегда возможно. Наблюдения выполняют, используя кино- и фотоаппаратуру. Съемку часто осложняют погодные условия. Результаты съемки зависят от правильного выбора дистанции: при крупномасштабной съемке не удастся разместить в кадре все судно. Для качественной обработки материалов киносъемки важно иметь неподвижную базу, которая может служить началом отсчетов.

Во втором случае — при изучении взаимодействия корпуса судна со льдом — с помощью зарисовок, обмеров, фото- и киносъемки, а также описаний фиксируют:

а) общую картину взаимодействия корпуса с ледяным покровом (сплошным, битым, в канале, при сжатии и т. п.) и ее особенности;

б) поле скоростей (траектории перемещений льдин в зоне корпуса, особенности взаимодействия льдин друг с другом и т. п.);

в) деформацию разрушения ледяного покрова корпусом судна (виды деформации, особенности образования и развития трещин, характер разрушения и т. п.);

г) особенности фрикционного взаимодействия корпуса со льдом (характер и локализация перемещения льдин вдоль корпуса и их взаимодействие между собой и с кромками канала, примерзание льдин и снега к обшивке корпуса, буксировка льдин корпусом и т. п.);

д) контакт корпуса со льдом при ударах и при ледовом сжатии и т. п.;

е) форму канала за судном (геометрия кромок, сплоченность, размеры и распределение льдин по каналу на различном расстоянии от кормы судна, особенности канала при непрерывном движении и при работе набегам и пр.);

ж) характер обгегания льдом подводной части корпуса, траектории движения льдин и т. п.

Поскольку при наблюдениях с палубы испытываемого судна обзор корпуса в районе действующей ватерлинии ограничен из-за развала бортов, то приходится оборудовать специальные площадки или беседки, вынесенные за корпус. В ряде случаев (например, при изучении канала за ледоколом) прибегают к наблюдениям с вертолета или соседних судов. Хорошие результаты можно получить при наблюдениях, выполняемых со льда, а также из-под него с помощью водолазов-аквалангистов.

ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ИСПЫТАНИЙ. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ЛЕДОВЫХ КАЧЕСТВ СУДНА

§ 3.1. ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ИСПЫТАНИЙ СУДНА

3.1.1. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ СУДНА

Каждый пробег судна в заданных ледовых условиях рассматривается как однородное испытание, при котором все основные переменные эксперимента сохраняют постоянное значение. Однородность испытаний — необходимое условие при применении статистических приемов обработки материалов, которые на первоначальном этапе имеют первостепенное значение. Замеры, выполненные при каждом пробеге судна, представляют собой практически случайные величины. Иными словами, случайная погрешность (неопределенность) играет важную роль. Как было показано выше, погрешности экспериментов, вообще говоря, имеют систематическую (приборную) и случайную составляющие. Можно, однако, считать, что неопределенность в целом задается некоторым распределением относительно истинного отсчета. Установлено, что распределение отклонений параметров изучаемых процессов существенно не отличается от нормального. Поэтому при обработке и анализе материалов испытаний в качестве неизвестного истинного значения измеряемых величин, как правило, можно использовать их среднее значение.

Важное условие правильного применения статистических методов оценки результатов испытаний — изъятие грубых ошибок наблюдений. Основной способ выявления — тщательный анализ условий испытаний. Наблюдения, проводившиеся в нарушенных условиях, должны отбраковываться независимо от результата. Эта задача решается в процессе первичной обработки результатов испытаний. Ее обычно выполняют непосредственно после завершения каждой серии пробегов. Для этого просматривают записи всех первичных наблюдений и оценивают их полноту и качество. Затем для каждого пробега выстраивают график синхронизированных замеров всех переменных опыта. На основании этого графика оценивают однородность условий опыта, отбраковывают данные и выбирают участки установившегося движения судна. Для них составляют выборки по каждой пере-

менной опыта, подсчитывают средние значения переменных, среднеквадратичные отклонения и т. п. Большие выборки с числом элементов 25—30 и более обрабатывают с помощью ЭВМ. При этом определяют математическое ожидание, дисперсии, моменты, критерии согласия и другие статистики распределения каждого параметра, а в процессе составления выборок окончательно, более тщательно отбраковывают данные. Показателем ошибочности элемента в выборке служит отклонение его величины от остальных элементов. Сомнительным, как правило, бывает самый большой и самый малый элементы выборки (при нормальном распределении — «крайний» элемент). При доверительной вероятности $(1 - p)$ для наблюдения x справедлива доверительная оценка

$$|x - a| \leq u_{1-p} \sigma, \quad (3.1)$$

где a и σ — параметры генеральной совокупности; u_{1-p} — квантиль стандартного нормального распределения.

Анализ выборки из нескольких элементов более сложен. Его нельзя выполнить, исследуя каждый элемент выборки отдельно по формуле (3.1), так как при увеличении объема выборки увеличивается вероятность больших отклонений. Первичную обработку заканчивают составлением сводного протокола испытаний, в который заносят осредненные данные по всем пробегаем.

На следующем этапе обработки приводят результаты испытаний к стандартным условиям. Испытания ходкости и маневренности приводят к спецификационной осадке судна (с грузом и в балласте) и при отсутствии ветра. Учитывают влияние отклонения осадки и водоизмещения от стандартных с помощью формул раздела 4.2.1, которые позволяют вычислить соответствующие поправки.

Исключить влияние ветра на результаты испытаний судна во льдах можно следующим образом. По данным измерений скорости и направления ветра строят векторные диаграммы, по которым определяют скорость и направление ветра относительно судна, а затем рассчитывают ветровое сопротивление

$$R_a = c'_{\text{хв}} \frac{\rho_a}{2} F_{\text{ж}} v_a^2, \quad (3.2)$$

где $c'_{\text{хв}}$ — коэффициент сопротивления, который можно определить с помощью графика (рис. 3.1); ρ_a — плотность воздуха, кг/см³; $F_{\text{ж}}$ — площадь поперечной проекции надводной части судна, см²; v_a — относительная скорость ветра, м/с.

Значение $c'_{\text{хв}}$ необходимо откорректировать [26]. Для этого находят эквивалентную высоту z , которая равна $z = 0,5f + 0,4H_1$ для судов с прерывистыми надстройками и $z = 0,5H_1$ — для судов с непрерывной надстройкой (здесь H_1 — средняя высота надстройки судна над ватерлинией, м; f — высота корпуса над ватерлинией, м). Вслед за этим по графику рис. 3.2, а

В зависимости от эквивалентной высоты z находят градиент скорости, с помощью которого по рис. 3.2, б вычисляют процентную надбавку к коэффициенту $c'_{хв}$, учитывающую неравномерность скорости ветра по высоте. Потом по рис. 3.2, в находят коэффициент $y = f(v_a/v)$, на который следует умножить поправку $\Delta c'_{хв}$ в зависимости от отношения скоростей ветра и судна.

Для обработки и анализа результатов ледовых испытаний судна часто приходится использовать графические методы. При графическом анализе особое внимание следует уделять выбору и преобразованию системы координат, стремясь к получению линейных зависимостей. В результате упрощаются расчетные зависимости (см. гл. 4), что облегчает вычисление различных статистических показателей, оценку ошибок, экстраполяцию и т. п. Выбору формы построения таких линейных зависимостей в каждом случае помогает понимание физического смысла эксперимента.

Рис. 3.1. Зависимость коэффициента сопротивления $c_{хв}$ от курсового угла судна α относительно ветра.

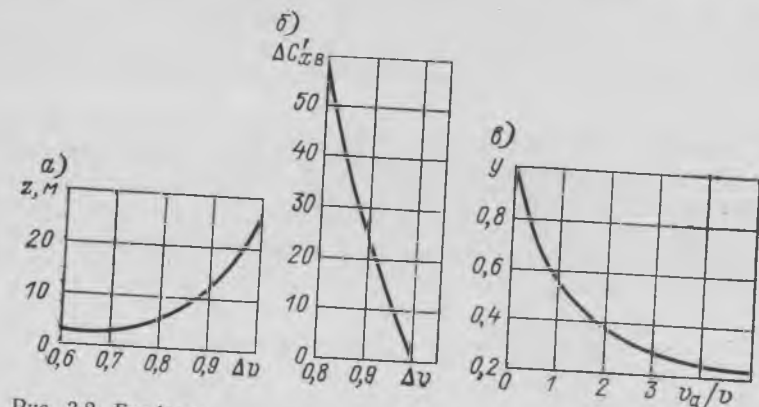


Рис. 3.2. Графики для вычисления поправок к коэффициенту сопротивления $c_{хв}$: зависимость градиента скорости от z (а), $\Delta c'_{хв}$ (б) и множителя y от v_a/v (в).

В процессе анализа результатов испытаний и получения зависимостей для оценки характеристик ледовых качеств судна используют как обычные (детерминативные) математические методы, так и вероятностные. Не вдаваясь в детали (см. разделы

3—5), отметим, что при изучении ледовой ходкости применяют в основном детерминационные методы (см. гл. 4), при изучении ледовой прочности корпуса — вероятностные (гл. 3), а при изучении маневренности — те и другие (гл. 3—4).

3.1.2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТИ СУДНА

В отличие от испытаний ходкости и маневренности, при которых изучается стационарное или квазистационарное движение, во время испытаний ледовой прочности всегда имеем дело с неустановившимися случайными процессами. Это обусловлено, с одной стороны, стохастическим характером изменения свойств льда, встречающегося на пути судна, а с другой, самим характером переменных эксперимента (в первую очередь, деформаций набора и обшивки при движении судна во льду). Вследствие этого приемы обработки и анализа данных испытаний имеют свои особенности. На предварительной стадии обработки материалов тензометрических испытаний прочности корпуса судна проводится синхронизация (привязка по времени) каждого осциллографического кадра с данными ледовых наблюдений и записями скорости движения судна. Черновую обработку самих осциллограмм начинают с их расшифровки. Записанные ударные импульсы дифференцируют по условиям, в которых они получены. Снятые с ленты значения напряжений и продолжительности ударного импульса, а также скорость движения судна и данные о ледовой обстановке фиксируют в специальных журналах. В них подклеивают и осциллограммы. Обычно число осциллографических кадров, получаемых в процессе испытаний того или иного судна, достигает 200—300. Число ударных импульсов, зафиксированных каждым датчиком, примерно такое же, а часто и больше. Таким образом, исходные данные являются репрезентативными.

В первую очередь при обработке осциллограмм выявляют максимальные значения напряжений, зафиксированные каждым датчиком. Выстраивают графики их распределения по длине носовой оконечности судна при плавании в тех или иных условиях (в припае, дрейфующих льдах, канале, проложенном ледоколом, и т. п.). Затем строят кривые суммарного распределения напряжений за весь период наблюдений. С их помощью уточняют район носовой оконечности, принимающий наиболее активное участие во взаимодействии со льдом. Значение максимальных напряжений служит ориентиром при оценке уровня внешних ледовых нагрузок. Затем для каждого датчика отдельно подсчитывают математическое ожидание замеренных напряжений $\bar{x}$ и дисперсию этих значений $\overline{\sigma_s}$. Затем строят кривые распределения, уточняют локализацию действия ледовой нагрузки, определяют

уровень «нагруженности» элементов конструкции бортового перекрытия в зависимости от ледовых условий плавания. Далее с помощью выборок максимальных амплитуд, снятых с каждого кадра, определяют (как среднее арифметическое) ве-

личину осредненного максимального напряжения $\bar{\sigma}_m$. При таких выборках учитывают только действенные значения напряжений, а влияние множественных мелких ударных импульсов исключают как случайный шум. Из табл. 3.1, составленной по результатам натурных испытаний, видно, что со скоростью судна и параметрами ледовой среды наиболее устойчиво коррелируется величина $\bar{\sigma}_m$ в кгс/см².

Таблица 3.1

Результаты статистической обработки тензометрических испытаний танкера

Скорость, уз	Самостоятельное движение					
	Мелкобитый лед, 7—8 баллов			Крупнобитый лед, 8—10 баллов		
	σ_m	$\bar{\sigma}_m$	$\bar{x}$	σ_m	$\bar{\sigma}_m$	$\bar{x}$
До 5	240	180	80	—	—	—
5—8	390	230	110	1200	430	215
8—10	435	360	170	—	—	—
Свыше 10	560	440	150	—	—	—

Скорость, уз	Плавание в канале за ледоколом								
	Мелкобитый лед, до 7 баллов			Крупномелкобитый лед, 6—8 баллов			Крупномелкобитый лед, 8—10 баллов		
	σ_m	$\bar{\sigma}_m$	$\bar{x}$	σ_m	$\bar{\sigma}_m$	$\bar{x}$	σ_m	$\bar{\sigma}_m$	$\bar{x}$
До 5	610	410	220	780	460	280	1700	860	—
5—8	1650	510	280	1100	520	280	1800	101	—
8—10	1100	580	245	800	540	254	—	—	—
Свыше 10	2000	690	324	—	—	—	—	—	—

§ 3.2. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЯ СУДНА ВО ЛЬДУ

3.2.1. СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОРПУСА СО ЛЬДОМ

Выше показано, что взаимодействие судна со льдом следует рассматривать как дискретный случайный процесс. Отдельные ударные импульсы a_j , действующие в зоне контакта борта со

льдом, прикладываются в произвольные моменты времени t_j к участкам борта с произвольными координатами центра зоны контакта x_j и z_j (третья координата y_j определяется заданием первых двух). Величины a_j , t_j , x_j и z_j можно полагать статистически независимыми.

При исследовании задач, связанных с движением судна во льдах, достаточно ограничиться двумя измерениями, т. е. полагать, что контакт борта со льдом происходит в плоскости xOy , совпадающей с плоскостью ватерлинии (рис. 3.3). Пренебрегая силами трения, ударный импульс можно считать направленным

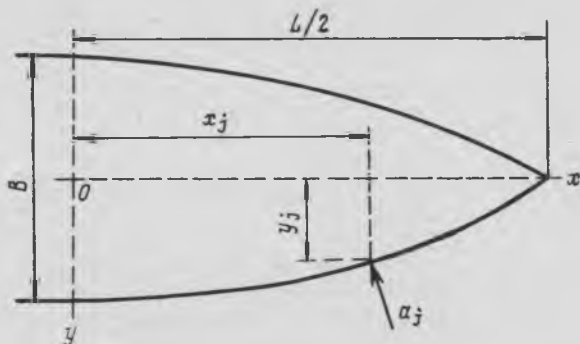


Рис. 3.3. Схема удара судна о лед.

по нормали к борту судна в точке удара. Если l_j , m_j , n_j — направляющие косинусы этой нормали, то вектор ударного импульса

$$\begin{pmatrix} a_{jx} \\ a_{jy} \\ a_{jz} \end{pmatrix} = a_j \begin{pmatrix} l_j \\ m_j \\ n_j \end{pmatrix}.$$

Обозначим через $(^k a_j)$ множество возможных значений амплитуды ударного импульса a_j , которая является случайной величиной, характеризующейся плотностью вероятности $p_a(a)$. Математическое ожидание для различных компонент ударного импульса определим, произведя осреднение по k реализациям. Если амплитуда ударного импульса и координата точки ее приложения статистически независимы, то для x компоненты импульса получим выражение

$$E_k [^k a_{jx}] = E_k [^k a_j] E[l(x_j)] = \bar{a} \int_{\Omega} l p(x) dx, \quad (3.3)$$

где $\bar{a}$ — среднее значение амплитуды ударного импульса; $p(x)$ — плотность вероятности попадания удара в точку борта с координатой x ; Ω — область интегрирования.

Интеграл необходимо вычислить для обоих бортов, всюду, где $p(x) \neq 0$ и $l \neq 0$. Очевидно, среднее значение y -компоненты ударного импульса равно нулю вследствие симметрии и статистической эквивалентности обоих бортов, а z -компоненту можно найти по выражению, аналогичному (3.3). При решении некоторых задач необходимо знать моменты более высоких порядков. Для момента второго порядка, например $E_k[k a_{jx} k a_{ix}]$, в случае статистической независимости амплитуды импульса a_i и координаты точки его приложения x_j имеем

$$E_k[k a_{jx} k a_{ix}] = \begin{cases} \bar{a}^2 \varphi_1 & \text{при } i=j; \\ (\bar{a})^2 \varphi_2^2 & \text{при } i \neq j, \end{cases}$$

где

$$\varphi_1 = \int_{\Omega} l^2(x) p(x) dx;$$

$$\varphi_2 = \int_{\Omega} l(x) p(x) dx.$$

Фактически амплитуды импульсов и их координаты не обязательно статистически независимы. Все формулы в таком случае значительно усложняются. Математическое ожидание x -компоненты ударного импульса в этом случае

$$E_k[k a_{jx}] = \bar{a} \varphi_2 + \text{cov} \{a_j; l_j\},$$

где ковариация зависит от дисперсий σ_a^2 и σ_l^2 и коэффициента корреляции ρ_{ax} :

$$\text{cov} \{a_j; l_j\} = \rho_{ax} \sqrt{\sigma_a^2 \sigma_l^2},$$

где

$$\sigma_a^2 = \bar{a}^2 - (\bar{a})^2; \quad \sigma_l^2 = \varphi_1 - \varphi_2^2.$$

Коэффициент корреляции ρ_{ax} может быть определен экспериментально. Если плотность вероятности попадания $p(x)$ задана или имеется ее экспериментальное значение, то величины φ_1 и φ_2 зависят только от формы корпуса судна и могут быть рассчитаны заранее. Аппроксимация для $p(x)$ может быть довольно грубой, поскольку возможные ошибки сгладятся при интегрировании. Для ледоколов обычно принимают аппроксимации, подобные приведенной на рис. 3.4. Для транспортных судов можно полагать $p(x) = p_0 = \text{const}$ по всей длине носовой оконечности до начала цилиндрической вставки.

Величину p_0 во всех случаях определяют из условий нормировки

$$\int_{\Omega} p(x) dx = 1.$$

При движении в битых льдах, когда они не разрушаются от изгиба, ударный импульс a_j зависит от случайной координаты x_j точки его приложения и массы M_2 льдины, о которую пришелся удар. Если судно ударяется о кромку ледяного поля, когда $M_2/M_1 \gg 1$, где M_1 — масса судна, то

$$a_j = M_1 v \frac{l(x_j)}{C'(x_j)},$$

где v — скорость судна; C' — коэффициент приведения массы судна.

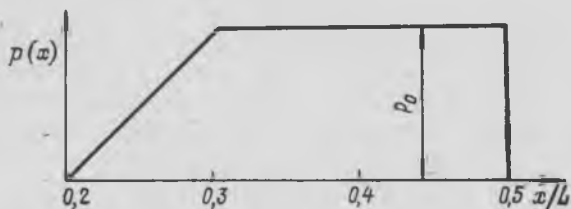


Рис. 3.4. Аппроксимация для плотности вероятности $p(x)$.

Тогда математическое ожидание и дисперсию x -компоненты ударного импульса можно найти по формулам

$$\bar{a}_x = M_1 v \int_{\Omega} \frac{l^2(x)}{C'(x)} p(x) dx;$$

$$\sigma_a^2 = M_1^2 v^2 \int_{\Omega} \frac{l^4(x)}{[C'(x)]^2} p(x) dx - (\bar{a}_x)^2.$$

В установившемся режиме движения случайная последовательность импульсов a_j представляет собой случайный стационарный процесс, когда импульсы действуют в независимые моменты времени. Экспериментально показано [41], что этот процесс является пуассоновым с постоянной средней плотностью распределения импульсов во времени λ . Вероятность попадания N импульсов в интервал времени T определяется законом распределения Пуассона:

$$P_N = \frac{(\lambda T)^N}{N!} e^{-\lambda T}. \quad (3.4)$$

Ударные импульсы обычно имеют колоколообразную форму. В первом приближении в качестве случайного параметра можно принимать только амплитуду импульса, а форму и длительность τ_0 полагать постоянными. Для большинства задач такое допущение вполне оправданно, так как и форма, и продолжительность по сравнению с изменениями амплитуды меняются весьма

незначительно. Учитывая, что импульсы непродолжительны, их можно описывать с помощью дельта-функций $\delta(t - t_j)$, равных нулю всюду, кроме $t = t_j$. С учетом локального характера приложения ударного импульса типичную реализацию подобного случайного процесса для интервала времени T представим следующим образом:

$${}^k f(t, x) = \sum_{j=1}^N {}^k a_j \delta(x - x_j) \delta(t - t_j). \quad (3.5)$$

Подобная вероятностная модель взаимодействия судна со льдом была разработана и впервые применена при исследовании общей вибрации корпуса судна при движении во льдах [72]. В дальнейшем она была использована при решении различных задач по оценке ледовой прочности корпусных конструкций, ледовой ходкости и маневренных качеств судов во льдах [75, 76].

Во время движения во льдах на корпус судна действуют ударные импульсы, вызывающие его перемещения, как твердого тела, соответствующие шести степеням свободы. Очевидно, x -компонента ударных импульсов определяет силу ледового сопротивления, перемещения в направлении оси y — боковой снос (дрейф) судна, а в направлении оси z — всплытие судна; вращение относительно оси z характеризует рыскание судна, а вращение вокруг осей x и y — соответственно бортовую и килевую качку. Если в уравнения движения входят восстанавливающие силы или моменты, то соответствующие перемещения судна будут носить характер вынужденных случайных колебаний. Если корпус судна рассматривать не как абсолютно твердое тело, а как упругую систему с распределенными параметрами, то ледовые вибрации можно считать случайными, причиной которых является воздействие тех же ударных импульсов. В обоих случаях правые части уравнений, описывающих колебания корпуса судна как твердого тела или как упругой системы, следует представить в виде случайной последовательности ударных импульсов ${}^k a_j$. Реальные амплитуды перемещений судна при движении во льдах малы. Это позволяет использовать линейное приближение и рассчитывать далее каждый вид перемещения отдельно.

3.2.2. АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ СУДНА ПРИ ДВИЖЕНИИ ВО ЛЬДАХ

Рассмотрим перемещения судна, имеющие характер вынужденных колебаний, когда в уравнения движения входит восстанавливающая сила или момент, вызванные вертикальной компонентой a_{jz} ударного импульса. При этом возбуждаются вертикальная, килевая, а также бортовая качка судна. Будем рассматривать линейное приближение, справедливое при малых

амплитудах колебаний. Уравнения вынужденных малых колебаний судна в плоскостях yz и xz запишем следующим образом:

$$I_x \ddot{\varphi} + \alpha_1 \dot{\varphi} + \Delta h \varphi = \sum_{j=1}^{2\lambda T} a_j(t) n_j y_j; \quad (3.6)$$

$$I_y \ddot{\psi} + \alpha_2 \dot{\psi} + \Delta H \psi = \sum_{j=1}^{2\lambda T} a_j(t) n_j x_j; \quad (3.7)$$

$$M \ddot{z} + \alpha_3 \dot{z} + F \rho g z = \sum_{j=1}^{2\lambda T} a_j(t) n_j, \quad (3.8)$$

где I_x, I_y — моменты инерции массы судна относительно осей x и y соответственно с присоединенными массами воды; M — масса судна; φ — угол крена; ψ — угол дифферента; α_i — коэффициент сопротивления; h и H — поперечная и продольная метацентрические высоты; F — площадь действующей ватерлинии; ρ — плотность воды; Δ — водоизмещение судна.

Все колебания корпуса происходят независимо друг от друга, поэтому можно отдельно рассматривать все виды качки: бортовую, килевую и вертикальную. Начнем с килевой качки, описываемой уравнением (3.7). Как видно из этого уравнения, задача сводится к анализу некоторой линейной системы, на вход которой подается случайный стационарный дискретный процесс. Правую часть уравнения (3.7) с учетом (3.5) можно представить в виде

$$f(t, x) = \sum_{j=1}^N a_j n_j x_j \delta(t - t_j) \delta(x - x_j), \quad (3.9)$$

где N — число импульсов, попадающих в рассматриваемый достаточно большой интервал времени $(-T, T)$.

Проведем осреднение внешнего воздействия (3.9), при этом положим величины a_j, x_j, t_j статистически независимыми. Нетрудно показать, что математическое ожидание правой части уравнения (3.7), отнесенное к единице времени,

$$\bar{f}_\psi = \bar{a} \int_{\mathbb{R}} n x p(x) dx.$$

Таким образом, математическое ожидание правой части уравнения (3.7) не равно нулю. Поэтому судно при движении будет все время иметь некоторый средний угол дифферента

$$\psi_0 = \frac{\bar{a}}{\Delta H} \int_{\mathbb{R}} n x p(x) dx. \quad (3.10)$$

Натурные наблюдения подтверждают этот факт. Килевая качка имеет характер вынужденных колебаний относительно

нового положения оси Ox (повернутой на угол ψ_0). Определим дисперсию такого отцентрованного процесса:

$$\sigma_f^2 = \bar{a}^2 \int_{\Omega} n^2 x^2 p(x) dx - \left[\bar{a} \int_{\Omega} n x p(x) dx \right]^2. \quad (3.11)$$

Частотная характеристика уравнения (3.7)

$$Y(i\omega) = \frac{1}{\Delta H / I_y - \omega^2 + (a_2 / I_y) i\omega};$$

квадрат модуля частотной характеристики запишем следующим образом:

$$|Y(i\omega)|^2 = \frac{1}{(\omega_H^2 - \omega^2)^2 + \varepsilon^2 \omega_H^4 \omega^2}, \quad (3.12)$$

где $\omega_H^2 = \Delta H / I_y$ — квадрат частоты свободной килевой качки; $\varepsilon = a_2 / \Delta H$ — коэффициент затухания.

Спектральная плотность случайной вынужденной килевой качки при движении во льдах в общем случае (при действии импульсов произвольной формы)

$$S_{\psi}(\omega) = \frac{2\sigma_f^2 \tau_0^2 \lambda |g(\omega \tau_0)|^2}{I_y^2 \{(\omega_H^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (a_2 / I_y)^2\}}, \quad (3.13)$$

где $g(\omega \tau_0)$ — спектр Фурье одиночного импульса; τ_0 — его продолжительность.

Формально в данном случае имеется узкополосный фильтр, на вход которого подается сигнал, обладающий свойствами «белого шума». Ширина полосы пропускания

$$\Delta_{\text{сиг}} = \frac{\pi}{2} \varepsilon \omega_H^2 = \frac{\pi}{2} \frac{a_2}{I_y}.$$

Если затухание мало, а именно:

$$\frac{\Delta_{\text{сиг}}}{\omega_H} = \frac{\pi}{2} \frac{a_2}{\sqrt{\Delta H I_y}} \ll 1,$$

то частотная характеристика имеет резко выраженную область резонанса в окрестности ω_H .

Аналогичные выражения могут быть получены и для вертикальной, и для бортовой качки. Таким образом, при движении в сплошных льдах судно несколько всплывает и приобретает дифферент. Относительно нового положения ватерлинии происходят колебания, кажущаяся частота которых близка к частоте соответствующих свободных колебаний.

3.2.3. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОРПУСА СУДНА

Как указывалось в работе [72], динамическое воздействие льда на корпусные конструкции $P(t)$ во многом аналогично так называемому дробовому эффекту, когда импульсы $a_j v(t-t_j)$ следуют друг за другом. Форма импульсов $v(t-t_j)$ аппроксимируется дельта-функцией $\delta(t-t_j)$, так что

$$P(t) = \sum_{j=1}^N a_j \delta(t-t_j), \quad (3.14)$$

где N — число импульсов в рассматриваемом интервале времени $0 \leq t \leq T$. Амплитуда импульса a_j — случайная величина с конечной дисперсией, а моменты $t = t_j$ — случайные, определяемые некоторым пуассоновым процессом со средней плотностью λ . Если процесс $P(t)$ начинается с $t = -\infty$, то он стационарный и эргодический. Для такого процесса

$$EP(t) = \lambda Ea_j = \xi, \quad (3.15)$$

а для спектральной плотности по множеству наблюдений

$$g_{PP}(\omega) = \xi^2 \delta(\omega) + \frac{\lambda}{2\pi} Ea_j^2. \quad (3.16)$$

Формулы (3.15) и (3.16) характеризуют процесс $P(t)$ в целом, а интерес в основном представляют амплитуды ударных импульсов или соответствующих напряжений в связях корпуса. Поэтому далее имеет смысл использовать несколько иные характеристики.

Напомним (см. подраздел 3.1.2), что при движении судна на определенном режиме в заданных ледовых условиях периодически включается измерительная аппаратура, фиксирующая деформации обшивки и набора корпуса, в сравнительно непродолжительные, не обязательно равные промежутки времени T . Можно считать, что из всего сеанса наблюдений, т. е. генеральной совокупности, выделяются случайные выборки — кадры объемом T . Таким образом, всего за сеанс продолжительностью T получаем конечное множество выборок — кадров $\{T\}$, и тогда задача сводится к определению статистик этих случайных выборок.

Можно найти несколько характерных величин, например, максимальное по всей совокупности измерений значение амплитуды действующего импульса (напряжения), т. е. $\sup\{a_k\}$, где $\{a_k\}$ — множество всех зафиксированных амплитуд. Можно установить их математическое ожидание

$$E\{a_k\} = \bar{a}, \quad (3.17)$$

где $\bar{a}$ — обычно не очень большая и мало отличающаяся для различных режимов плавания величина, поскольку при ее

вычислении приходится учитывать малые импульсы, которых большинство. Поэтому естественно ввести весовые характеристики. Для этого внутри каждого интервала τT нужно выявить максимальное значение амплитуды $\sup_i \{a_k\}$ и приписать этому значению вес, равный единице. Все прочие импульсы не учитывают, т. е. приписывают им вес, равный нулю. Тогда за основную характеристику исследуемой совокупности будем принимать математическое ожидание

$$E \sup_i \{a_k\} = \bar{a}_s \geq \bar{a}. \quad (3.18)$$

Разумеется, возможно и другое распределение весов. Равенство (3.18) выполняется, если все амплитуды a_k равны, или $i = N$. Если $i = 1$, т. е. рассматривается только одна выборка, то $\bar{a}_s = \sup \{a_k\}$. Математическое ожидание в данном случае — наглядная характеристика ударных импульсов.

§ 3.3. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХОДКОСТИ СУДНА ВО ЛЬДАХ

3.3.1. УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА В СПЛОШНЫХ ЛЬДАХ ПРЕДЕЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ

Наблюдения показывают, что движение судна в сплошных льдах толщиной, близкой к $h_{\text{пр}}$, неустойчиво. Даже двигаясь в казалось бы идеально ровных льдах, судно время от времени останавливается.

Таким образом, исследование устойчивости движения в этих условиях представляет определенный практический интерес. Отметим, что оценки усилий ледового сопротивления движению судна в сплошных льдах, приведенные в работах [30, 80, 83 и др.], основаны главным образом на результатах натурных и модельных испытаний и носят эмпирический характер. Ниже приведена сравнительно простая расчетная схема, позволяющая получить аналитическую оценку решения задачи на основании использования вероятностных методов анализа.

При движении во льду с малой скоростью составляющие сопротивления, зависящие от скорости, малы. Сопротивление движению судна в основном определяется так называемым прямым ледовым сопротивлением, не зависящим от скорости судна [30]. Зависимость сопротивления $R_{\text{л}}$ от скорости будем считать линейной с постоянным коэффициентом пропорциональности α , учитывающим как ледовую компоненту $R_{\text{л.ч}}$, так и сопротивление воды $R_{\text{в}}$. Возмущающую силу $R(t)$, равную разности между тягой винтов $T_{\text{в}}$ и прямым ледовым сопротивлением $R_{\text{прям}}$, будем полагать случайной функцией времени с детерминированной составляющей $T_{\text{в}}$ и случайной составляющей $R_{\text{прям}}$.

Ледовое сопротивление можно представить как результат последовательно приложенных к корпусу ударных импульсов, противодействующих движению. Для установившихся режимов движения судна этот случайный процесс является стационарным и эргодическим.

Счетное множество дискретных внешних воздействий на корпус образует упорядоченный временной ряд. Его можно представить, разбив случайным образом бесконечную временную ось бесконечной последовательностью точек t_j на интервалы случайной длины:

$$\Delta t_j = t_{j+1} - t_j.$$

Если взять произвольный интервал времени $(-T, T)$, то число точек N , попавших внутрь этого интервала, будет случайной величиной. Как уже говорилось, количество ударов N подчиняется закону распределения Пуассона (3.4). Для стационарных режимов средняя плотность распределения ударных импульсов во времени λ постоянна. Ее также можно определить экспериментально.

Пусть $\{^k R(t)\}$ — множество возможных значений внешнего возмущения. Скорость судна, вызванная случайной силой $^k R(t)$, также будет случайной функцией времени $^k v(t)$. Тогда дифференциальное уравнение прямолинейного движения судна водоизмещением Δ запишется так [49]:

$$\frac{\Delta}{g} \frac{d[^k v(t)]}{dt} + \alpha [^k v(t)] = ^k R(t), \quad (3.19)$$

где индекс k соответствует k -й реализации случайного процесса.

Правая часть уравнения (3.19) при установившемся режиме движения судна является стационарной случайной функцией времени. В первом приближении ее можно представить следующим образом:

$$^k R(t) = ^k R_j \text{ при } t_j \leq t < t_{j+1} (j=0; \pm 1, \dots). \quad (3.20)$$

Случайные величины $\{^k R_j\}$ статистически независимы и имеют одинаковые математические ожидания и дисперсии, не зависящие от t , т. е. для произвольных индексов j получим

$$E_k [^k R_j] = \bar{R} = T_v - \bar{R}_{\text{прям.}}$$

Интервалы Δt_j также представляют собой независимые случайные переменные, имеющие функцию распределения вероятности, не зависящую от индекса j .

Зависимость (3.20) описывает величину случайного импульса силы, действующей на судно при его прямолинейном движении в статистически однородных ледовых условиях. Этот процесс отличается от процесса (3.5), представляющего собой последовательность дельта-функций, т. е. в данном случае

рассматриваются две различные равноправные теоретические аппроксимации реального процесса взаимодействия корпуса со льдом. Обычно (3.20) используют при анализе ледовой ходкости судов, а последовательность дельта-функций (3.5) — при исследовании прочностных и маневренных характеристик.

Спектральная плотность рассматриваемого пуассонова процесса определяется по формуле, известной из работы [3]:

$$S(\omega) = \sigma_R^2 \frac{2\lambda}{\omega^2 + \lambda^2} + (\bar{R})^2 \delta(\omega), \quad (3.21)$$

где

$$\sigma_R^2 = \bar{R}_{\text{прям}}^2 - (\bar{R}_{\text{прям}})^2.$$

Корреляционная функция для $R(t)$ будет иметь вид

$$K_R(\tau) = \sigma_R^2 e^{-\lambda|\tau|} + (\bar{R})^2. \quad (3.22)$$

Функция спектральной плотности имеет особенность в начале координат, соответствующую постоянному среднему значению внешнего воздействия $\bar{R}$.

По известному соотношению между спектральными плотностями входа и выхода для спектральной плотности искомого случайного процесса $\{^k v(t)\}$ получим

$$S_v(\omega) = S_R(\omega) |Y(i\omega)|^2,$$

где $Y(i\omega)$ — частотная характеристика системы, описываемой дифференциальным уравнением (3.19). Поделим обе части этого уравнения на Δ/g :

$$Y(i\omega) = \frac{1}{\beta + i\omega},$$

где

$$\beta = \frac{\alpha g}{\Delta}.$$

Тогда спектральная плотность

$$S_v(\omega) = \left(\frac{g}{\Delta}\right)^2 \frac{2}{\pi} \frac{\lambda \sigma_R^2}{(\lambda^2 + \omega^2)(\beta^2 + \omega^2)} + \left(\frac{g}{\Delta}\right)^2 \frac{(\bar{R})^2}{\beta^2 + \omega^2} \delta(\omega). \quad (3.23)$$

Математическое ожидание скорости движения судна

$$E_k[^k v(t)] = \bar{v} = \frac{\bar{T}_v - \bar{R}_{\text{прям}}}{\alpha}. \quad (3.24)$$

При $\bar{T}_v = \bar{R}_{\text{прям}}$, средняя скорость $\bar{v} = 0$, а движение происходит лишь, когда тяга винтов $\bar{T}_v > \bar{R}_{\text{прям}}$. Однако в этом случае все же возможны остановки судна, если случайные отклонения

величины $R_{\text{прям}}$ от среднего значения достаточно долго будут превышать разность $(\bar{T}_в - \bar{R}_{\text{прям}})$. Движение судна становится неустойчивым.

В рассматриваемом случае термин «устойчивость движения» имеет чисто вероятностный смысл. Под «устойчивым» будем понимать непрерывное без остановок движение судна для достаточно больших интервалов времени с заданной обеспеченностью. Иными словами, вероятность того, что скорость судна равняется нулю по истечении определенного промежутка времени t , должна быть ограничена некоторой конечной величиной A :

$$P(\bar{v}/0, t) \leq A,$$

где A и t следует определять по данным эксплуатации судов в ледовых условиях. Величина A зависит от выбора интервала времени t или пробега судна $l = \bar{v}t$.

Рассмотрим более подробно процесс движения судна во льдах, толщина которых близка к $h_{\text{пр}}$, когда математическое ожидание скорости $\bar{v} \neq 0$. Поэтому для определения вероятности P следует отцентровать исследуемый случайный процесс. С этой целью будем рассматривать его как случайную осцилляцию скорости в пространстве (v, t) относительно среднего

значения $\bar{v}$ при выходе в момент времени $t=0$ из точки $v=\bar{v}$. Нас интересует вероятность попадания на границу $v=0$. Движение судна после остановки само по себе не возобновится, поэтому можно считать границу поглощающей стенкой. В принятой модели взаимодействия судна со льдом следующие друг за другом импульсы статистически независимы. Поэтому исследуемый стохастический процесс можно рассматривать как броуновское движение в одномерном пространстве с координатой v .

Известно, что для подобных процессов используется фундаментальное решение уравнения теплопроводности [3]. В частности, решение задачи о вероятности попадания частицы на стенку с «прилипанием» имеет вид [37]

$$w(t) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x_0}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (3.25)$$

где x_0 — начальное расстояние до стенки; D — коэффициент диффузии.

Нетрудно показать, что для рассматриваемой задачи вероятность остановки судна

$$P(\bar{v}/0, t) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{v}{2\sqrt{\lambda t \sigma_v^2}}\right), \quad (3.26)$$

где

$$\sigma_v^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (v - \bar{v})^2 p(v - \bar{v}, t) dv = D[v] - \bar{v}^2. \quad (3.27)$$

Дисперсию случайной скорости $D[v]$ в выражении (3.27) можно определить путем интегрирования спектральной плотности:

$$D[v] = \int_0^{\infty} S_v(\omega) d\omega. \quad (3.28)$$

Используя выражения (3.23) и (3.24), получим

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{\alpha M} \frac{\sigma_R^2}{\beta + \lambda}. \quad (3.29)$$

Тогда из формулы (3.26) будем иметь

$$P(\bar{v}/0, t) = \operatorname{erfc} \left(\frac{\bar{v}}{2\sigma_R \sqrt{\frac{\lambda t}{\alpha M (\lambda + \beta)}}} \right), \quad (3.30)$$

где erfc — дополнительный интеграл вероятностей.

Если средняя скорость $\bar{v}$ и время t до остановки судна достаточно велики, то пройденный путь определится, как $l_0 = \bar{v}t$. Сделав в формуле (3.30) соответствующую замену, найдем вероятность остановки судна на участке пути длиной l_0 .

Как видно из выражения (3.30), для судна бесконечной массы ($M \rightarrow \infty$) вероятность остановки равна нулю. То же имеем при $t \rightarrow 0$ или $l_0 \rightarrow 0$, т. е. если судно в данный момент двигалось со средней скоростью, ощутимо отличной от нуля, то в ближайший последующий момент времени вероятность его остановки ничтожна. Это является следствием так называемого принципа нечувствительности границы. В окрестностях начального состояния для переходной плотности броуновского движения

$$g_t(v, \bar{v}) \approx \frac{1}{2\pi t} \quad \text{при } t \rightarrow 0.$$

Переходные вероятности почти не зависят от граничных условий в самом начале, пока не станет ощутимой возможность достижения границы, т. е. остановки. Отсюда ясно, что вероятность остановки судна резко уменьшится при увеличении средней скорости движения судна $\bar{v}$ и числа соударений со льдом λ . Вероятность остановки возрастает с увеличением дисперсии возмущающей силы, т. е. при увеличении неравномерности процесса взаимодействия корпуса со льдом. Движение судов большого водоизмещения в условиях, не слишком близких к предельным, устойчиво, если дисперсия ледового сопротивления не будет чрезмерно велика. Движение судов с меньшей массой в тех же ледовых условиях менее устойчиво.

Учитывая сказанное выше, с помощью выражений (3.26) — (3.27) можно получить формулу для допустимого значения дисперсии σ_v^2 , при которой обеспечивается устойчивое непрерывное движение судна с заданной вероятностью неостановки $W = 1 - A$:

$$\sigma_v^2 = \frac{\bar{v}^2}{u^{24} \lambda t}, \quad (3.31)$$

где u — аргумент функции ошибок $\text{erf}(u)$, который вычисляется по таблицам для заданной вероятности A (или W).

3.3.2. ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Как уже отмечалось, количество ударных импульсов, возникающих при контакте корпуса судна со льдом, подчиняется закону распределения Пуассона (3.4). Средняя плотность распределения ударных импульсов во времени λ для рассматриваемых стационарных и близких к ним режимов постоянна. Ее можно выразить следующим образом:

$$\lambda \approx \frac{\bar{v}}{\Delta x}, \quad (3.32)$$

где Δx — длина ледяных сегментов, образующихся при ломке сплошного ледяного покрова бортами судна.

Эмпирически показано, что величина Δx связана с толщиной льда h линейной зависимостью

$$\Delta x = ah,$$

так что

$$\lambda = \bar{v}/ah,$$

где a — постоянный эмпирический коэффициент; $a \approx 20 \div 30$, что согласуется с выводами теории тонких упругих пластин на упругом основании.

Будем рассматривать непрерывное движение судна при заданной мощности в сплошном ледяном покрове, неравномерном по толщине. Степень этой неравномерности можно характеризовать дисперсией σ_h^2 . Следствием изменения толщины льда будет изменение скорости судна, имеющее дисперсию σ_v^2 . Поскольку изменение толщины природного льда носит случайный характер, то такой же характер имеет изменение скорости судна. По достижении дисперсией некоторого критического значения она может снизиться до нуля, и процесс движения перестанет быть непрерывным. Вероятность обращения скорости в нуль $P(v/0, t)$ в течение некоторого, достаточно большого, интервала времени t определяется по формуле (3.26).

При непрерывном движении судна с заданной мощностью его средняя скорость и толщина преодолеваемого сплошного

льда h связаны линейной зависимостью, которую в общем виде можно представить так:

$$v_{\text{ср}} = \beta_1 - k_1 h, \quad (3.33)$$

где k_1 — коэффициент, равный $(v_{\text{ч. в}} - v_{\text{min}})/h_{\text{пр}}$; $v_{\text{ч. в}}$ — скорость судна на чистой воде при заданном значении мощности; $h_{\text{пр}}$ — предельная толщина ровного сплошного льда, преодолеваемого судном непрерывным ходом с минимальной устойчивой скоростью v_{min} .

С учетом (3.33) допустимое значение дисперсии толщины льда σ_h^2 можно связать с величиной σ_v^2 по формуле

$$\sigma_v^2 = k_1^2 \sigma_h^2. \quad (3.34)$$

Используя выражение (3.31), можно получить зависимость, позволяющую определять величину σ_h^2 для любых заданных значений толщины льда и скорости движения судна [см. формулу (2.3)].

3.3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ ПРЯМОГО ЛЕДОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Дисперсия силы ледового сопротивления σ_R^2 не равна нулю даже в сплошных льдах постоянной толщины, так как их ломка происходит на участках борта, имеющих различный наклон. При этом контактные усилия будут зависеть от случайной координаты точки взаимодействия. Дисперсию σ_R^2 здесь можно оценить, используя статистическую модель взаимодействия судна со льдом. В этой модели контакт корпуса судна со льдом и его ломка одновременно осуществляются в трех точках, т. е. в треугольнике, который однозначно определяет равновесное положение судна (рис. 3.5). Одна точка расположена на форштевне, а две другие — по бортам судна симметрично его диаметральной плоскости. В этих точках действуют контактные усилия R_N , нормальные к борту судна, а также пропорциональные им силы трения, направленные по касательной к нему.

Суммарная проекция контактных усилий с обоих бортов на ось Ox с учетом сил трения

$$R_x = 2R_N(l + f_{\text{тр}} \cos \alpha), \quad (3.35)$$

где l — направляющий косинус нормали к борту судна; $f_{\text{тр}}$ — коэффициент трения борта судна о борт; α — угол наклона к диаметральной плоскости, касательной к ватерлинии.

Вертикальная составляющая контактного усилия $R_z = R_N \sin \beta'$ ломает лед (здесь β' — угол наклона борта к вертикали в точке контакта). Полагаем, что в контакт с бортом в точках 2 и 3 входят полубесконечные ледяные пластины, для ломки которых требуется усилие [25]

$$R_z = 0,52 \sigma_p h^2,$$

где σ_p — предел прочности льда на изгиб; h — толщина льда.

В точке 1 контакта форштевня со льдом действует нормальное к штевню усилие R'_N и пропорциональная ему сила трения $R'_{тр} = f'_{тр} R'_N$. Имеется в виду приведенный коэффициент трения [69]

$$f'_{тр} = f_{тр} \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \varphi}{\operatorname{tg}^2 \alpha_0}},$$

где φ — угол наклона форштевня к горизонту; α_0 — угол «входа» носовой ветви ватерлинии.

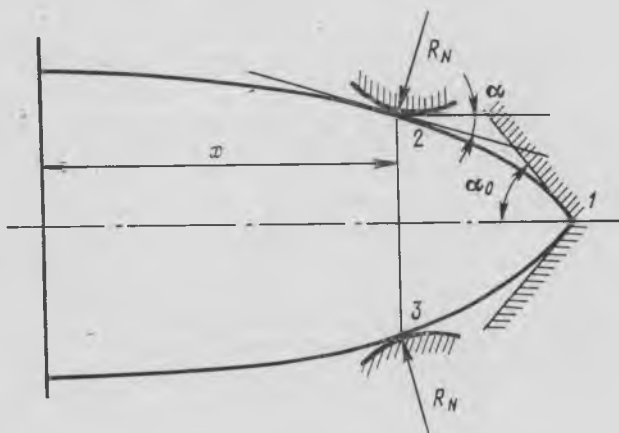


Рис. 3.5. Трехточечная схема ломки ледового покрова.

Проекция этих усилий на ось Ox

$$R'_x = R'_z (\operatorname{tg} \varphi + f'_{тр}). \quad (3.36)$$

Вертикальную составляющую контактного усилия R'_z определим, рассматривая ломку бесконечной пластины с клинообразным вырезом, имеющим угол раствора $2\alpha_0$ [28]:

$$R'_z = 1,04 \sigma_p h^2 \frac{\pi - \alpha_0}{\pi}. \quad (3.37)$$

Составляя уравнение статического равновесия судна в проекции на ось Ox и полагая контактные усилия равными разрушающему лед, получим для силы прямого ледового сопротивления следующее выражение:

$$R_{\text{прям}} = 1,04 \sigma_p h^2 k_f(x), \quad (3.38)$$

где

$$k_f(x) = \frac{l + f_{тр} \cos \alpha}{\sin \beta'} + \frac{\pi - \alpha_0}{\pi} (\operatorname{tg} \varphi + f'_{тр})$$

— безразмерный коэффициент, характеризующий форму корпуса судна.

Величина $R_{\text{прям}}$ имеет случайный характер, так как координаты точек 2 и 3 контакта со льдом случайные. Для определения среднего значения силы ледового сопротивления $\bar{R}_{\text{прям}}$ следует задать функцию плотности вероятности $p(x)$ попадания в точку борта со случайной координатой x . В этом случае

$$\bar{R}_{\text{прям}} = 1,04 \sigma_p h^2 \bar{k}_f,$$

где

$$\bar{k}_f = \frac{\pi - \alpha_0}{\pi} (\operatorname{tg} \varphi + f_{\text{тр}}) + \int_0^l \frac{l + f_{\text{тр}} \cos \alpha}{\sin \beta'} p(x) dx.$$

При движении в предельных льдах скоростной составляющей сопротивления можно пренебречь. Тогда вместо $R_{\text{прям}}$ в формулу (3.38) подставим тягу винтов $\bar{T}_v$ и определим толщину льда, преодолеваемого непрерывным ходом. Располагая бортовые точки контакта на различном расстоянии от форштевня, построим эпюру предельных толщин ломаемого льда $h(x)$ по длине судна. Характер этой эпюры дает представление о рациональности спроектированных обводов корпуса относительно его ледокольных качеств.

Таблица 3.2

Расчетные толщины разрушаемого льда для различных судов
(в метрах)

Судно	Значение h , м, в районе теоретических шпангоутов						
	1	2	3	4	5	6	7
Ледоколы	0,92	0,91	0,90	0,89	0,90	0,92	0,96
	0,61	0,60	0,60	0,59	0,59	0,60	0,63
Дизель- электроходы	0,58	0,53	0,50	0,51	0,55	0,58	—
	0,70	0,71	0,70	0,63	0,61	0,62	—

В табл. 3.2 приведены данные расчетов $h(x)$ для ряда судов при $f_{\text{тр}} = 0,1$ и $\sigma_p = 10$ кгс/см², т. е. движущихся в прочных арктических льдах. Из нее видно, что величина h непосто-

янная по длине корпуса судна и принимает наименьшие значения в районе 4-го и 5-го теоретического шпангоута, т. е. на скуле ватерлинии. Минимальная толщина льда $h_{\min}$, определенная по эпюре $h(x)$, является гарантированной предельной толщиной, преодолеваемой судном непрерывным ходом.

В качестве интегрального параметра, определяющего ледокольные возможности судна, можно принять среднее значение толщины

$$\bar{h} = \int_{\Omega} h(x) p(x) dx.$$

Для полной оценки ледокольных качеств судна необходимо учесть также показатели, характеризующие устойчивость его движения в предельных льдах. Из формулы (3.30) следует, что одним из таких параметров, зависящим от формы обводов корпуса, является дисперсия σ_R^2 силы прямого ледового сопротивления. Ее можно найти по формуле

$$\sigma_R^2 = (1,04\sigma_p h^2)^2 k_{\sigma},$$

где

$$k_{\sigma} = \int_{\Omega} \left(\frac{l + f_{\text{тр}} \cos \alpha}{\sin \beta'} \right)^2 p(x) dx - \left[\int_{\Omega} \frac{l + f_{\text{тр}} \cos \alpha}{\sin \beta'} p(x) dx \right]^2$$

— коэффициент, зависящий только от формы обводов корпуса судна.

Из формулы (3.30) следует, что при уменьшении σ_R^2 вероятность остановки судна, движущегося в предельных льдах, будет убывать. Для возможности сопоставления форм корпуса различных судов введем безразмерные величины дисперсии силы прямого ледового сопротивления и средней толщины преодолеваемого льда:

$$(\sigma_R^2)^* = \frac{\sigma_R^2}{(1,04\sigma_p h^2)^2} \text{ и } \bar{h}^* = \bar{h} \sqrt{\frac{1,04\sigma_p}{T_B}}.$$

Расчетные значения толщин преодолеваемого льда довольно близки к реальным осредненным величинам. Относительные среднеквадратические отклонения силы прямого ледового сопротивления σ_R^* невелики и составляют 8—10 % для ледоколов и 19—20 % для транспортных судов. Это свидетельствует о высокой степени совершенства формы обводов корпуса современных ледоколов. Выполнив такие расчеты для однотипных судов, можно получить объективные численные характеристики, позволяющие сопоставить их ледовые качества при работе в сплошных льдах.

3.4.1. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ СУДНА
ПО КУРСУ ВО ЛЬДАХ

Рыскание судна и боковой снос с курса при движении во льдах вызываются горизонтальными компонентами a_{jx} и a_{jy} ударных импульсов, действующих на корпус. Исследуем плоское движение судна по прямому курсу в направлении оси Ox . Уравнение, описывающее вращение судна как твердого тела относительно оси Oz , в этом случае запишем в виде [75]

$$(I_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega_3}{dt} + \lambda_{26} \frac{du_2}{dt} + \lambda_{26} u_1 \omega_3 = -(\lambda_{22} - \lambda_{11}) u_1 u_2 + M_z, \quad (3.39)$$

где I_z — момент инерции массы судна относительно оси Oz ; λ_{11} , λ_{22} , λ_{26} , λ_{66} — присоединенные массы; ω_3 — угловая скорость вращения относительно оси Oz ; u_1 , u_2 — проекции линейной скорости судна на оси Ox и Oy .

При установившемся режиме движения и сравнительно малом рыскании боковой снос судна мал, а скорость его прямолинейного движения можно считать постоянной, т. е. $u_1 = v = \text{const}$ и $u_2 = 0$. Тогда вместо уравнения (3.39) получим линейное дифференциальное уравнение, определяющее рыскание, вызванное случайной последовательностью ударов о лед,

$$(I_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega_3}{dt} + \lambda_{26} v \omega_3 = M_z. \quad (3.40)$$

Присоединенные массы и моменты можно определить приближенно, представляя обводы корпуса трехосным эллипсоидом с теми же размерениями, что и у судна, либо более точно, используя численные методы.

Момент от одиночного импульса a_j , приложенного в точке с координатами $x = x_j$ и $y = y_j$ (см. рис. 3.3), запишем в виде

$$M_{zj} = a_j [l_j y_j - m_j x_j]. \quad (3.41)$$

Рассмотрим стационарный режим движения судна в достаточно большом интервале времени $(-T, T)$. Дифференциальное уравнение (3.40) можно записать следующим образом:

$$I_z (1 + n) \frac{d\omega_3}{dt} + \lambda_{26} v \omega_3 = \sum_{j=1}^N a_j(t) (l_j y_j - m_j x_j). \quad (3.42)$$

Из статистической независимости ударов и симметрии обоих бортов судна следует, что математическое ожидание правой части уравнения (3.42) равно нулю ($\overline{M_z} = 0$). Полагая форму и

длительность каждого импульса $a(t)$ постоянными, спектр мощности такого отцентрованного процесса [3]

$$S(\omega) = \frac{2\sigma_M^2 \tau_a^2}{\tau_a} |g(\omega\tau_0)|^2, \quad (3.43)$$

где σ_M^2 — дисперсия амплитуды момента M_z ; $\tau_a \approx \lambda^{-1}$ — средняя продолжительность интервала между импульсами; $g(\omega\tau_0)$ — безразмерный спектр Фурье одиночного импульса единичной амплитуды.

Аппроксимируя реальную форму импульса прямоугольником, будем иметь

$$g(\omega\tau_0) = \frac{\sin(\omega\tau_0/2)}{\omega\tau_0/2}. \quad (3.44)$$

Введем плотность вероятности попадания удара в точку борта с координатой x . Тогда дисперсия

$$\sigma_M^2 = \overline{a^2} \int_{\frac{\pi}{2}} (ly - mx)^2 p(x) dx, \quad (3.45)$$

где интеграл берется лишь по одному из бортов.

Таким образом, задача сводится к анализу линейной системы (3.40), на вход которой подается дискретный сигнал, обладающий спектром мощности (3.43). По известной теореме о соотношении между спектрами входа и выхода [4] имеем

$$S_3(\omega) = |Y(i\omega)| S(\omega),$$

где $Y(i\omega)$ — частотная характеристика однородного уравнения (3.43). Окончательно выражение для спектра S_3 будет иметь вид

$$S_3 = \frac{2\lambda\sigma_M^2 \tau_a^2 |g(\omega\tau_0)|^2}{I_z^2 (1+n)^2 (\omega^2 + \beta_{26}^2)}, \quad (3.46)$$

где

$$\beta_{26} = \frac{\lambda_{26} v}{I_z (1+n)}.$$

Дисперсию угловых скоростей случайных отклонений от прямого курса получим, проинтегрировав спектр выходного процесса (3.46) по всему диапазону частот. Полагая импульсы прямоугольными,

$$\sigma_3^2 = \frac{2\lambda\sigma_M^2 \pi}{v^2 \lambda_{26}^2} \left[\tau_0 - \frac{1}{\beta_{26}} (1 - e^{-\tau_0 \beta_{26}}) \right].$$

Обычно $\tau_0 \beta_{26} \ll 1$, откуда

$$\sigma_3^2 = \frac{\pi \lambda \sigma_M^2 \tau_a^2}{v \lambda_{26} I_z (1+n)}. \quad (3.47)$$

Как видно из формулы (3.47), дисперсия угловых скоростей существенно зависит от формы обводов корпуса судна и параметров ударов о лед, т. е. их длительности, амплитуды, вероятности попадания в данную точку борта и т. д. Наблюдения показали, что случайный процесс, описывающий отклонения от прямого курса, является гауссовым. Поэтому задание дисперсии полностью определяет все его параметры.

Одна из важных характеристик устойчивости движения судна по курсу — среднее число рысканий за единицу времени. Ее можно определить по общей формуле для математического ожидания числа нулей нормального процесса:

$$N = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\int_0^{\infty} \omega^2 S_3(\omega) d\omega}{\sigma_3^2} \right]^{1/2}.$$

Подставив в эту формулу выражения (3.46) и (3.47), получим после интегрирования следующее простое выражение:

$$N = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2\lambda_{26}v}{I_z(1+n)\tau_0}}. \quad (3.48)$$

Для возможности сопоставления различных судов выражение (3.48) приведем к безразмерному виду, умножив на дробь L/v . Тогда безразмерный критерий устойчивости

$$K_N = \frac{NL}{v} = \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{2\lambda_{26}}{I_z(1+n)\tau_0 v}}. \quad (3.49)$$

Время соударения τ_0 довольно стабильно и незначительно зависит от ледовых условий. Поэтому устойчивость на курсе при движении в сплошных льдах с достаточно большой скоростью мало отличается от устойчивости на чистой воде. Это подтверждает практика: устойчивое движение судна в сравнительно ровных сплошных или мелкобитых льдах удается обеспечить с помощью авторулевого.

3.4.2. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИНЕРЦИИ СУДНА ВО ЛЬДАХ

Длина пробега судна при выполнении маневров (реверсов, остановок, разгонов) — важная тактическая характеристика, в значительной мере определяющая безопасность плавания во льдах. Схема определения длины пробега судна в однородных льдах (сплошных или битых) рассмотрена в работе [49]. Рассчитывают длину пробега путем численного интегрирования дифференциального уравнения движения судна во льдах:

$$Mv \frac{dv}{dx} + R(v) = R_T(v, n), \quad (3.50)$$

где M — масса судна с учетом присоединенной массы воды; $R(v)$ — полное сопротивление движению судна; $R_T(v, n)$ — суммарная тяга винтов; n — частота вращения гребного винта.

Интегрирование дифференциального уравнения (3.50) оказалось возможным, поскольку были использованы аналитические зависимости для силы сопротивления

$$R(v) = R_{\text{прям}} + \alpha v + \beta v^2, \quad (3.51)$$

где $R_{\text{прям}}$ — прямое ледовое сопротивление, не зависящее от скорости, α , β — эмпирические коэффициенты сопротивления.

Величины α , β и $R_{\text{прям}}$ зависят от формы обводов корпуса и главных размерений судна, а также от параметров льда.

Результаты расчетов по формулам, полученным в работе [49], удовлетворительно совпадают с данными натурных испытаний.

В качестве иллюстрации на рис. 3.6 приведены графики зависимости скорости судна от пройденного пути. При прочих равных условиях длина пробега в сплошных льдах зависит от начальной скорости судна v_0 и толщины льда h . Это

хорошо видно на рис. 3.7, а, где представлены результаты инерционных испытаний портового ледокола в ровных сплошных льдах малой толщины. В сильно неоднородных, особенно в многолетних торосеных, льдах разброс значений длин пробегов может быть очень велик [66], так как связан со случайным характером процесса взаимодействия корпуса судна со льдом.

Сопротивление льда движению судна также случайным образом колеблется относительно некоторого среднего значения вследствие неоднородности льда и нестабильности силового контакта судна со льдом. Среднее значение силы ледового сопротивления соответствует осредненным ледовым условиям и сглаженному процессу взаимодействия судна со льдом (см. рис. 3.7, б). Поэтому пробеги, определяемые по уравнениям движения с детерминированными составляющими, следует рассматривать как средние по множеству их возможных значений.

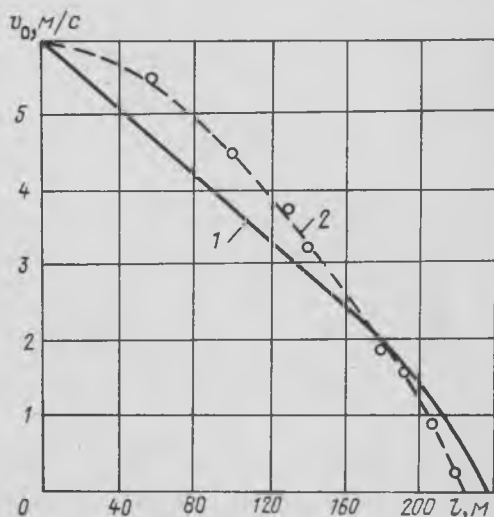


Рис. 3.6. Зависимость скорости судна от пройденного пути во время выбега.

1 — расчетная кривая; 2 — экспериментальная кривая.

При движении судна в случайно неоднородных по прочности и толщине льдах коэффициенты α , β , а также прямое ледовое сопротивление $R_{\text{прям}}(x)$ будут случайными функциями пути. Скорость судна v и искомая длина пробега l также будут случайными величинами.

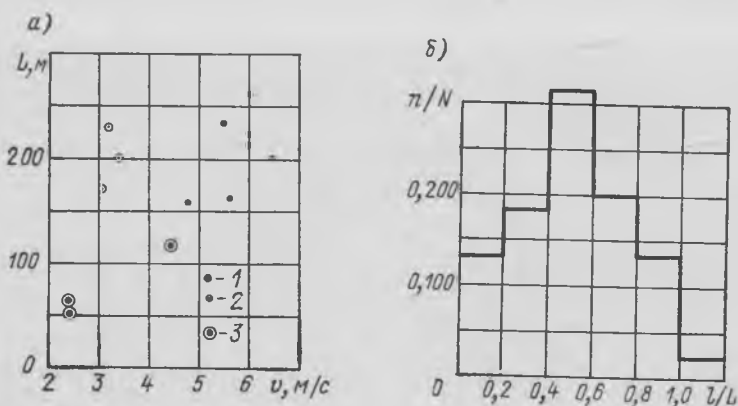


Рис. 3.7. Выбег по инерции портового ледокола (а) и гистограмма выбегов (б)

1 — в сплошном льду толщиной 25—30 см; 2 — толщиной 17—29 см; 3 — 37—38 см.

Рассмотрим пробег судна при останове ($T_v = 0$) с малой скоростью, когда можно пренебречь скоростными составляющими сопротивления. Уравнение движения можно записать так:

$$Mv \frac{dv}{dx} = -R_{\text{прям}}(x). \quad (3.52)$$

Проинтегрировав обе стороны этого уравнения от начального положения ($z = 0$; $v = v_0$) до остановки ($x = l$; $v = 0$), получим

$$\frac{Mv_0^2}{2} = \int_0^l R_{\text{прям}} dx. \quad (3.53)$$

Эта формула выражает равенство начальной кинетической энергии судна работе силы прямого ледового сопротивления на пути выбега. Уравнение (3.53) можно рассматривать как функциональное уравнение со случайным аргументом, корень которого l обладает некоторым распределением. Его свойства таковы, что интеграл от случайной функции $R_{\text{прям}}(x)$, взятый на интервале случайной длины l , остается неизменным. Среднее значение длины выбега $l = l_{\text{выб}}$ можно найти по формуле

$$l_{\text{выб}} = Mv_0^2 / 2\bar{R}_{\text{прям}}. \quad (3.54)$$

Для оценки разброса выбегов необходимо определить их дисперсию. Будем полагать, что ледовое сопротивление изменяется

скачкообразно, оставаясь постоянным на некотором малом интервале пути $\Delta x_j = x_{j+1} - x_j$, т. е.

$${}^k R_{\text{прям}}(x) = {}^k R_j \text{ при } x_j \leq x < x_{j+1}.$$

Ледяной покров считаем статистически однородным и изотропным. Весь процесс ${}^k R_{\text{прям}}(x)$, естественно, также будет статистически однородным и эргодическим. В этом случае осреднение по k реализациям не зависит от индекса j . Иными словами, среднее значение

$$E_k \{ {}^k R_{\text{прям}}(x_j) \} = \overline{R}_{\text{прям}}$$

для любого интервала из Δx_j . Среднее значение $\overline{R}_{\text{прям}}$ и дисперсия σ_R^2 прямого ледового сопротивления являются внешними параметрами задачи и должны быть заданы тем или иным способом.

При движении в статистически однородном льду вероятность изменения силы $R_{\text{прям}}$ на интервале l , т. е. вероятность попадания того или иного числа скачков в этот интервал, зависит только от его длины. Иными словами, случайное распределение скачков имеет одинаковую среднюю плотность λ_x на единицу длины. Кроме того, скачки распределяются по оси Ox независимо друг от друга и практически не совпадают. При таких условиях вероятность попадания ν скачков на отрезок l ,

$$P_\nu = \frac{(\lambda_x l)^\nu}{\nu!} e^{-\lambda_x l}.$$

Длины участков Δx между соседними скачками распределены по показательному закону с плотностью распределения

$$f(\Delta x) = \lambda_x \exp(-\lambda_x \Delta x).$$

Математическое ожидание и дисперсия величины Δx будут равны соответственно

$$E\{\Delta x_j\} = \lambda_x^{-1} \text{ и } D\{\Delta x_j\} = \lambda_x^{-2}.$$

Обозначим далее

$$\Delta R = R_{\text{прям}}(x) - \overline{R}_{\text{прям}} \text{ и } \Delta l = l - l_{\text{выб}}. \quad (3.55)$$

Очевидно, $\Delta R = 0$ и $D\{\Delta R\} = \sigma_R^2$. Среднее значение отклонения Δl равно нулю, а дисперсия $\overline{\Delta l^2}$ является искомой величиной.

Используя формулу (3.54), перепишем с учетом обозначения (3.55) уравнение (3.53) следующим образом:

$$-\overline{R}_{\text{прям}} \Delta l = \int_0^{l_{\text{в}} + \Delta l} \Delta R dx. \quad (3.56)$$

Найдем дисперсию обеих частей равенства (3.56), рассматривая интеграл в правой части как конечную сумму случайного числа случайных величин:

$$(\bar{R}_{\text{прям}})^2 D\{\Delta l\} = D\left\{\sum_{j=1}^{\nu} \Delta R_j \Delta x_j\right\},$$

где для достаточно большого интервала l число $\nu = l/\lambda$.

Дисперсия суммы случайного числа ν случайных величин $\Delta R_j \Delta x_j$, не зависящих от ν ,

$$D\left\{\sum_{j=1}^{\nu} \Delta R_j \Delta x_j\right\} = D\{\Delta R\} D\{\Delta x\} E\{\nu\} + \\ + D\{\nu\} (E\{\Delta R_j \Delta x_j\})^2.$$

Второе слагаемое в этом выражении равно нулю, поскольку величины ΔR_j и Δx_j статистически независимы, а $\overline{\Delta R} = 0$.

В первом слагаемом, очевидно,

$$E\{\nu\} = E\{\lambda_x (l_0 + \Delta l)\} = \lambda_x l_0.$$

Тогда среднеквадратичное отклонение от среднего выбега

$$\sigma_{\Delta l}^2 = \frac{l_0}{\lambda_x} \frac{\sigma_R^2}{(\bar{R}_{\text{прям}})^2}. \quad (3.57)$$

Амплитуды усилий, определяющих прямое ледовое сопротивление, можно считать распределенными по релеевскому закону или подобным образом. Тогда математическое ожидание и дисперсия будут связаны следующей зависимостью:

$$\bar{R}_{\text{прям}} = \sigma_R \sqrt{\frac{\pi}{2}},$$

что, в известной мере, подтверждается при статистическом анализе данных тензометрических испытаний.

Среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_{\Delta l} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{l_{\text{выб}}}{\lambda_x}}. \quad (3.58)$$

Вид закона распределения длины выбега l можно оценить учитывая, что

$$l = \sum_{j=1}^{\nu} \Delta x_j.$$

Величины Δx_j — независимые, поэтому при росте ν закон распределения l на основании центральной предельной теоремы стремится к нормальному. В этом случае вероятность отклоне-

ния длины выбега от среднего значения на величину Δl в обе стороны

$$P(|l - l_{\text{выб}}| < \Delta l) = 2\Phi^*\left(\frac{\Delta l}{\sigma_{\Delta l}}\right) - 1,$$

где функция Φ^* есть нормальная функция распределения. Вероятность превышения заданного уровня Δl будет равна

$$P(|l - l_{\text{выб}}| \geq \Delta l) = 2\left[1 - \Phi^*\left(\frac{\Delta l}{\sigma_{\Delta l}}\right)\right].$$

Для нормально распределенной случайной величины практически все рассеивание укладывается на участке

$$l_{\text{выб}} \pm 3\sigma_{\Delta l} = l_{\text{выб}} \pm 3\sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{l_{\text{выб}}}{\lambda_x}}. \quad (3.59)$$

В этом случае

$$P(|l - l_{\text{выб}}| \geq 3\sigma_{\Delta l}) = 0,0028,$$

т. е. вероятность превышения уровня $\Delta l = 3\sigma_{\Delta l}$ составляет долю процента. Вероятность превышения уровня $\Delta l = 2\sigma_{\Delta l}$ также невелика и составляет 4,56 %.

Нормируя случайное отклонение $\xi = \Delta l / l_{\text{выб}}$, можно найти

$$\sigma_{\xi} = \sqrt{\frac{2}{\pi \lambda_x l_{\text{выб}}}}. \quad (3.60)$$

Как следует из сравнения формул (3.58) и (3.60), абсолютная величина разброса длин пробегов судна будет возрастать при увеличении их средней протяженности $l_{\text{выб}}$, а относительная величина этого разброса будет убывать. Абсолютный и относительный разброс уменьшается при увеличении λ_x . Эту величину в сплошных льдах можно оценить, исходя из размеров первого ряда сегментов, взламываемых носовой оконечностью судна. Длина этих сегментов зависит от толщины льда, формы носовой оконечности и обычно составляет 3—5 м. Отсюда, $\lambda_x \sim 0,2 \div 0,3 \text{ м}^{-1}$. В битых льдах λ_x обратно пропорциональна среднему размеру льдины r . В мелкобитых льдах $r \sim 10 \text{ м}$, так что $\lambda_x \sim 0,1 \text{ м}^{-1}$. Таким образом, разброс значений длины пробегов в битых льдах больше, чем в сплошных.

Оценим величину разброса для $l_{\text{выб}} = 200 \text{ м}$, $\lambda_x = 0,3$. По формуле (3.59):

$$l_{\text{выб}} \pm 3\sigma_{\Delta l} = (200 \pm 60) \text{ м},$$

т. е. длина пробега распределяется в довольно широких пределах: от 140 до 260 м. Столь большой разброс отмечается и в натурных условиях, даже при движении в ровных молодых льдах (см. рис. 3.7, а).

Если рассматривать длину пробега при реверсе, то в правую часть уравнения (3.50) должна входить тяга винтов $T_{з. х}$, постоянная за время пробега:

$$Mv \frac{dv}{dx} + \alpha v = -T_{з. х} - R_{\text{прям}}(x).$$

Ход решения задачи в том случае принципиально не изменится, но в окончательные формулы придется внести коррективы. Например, длина среднего пробега судна

$$l_{\text{выб}} = \frac{Mv_0^2}{2(\bar{R}_{\text{прям}} + T_{з. х})};$$

среднеквадратичное отклонение от среднего пробега

$$\sigma_{\Delta l}^2 = \frac{l_0}{\lambda} \frac{2}{\pi} \frac{(\bar{R}_{\text{прям}})^2}{(\bar{R}_{\text{прям}} + T_{з. х})^2},$$

т. е. наличие тяги на задний ход существенно уменьшает среднюю длину пробега и значения разброса.

При практическом использовании полученных зависимостей следует помнить, что они справедливы лишь для достаточно больших значений $l_{\text{выб}}$. Это имеет место либо при малой толщине льда, либо при большой начальной скорости судна. В последнем случае скоростные составляющие сопротивления будут соизмеримы с прямым ледовым сопротивлением. Тогда целесообразно задать среднюю толщину льда и определять значения среднего пробега с учетом всех составляющих сопротивления, а затем по формуле (3.58) находить его среднеквадратичное отклонение, полагая $\lambda_x = 0,2 \div 0,3 \text{ м}^{-1}$.

§ 3.5. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА СУДОВ

3.5.1. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ УДАРА КОРПУСА О ЛЕД

При оценке ледовой прочности судов основными параметрами, характеризующими действие внешних сил, являются продолжительность ударного импульса, размеры зоны контакта, распределение количества импульсов по длине корпуса и высоте борта, распределение амплитуд, частотные характеристики и т. д. Их можно определить только при соответствующих натурных испытаниях корпусов судов.

Длительность приложения нагрузки существенно влияет на величину контактных усилий, характер работы корпусных конструкций и на прочностные характеристики льда, зависящие от времени. Результаты исследований продолжительности динамического контакта борта судна со льдом приведены в табл. 3.3.

Продолжительность удара судна о лед τ в зависимости от ледовых условий и скорости судна [41]

Тип судна	Ледовые условия	$v_{ср}$, уз	τ , с	$\bar{\tau}$, с
Мощный ледокол	Крупномелкобитый лед:			
	сплоченность 6—7 баллов, разрушенность 3 балла	8,0	0,2—0,9	0,36
	сплоченность 4—6 баллов, разрушенность 4 балла	9,0	0,3—1,2	0,46
Транспортное судно класса УЛ1А	Крупномелкобитый лед, обломки полей:			
	сплоченность 9—10 баллов, разрушенность 3 балла	12,0	0,12—0,7	0,36
	Мелкобитый лед:			
УЛ	сплоченность 6—8 баллов, разрушенность 2 балла	6,0	2	0,46
	Припай толщиной 40 см	3,0	—	0,51
	Припай речной толщиной 40 см	3,0	—	0,34
При самостоятельном движении	Крупномелкобитый лед, обломки полей:			
	сплоченность 6—7 баллов, разрушенность 4 балла	5,0	0,4—3,5	0,88
	сплоченность 6—8 баллов	6,0	0,3—2,0	0,86
При движении за ледоколом	разрушенность 4 балла	9,5	0,2—2,0	0,56

В ней продолжительность удара τ дана в зависимости от скорости судна и ледовых условий. Из таблицы видно, что при изменении ледовых условий от сравнительно легких к более сложным, время соударения возрастает. Средняя продолжительность

удара τ минимальна при движении судна с большой скоростью в редких и разреженных битых льдах. В сплоченных и сплошных льдах, особенно при работе ледокола набегами в тяжелом припае, величина τ возрастает до 1 с и более. Для транспортных судов характерно некоторое увеличение средней продолжительности удара по сравнению с ледоколами. Наименьшие значения τ в данном случае также зарегистрированы в мелкобитых разреженных льдах и составляют 0,2—0,3 с. Наибольшие значения зафиксированы при движении в канале, проложенном ледоколом в тяжелых припайных льдах. Контакт борта со льдом здесь имеет характер навала, а время соударения возрастает до 2—3 с.

Как следует из теоретических решений [52], продолжительность удара уменьшается с увеличением скорости судна. Это подтверждают тензометрические испытания судов, в частности транспортного судна, которые проводились во льдах с высокой степенью разрушенности. Среднее значение времени соударения оказалось довольно большим: $\tau = 0,86 \div 0,90$ с при скорости 5—7 уз. При испытании мощного ледокола во льдах разрушенностью 3—4 балла τ возросло с 0,36 до 0,46 с. Измеренные значения времени соударения могут быть использованы при численной оценке суммарного усилия взаимодействия корпуса судна со льдом P во время удара. Действительно, из закона сохранения количества движения следует

$$kM'v' = -\frac{1}{2} P\tau,$$

откуда

$$P = \frac{2kM'v'}{\tau}, \quad (3.61)$$

где k — коэффициент ($k \leq 1$), учитывающий отламывание кромки льда; M' , v' — масса и скорость судна, приведенные к линии удара [52].

Суммарное усилие P для судна водоизмещением $D = 20\,000$ т при скорости около 8 уз

$$P = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^3}{1,0} = 4000 \text{ тс}$$

при $M = 2 \cdot 10^3 \text{ т} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2$; $v' = 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; $k = 1$; $\tau = 1,0$ с.

Результаты испытаний позволяют численно оценить степень динамичности ударной ледовой нагрузки на конструкции корпуса. Известно, что в спектре короткого импульса произвольной формы продолжительностью τ преобладают частоты ω , удовлетворяющие условию

$$\omega < \omega_0 = \frac{2\pi}{\tau}.$$

Даже для близкой к минимальной продолжительности импульса $\tau = 0,2$ с $\omega_0 = 31,4 \text{ с}^{-1} = 5 \text{ Гц}$.

Собственная частота первого тона свободных колебаний конструкции бортового набора обычно значительно превосходит частоту ω_0 . Поэтому для практических расчетов прочности бортовых конструкций ледовую нагрузку полагают приложенной статически, т. е. рассматривают статическое воздействие максимальной амплитуды контактного усилия. Теоретически между амплитудой a и продолжительностью τ ударного импульса существует определенная зависимость, хотя экспериментально ко-

эффицент корреляции ρ_{at} между величинами a и τ никто не определял. Одной из задач натурных тензометрических испытаний должно быть определение величины ρ_{at} или ковариации $\text{cov}(a, \tau)$.

3.5.2. РАЗМЕРЫ ЗОНЫ КОНТАКТА БОРТА СО ЛЬДОМ

Как уже отмечалось, зона контакта борта судна со льдом имеет вид пятна продолговатой формы, вытянутого вдоль действующей ватерлинии. Размеры этого пятна — очень важные характеристики удара, поскольку вместе с контактным давлением они полностью определяют расчетную ледовую нагрузку на бортовое перекрытие. Длину распределения ледовой на-

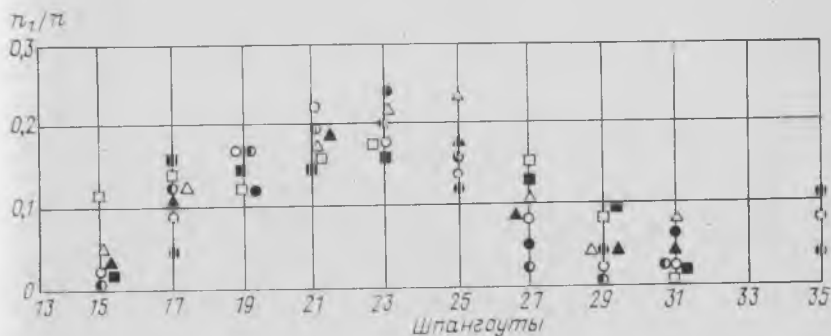


Рис. 3.8. Экспериментальное распределение числа ударов по длине носовой оконечности судна категории УЛА.

грузки удастся замерить инструментально, высоту зоны контакта — лишь оценить визуально и на основании единичных непосредственных измерений отпечатков на льдинах. Длину зоны распределения ледовой нагрузки при тензометрических испытаниях можно определить, синхронно записывая показания датчиков, расположенных горизонтально по одной линии. На осциллограммах фиксируются ударные импульсы с датчиков, расположенных непосредственно друг за другом, в данный момент времени.

В табл. 3.4 дан пример обработки такой записи, полученной при испытаниях ледокола. В результате тензометрических испытаний установлены закономерности изменения длины зоны контакта в зависимости от ледовых условий. Например, при движении мощных ледоколов в мелкобитых льдах сплоченностью 8—9 баллов длина зоны контакта составляет 1,5—2,5 м. При движении в тяжелых крупнобитых льдах при преодолении ледяных полей и гряд торосов длина этой зоны возрастает до 3—6 м и лишь при заклинивании ледокола или ледовых сжатиях составляет 10—12 м.

У транспортных судов ледового плавания длина зоны контакта в среднем несколько больше, чем у ледоколов, несмотря на меньшую интенсивность контакта борта со льдом. Обычно даже в мелкобитых льдах зона распределения ледовой нагрузки охватывает не менее трех-четырёх шпаций по длине судна, т. е. составляет 2—3 м. При самостоятельном плавании в сплошных льдах или при движении в канале за ледоколом она увеличивается до 5—6 м. Наибольшая длина участка распределения ледовой нагрузки для транспортных судов была зафиксирована во время ледовых сжатий, когда нагрузка прикладывалась статически. Протяженность зоны контакта в этом случае достигала 10 м и более. Иногда в контакт со льдом при сжатии входил весь участок борта с цилиндрической вставкой.

Длины зоны контакта некоторых транспортных судов и ледоколов, определенные экспериментально, приведены в табл. 3.4. Эти данные позволяют считать, что ледовая нагрузка распределяется вдоль борта на участках, длина которых соизмерима с расстоянием между рамными шпангоутами, а в средней части — с длиной бортового перекрытия трюма.

Таблица 3.4

Длина зоны контакта l по данным тензометрических испытаний

Дата	Значения l , м, при плавании в различных ледовых условиях			
	Мелкобитый лед, 6—8 баллов	Крупнобитый лед, 8—10 баллов	В канале за ледоколом	При ледовых сжатиях
Июнь 1961 г.	1,5—2,5	3—6	—	8—10
Июль 1964 г.	2—3	4—6	5—7	10—15
Август 1964 г.	2—3	4—6	5—7	10—15
Сентябрь 1970 г.	2—3	4—6	5—7	10—15
Октябрь 1974 г.	2—3	4—6	—	10—15
Ноябрь 1974 г.	2—3	4—7	5—7	—

Ширина пятна зоны контакта, т. е. высота распределения ледовой нагрузки по борту b , обычно не превосходит 1 м. Пролет шпангоута между палубами или стрингерами у ледоколов составляет не более 2,5—3,0 м, т. е. ледовая нагрузка перекрывает не менее $\frac{1}{3}$ пролета. Следовательно, ледовая нагрузка оказывается приложенной по некоторому пятну, вытянутому вдоль борта ледокола. Для удобства вычислений обычно рассматривают пятно в виде прямоугольника [33]. У транспортных судов с большой высотой трюма и монотонной системой набора внешнюю ледовую нагрузку можно принимать приложенной по линии вдоль борта [52]. Если форма кромки льда известна, то, задавая высоту зоны контакта в зависимости от толщины льда,

можно одновременно определить длину l . В расчетах принимается форма кромки льда, закругленной по большому радиусу $R \approx 25$ м. При этом расчетное отношение длины зоны контакта к ширине получается близким к фактическому.

3.5.3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПО ДЛИНЕ НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ СУДНА

Исследование, по существу, сводится к построению плотности вероятности «попадания» ударного импульса $p(x)$ в борт судна по длине действующей ватерлинии. Экспериментально устанавливают $p(x)$ в результате обработки показаний ряда датчиков,

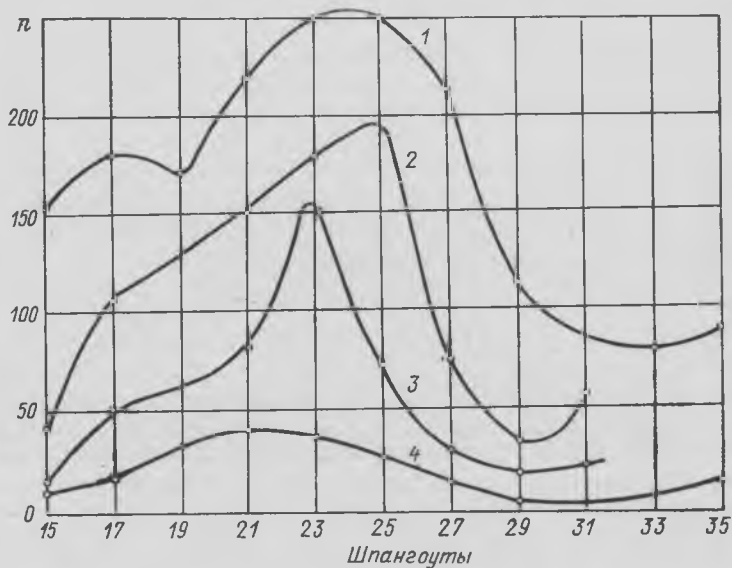


Рис. 3.9. Распределение ударов вдоль носовой оконечности судна.

1 — при плавании в крупномелкобитых льдах; 2 — среди полей и обломков полей; 3 — в морском припае; 4 — в речном припае.

расположенных вдоль конструктивной и балластной ватерлиний. При анализе результатов тензометрических испытаний большой интерес представляет исследование воздействия различных внешних факторов, например ледовых условий, а также формы обводов корпуса судна, на форму кривой $p(x)$, расположение максимумов и т. п. Наиболее полные сведения о влиянии ледовых условий на распределение числа ударов вдоль носовой оконечности были получены при испытании ледокольно-транспортных судов [41].

На рис. 3.9 приведены кривые, характеризующие это распределение для различных условий плавания. По оси ординат

нанесено количество ударных импульсов n_i , зафиксированных датчиками, номера и местоположение которых указаны на оси абсцисс. Как видно из рисунка, характер всех кривых, независимо от ледовых условий плавания, идентичен. Все они имеют максимум в районе 21—27-го шпангоутов, далее число ударов резко уменьшается, а в районе 33—35-го шпангоутов снова наблюдается некоторое увеличение их числа. При плавании в крупно-мелкобитых льдах сплоченностью 6—8 баллов число ударов на единицу длины корпуса для каждой точки ватерлинии с углом наклона α будет пропорционально $\sin \alpha$, так как льдины распределены равномерно по пути движения судна. Это значит, что число однократных ударов льдин о борт должно плавно уменьшаться по мере приближения к цилиндрической части корпуса судна.

Во время движения судна в разреженных битых льдах в контакт с отдельными льдинами в первую очередь вступает участок борта, непосредственно примыкающий к форштевню. В результате ударов часть льдин отбрасывается от борта на некоторое расстояние и только отдельные льдины входят в контакт с ним вторично. Поэтому начиная от носовой оконечности судна вплоть до начала цилиндрической вставки образуются зоны повышенной и пониженной плотности ударов.

Особенности распределений числа ударов при испытании судна в сплошных льдах и ледяных полях обусловлены спецификой их ломки корпусом судна. В ровных сплошных льдах толщиной до 30 см носовая оконечность судна обламывает три-четыре ледяных сегмента. С ростом толщины льда число сегментов уменьшается до двух-трех, а их размеры увеличиваются. Последний ледяной сегмент обламывается в том районе борта, где на графике наблюдается повторное увеличение числа ударных импульсов.

Приведенный анализ позволяет сделать вывод об определяющем влиянии формы обводов корпуса носовой оконечности судна на распределение ударов вдоль борта. Влияние скорости судна или ледовых условий выражено меньше. В основном характер кривой $p(x)$ зависит от углов наклона борта $\beta(x)$ и $\alpha(x)$, а также от их соотношения. Значение $p(x)$ возрастает при увеличении производной $d\beta/dx$, особенно в районах, где угол α мал.

3.5.4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНИХ И МАКСИМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Практический интерес представляют две задачи: во-первых, построение распределения амплитуд ударных импульсов, во-вторых, исследование распределения максимальных и средних напряжений по длине и высоте борта. Кривые этих распределений строят аналогично кривым распределения количества ударов вдоль ватерлинии. Для решения первой задачи проводится ста-

статистическая обработка напряжений, зафиксированных датчиками, расположенными на обшивке и наборе корпуса при движении в различных ледовых условиях. Результаты подобной обработки данных, полученных при испытании набора мощного ледокола при работе в однолетних льдах, приведены на рис. 3.10. Осреднение напряжений выполнено для каждого интервала от 50—100 кгс/см² и выше. Меньшие значения импульсов рассматривают как случайный «шум» и при вычислениях не учитывают. Расчеты показали, что во всех случаях распределения амплитуд описываются кривыми Пирсона типа III [41]. Вероятность достижения напряжениями σ уровня x определяется по следующей формуле:

$$P(x) = a \exp\left(-b \frac{x}{100}\right),$$

где a и b — коэффициенты, находящиеся в интервале (1—2). Например, по данным замеров при работе мощного ледокола набегамии имеем $a=1,14$ и $b=1,0$, при работе в других условиях $a=1,73$, $b=1,26$ и т. д.

Вероятность достижения расчетных напряжений в первом приближении можно определить, экстраполируя полученные функции распределения. У транспортных судов эта вероятность оказывается много больше, чем у мощных ледоколов. Однако практически возможны случаи взаимодействия ледокола со льдом, при которых в его конструкциях возникают напряжения, намного превышающие замеренные в обычных условиях эксплуатации. Поэтому расчетную ледовую нагрузку для ледоколов нельзя назначать только на основании результатов статистической обработки тензометрических испытаний, ее следует принимать, исходя из экстремальных значений с учетом требования сохранения прочности корпуса ледокола.

При обработке экспериментально полученных кривых распределения вычисляют математическое ожидание напряжений $\bar{\sigma}$ и их дисперсию s . Математическое ожидание напряжений в известной мере зависит от прочности корпуса судна, но прежде всего оно характеризует степень сложности ледовых условий.

Обычно математическое ожидание напряжений $\bar{\sigma} = 100 \div 200$ кгс/см², уменьшение его значений свидетельствует об облегчении ледовой обстановки, например увеличении разрушенности ледяного покрова. Исследования показали, что для различных типов судов независимо от вида ледовых условий

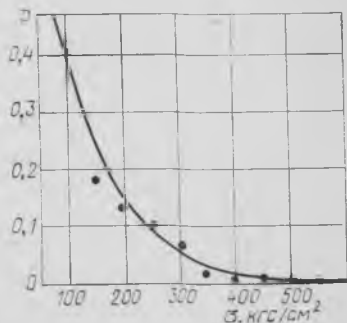


Рис. 3.10. Кривая распределения амплитуд напряжений при ударах.

значения σ по всей носовой оконечности примерно равны. Как указывалось в разделе 3.3, более интересна величина максимальных напряжений, которая используется в качестве основного критерия при оценке прочности судов ледового плавания по данным натуральных испытаний.

Основными факторами, влияющими на величину напряжений, являются толщина и разрушенность ледяного покрова, масса льдин, а также скорость соударения судна со льдом. Максимальные напряжения $\sigma_{\max}$ значительны и близки к расчетным значениям предельных напряжений. Кривая распределения максимальных напряжений вдоль борта в отличие от кривой рас-

пределения σ имеет максимумы. Для транспортных судов при увеличении сложности ледовых условий максимальные напряжения смещаются в корму.

§ 3.6. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ КОРПУСА СУДОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК

3.6.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

Натурные тензометрические испытания прочности бортовых конструкций ледоколов и транспортных судов показали, что внешние ледовые нагрузки имеют случайный характер. Это следует учитывать не только при обработке экспериментальных данных, но и при назначении расчетных нагрузок на отдельные элементы набора.

Внешние воздействия, вызывающие изгиб элементов перекрытий, обычно представляют как систему поперечных и продольных усилий и изгибающих моментов. При расчете следует учитывать случайный характер внешних воздействий и рассматривать их как случайные величины или случайные функции пространственных координат и времени. Они могут быть статистически независимы. При линейной постановке задачи это позволяет исследовать каждый тип нагрузки самостоятельно, используя принцип суперпозиции.

Проанализируем динамический изгиб призматической балки длиной l под действием поперечной возмущающей силы $F(x, t)$, являющейся случайной функцией координаты x и времени t . Дифференциальное уравнение малых колебаний такой балки с учетом диссипации энергии можно записать следующим образом:

$$EI \left(1 + a \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + b \frac{\partial w}{\partial t} \right) = mF, \quad (3.62)$$

где EI — жесткость балки; a и b — коэффициенты, определяющие затухание, связанное соответственно с внутренним и внешним сопротивлением; m — погонная масса, постоянная по длине балки; F — внешнее усилие, отнесенное к единице массы балки.

Стрелка прогиба $w(x, t)$ должна удовлетворять дифференциальному уравнению (3.62) и граничным условиям на концах балки. Если она оперта по концам на жесткие несмещаемые опоры, то граничные условия однородные.

Умножим уравнение (3.62) на скорость колебаний $\partial w / \partial t$ и проинтегрируем по всей длине балки с учетом однородных граничных условий. Проинтегрировав выражение по частям, получим уравнение энергетического баланса колеблющейся балки:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{EI}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx + \frac{m}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx \right] = \\ & = -aEI \int_0^l \left(\frac{\partial^3 w}{\partial t \partial x^2} \right)^2 dx - bm \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx + m \int_0^l F \frac{\partial w}{\partial t} dx. \quad (3.63) \end{aligned}$$

Левая часть этого уравнения представляет собой скорость изменения суммы кинетической и потенциальной энергий балки, а правая часть равняется разности между мощностью возмущающих сил и мощностью, рассеиваемой в результате внешнего и внутреннего сопротивления. Если на концах балки имеются упругие опоры или упругие заделки, то в левую часть уравнения (3.63) следует ввести дополнительные члены, учитывающие потенциальную энергию деформации опор.

Введем следующие обозначения для потенциальной энергии изгиба балки $U_{\text{изг}}$, кинетической энергии ее колебаний $T_{\text{кин}}$ и энергии $U_{\text{дис}}$, диссипируемой в единицу времени внутренними силами сопротивления:

$$\begin{aligned} U_{\text{изг}} &= \frac{EI}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx; \\ T_{\text{кин}} &= \frac{m}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx; \\ U_{\text{дис}} &= aEI \int_0^l \left(\frac{\partial^3 w}{\partial t \partial x^2} \right)^2 dx. \end{aligned}$$

Энергия, рассеиваемая в единицу времени в результате внешнего демпфирования, равна $2bT_{\text{кин}}$. Тогда уравнение энергетического баланса вынужденных колебаний балки можно записать в следующем виде:

$$\frac{d}{dt} (U_{\text{изг}} + T_{\text{кин}}) = m \int_0^l F \frac{\partial w}{\partial t} dx - U_{\text{дис}} - 2bT_{\text{кин}}. \quad (3.64)$$

Если внешняя возмущающая сила — случайная функция координаты x и времени t , то энергия и рассеиваемая мощность также будут случайными. В этом случае стационарный режим

колебаний можно рассматривать лишь как стохастический стационарный процесс. При установившихся колебаниях энергия в системе не накапливается, так что мощность возмущающих сил должна равняться мощности, диссипируемой путем внешнего и внутреннего демпфирования. Применяв операцию статистического осреднения к уравнению (3.64), получим для стационарного процесса выражение

$$m \int_0^l \left\langle F \frac{\partial w}{\partial t} \right\rangle dx = \langle U_{\text{ин}} \rangle + 2b \langle T_{\text{кин}} \rangle.$$

Стрелка прогиба балки $w(x, t)$ также будет случайной функцией координаты x и времени t . Для ее определения в линейной постановке задачи можно либо использовать разложение по собственным функциям, либо построить функцию Грина (функцию влияния), там, где это возможно [72, 76].

3.6.2. ИЗГИБ БАЛОК БОРТОВОГО НАБОРА ПРИ ДЕЙСТВИИ СЛУЧАЙНЫХ НАГРУЗОК

Как показывает анализ, при расчетах бортовых перекрытий ледовые нагрузки следует считать приложенными статически. Как правило, несущая способность конструкций определяется лишь в упругой зоне. Таким образом, задача сводится к исследованию статического изгиба призматических балок под действием случайной поперечной нагрузки $q(x)$. Определение прогиба такой балки $w(x)$ сводится к интегрированию дифференциального уравнения

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 w}{dx^2} \right) = q(x) \quad (3.65)$$

и удовлетворению граничных условий на ее концах. В уравнении (3.65) жесткость балки в общем случае переменная.

Поперечные нагрузки на балку разделим на непрерывные и дискретные. В первом случае на балку действует распределенная нагрузка $q(x)$, являющаяся достаточно гладкой случайной функцией координаты x . Во втором случае на балку время от времени действуют статические сосредоточенные усилия Q_j , приложенные в точках со случайными координатами $x = x_j$. Усилия Q_j и координаты x_j образуют системы статистически независимых случайных величин, что в общем подтверждается данными эксперимента.

Нагрузки обоих типов можно изучать совместно, если представить вероятность с помощью интеграла Стилтеса. Обозначим множество возможных реализаций внешней нагрузки через $\{^k q(x)\}$, где функцию $q(x)$ можно рассматривать либо как непрерывную, либо как совокупность дельта-функций, либо как и то и другое одновременно. Пусть $\Phi(x)$ — функция распределе-

ния случайной координаты x приложения силы. Тогда прогиб балки

$${}^k w(x) = \int_0^l {}^k q(\xi) \gamma(x, \xi) d\Phi(\xi), \quad (3.66)$$

где $\gamma(x, \xi)$ — неслучайная функция, равная прогибу балки, вызванному единичной силой, приложенной в точке $x = \xi$ (линия влияния).

При непрерывном распределении нагрузки $q(x)$ имеем $d\Phi = dx$, откуда прогиб балки

$${}^k w(x) = \int_0^l {}^k q(\xi) \gamma(x, \xi) d\xi, \quad (3.67)$$

а математическое ожидание прогиба

$$\overline{w(x)} = E_k \{ {}^k w \} = \int_0^l \gamma(x, \xi) \overline{{}^k q(\xi)} d\xi. \quad (3.68)$$

Здесь среднее значение внешней нагрузки как функции x получено путем осреднения по множеству реализаций:

$$\overline{{}^k q(x)} = E_k \{ {}^k q \}.$$

Если задано дискретное множество $\{ {}^k Q_j \}$ внешних воздействий, то $d\Phi(\xi) = p_x(\xi) d\xi$, где $p_x(\xi)$ — плотность вероятности попадания в точку с координатой $x = \xi$. Очевидно, для математического ожидания прогиба балки в этом случае будет справедливо следующее выражение:

$$\overline{w(x)} = E_k \{ {}^k w_{Q_j} \} = \overline{Q} \int_0^l \gamma(x, \xi) p_x(\xi) d\xi, \quad (3.69)$$

полностью совпадающее с формулой (15), выведенной в работе [76].

Случайную непрерывную внешнюю нагрузку $q(x)$ всегда можно отцентровать. Вследствие линейного характера задачи можно рассматривать лишь отцентрованные внешние воздействия с нулевым математическим ожиданием. Тогда решения будут получены с точностью до детерминированной составляющей, соответствующей среднему значению внешней нагрузки. Непрерывную центрированную случайную функцию $q(x)$ представим как суперпозицию счетного множества элементарных составляющих со случайными амплитудами V_n и нулевыми средними значениями [76]:

$$q(x) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n v_n(x), \quad (3.70)$$

где $v_n(x)$ — фундаментальные (собственные) функции задачи, образующие полную ортогональную систему функций.

Корреляционная функция внешней нагрузки с учетом разложения по собственным функциям будет

$$K_q(x, \xi) = \sum_{i=1}^{\infty} [v_i(x)]^2 D_i + \sum_{i \neq j}^{\infty} v_i(x) v_j(\xi) K_{ij}, \quad (3.71)$$

где D_i — дисперсия случайной величины V_i ; K_{ij} — корреляционный момент величин V_i и V_j .

Используя свойства ортогональности фундаментальных функций для элементов корреляционной матрицы $\|K_{ij}\|$, получим

$$K_{mn} = \int_0^l \int_0^l K_q(x, \xi) v_m(x) v_n(\xi) dx d\xi, \quad (3.72)$$

а корреляционная функция прогибов балки окончательно будет иметь вид

$$K_w(x, \xi) = \sum_{m, n=1}^{\infty} \frac{v_m(x) v_n(\xi)}{\lambda_m \lambda_n} K_{mn}, \quad (3.73)$$

где λ_n — собственное число, соответствующее n -й собственной функции задачи.

Дисперсия

$$D_w = \sum_{m, n=1}^{\infty} \frac{v_m(x) v_n(x)}{\lambda_m \lambda_n} K_{mn}. \quad (3.74)$$

Аналогично можно определить корреляционные функции и дисперсии для остальных элементов изгиба балки.

Таким образом, при известной пространственной корреляционной функции внешнего воздействия решение задачи о статическом изгибе балки под действием случайной внешней нагрузки выполняется по достаточно простой схеме. В первую очередь находят собственные функции и числа задачи. Затем по среднему значению внешнего воздействия определяют среднее значение прогиба балки. Наконец, по заданной корреляционной функции отцентрованного внешнего воздействия вычисляют элементы корреляционной матрицы и определяют корреляционные функции и дисперсии прогиба и других элементов изгиба балки. Общий подход к решению обратных задач показан в работе [76].

Перейдем далее к дискретным случайным нагрузкам, более характерным для процесса взаимодействия корпуса судна со льдом, когда на корпусные конструкции действуют локальные ледовые нагрузки импульсного характера. Рассмотрим простейший случай изгиба балки бортового набора. В разные моменты времени на нее действуют поперечные сосредоточенные статические усилия Q_j , прикладываемые в точках со случайными координатами $x = x_j$. Случайные величины Q_j и x_j статистически не-

зависимы, причем плотность вероятности распределения амплитуд $g_Q(Q)$ и плотность вероятности попадания $p_x(x_j)$ в точку с координатой $x = x_j$ считаются заданными. Практический интерес представляет вычисление средних значений и дисперсии элементов изгиба перекрытия, т. е. прогибов, изгибающих моментов и т. д.

Сравнивая выражения (3.68) и (3.69), нетрудно убедиться, что математическое ожидание прогиба балки при действии на нее совокупности случайно приложенных сосредоточенных нагрузок равно значению прогиба при воздействии на балку неслучайной нагрузки, распределенной с интенсивностью $q(x) = \bar{Q}p_x(x)$, где $\bar{Q}$ — математическое ожидание амплитуды случайной нагрузки.

Соответствующее утверждение справедливо и для любого другого элемента изгиба балки, например изгибающего момента $M = Elv''$, поскольку математическое ожидание и производная случайной функции коммутируют. Аналогичное положение имеет место для любых линейно деформируемых систем, например для бортовых перекрытий, пластин наружной обшивки и т. п. Во всех этих случаях определение элементов изгиба конструкций при действии дискретных случайных нагрузок сводится к расчету на действие неслучайных нагрузок, распределенных в соответствии с плотностью вероятности попадания $p_x(x)$ или $p(x, y)$.

Задав дисперсию внешнего воздействия σ_Q^2 , найдем дисперсию прогибов балки:

$$\sigma_w^2 = \overline{w_Q^2(x)} - (\overline{w_Q(x)})^2,$$

где

$$\overline{w_Q^2(x)} = \bar{Q}^2 \int_0^l \gamma^2(x, \xi) p_x(\xi) d\xi. \quad (3.75)$$

Используя формулы (3.69) и (3.75), получим

$$\sigma_w^2 = \bar{Q}^2 (\bar{\gamma}^2 - \bar{\gamma}^2) + \bar{\gamma}^2 \sigma_Q^2, \quad (3.76)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}^2 &= \int_0^l \gamma^2(x, \xi) p_x(\xi) d\xi; \\ \bar{\gamma} &= \int_0^l \gamma(x, \xi) p_x(\xi) d\xi. \end{aligned} \quad (3.77)$$

В формуле (3.76) среднее значение $\bar{Q}$ и дисперсия внешней нагрузки σ_Q^2 считаются заданными. Натурные тензометрические испытания судов показали, что распределение амплитуд внешних ледовых нагрузок на набор близко к релеевскому. В этом

случае математическое ожидание и дисперсия связаны следующей зависимостью:

$$\bar{Q} = \sigma_Q \sqrt{\frac{\pi}{2}},$$

а вместо формулы (3.76) можно написать

$$\sigma_w^2 = \bar{Q}^2 \left(\gamma^2 \frac{2 + \pi}{\pi} - \gamma^2 \right). \quad (3.78)$$

Дисперсии прочих элементов изгиба определяют аналогичным образом. В частности, изгибающий момент можно вычислить по формулам (3.76), (3.77), подставив в них величину $El\gamma''$ вместо γ .

Рассмотрим в качестве примера однопролетную свободно опертую балку. Положим вероятность попадания внешней силы одинаковой по всей длине балки. Среднее значение изгибающего момента определится как для балки, нагруженной равномерной нагрузкой $\bar{q} = \bar{Q}/l$,

$$\overline{M(x)} = -\frac{\bar{Q}l}{2} \left(\frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2} \right),$$

а дисперсия

$$\sigma_M^2 = \frac{x^2}{12} \left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 (\bar{Q}^2 + 4\sigma_Q^2).$$

Если амплитуда внешней силы постоянна ($Q = \text{const}$), а случайной является лишь точка приложения силы, то $\sigma_Q = 0$ и дисперсия изгибающего момента

$$\sigma_M^2 = \frac{x^2}{12} \left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 \bar{Q}^2.$$

Полученные здесь зависимости могут быть использованы не только для однопролетных балок, но и для расчета многопролетных балок и балочных систем. Покажем на примере, каким образом вероятностный метод можно применять при обработке данных тензометрических испытаний бортового набора мощного ледокола.

Тензометрические датчики напряжений были наклеены на полки шпангоутов вблизи действующей ватерлинии (рис. 3.11) для оценки характера распределения ледовой нагрузки по высоте борта в этом районе. При обработке экспериментальных данных были сопоставлены показатели тензометров в середине пролетов 1—2 и 2—3. На всех без исключения осциллограммах показания этих тензометров противоположны по знаку, т. е. если полка шпангоута на участке 1—2 растянута, то на участке 3—4 она сжата, и наоборот. Это соответствует ледовой нагрузке, приложенной в пределах одного участка.

При обработке экспериментальных данных было выбрано 113 осциллограмм с импульсами, соответствующими удару

в пролете 2—3. Для каждого импульса были сосчитаны отношения напряжений σ_1 в середине пролета, испытывающего удар, к напряжениям σ_2 в соседнем ненагруженном пролете. Так как

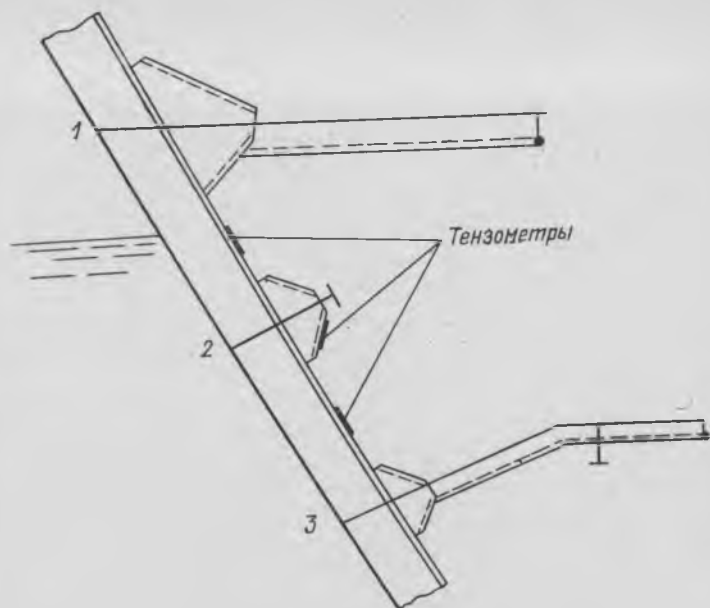


Рис. 3.11. Схема установки датчиков на шпангоуте ледокола.

моменты инерции и моменты сопротивления шпангоута в пролетах 1—2 и 2—3 одинаковы, можно полагать отношение $\sigma_2/\sigma_1 = M_{2-3}/M_{1-2}$. Гистограмма экспериментально полученных значений этого отношения приведена на рис. 3.12.

Далее были вычислены статистические характеристики выборки и доказана ее репрезентативность. При этом среднее значение отношения M_{2-3}/M_{1-2} оказалось равным 4,0, а среднеквадратическое отклонение $\sigma_M = 1,17$.

Для анализа полученных результатов были также проведены расчеты для нагрузки, равномерно распределенной в пролете 2—3, распределенной по треугольнику, и сосредоточенной нагрузки, приложенной в различных точках по длине участка. Для всех этих случаев определялось отношение (рис. 3.12). При равномерно распределенной нагрузке это отношение равно 4,0, что совпадает со средним измеренным

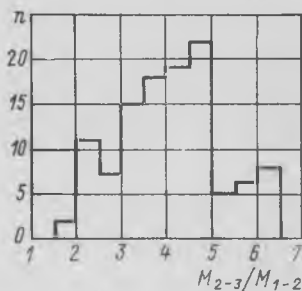
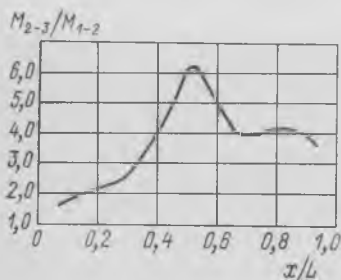


Рис. 3.12. Гистограмма экспериментальных отношений моментов M_{2-3}/M_{1-2} .

значением. Это позволяет утверждать, что вероятность воздействия ледовой нагрузки по высоте борта в пределах участка 2—3 одинакова.

Расчет бортового набора на действие распределенных ледовых нагрузок эквивалентен расчету по средним значениям. Расчет на действие сосредоточенных усилий соответствует крайним замеренным значениям отношения M_{2-3}/M_{1-2} (см. рис. 3.12 и кривую на рис. 3.13). Впрочем, вероятность этих значений P не так уж мала, и для интервала отношений $M_{2-3}/M_{1-2} = 5,5 \div 6,5$ $P = 0,1$. Следовательно, в данном случае более оправданным является расчет бортового набора на действие сосредоточенных нагрузок.

Рис. 3.13. Расчетное отношение моментов M_{2-3}/M_{1-2} .



Для более точного определения величины внешней нагрузки и зоны ее приложения приходится строить так называемую статистическую эпюру распределения напряжений [41]. С этой целью используют показания тензометров вертикальных групп

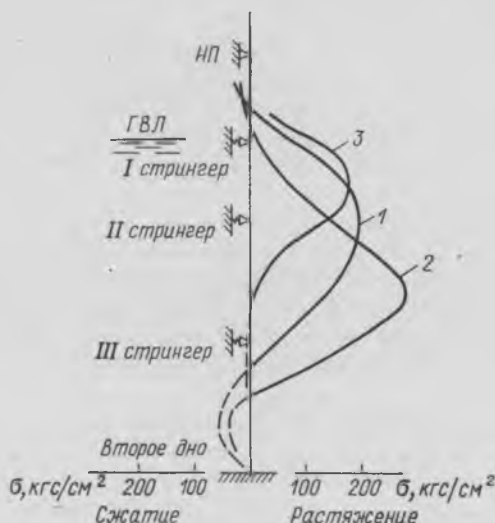


Рис. 3.14. Статистические эпюры напряжений при движении ледокола.

1 — в крупномелкобитых льдах толщиной 80—100 см; 2 — толщиной 150—200 см; 3 — толщиной 60—80 см.

датчиков и для каждого тензометра находят среднее значение напряжения. По средним значениям строят статистическую эпюру распределения напряжений либо за весь период испытаний, либо за некоторый интервал, в зависимости от необходимо-

сти. Фактически при этом выполняют осреднение, аналогичное проведенному в формуле (3.68):

$$\bar{\sigma} = \frac{EI}{W} E_h \left\{ \int_0^l q(\xi) \gamma''(x, \xi) d\Phi(\xi) \right\}.$$

Обычно максимум статистической эпюры соответствует уровню центра приложения ледовой нагрузки. В результате обработки экспериментальных данных было установлено, что в зависимости от ледовых условий место положения этого максимума перемещается по высоте борта судна. При увеличении толщины льда максимум эпюры смещается вниз от ватерлинии. Для иллюстрации на рис. 3.14 приведены статистические эпюры напряжений, полученные при испытании судов типа «Амгуэма» в крупномелкобитых льдах различной толщины. Вертикальная группа датчиков во всех испытаниях монтировалась на одном и том же шпангоуте, суда имели примерно одинаковую осадку и грузовая ватерлиния проходила в районе верхнего стрингера.

На рис. 3.14 статистическая эпюра 1 получена при испытаниях в полях и обломках полей льда толщиной $h = 80$ см, эпюра 2 — во льдах толщиной $h \approx 2,0$ м, а эпюра 3 — статистическая эпюра напряжений — при плавании во льдах толщиной $h = 1 \div 0,8$ м. Смещение максимумов всех этих кривых соответствует разнице в толщине льда для каждого случая.

3.6.3. УПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ КОРПУСА СУДНА ПРИ ДВИЖЕНИИ ВО ЛЬДАХ

При динамическом взаимодействии корпуса судна со льдом возникают упругие колебания (ледовая вибрация) корпуса, отличающиеся по частоте и амплитудам от обычной ходовой вибрации корпуса на чистой воде. Ясно, что возмущающей силой, вызывающей такие колебания, являются удары носовой оконечности судна о лед. Частота и интенсивность этой возмущающей нагрузки в основном зависят от ледовых условий и скорости судна. Например, при движении в мелкобитых льдах сплоченностью $N = 0,6 \div 0,8$ возбуждаются поперечные упругие колебания корпуса в вертикальной плоскости. Их амплитуда достигает значительной величины. Аналогичная картина иногда наблюдается при движении в канале за ледоколом. Во время хода в сплошных и сплоченных дрейфующих льдах поперечные колебания в вертикальной плоскости отмечаются значительно реже, зато наблюдается резкое усиление поперечных колебаний корпуса в горизонтальной плоскости.

Возбуждение поперечной вибрации при воздействии дискретной случайной ледовой нагрузки на корпус впервые рассматривалось в работе [72], где импульсивные внешние воздействия были представлены совокупностью дельта-функций, случайно

распределенных во времени. В дальнейшем эта задача исследовалась более подробно с учетом реальной формы ударных импульсов. В качестве основной характеристики при описании вынужденных случайных колебаний принималась спектральная плотность, поскольку по спектру колебаний можно определить резонансные зоны и в первом приближении вычислить реакции конструкции.

Задача сводится к решению дифференциального уравнения малых изгибных колебаний корпуса судна $w(x, t)$, которое с учетом рассеяния энергии имеет вид

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(w + a \frac{\partial w}{\partial t} \right) \right] + m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + b \frac{\partial w}{\partial t} \right) = F(x, t), \quad (3.79)$$

где a и b — коэффициенты, определяющие затухание, которое связано с внутренним и внешним трением; F — внешнее усилие, являющееся случайной импульсивной функцией координаты x и времени t .

В работе [72] правая часть уравнения (3.79) выражалась формулой (3.5). В более общем случае рассмотрим множество реализаций внешней возмущающей силы $\{^k F(x, t)\}$, где любая реализация определена на участке $0 \leq x \leq l$. Если внешнее воздействие на балку стационарное, то ее реакции тоже будут стационарными. Примем достаточно большой интервал времени $(-T, T)$. Типичную реализацию случайного импульсивного процесса для этого интервала можно представить в виде

$$^k F(x, t) = \sum_{j=-N}^N {}^k \tau_j(t) \delta(x - x_j), \quad (3.80)$$

где ${}^k \tau_j(t)$ — функция, описывающая во времени j -й импульс k -й реализации, равная тождественно нулю вне интервала $t_{2j} \leq t < t_{2j+1}$.

Число импульсов, попадающих в рассматриваемый интервал, для стационарного режима можно определить по формуле $2N + 1 = 2\lambda T$, где λ — средняя плотность импульсов, т. е. их среднее число за единицу времени.

Форма импульсов задается неслучайной функцией времени $u(t)$, которая тождественно равна нулю вне интервала $0 \leq t < 1$, так что

$${}^k \tau_j(t) = {}^k a_j u \left(\frac{t - t_{2j}}{{}^k \tau_j} \right),$$

где ${}^k \tau_j = t_{2j+1} - t_{2j}$ — продолжительность j -го импульса в k -й реализации; ${}^k a_j$ — амплитуда импульса.

Продолжительность ударных импульсов, паузу между последовательными ударами, амплитуды ударных импульсов и коор-

длины точек их приложения будем считать статистически независимыми случайными величинами.

Пусть тем или иным расчетным приемом удалось определить главные формы свободных незатухающих колебаний балки $v_n(x)$ и соответствующие собственные частоты ω_n . Каждое слагаемое в сумме (3.80) можно представить в виде ряда по формам свободных колебаний.

Тогда решение уравнения (3.79) будем искать в виде

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(t) v_n(x).$$

Подставив это выражение в уравнение (3.79), получим для определения $\varphi_n(t)$ линейное дифференциальное уравнение второго порядка со случайной правой частью:

$$\ddot{\varphi}_n + (b + a\omega_n^2) \dot{\varphi}_n + \omega_n^2 \varphi_n = \alpha_n^k a_j u_j(t) v_n(x_j), \quad (3.81)$$

где

$$\alpha_n^{-1} = \int_0^l m(x) v_n^2(x) dx.$$

Таким образом, задача сведена к одномерной и эквивалентна задаче о воздействии дискретного случайного сигнала на вход линейной системы с одной степенью свободы. Каждая такая система с индексом n соответствует n -й форме свободных колебаний балки. На каждую одномерную систему действует исходная совокупность импульсов, амплитуды которых умножаются на весовой множитель, зависящий от номера рассматриваемой формы колебаний.

По известному соотношению между спектральными плотностями входа и выхода для линейных систем получим следующее выражение для спектральной плотности вынужденных колебаний балки:

$$S_w = \sum_{n=1}^{\infty} S_{F_n} |Y_n(i\omega)|^2, \quad (3.82)$$

где $Y_n(i\omega)$ — частотная характеристика одномерной линейной системы с индексом n ; $S_{F_n}(\omega)$ — спектральная плотность внешнего воздействия для n -й формы.

Для рассматриваемого аperiodического импульсного случайного процесса с нулевым средним значением

$$S_{F_n} = \frac{\lambda \sigma_{an}^2}{\pi} \int_0^{\infty} \xi^2 |g(\omega\xi)|^2 w_{\tau}(\xi) d\xi, \quad (3.83)$$

где σ_{an}^2 — дисперсия амплитуд ударных импульсов; $w_{\tau}(\xi)$ — функция распределения длительности импульсов; $g(\omega\xi)$ — спектр Фурье формы единичного импульса, равный

$$g(\omega\xi) = \int_0^1 u(t) \exp(-i\omega\xi t) dt.$$

Для определения дисперсии σ_{an}^2 выполним осреднение по всей длине корпуса, полагая известной плотность вероятности попадания импульса $p(x_j)$ в точку с координатой $x = x_j$. Тогда

$$\sigma_{an}^2 = \overline{a^2} \alpha_n^2 \int_0^l p(x) v_n^2(x) dx.$$

Окончательно спектральная плотность внешнего воздействия, соответствующая n -й форме свободных колебаний балки,

$$S_{Fn} = \frac{\lambda \overline{a^2} \alpha_n^2}{\pi} \int_0^\infty \xi^2 |g(\omega \xi)|^2 w_\tau(\xi) d\xi \int_0^l v_n^2(x) p(x) dx.$$

Подставив это выражение в формулу (3.82) и определив частотную характеристику $Y_n(i\omega)$, получим выражение для спектральной плотности вынужденных колебаний балки:

$$S_w = \frac{\lambda \overline{a^2}}{\pi} \int_0^\infty \xi^2 |g(\omega \xi)|^2 w_\tau(\xi) d\xi \sum_{n=1}^\infty \frac{\alpha_n^2 \int_0^l v_n^2(x) p(x) dx}{(\omega^2 - \omega_n^2)^2 + (b + a\omega_n^2)^2 \omega^2}. \quad (3.84)$$

Исследование вынужденных колебаний корпуса судна под действием ударных ледовых нагрузок показало, что распределение импульсов во времени подчиняется закону Пуассона. Паузы между последовательными импульсами распределены по экспоненциальному закону

$$w_T(t) = T_1 \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right),$$

где T_1 — средняя продолжительность паузы между импульсами.

Очевидно, что $T_1^{-1} \approx \lambda$.

Полагая продолжительность каждого импульса τ_0 одинаковой и считая $\tau_0 \ll T_1$, получим вместо формулы (3.83) следующее выражение:

$$S_{Fn} = \frac{\lambda \overline{a^2} \tau_0^2}{\pi} |g(\omega \tau_0)|^2 \alpha_n^2 \int_0^l v_n^2(x) p(x) dx.$$

Таким образом, при $\tau_0 \ll T_1$ непрерывный спектр внешнего воздействия с точностью до постоянного множителя совпадает со спектром одиночного импульса. При рассмотрении последовательности дельта-функций имеем дело с «белым шумом». Выражение для спектральной плотности вынужденных колебаний балки в этом случае совпадает с полученным в работе [71].

Коэффициенты сопротивления a и b обычно невелики, так что непрерывный спектр (3.84) имеет максимумы вблизи точек $\omega = \omega_n$, т. е. на собственных частотах свободных колебаний. Коэффициент затухания $(b + a\omega_n^2)$ зависит от частоты соответ-

вующей формы свободных колебаний и увеличивается с возрастанием номера формы n . Следовательно, спектральная плотность вынужденных колебаний будет быстро убывать начиная с некоторого значения частоты $\omega = \omega_m$.

При малой продолжительности импульсов τ_0 независимо от их формы спектральная плотность остается постоянной вплоть до частот, сравнимых по порядку величины с τ_0^{-1} [38]. Ясно, что при выполнении условия $\tau_0^{-1} > \omega_m$ аппроксимация импульсов дельта-функциями, использованная в работе [72], не приводит к значительным погрешностям. При сравнительно малых значениях τ_0^{-1} необходимо учитывать фактическую форму ударного импульса.

Спектральная плотность одиночного импульса быстро убывает при частотах $\omega > \tau_0^{-1}$. Значит спектр вынужденных случайных колебаний корпуса судна будет быстро убывать как за счет затухания в области высоких частот, так и за счет ограниченной ширины спектра каждого импульса. Если порядок τ_0^{-1} сравним с порядком низших собственных частот свободных колебаний корпуса, то в основном будут возбуждаться колебания низших тонов.

Для исследования ледовой вибрации проводились специальные тензометрические испытания транспортных судов и ледоколов. С этой целью на верхней палубе в средней части и в оконечностях устанавливали тензометры сопротивления симметрично по обоим бортам. Одновременно ставили датчики ускорений (акселерометры), с помощью которых определяли ускорение и амплитуды упругих колебаний. Испытания показали, что свободные упругие колебания, возникающие в результате взаимодействия корпуса со льдом, совершаются с частотой, соответствующей частоте первого тона собственных колебаний.

При движении в битых льдах основной причиной возбуждения вибрации являются удары форштевня о лед. Такая ледовая вибрация, совершающаяся в вертикальной плоскости, очень напоминает общую вибрацию корпуса при слеминге. При движении в сплошных льдах с достаточно большими скоростями возбуждаются поперечные горизонтальные упругие колебания корпуса, особенно у транспортных судов, имеющих большое отношение L/B . В этом случае, как правило, наблюдается резонансная скорость движения, при которой частота контактов (ударных импульсов) совпадает с частотой низшего тона собственных свободных колебаний. При выходе из резонансного режима амплитуды вынужденных колебаний резко падают. Колебания в сплоченных дрейфующих льдах имеют нерегулярный характер, однако их несущая частота также близка к частоте первого тона собственных колебаний корпуса судна.

**§ 4.1. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЛЕДОВОЙ СРЕДЫ НА ХОДКОСТЬ СУДНА
ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ДВИЖЕНИИ В СПЛОШНЫХ ЛЬДАХ**

4.1.1. ТОЛЩИНА ЛЬДА

На практике при оценке ходкости судна нужно учитывать специфические особенности ледяного покрова и, в первую очередь, неоднородность льда по толщине. Однако до настоящего времени более или менее тщательно разрабатывались лишь методы оценки ходкости судна при непрерывном движении в равномерном по толщине ледяном покрове [8, 15, 61 и др.]. Лишь в работе [9] была предпринята попытка рассмотреть задачу в общем виде.

Заметим, что толщину ледяного покрова нельзя рассматривать только как линейный масштаб. Она является важной природной характеристикой льда и отражает процессы роста и разрушения ледяного покрова, которые обусловлены воздействием ряда гидрометеорологических факторов: температуры, солености, интенсивности солнечной радиации, глубины воды, течения и т. п. Как отмечалось, толщина морского льда связана с его возрастом. Интерес для мореплавания представляют в основном молодые и однолетние льды, ибо ниласовые льды не создают ощутимого препятствия для движения современных судов, а в двухлетних и многолетних сплошных льдах суда плавают сравнительно редко. Льды различного возраста помимо толщины отличаются по своим качествам (см. гл. 1). Так, молодой лед сравнительно равномерен (однороден), слабо заснежен, обильно пропитан рассолом, эластичен, его прочность невелика. Многолетний — сильно заснежен, опреснен, имеет высокую прочность. Существует определенная взаимосвязь между толщиной ледяного покрова и его торосистостью и разрушенностью. Среднее значение толщины у торосистого ледяного покрова больше, чем у ровного льда того же возраста.

Пространственное распределение толщины льда на всех стадиях его существования имеет случайный характер (см. рис. 4,1, а, где длина маршрута более 500 м, интервал между измерениями — 5,0 м). В большинстве случаев закон простран-

ственного распределения толщин льда наилучшим образом описывается функцией Шарлье. Применение этой функции в сочетании с известными приемами учета торосистости позволяет оценить спектр распределения толщины льда на пути движения судна и вычислить статистики распределения. Как показано ниже, при оценке влияния неравномерности толщин льда на ходкость судна наиболее важно знать дисперсию толщины σ_h^2 и среднее квадратичное отклонение σ_h .

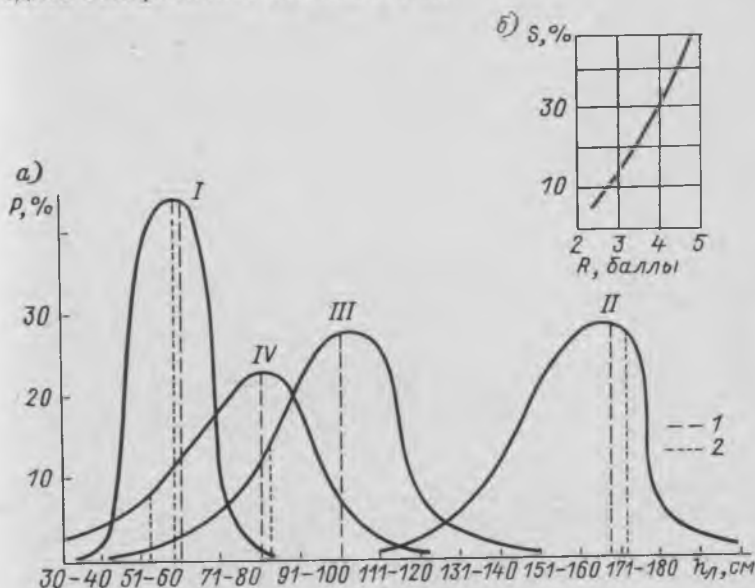


Рис. 4.1. Повторяемость P (%) измеренных значений толщины $h_{\text{л}}$ «ровного» льда (а) и приближенная зависимость площади промоя S (%) от разрушенности R (б).

I — в осенне-зимний период; II — весной до начала таяния; III и IV — при разрушенности 3 и 3—4 балла соответственно.

1 — средняя толщина льда по данным маршрутных съемок; 2 — значение толщины льда по наблюдениям на полярных станциях в тот же период.

Установлено, что неравномерность распределения толщины льда усугубляется в процессе таяния. На определенной стадии таяния сплошность ледяного покрова нарушается. В нем появляются сквозные проталины и промоины. Эмпирическое соотношение между площадями, занятыми льдом, и проталинами, при различной разрушенности представлено на рис. 4.1, б. Наибольшей неравномерности толщина льда достигает при разрушенности 2—3 балла. Для практического учета изменения величины σ_h вследствие разрушенности льда необходимо умножить значения σ_h для осенне-зимнего периода на соответствующий коэффициент неравномерности.

В большинстве случаев для приближенных расчетов ходкости судна в ровных¹ молодых и зимних льдах, у которых изменчивость толщины и высоты снежного покрова сравнительно невелика, можно ориентироваться на средние значения толщины, т. е. использовать прямые методы анализа. Удобнее воспользоваться зависимостью, связывающей скорость непрерывного движения судна со средней толщиной льда h при заданной мощно-

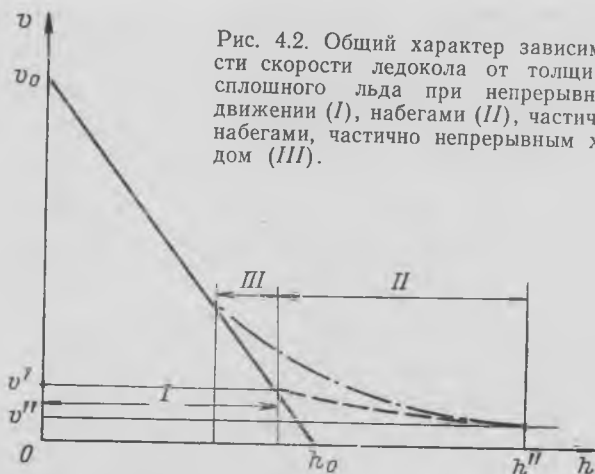


Рис. 4.2. Общий характер зависимости скорости ледокола от толщины сплошного льда при непрерывном движении (I), набегам (II), частично набегам, частично непрерывным ходом (III).

сти энергетической установки N_B (рис. 4.2), которая в общем виде выражается уравнением

$$v = v_0 \left(1 - \frac{h}{h_0}\right)^n \quad \text{при } N_B = \text{const}, \quad (4.1)$$

где v_0 — значение скорости судна при толщине льда, близкой к нулю; h_0 — значение толщины льда при скорости, близкой к нулю; n — показатель степени, имеющий постоянное значение.

Корреляционный анализ данных натурных испытаний судов во льдах показывает, что при непрерывном движении судна зависимость (4.1), как правило, имеет линейный характер (коэффициент линейной корреляции составляет 0,86—0,99, что свидетельствует о достаточно высокой тесноте рассматриваемой связи). Таким образом, в формуле (4.1) показатель степени $n = 1,0$, т. е.

$$v = v_0 \left(1 - \frac{h}{h_0}\right). \quad (4.2)$$

В выражении (4.2) значение v_0 при $h = 0$ отвечает движению данного судна по чистой воде со скоростью $v_{ч.в.}$, а h_0 при $v =$

¹ Здесь и далее под «ровным» будем понимать ледяной покров торосистостью не выше 0—1 балла.

$= v_{\min}$ равно предельной толщине льда $h_{\text{пр}}$, преодолеваемого судном непрерывным ходом с минимальной устойчивой скоростью $v_{\min}$.

Следовательно, величины v_0 и h_0 можно полагать заданными. Это позволяет использовать зависимость (4.2) для практического определения среднего значения скорости непрерывного движения судна v в ровном сплошном льду различной толщины h по выражению

$$v = v_{\text{ч. в}} - (v_{\text{ч. в}} - v_{\min}) \frac{h}{h_{\text{пр}}}, \quad (4.3)$$

где $v_{\text{ч. в}}$ — скорость, развиваемая судном на чистой воде при заданной мощности энергетической установки; $h_{\text{пр}}$ — предельная толщина льда, которую судно при заданной мощности энергетической установки в состоянии преодолевать непрерывным ходом с минимальной устойчивой скоростью $v_{\min} \approx 1$ уз.

Значения $h_{\text{пр}}$ (в см) можно установить для ледокола с помощью модельных или натурных испытаний либо приближенно рассчитать по следующей эмпирической формуле, полученной по данным натурных испытаний:

$$h_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\bar{T}_{\text{ш. в}} \Delta^{1/4}}{c_{\text{лед}}}}, \quad (4.4)$$

где $\bar{T}_{\text{ш. в}}$ — суммарная тяга винтов на швартовном режиме, кгс; Δ — водоизмещение судна, т; $c_{\text{лед}}$ — эмпирический коэффициент, среднестатистическое значение которого $\bar{c}_{\text{лед}} = 108$ и постоянно для всех современных ледоколов.

Если значение $\bar{T}_{\text{ш. в}}$ неизвестно, а задана мощность энергетической установки судна (например, мощность на гребных валах $N_{\text{в}}$), то для вычисления $h_{\text{пр}}$ можно воспользоваться формулой

$$h_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{N_{\text{в}} \Delta^{1/4} \eta_{\text{пр}}}{c_{\text{лед}}}}, \quad (4.5)$$

где $N_{\text{в}}$ — суммарная мощность на гребных валах, л.с.; $c_{\text{лед}}$ — эмпирический коэффициент, равный для ледоколов 0,70; $\eta_{\text{пр}}$ — пропульсивный коэффициент полезного действия судна при работе во льду предельной толщины, равный $\eta_{\text{пр}} = N_{\text{эф}}/N_{\text{в}}$, который можно определить по прототипу или любым другим путем. Значения пропульсивного коэффициента $\eta_{\text{пр}}$ для современных ледоколов приведены ниже:

«Капитан Белоусов»	0,066
«Василий Прончищев»	0,060

Выражение (4.5) получено из (4.4) с учетом того, что буксировочная мощность при движении судна во льду предельной толщины

$$N_{\text{эф}} = \frac{0,975 T_{\text{ш. в}} v_{\text{min}}}{75} . \quad (4.6)$$

Формулы (4.4) и (4.5) обладают точностью, достаточной для приближенных расчетов, выполняемых на предварительных стадиях проектирования судна. Наилучшие результаты они дают при расчетах $h_{\text{пр}}$ ледоколов при загрузке по КВЛ (т. е. по осадку, отвечающую нормальному водоизмещению) и полной мощности, развиваемой энергетической установкой (табл. 4.1). Следует отметить, что эмпирические зависимости предлагал ранее ряд авторов. Однако формулы (4.4) и (4.5) следует признать наиболее удачными: они пригодны практически для всех современных ледоколов и обладают удовлетворительной точностью, так как основаны на обширных сведениях, полученных экспериментально.

Таблица 4.1

Значения предельной толщины льда $h_{\text{пр}}$
для различных ледоколов при осадке по КВЛ

Ледокол	Мощность, л. с.	Значения $h_{\text{пр}}$, см, по формуле (4.4)
Малый 1	10 500	90
Малый 2	4 400	59
Речной	1 400	39

При определении $h_{\text{пр}}$ в ходе модельных испытаний в опытовом ледовом бассейне найденное экспериментальным путем значение $h_{\text{пр}}^{\text{мод}}$ пересчитывают на натуру по соотношению

$$h_{\text{пр}}^{\text{нат}} = \lambda h_{\text{пр}}^{\text{мод}}, \quad (4.7)$$

где λ — масштаб модели.

Для построенных судов $h_{\text{пр}}$ можно найти непосредственно в процессе натурных испытаний во льдах. Этот способ наиболее надежен, но не всегда доступен.

Скорость судна при движении по чистой воде $v_{\text{ч. в}}$ можно получить с помощью модельных или натурных испытаний, либо в результате расчета по одному из приводимых ниже способов. Наиболее простой из них — вычисление $v_{\text{ч. в}}$ как функции от во-

доизмещения судна и мощности по эмпирическим формулам типа

$$N = \frac{\Delta^m v_{\text{ч. в}}^n}{c_{\text{в}}}, \quad (4.8)$$

где m и n — показатели степени.

Известно несколько разновидностей подобных формул (формула адмиралтейских коэффициентов, формула Энсли, Афанасьева, Давыдова, Ашика и др.), отличающихся показателями степени m и n . Каждое выражение дает наилучшие результаты для судов определенного типа, причем отмечается тенденция к изменению численного значения m , n и $c_{\text{в}}$ в процессе совершенствования судов. При применении формул Энсли, Афанасьева, Ашика и др. погрешность для ледоколов получается

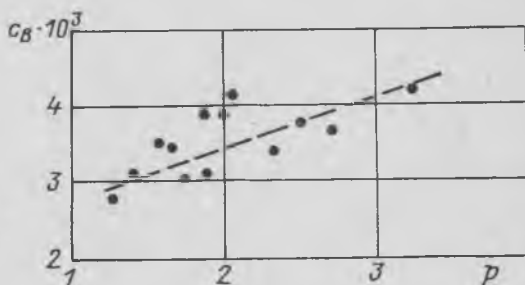


Рис. 4.3. Зависимость $c_{\text{в}}$ от энерговооруженности ледокола p .

большая. Наилучшие результаты для этого типа судов получаются при расчетах по ранее не применявшейся зависимости:

$$N_{\text{в}} = \frac{\Delta^{2/3} v_{\text{ч. в}}^{2,5}}{c_{\text{в}}}, \quad (4.9)$$

где $c_{\text{в}}$ — эмпирический коэффициент, зависящий от энерговооруженности $p = N_{\text{в}}/\Delta$ ледокола (рис. 4.3).

Из сопоставления эмпирических зависимостей (4.5) и (4.9) следует, что они идентичны по структуре, однако влияние водоизмещения судна учитывается в них по-разному: при движении во льду, толщина которого близка к $h_{\text{пр}}$, судно с заданной мощностью и меньшим водоизмещением имеет худшую ходкость, а на чистой воде, наоборот, судно с меньшим водоизмещением при прочих равных условиях развивает большую скорость.

Наилучшие результаты формула (4.9) дает при расчетах скорости движения судна с осадкой по КВЛ при полной мощности энергетической установки. Для определения скорости ледокола на чистой воде на промежуточных режимах можно использовать расчетный метод [25], основанный на вычислении удельного остаточного сопротивления по графикам, полученным на основании обобщения экспериментальных данных. Для грузовых

судов ледового плавания (сухогрузов, лесовозов, танкеров и др.) расчеты $v_{\text{ч}}$ в можно производить по формуле В. В. Ашика [2] или другим известным эмпирическим зависимостям.

4.1.2. СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ

Значительное влияние оказывает заснеженность ледяного покрова на ходкость судна. Это известно из практики мореплавания. Во время испытаний в Арктике ледокол мощностью $N_B = 21\,000$ л. с. продвигался непрерывным ходом со скоростью около 1,0 уз в ровном сплошном льду толщиной 100 см, имеющем плотный снежный покров высотой 25 см. Толщина ровного бесснежного льда, преодолеваемого этим ледоколом при заданной мощности с той же скоростью, составила 145 см. Как видим, снежный покров в ряде случаев может оказывать большее сопротивление движению судна, чем лед той же толщины. Однако до не-

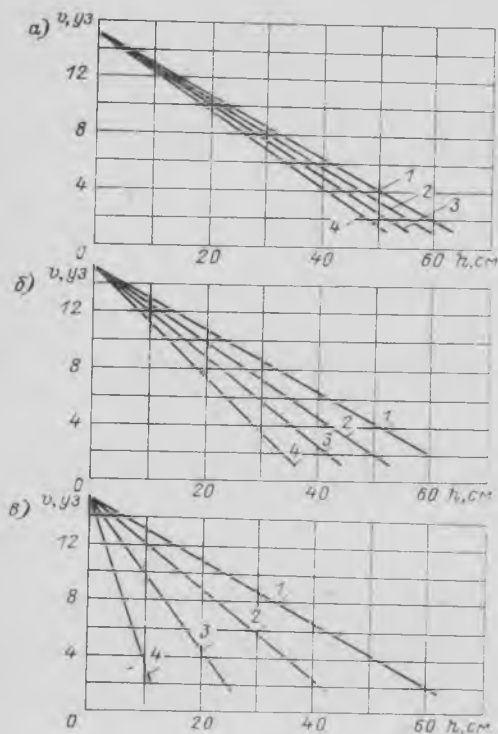


Рис. 4.4. Общий характер зависимости $v=f(h)$ ледокола в сплошном льду с различной высотой снежного покрова при плотности:

а — $\rho_{\text{сн}} = 1$ г/см³; б — $\rho_{\text{сн}} = 0,21$ г/см³; в — $\rho_{\text{сн}} = 0,40$ г/см³.

1 — $h_{\text{сн}1} = 0$ см; 2 — $h_{\text{сн}1} = 10$ см; 3 — $h_{\text{сн}2} = 20$ см; 4 — $h_{\text{сн}3} = 30$ см.

давнего времени не существовало надежного способа оценки влияния снега на ходкость судна. Вследствие того что процесс фрикционного взаимодействия ледяного покрова с бортом судна имеет весьма сложный характер, чисто теоретические приемы учета влияния снега на ходкость судна на практике не приводят к успеху. Наиболее приемлемых результатов и в этом случае можно добиться, используя эмпирические способы расчета.

Опытным путем установлено, что ходкость судна в наибольшей степени зависит от высоты снежного покрова $h_{\text{сн}}$ и его плотности $\rho_{\text{сн}}$ (рис. 4.4). Корреляционный анализ показывает,

что при $h_{\text{сн}} = \text{const}$ зависимость скорости непрерывного движения судна от толщины снега и льда линейная: коэффициент линейной корреляции равен 0,82—0,98. Влияние, оказываемое снежным покровом на ходкость судна, становится более интенсивным по мере увеличения толщины льда и снижения скорости судна (см. рис. 4.4). Это обусловлено тем, что снежный покров увеличивает не зависящее от скорости сопротивление, которое в значительной степени связано с действием сил «сухого» трения.

Обозначим $h_{\text{при}}$ предельную для данного судна толщину сплошного льда, имеющего снежный покров высотой $h_{\text{сн}}$, тогда

$$h_{\text{пр}} - h_{\text{при}} = \Delta h_{\text{пр}}. \quad (4.10)$$

Как показывает анализ натуральных данных, при $h_{\text{сн}} = \text{const}$ зависимость $\Delta h_{\text{пр}} = f(h_{\text{сн}})$ можно записать в виде

$$\Delta h_{\text{пр}} = k' h_{\text{сн}}, \quad (4.11)$$

где k' — безразмерный эмпирический коэффициент, зависящий от плотности снега $\rho_{\text{сн}}$.

Связь коэффициента k' с $\rho_{\text{сн}}$ в первом приближении можно аппроксимировать линейной зависимостью вида

$$k' = k'' \frac{\rho_{\text{сн}}}{\rho_{\text{л}}}, \quad (4.12)$$

где k'' — безразмерный эмпирический коэффициент, который имеет постоянное значение (для ледоколов оно равно $k'' = 4,2$).

Воспользовавшись формулами (4.11) и (4.12), можно выразить $h_{\text{при}}$ как

$$h_{\text{при}} = h_{\text{пр}} - k'' \frac{\rho_{\text{сн}}}{\rho_{\text{л}}} h_{\text{сн}}. \quad (4.13)$$

Зная k'' , найдем скорость движения судна при любой заданной толщине льда h и высоте снежного покрова $h_{\text{сн}}$ по следующей формуле, полученной с помощью выражения (4.3):

$$v = v_{\text{ч. в}} - \left(\frac{v_{\text{ч. в}} - v_{\text{мин}}}{h_{\text{пр}} - k'' h_{\text{сн}} \frac{\rho_{\text{сн}}}{\rho_{\text{л}}}} \right) h. \quad (4.14)$$

Толщина сплошного льда со снежным покровом высотой $h_{\text{сн}}$, которую судно сможет преодолевать с заданной скоростью

$$h = \frac{v_{\text{ч. в}} - v}{v_{\text{ч. в}} - v_{\text{мин}}} \left(h_{\text{пр}} - k'' h_{\text{сн}} \frac{\rho_{\text{сн}}}{\rho_{\text{л}}} \right). \quad (4.15)$$

Снежный покров небольшой плотности (например, свежавшийся рыхлый снег плотностью порядка 0,1 г/см³ (см.

рис. 4.4, а) вызывает лишь незначительное снижение скорости судна, а снежный покров большой плотности (например, уплотненный ветром зимний арктический снег плотностью порядка $0,4 \text{ г/см}^3$ — см. рис. 4.4, в) приводит к резкому снижению скорости.

4.1.3. ПРОЧНОСТЬ ЛЬДА

Вопрос о влиянии прочностных характеристик ледяного покрова на ледовую ходкость судна долгое время служил предметом дискуссий. Некоторые специалисты высказывали предположение, что рассматриваемый параметр льда оказывает на ходкость судов значительное влияние. Другие придерживались противоположного мнения. Обоснованно ответить на этот вопрос оказалось возможным лишь по мере накопления надежных натуральных экспериментальных данных.

Из числа констант, характеризующих прочностные качества льда, как уже отмечалось в гл. 1, при движении судна в сплошном ледяном покрове наиболее значительную роль играет предел прочности на изгиб. Это обусловлено тем, что нарушение общей целостности сплошного льда носовой оконечностью судна связано с деформацией изгиба. Вследствие этого ледяной покров разламывается на отдельные сравнительно крупные льдины (рис. 4.5, б). Для того чтобы борта носовой оконечности судна смогли разрушить лед изгибом, необходима своего рода подготовительная работа, в результате которой будут созданы условия для передачи на лед усилий. В районе форштевня и прилегающих к нему участков бортов происходит «прорезание» льда (рис. 4.5, а), а в местах контакта бортов с кромкой ненарушенного ледяного покрова — смятие и раздробление кромок (рис. 4.5, в). Кроме этого, разрушение льда скалыванием и смятием наблюдается в процессе раздвигания, поворачивания и уплотнения льдин корпусом.

Непосредственно (путем эксперимента или аналитически) внести ясность в вопрос об учете влияния прочностных констант льда на ходкость судна не представляется возможным. Попытаемся дать приближенную оценку с использованием результатов наблюдений и ряда априорных соображений.

Рассмотрим движение судна в сплошном льду предельной толщины, когда удельный вес составляющих сопротивления, связанных с разрушением льда, особенно велик. Известно, что ломка ледяного покрова изгибом и его прорезание в районе форштевня, а также притапливание и поворачивание льдин происходит за счет вертикальной составляющей силы, прикладываемой корпусом ко льду. Горизонтальная составляющая этой силы затрачивается на раздвигание обломков льда, частично на их доламывание, уплотнение и преодоление сил трения.

Таким образом, основную работу по разрушению льда выполняет вертикальная составляющая R_z . Ее можно приближенно

определить, зная величину изменения посадки судна при движении во льду, с помощью выражения

$$R_z = \Delta T_{\text{ср}} \rho_{\text{в}} S_{\text{вл}}, \quad (4.16)$$

где $\Delta T_{\text{ср}}$ — всплытие корпуса судна, измеренное на миделе; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воды; $S_{\text{вл}}$ — площадь действующей ватерлинии.

Дифференцирующий момент, вызванный действием силы R_z ,

$$\delta M_{\text{д}} = R_z (x_z - x_s), \quad (4.17)$$

где x_z — продольная координата точки приложения силы R_z ; x_s — продольная координата центра тяжести действующей ватерлинии корпуса.

Величину $\delta M_{\text{д}}$ можно выразить через всплытие корпуса $\Delta T_{\text{ср}}$, дифферент судна в носу $\Delta T_{\text{н}}$ и момент M_0 , дифференцирующий судно на 1 см осадки:

$$\delta M_{\text{д}} = M_0 (\Delta T_{\text{н}} - \Delta T_{\text{ср}}). \quad (4.18)$$

Таким образом, координата точки приложения силы R_z по длине

$$x_z = x_s + \frac{M_0 (\Delta T_{\text{н}} - \Delta T_{\text{ср}})}{R_z}. \quad (4.19)$$

У среднего ледокола при движении в сплошном ледяном покрове предельной толщины осадка носом уменьшается по сравнению с осадкой на чистой воде в среднем на $\Delta T_{\text{н}} = 0,5$ м, а всплытие корпуса на миделе составляет $\Delta T_{\text{ср}} = 0,1$ м. Расчет по формулам (4.16) и (4.19) показывает, что в этом случае $R_z = 210$ тс, а $x_z = 24$ м

(т. е. центр приложения вертикальной составляющей силы



Рис. 4.5. Деформация льда корпусом: а — прорезание в районе форштевня; б — изгиб в районе бортов; в — смятие и раздробление в местах контакта кромки с бортом.

ледового сопротивления располагается примерно на середине длины носового заострения ледокола).

При оценке величины слагаемых сопротивления R_z будем исходить из условной схемы взаимодействия корпуса со льдом: будем считать, что корпус судна имеет контакт с ненарушенным ледяным покровом в виде сосредоточенных усилий, приложенных в точках 1, 2, 3 (рис. 4.6). В дополнение к этим силам по всей длине носовой ветви ледовой ватерлинии приложена равномерно распределенная вертикальная нагрузка, способствующая притапливанию и поворачиванию обломков льда.

Причина прорезания льда форштевнем (без ломки изгибом) связана с тем, что на наклонной грани форштевня происходит

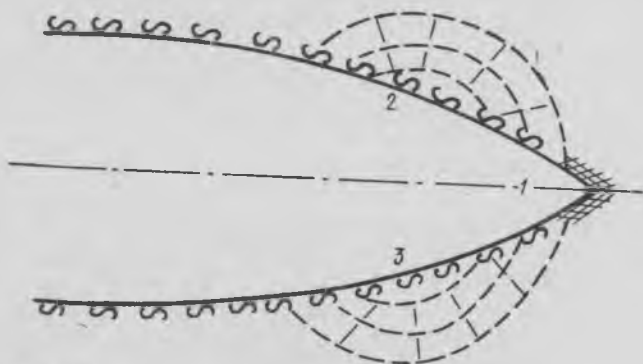


Рис. 4.6. Условная схема взаимодействия сплошного ледяного покрова с корпусом судна.

1 — зона прорезания льда форштевнем; 2, 3 — зоны ломки изгибом; ∞ — зона притапливания и поворачивания льдин.

разложение вектора контактного давления на горизонтальную и вертикальную составляющие, которые в принципе могут вызвать деформацию льда в виде сжатия, среза или изгиба. Окончательное разрушение льда будет зависеть от того, какая из перечисленных видов деформации и соответствующих им напряжений раньше достигнет своего предельного значения. У ледокола в основном имеет место срез льда. Размеры зоны среза зависят от геометрии форштевня и прилегающих участков борта. Суммарная площадь деформации среза в этом районе

$$F'_s = \frac{h^2}{\operatorname{tg} \varphi' \cos \alpha'_E},$$

где φ' — угол наклона форштевня к горизонту; α'_E — угол входа КВЛ в носу.

Приближенно оценить усилия, затрачиваемые на прорезание льда форштевнем ледокола, можно, пренебрегая прогибом льда

и дифферентом ледокола. Тогда силы, действующие на участки бортов, прилегающие к форштевню

$$R'_S = \frac{1}{2} \sigma_S F'_S, \quad (4.20)$$

где σ_S — предел прочности льда на срез.

Суммарная вертикальная сила

$$R_S = 2R'_S \cos \beta, \quad (4.21)$$

где β — угол наклона борта к вертикали.

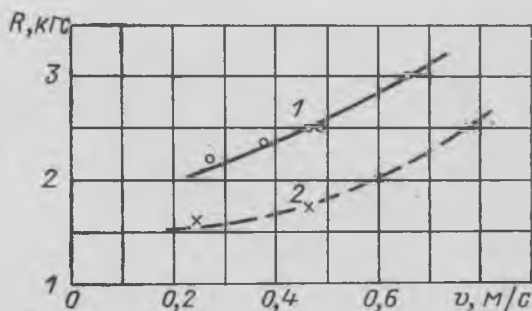
Вертикальная составляющая силы

$$R_{Sz} = R_S \sin \varphi_S, \quad (4.22)$$

где φ_S — угол между вектором относительной скорости перемещения частиц льда по отношению к борту и горизонтом, значения которого лежат в пределах $0 < \varphi_S < \varphi'$.

Рис. 4.7. Результаты испытаний модели среднего ледокола.

1 — сплошной лед; 2 — сплошной лед с прорезями.



Полагая $\varphi_S = 1/2 \varphi'$, можно вычислить вертикальную составляющую силы R_{Sz} для среднего ледокола при движении в предельном льду: она равна 40 тс, или около 20 % суммарной вертикальной силы R_z . Примерно такие же значения получаются в результате модельных испытаний (рис. 4.7). На рисунке сопоставлена кривая буксировочного сопротивления R модели среднего ледокола при движении в сплошном моделированном льду с кривой, полученной в таком же льду, снабженном продольной прорезью, ширина которой равна примерно ширине зоны прорезания льда форштевнем.

Силу, затрачиваемую бортами судна на ломку льда изгибом в соответствии с принятой условной схемой можно оценить по формуле из работы [28]:

$$R_{\text{изг}} = 0,52 \sigma_{\text{изг}} h^2, \quad (4.23)$$

где $\sigma_{\text{изг}}$ — предел прочности льда на изгиб.

Средний ледокол, например, на ломку изгибом льда предельной толщины затрачивает силу $R_{\text{изг}} = 82$ тс, т. е. примерно 40 % суммарной вертикальной силы R_z . Ее остаток, равный

88 тс, расходуется на притапливание, поворачивание льдин, а также на смятие и скалывание кромок ледяного покрова. Непосредственный расчет всех этих сил затруднен. По приближенным расчетам сила, затрачиваемая на притапливание и поворачивание льдин, составляет 18 % R_z , сила, расходуемая на смятие и скалывание кромок — 22 % R_z .

Таким образом, при движении ледокола в сплошном льду предельной толщины все силы, затрачиваемые на разрушение льда (изгибом, смятием, срезом), составляют более 80 % создаваемого корпусом вертикального усилия R_z . При уменьшении толщины эти составляющие уменьшаются, но возрастает роль скоростных слагаемых сопротивления. Результаты натурных

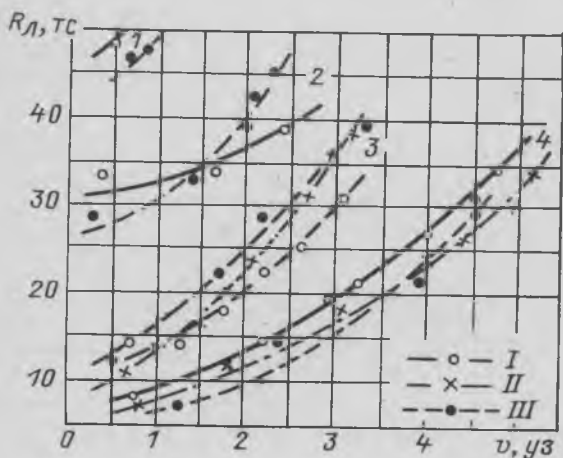


Рис. 4.8. Результаты натурных испытаний малых ледоколов в ровных малозаснеженных сплошных льдах различной прочности и толщины.

I — $\sigma_{изг}=4,6$ кгс/см²; II — $\sigma_{изг}=3,7$ кгс/см²; III — $\sigma_{изг}=2,2$ кгс/см².
1 — $h=55 \pm 57$ см; 2 — $h=37 \div 40$ см; 3 — $h=30 \div 33$ см; 4 — $h=17 \div 20$ см.

испытаний малого ледокола (рис. 4.8) при движении в ровных сплошных льдах различной толщины и прочности показывают, что значения $\sigma_{изг}$ слабо влияют на ледовую ходкость судна: ледовое сопротивление судна изменяется не более чем на 5—10 %. Результаты модельных испытаний в ледовом бассейне [30] подтверждают эти данные. На первый взгляд, вывод о сравнительно небольшом влиянии $\sigma_{изг}$ на ледовую ходкость противоречит сделанному выше заключению о существенной роли сил, затрачиваемых ледоколом на разрушение льда. Это противоречие разрешается, если учесть следующее. В реальных условиях эксплуатации судов диапазон относительного изменения предела прочности ледяного покрова на изгиб и срез примерно одинаков. Так, значение $\sigma_{изг}$ меняется от 2,5 до 4,8 кгс/см², а σ_s — от 3,0 до 6,0 кгс/см², т. е. примерно в два раза. Однако $\sigma_{изг}$ увеличивается при понижении температуры и уменьшении солености льда, а σ_s уменьшается при аналогичном изменении температуры и солености [35]. По-видимому, в силу этих обстоятельств ледовая ходкость судна в целом мало

зависит от каждой из рассмотренных констант ($\sigma_{изг}$ и σ_s), а также от изменения таких гидрометеорологических факторов, как температура и соленость льда. Из сказанного следует, что при практических расчетах ледовой ходкости судна влиянием прочностных констант льда, а также температурой и соленостью льда можно пренебречь.

4.1.4. РАЗРУШЕННОСТЬ И ТОРОСИСТОСТЬ ЛЬДА

Наблюдения показали, что скорость движения судна в значительной степени зависит от разрушенности и торосистости ледяного покрова.

Торосистость — одна из наиболее распространенных особенностей морского ледяного покрова. Как отмечалось в гл. 1, торосистость оценивается по пятибалльной шкале, причем 0 бал-

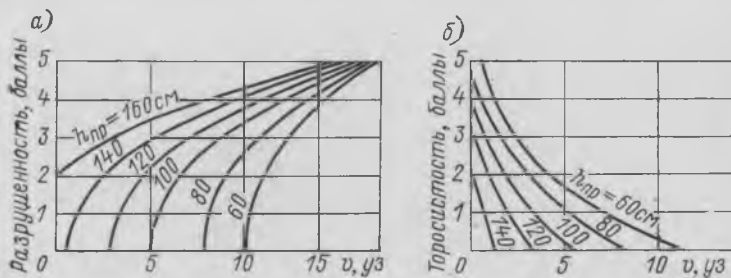


Рис. 4.9. Номограммы для оценки влияния разрушенности (а) и торосистости (б) льда на ходкость ледокола при непрерывном движении.

лов соответствует ровному ледяному покрову, не имеющему торосов, 5 баллов — случаю, когда относительная площадь торосов составляет 100 %. Определение торосистости ледяного покрова производится визуально. Характер распределения торосов и ряд других важных факторов при этом не учитывают.

Разрушенность оценивают визуально также по пятибалльной шкале (см. гл. 1). Изменение разрушенности и торосистости оказывает значительное влияние на ледовую ходкость судна. Это влияние не поддается строгому учету, поэтому разработать физически обоснованную модель, описывающую рассматриваемый процесс, не удается. Для приближенной оценки влияния разрушенности и торосистости на ходкость судна при непрерывном движении в сплошном льду используют номограммы (рис. 4.9), построенные по материалам натурных испытаний ледоколов [28].

Ходкость судна с учетом разрушенности оценивают следующим путем. По формулам (4.4), (4.5) или другим способом находят предельную толщину ровного сплошного льда нулевой

разрушенности, преодолеваемого судном. Затем подбирают диаграмму, соответствующую найденному значению $h_{пр}$ (комплект диаграмм, подобных приведенным на рис. 4.9, содержит серию графиков, построенных для различных значений $h_{пр}$ с интервалом в 10 см). С помощью этой диаграммы определяют скорость непрерывного движения судна для заданных значений толщины льда и разрушенности (рис. 4.9, а) или торосистости

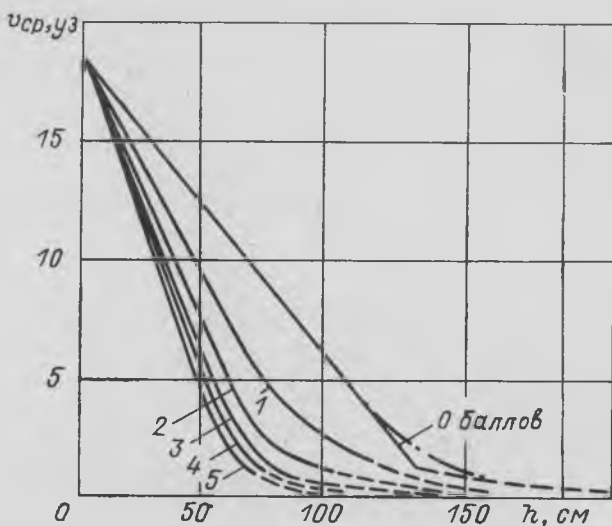


Рис. 4.10. Диаграмма зависимости $v=f(h)$ ледокола во льду различной толщины и торосистости. (0—5 — торосистость).

(рис. 4.9, б). При торосистости льда свыше 3—4 баллов даже ледоколы, как правило, вынуждены продвигаться, работая набегам или попеременно непрерывным ходом и набегам.

На рис. 4.10 приведена диаграмма зависимости скорости движения среднего ледокола во льду различной толщины и торосистости при непрерывном движении (сплошные линии), набегам (пунктир), непрерывным ходом и частично набегам (штрихпунктир). Область толщин льда, в которых ледокол вынужден работать набегам, расширяется по мере повышения торосистости.

§ 4.2. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНА НА ХОДКОСТЬ В СПЛОШНЫХ ЛЬДАХ

4.2.1. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ОСАДКА И ВОДОИЗМЕЩЕНИЕ

Вопрос о влиянии осадки и водоизмещения судна на его ледовые качества имеет большое практическое значение. Известно, что суда всех типов в процессе плавания во льдах в той

или иной степени меняют свою осадку. Грузовые суда имеют две основные эксплуатационные осадки — с грузом и в балласте, а рабочая осадка ледоколов постоянно меняется в рейсе за счет расходования судовых запасов и балластировки.

У современных ледокольно-транспортных судов (табл. 4.2) эксплуатационное изменение осадки и водоизмещения достигает 60 %. Длина судна изменяется не более чем на 3—5 %, ширина остается неизменной (почти все грузовые суда имеют вертикальные борта), форма обводов корпуса меняется незначительно. У ледоколов (табл. 4.3) эксплуатационное изменение осадки достигает 27 %, а водоизмещения — 35 %. Длина и ширина ледокола изменяются не более чем на 6—7 %, а форма обводов корпуса меняется незначительно. Таким образом, у судов ледового плавания при изменении эксплуатационной осадки наиболее существенно изменяется водоизмещение.

Таблица 4.2

Осадка, водоизмещение и грузоподъемность современных ледокольно-транспортных судов ледового плавания

Судно	Ледовый класс	Осадка, м		Водоизмещение, т	Грузоподъемность, т
		с грузом	в балласте		
Сухогрузное	УЛА	8,86	4,93	11 290	5 500
"	УЛА	8,17	4,89	11 540	5 000
Лесовоз	УЛ	6,82	2,86	9 320	5 200
"	УЛ	6,77	2,80	19 760	5 040
"	УЛ	6,93	3,05	10 500	5 300
Танкер	УЛ	8,15	4,60	24 500	13 560

Таблица 4.3

Осадка и водоизмещение ледоколов при различной загрузке

Ледокол	$T_{\text{квл}}, \text{ м}$	$\Delta_{\text{квл}}, \text{ т}$	$T_{\text{max}}, \text{ м}$	$\Delta_{\text{max}}, \text{ т}$	$T_{\text{min}}, \text{ м}$	$\Delta_{\text{min}}, \text{ т}$	$\theta, \text{ т/см}$
	По осадке по КВЛ		При максимальной осадке		При минимальной осадке		
Малый 1	5,5	2 700	6,15	3 200	4,83	2 200	7,6
Малый 2	6,2	4 500	7,0	5 360	5,6	3 840	10,8

Водоизмещение ледокола при любом промежуточном значении эксплуатационной осадки можно вычислить по формуле, полученной с учетом того, что зависимость $\Delta = f(T)$, т. е. грузовой размер ледокола, — практически линейная характеристика во всем диапазоне рабочих осадок:

$$\Delta = \Delta_{\text{КВЛ}} + \Theta_1 (T - T_{\text{КВЛ}}), \quad (4.24)$$

где $\Delta_{\text{КВЛ}}$ — водоизмещение ледокола при осадке по КВЛ, т; Θ_1 — число тонн водоизмещения на 1 см осадки; T — эксплуатационная осадка, см; $T_{\text{КВЛ}}$ — осадка по КВЛ, см.

Как показывают наблюдения, при движении судна во льду, толщина которого близка к предельной, увеличение его эксплуатационной осадки (водоизмещения) приводит к существенному возрастанию скорости. Так, при

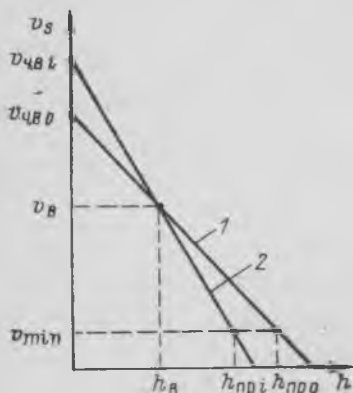


Рис. 4.11. Зависимость $v=f(h)$ ледокола в сплошном льду при различной эксплуатационной осадке.

1 — осадка по КВЛ; 2 — осадка T_i .

испытаниях в ровном сплошном льду значительной толщины двух серийных средних ледоколов — один из них при осадке 9,5 м и водоизмещении 13 300 т продвигался со средней скоростью около 1,0 уз, а другой при той же мощности, осадке 10,5 м и водоизмещении 15 300 т — со скоростью 2,0 уз. Во льду небольшой толщины при высокой скорости движения характер зависимости ходкости судна от осадки и водоизмещения иной: с увеличением осадки скорость понижается. Известно, что аналогичная закономерность наблюдается

на чистой воде: у среднего ледокола при осадке 7,9 м скорость равна 19,8 уз, а при осадке 10,5 м — 18,5 уз. Элементарная математическая модель, описывающая подобную зависимость, представлена на рис. 4.11. Очевидно, что аналитическое выражение для расчета скорости судна v_i и толщины преодолеваемого льда h_i при любой заданной эксплуатационной осадке T_i можно получить, решая совместно систему линейных уравнений вида

$$v_i = v_{q, v_i} - (v_{q, v_i} - v_B) \frac{h_i}{h_B}, \quad (4.25)$$

которые имеют общую точку с координатами h_B, v_B . В этой точке происходит перемена характера влияния осадки и водоизмещения на ходкость судна. Как уже было сказано, при движении судна с большой скоростью в тонких льдах картина взаи

модействия корпуса со льдом принципиально отличается от наблюдаемой во льду большой толщины (см. раздел 1.3): ледяной покров взламывается волнами, которые создает судно. При этом



Рис. 4.12. Ломка льда волной.

его корпус практически не касается льда, а зона разрушения ледяного покрова простирается на значительное по ширине расстояние — до 200—300 м (рис. 4.12). Как показывают наблюдения, ледоколы с относительным удлинением $L/B = 3,5 \div 5,0$ и плохим с точки зрения гидромеханики обтеканием корпуса [42] при движении с относительной скоростью $F_r = 0,28 \div 0,30$ создают значительное волнение. Например, средний ледокол способен ломать волной ровный сплошной лед толщиной до 50 см, малые ледоколы — до 25 см, речные — до 5 см.

Приближенно

$$h_b = dh_{пр}, \quad (4.26)$$

где d — безразмерный эмпирический коэффициент; $h_{пр}$ — предельная толщина льда для данного судна при осадке по КВЛ.

Коэффициент d , постоянный для каждого данного ледокола, зависит от главных размерений судна. Наилучшим образом он коррелируется с длиной корпуса (рис. 4.13).

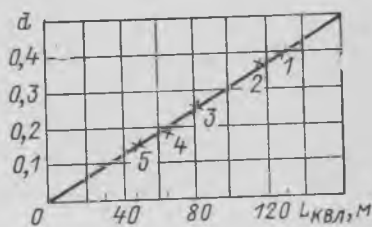


Рис. 4.13. Зависимость коэффициента d от длины ледокола $L_{КВЛ}$.

1, 2 — средние ледоколы; 3, 4 — ледоколы малые 1 и 2; 5 — речной ледокол.

Скорость v_B с учетом (4.3) можно выразить как

$$v_B = v_{ч. в0} - (v_{ч. в0} - v_{min}) d. \quad (4.27)$$

Для вычисления $v_{ч. вi}$ можно воспользоваться формулой Г. И. Музыкантова [26], полученной для судов с различной эксплуатационной осадкой,

$$\frac{\Delta v_{ч. в}}{v_{ч. вi}} = 0,217 \frac{T_i - T_0}{T_0}, \quad (4.28)$$

где $\Delta v_{ч. в} = v_{ч. в0} - v_{ч. вi}$ — скорость судна на чистой воде при работе энергетической установки на полную мощность при осадке по КВЛ T_0 ; $v_{ч. вi}$ — скорость при заданной произвольной осадке T_i .

Формула (4.28) дает хорошие результаты при расчете $v_{ч. вi}$ ледоколов и ледокольно-транспортных судов во всем диапазоне изменения их осадки. С учетом (4.28)

$$v_{ч. вi} = v_{ч. в0} \left(1 - 0,217 \frac{T_i - T_0}{T_0} \right). \quad (4.29)$$

Обозначим

$$1 - 0,217 \frac{T_i - T_0}{T_0} = c. \quad (4.30)$$

Тогда

$$v_{ч. вi} = v_{ч. в0} c. \quad (4.31)$$

Подставив в формулу (4.25) выражения для h_B , v_B и $v_{ч. вi}$, получим

$$v_i = v_{ч. вi} c \left(1 - \frac{h_i}{h_{прd}} \right) - v_{ч. в0} \frac{h_i}{h_{пр}} (1 - d) + v_{min} \frac{h_i}{h_{пр}} \quad (4.32)$$

или

$$h_i = d h_{пр} \frac{c v_{ч. в0} - v_i}{(d + c - 1) v_{ч. в0} - d v_{min}}. \quad (4.33)$$

Выражение для определения предельной толщины льда, преодолеваемого судном при произвольной осадке T_i , можно получить из (4.33), полагая $v_i = v_{min}$:

$$h_{при} = \frac{c d v_{ч. в0} - d v_{min}}{(c + d - 1) v_{ч. в0} - d v_{min}} h_{пр}. \quad (4.34)$$

Отношение

$$\frac{h_{при}}{h_{пр}} = \frac{c d v_{ч. в0} - d v_{min}}{(c + d - 1) v_{ч. в0} - d v_{min}}. \quad (4.35)$$

Приведенные формулы можно использовать для практических расчетов ледовой ходкости судна (табл. 4.4).

Значения $h_{\text{пр}}$ при различной эксплуатационной осадке ледоколов

Ледокол	$T_{\text{min}}, \text{м}$	$h_{\text{пр min}}, \text{см}$	$T_{\text{max}}, \text{м}$	$h_{\text{пр max}}, \text{см}$	$\frac{h_{\text{пр max}}}{h_{\text{пр min}}}$
Малый 1	4,83	56	6,15	69	1,23
Малый 2	5,6	93	7,0	108	1,16

Расчеты подтверждают, что для работы в тяжелых льдах (при $h \geq h_{\text{пр}}$) целесообразно придать судну наибольшую эксплуатационную осадку и водоизмещение, а при сравнительно легких ледовых условиях ($h \ll h_{\text{пр}}$), так же как и на чистой воде, меньшую осадку. Выбирать осадку и водоизмещение судна ледокольного типа при проектировании можно с помощью приведенных зависимостей, учитывая условия эксплуатации.

4.2.2. КРЕН И ДИФФЕРЕНТ

Исследование зависимости ледовых качеств судна от изменения крена и дифферента также представляет практический интерес. Следует отметить, что произвольно изменять посадку обычных грузовых судов ледового плавания во время рейса не удастся. На большинстве ледоколов для этих целей предусмотрены креновая и дифференциальная системы, а на ряде речных ледоколов специальная раскачивающая система. Изменение посадки ледоколов ограничено предельной емкостью балластных дифференциальных цистерн. Так, на среднем ледоколе она равна 900 м³, на малых ледоколах — 250—310 м³, что составляет в среднем 5—8 % водоизмещения.

Пределы изменений продольной посадки ледоколов невелики. Максимальные значения дифферента, зафиксированные при работе во льдах, составляют: у среднего ледокола — 2,8 м, у малых ледоколов — 1,2—1,4 м, а угловой дифферент равен примерно 1,0—1,5°.

Результаты натурных испытаний (табл. 4.5) показывают, что при изменении продольной посадки судна в этих пределах его ледовая ходкость при непрерывном движении во льду практически не меняется.

В то же время изменение посадки оказывает существенное влияние на ряд важных тактико-технических качеств судна, на защищенность движительно-рулевого комплекса, маневренность, заклиниваемость во льдах и т. д. Так, дифферент на корму улучшает защиту этого рулевого комплекса от ледовых повреждений,

Таблица 4.5

Результаты испытаний малых ледоколов в ровных сплошных льдах
при различной продольной посадке

Ледокол	h_d , см	$h_{сн}$, см	v , уз	N , л. с	ΔT , м
Малый 1	28—30	2—3	6,8	5400	+0,5
	28—30	2—3	4,8	2800	+0,5
	28—30	2—3	2,0	1000	+0,5
	28—30	2—3	8,2	5400	—0,6
	28—30	2—3	4,6	2800	—0,6
	28—30	2—3	1,8	1000	—0,6
	50—60	5—7	1,5	5400	+0,5
	50—60	5—7	2,0	5400	—0,6
Малый 2	35	6—7	5,0	5000	+0,7
	35	6—7	3,7	2200	+0,7
	35	6—7	4,9	5000	—0,6
	35	6—7	3,7	2200	—0,6
	56	15—20	1,4	5400	+0,7
	56	15—20	1,6	5400	—0,6

но увеличивает вероятность заклинивания корпуса во льду и т. п. На практике при выборе оптимальной посадки судна в тех или иных условиях судоводители принимают, как правило, компромиссные решения, основываясь на личном опыте. Обычно предпочитают, чтобы при работе во льдах судно имело небольшой дифферент на корму, либо посадку на ровный киль. В исключительных случаях, в основном при плавании на мелководье, ледоколу придают дифферент на нос, ибо при этом уменьшается количество частиц грунта, попадающих в дейдвуды, и облегчается снятие судна с мели [16].

Постоянный крен при плавании судна во льдах стараются заблаговременно устранить, так как он недопустим из-за опасности опрокидывания судна при ледовом сжатии, ухудшения управляемости и т. д. Вопрос о влиянии периодического кренования (раскачивания) судна на ледовую ходкость долгое время служил предметом дискуссий, причем ряд специалистов высказывал предположение, что раскачивание должно привести к увеличению скорости при непрерывном движении судна во льдах и при работе набегам (раскачивание современного ледокола с периодом около 3—5 мин до 3—6° на борт можно осуществить с помощью креновой системы, действующей в автоматическом режиме). Испытания показали, что раскачивание ледокола не влечет за собой увеличения скорости во льдах при непрерывном движении. Вследствие асимметричного характера взаимодействия корпуса судна со льдом возрастает его рыскливость, а канал за кормой становится извилистым даже в ровных льдах. При неработающей креновой системе для удержания ледокола

на курсе в ровном сплошном льду угол перекалки руля не превышает $10\text{--}15^\circ$ на борт, а при раскачивании судна он достигает 40° . При работе набегам в торосистых и сильно заснеженных льдах раскачивание ледокола также не приводит к возрастанию средней скорости движения, однако понижает вероятность заклинивания корпуса во льду.

Продольное раскачивание корпуса ледокола можно осуществить либо за счет работы дифференной балластной системы, либо за счет специального раскачивающего устройства. Время перекачки балласта из носовых дифференных цистерн в кормовые и обратно у современных ледоколов составляет $10\text{--}30$ мин и более. Очевидно, что раскачивание корпуса с таким большим

периодом не оказывает на ледовую ходкость судна сколько-нибудь заметного влияния. Изменение продольной посадки судна с периодом $100\text{--}200$ колебаний в минуту на речных ледоколах добиваются с помощью специальных раскачивающих установок. В 1966 г. были проведены натурные испытания ледокольной приставки, оборудованной подобной установкой, в 1972 г. — речного ледокола мощностью 600 л. с. с раскачивающей установкой. Наблюдения за работой этих судов позволили установить, что колебания корпуса судна, имеющие характер килевой и вертикальной качки, не приводят к выраженным резонансным колебаниям свободной поверхности воды и ледяного покрова. Общая картина разрушения льда корпусом при работе раскачивающей установки примерно такая же, как и при движении обычного ледокола. На рис. 4.14 приведен график зависимости толщины сплошного льда от скорости движения речного ледокола с работающей и неработающей раскачивающей установкой. Из рисунка видно, что раскачивание ледокола дает положительный эффект лишь при большой толщине льда и малой скорости движения (область С на рисунке). При этом скорость непрерывного движения судна с работающей раскачивающей установкой равна или немного выше средней скорости движения того же судна с неработающей установкой, продвигающегося набегам (разница в скорости может быть значительной лишь в том случае, когда судно без раскачивающей установки часто заклинивается во льду). При промежуточных значениях скорости и толщины льда раскачивание никакого эффекта не дает (область В), а при

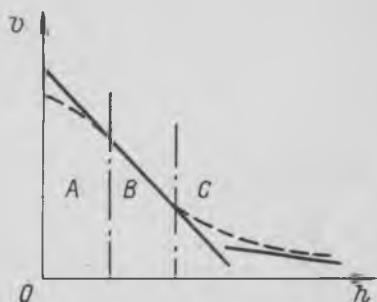


Рис. 4.14. Зависимость скорости движения речного ледокола с раскачивающей установкой от толщины ровного сплошного льда (сплошные линии — с работающей установкой, пунктир — с неработающей установкой).

общей картине разрушения льда корпусом при работе раскачивающей установки примерно такая же, как и при движении обычного ледокола. На рис. 4.14 приведен график зависимости толщины сплошного льда от скорости движения речного ледокола с работающей и неработающей раскачивающей установкой. Из рисунка видно, что раскачивание ледокола дает положительный эффект лишь при большой толщине льда и малой скорости движения (область С на рисунке). При этом скорость непрерывного движения судна с работающей раскачивающей установкой равна или немного выше средней скорости движения того же судна с неработающей установкой, продвигающегося набегам (разница в скорости может быть значительной лишь в том случае, когда судно без раскачивающей установки часто заклинивается во льду). При промежуточных значениях скорости и толщины льда раскачивание никакого эффекта не дает (область В), а при

большой скорости оно сказывается отрицательно, так как энергия раскачивающей установки расходуется в основном на дополнительное волнообразование (область А).

Природа влияния продольного раскачивания ледокола на его ледовую ходкость связана в основном с трением, которое препятствует вползанию носовой оконечности на лед. При снижении скорости ледокола до бесконечно малой величины сила трения наружной обшивки о лед резко возрастает, так как трение из динамического переходит в статическое. Обычный ледокол в этот момент останавливается, а затем, чтобы продолжить движение, вынужден отойти назад для разбега. При работе раскачивающей установки и очень малой скорости движения статическое трение не возникает. Благодаря этому носовая оконечность может беспрепятственно вползать на ледяной покров и разрушать его под тяжестью своей массы. Применение раскачивающей установки на речных ледоколах особенно эффективно. Благодаря ему сокращается потребность в работе судна набегам, уменьшается вероятность заклинивания, улучшается маневренность, что важно при работе ледокола в условиях мелководья, узких фарватеров и акваторий портов. Однако для преодоления значительных по протяженности ледовых трасс раскачивание ледокола не дает ощутимого преимущества. Учитывая, что при длительной работе раскачивающей установки возникает ряд серьезных эксплуатационных неудобств, ее применение на морских ледоколах нельзя признать перспективным (за исключением, возможно, вспомогательных ледоколов).

Таким образом, приближенные практические расчеты ходкости судов можно выполнять без учета крена и дифферента, т. е. так же, как при посадке на ровный киль.

4.2.3. ШЕРОХОВАТОСТЬ НАРУЖНОЙ ОБШИВКИ

Среди составляющих ледового сопротивления судна важную роль играют силы трения, поэтому вопрос о влиянии фрикционных характеристик наружной обшивки судна на его ледовую ходкость заслуживает особого рассмотрения. Фрикционные свойства обшивки зависят в первую очередь от ее материала и шероховатости поверхности. Как известно, наружную обшивку всех современных судов изготавливают из различных сортов судостроительной стали, фрикционные свойства которых практически одинаковы. Шероховатость судовой обшивки определяется:

а) конструктивной и технологической шероховатостью, зависящей от конструкции наружной обшивки, расположения и количества сварных швов, их износа, наличия гофров на обшивке и т. п.;

б) шероховатостью поверхности стальных листов, из которых изготовлена обшивка, зависящей от качества обработки металла перед нанесением красочного покрытия;

в) шероховатостью и структурой покрытия.¹

Рассмотрим наиболее простой для анализа случай фрикционного взаимодействия корпуса со льдом при движении судна в однородном ледяном покрове. Будем полагать, что фрикционное взаимодействие льда с бортом равномерно охватывает зону наружной обшивки, прилегающую к ватерлинии судна по всей длине корпуса. В рассматриваемом случае контактное усилие, возникающее при взаимодействии борта судна со льдом, $p_{\tau} = f_{\tau p} p_n$, где p_n — нормальное давление. Сила p_{τ} направлена по касательной к борту судна, а контактное усилие p_n является непрерывной функцией координаты x , которая направлена вдоль судна, скорости судна и параметров ледяного покрова. Для данного судна в заданных ледовых условиях $p_n = p(x)$. В системе координат, связанной с судном, проекция контактного усилия на ось Ox , направленную вдоль диаметральной плоскости,

$$p_{nx} = p(x) (l + f_{\tau p} \sqrt{1 - l^2}), \quad (4.36)$$

где l — направляющий косинус нормали к оси Ox .

Сила сопротивления может быть получена интегрированием выражения (4.36):

$$R_{\tau p} = 2f(\xi) \int_0^{L_n} (l + f_{\tau p} \sqrt{1 - l^2}) dx, \quad (4.37)$$

где L_n — длина носового заострения корпуса.

Формула для учета влияния сил трения на ледовое сопротивление будет иметь вид

$$R_0 = R_1 \frac{\int_0^{L_n} (l + f_{\tau p1} \sqrt{1 - l^2}) dx}{\int_0^{L_n} (l + f_{\tau p0} \sqrt{1 - l^2}) dx}, \quad (4.38)$$

где R_0 — сопротивление, отвечающее коэффициенту трения $f_{\tau p0}$; R_1 — сопротивление, отвечающее коэффициенту трения $f_{\tau p1}$. Наклоном бортов в районе ватерлинии можно пренебречь, так как его влияние на конечный результат незначительно. Тогда можно получить более простые расчетные выражения, пригодные для практического использования:

— для судов с цилиндрической вставкой

$$R_0 = R_1 \frac{f_{\tau p0} L_n + 0,5B}{f_{\tau p1} L_n + 0,5B}; \quad (4.39)$$

— для судов, не имеющих цилиндрической вставки,

$$R_0 = R_1 \frac{f_{\tau p0} L + B}{f_{\tau p1} L + B}. \quad (4.40)$$

¹ Обрастание подводной части наружной обшивки во внимание не принимается, так как при плавании судна во льдах оно быстро устраняется.

Динамический коэффициент трения льда по стали с различной шероховатостью поверхности может изменяться в диапазоне 0,02—0,14 [60]. При этом сопротивление ледокола, подсчитанное по формулам (4.39), (4.40), меняется на 50 %. Однако в условиях эксплуатации шероховатость судовой обшивки и коэффициент ее трения о лед не изменяются столь значительно, так как в процессе работы судна наружная обшивка корпуса подвергается интенсивной обработке льдом. В зоне ледового пояса, прилежащей к действующей ватерлинии, где фрикционное воздействие льда на поверхность обшивки особенно активно, поверхность бортов полируется льдом до появления металлического блеска. На остальной части подводной поверхности корпуса с наружной обшивки полностью удаляется обрастание, ржавчина и большая часть краски. В такое состояние наружная обшивка корпуса приходит уже через несколько часов после начала работы судна во льдах. В дальнейшем оно сохраняется практически неизменным. Это подтверждают результаты повторных испытаний судов, проводимых через разные интервалы времени (от нескольких недель до нескольких лет): их ходкость в идентичных ледовых условиях практически одинаковая.

Из сказанного следует, что при приближенных расчетах ледовой ходкости судна нет необходимости особо учитывать шероховатость наружной обшивки корпуса. В тех случаях, когда возникает такая необходимость, можно воспользоваться формулами (4.38)—(4.40), в которые коэффициент трения льда о борт судна входит в явном виде.

Вполне очевидно, что при постройке ледоколов необходимо принимать все возможные меры для снижения конструктивной и технологической шероховатости наружной обшивки корпуса, особенно в районе ледового пояса. При этом нанесение на обшивку различных антифрикционных покрытий не может служить эффективной мерой, так как, во-первых, фрикционные характеристики обычной стальной наружной обшивки ледокола достаточно высоки за счет полирования льдом, а во-вторых, долговечность любого покрытия (краски, смолы, полимеров и т. п.) в условиях взаимодействия со льдом весьма ограничена.

Отметим попутно, что снижения фрикционного сопротивления пытаются достичь с помощью применения на ледоколах гидро- и пневмоомывающих устройств. Гидроомывающее устройство было установлено в носовой части ледокола «Петр Пахтусов», а пневмоомывающее — например, на речном ледоколе «Капитан Измайлов». Натурные испытания показали, что гидроомывающее устройство не оказывает заметного влияния на ходкость ледокола в сплошных льдах, а пневмоомывающее эффективно лишь на малых скоростях — не более 1—3 уз. Ледокол без пневмоомывающего устройства во льдах предельной толщины нередко вынужден останавливаться и работать набегами, однако в целом положительное влияние рассмотренных

устройств на ходовые и маневренные качества судна весьма незначительно.

Таким образом, с помощью гидро- и пневмоомывающих устройств радикально решить задачу снижения фрикционного сопротивления при работе судна во льдах не удастся.

4.2.4. ПРОПУЛЬСИВНЫЕ КАЧЕСТВА СУДНА

Показателем для общей оценки пропульсивных качеств судна при плавании по чистой воде, как известно, служит пропульсивный коэффициент полезного действия

$$\eta_{\text{пр}} = \frac{R_{\text{ч. в}} v}{75 N_{\text{в}}}, \quad (4.41)$$

где $R_{\text{ч. в}}$ — буксировочное сопротивление судна при плавании на чистой воде, кгс; v — скорость, м/с; $N_{\text{в}}$ — суммарная мощность на гребных валах, л. с.

Аналогичный показатель для работы судна во льдах («пропульсивный ледовый коэффициент») можно представить в виде

$$\eta_{\text{л}} = \frac{\bar{T}_{\text{г}} v}{75 N_{\text{в}}}, \quad (4.42)$$

где $\bar{T}_{\text{г}}$ — суммарная тяга на гаке, которая зависит от скорости судна.

В общем виде зависимость тяги на гаке от скорости непрерывного движения судна во льду можно записать как

$$\bar{T}_{\text{г}} = \bar{T}_{\text{шв}} - a_1 v - a_2 v^2, \quad (4.43)$$

где $\bar{T}_{\text{шв}}$ — тяга винтов судна на швартовном режиме; a_1 и a_2 — эмпирические коэффициенты.

Обозначим

$$\alpha_1 = a_1 \frac{v_{\text{ч. в}}}{\bar{T}_{\text{шв}}}, \quad \alpha_2 = a_2 \frac{v_{\text{ч. в}}^2}{\bar{T}_{\text{шв}}^2} \quad (4.44)$$

и приведем выражение (4.43) к безразмерному виду

$$\bar{T}_{\text{г}} = \bar{T}_{\text{шв}} \left[1 - \alpha_1 \frac{v}{v_{\text{ч. в}}} - \alpha_2 \frac{v^2}{v_{\text{ч. в}}^2} \right]. \quad (4.45)$$

При $\bar{T}_{\text{г}} = \bar{T}_{\text{шв}}$ и $v = 0$, следует, что $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

Принимая во внимание, что между скоростью непрерывного движения судна в сплошных льдах и толщиной льда существует зависимость вида (4.3), выражение (4.45) можно записать как

$$\bar{T}_{\text{г}} = \bar{T}_{\text{шв}} \frac{h}{h_{\text{пр}}} \left[1 + \alpha_2 \left(1 - \frac{h}{h_{\text{пр}}} \right) \right]. \quad (4.46)$$

Тогда ледовый пропульсивный КПД

$$\eta_{\text{л}} = \frac{\bar{T}_{\text{шв}} v_{\text{ч. в}}}{75 N_{\text{в}}} \left(1 - \frac{h}{h_{\text{пр}}}\right) \left(\frac{h}{h_{\text{пр}}}\right) \left[1 + \alpha_2 \left(1 - \frac{h}{h_{\text{пр}}}\right)\right]. \quad (4.47)$$

Обозначая

$$f\left(\frac{h}{h_{\text{пр}}}\right) = \left(1 - \frac{h}{h_{\text{пр}}}\right) \left[1 + \alpha_2 \left(1 - \frac{h}{h_{\text{пр}}}\right)\right] \frac{h}{h_{\text{пр}}}, \quad (4.48)$$

получим

$$\eta_{\text{л}} = \frac{\bar{T}_{\text{шв}} v_{\text{ч. в}}}{75 N_{\text{в}}} f\left(\frac{h}{h_{\text{пр}}}\right). \quad (4.49)$$

Коэффициент $\eta_{\text{л}}$ равен нулю при $v = 0$ и при $h = 0$, а при некотором значении $h/h_{\text{пр}}$ имеет максимум, положение которого при $f'(h/h_{\text{пр}}) = 0$, вычисляют по формуле

$$\left(\frac{h}{h_{\text{пр}}}\right)_{\text{max}} = \frac{2\alpha_2 + 1}{3\alpha_2} \pm \sqrt{\left(\frac{2\alpha_2 + 1}{3\alpha_2}\right)^2 - \frac{1 + \alpha_2}{3\alpha_2}}. \quad (4.50)$$

Значения коэффициента α_2 для ряда современных отечественных ледоколов и грузовых судов ледового плавания приведены ниже:

Ледоколы	0,53	0,57	0,60	0,62	0,63
Транспортные суда	0,62	0,60	0,64	0,66	0,67

Расчеты показывают, что при изменении α_2 во всем диапазоне его значений (от 0,50 до 0,67) величина $(h/h_{\text{пр}})_{\text{max}} = 0,44$ практически постоянна. Это означает, что ледовый КПД достигает максимального значения при плавании судна во льду, толщина которого составляет примерно $0,44h_{\text{пр}}$, а именно:

$$\eta_{\text{л max}} = \frac{0,34 \bar{T}_{\text{шв}} v_{\text{ч. в}}}{75 N_{\text{в}}}. \quad (4.51)$$

При повышении и понижении толщины льда значение $\eta_{\text{л}}$ уменьшается. При плавании судна во льду предельной толщины оно достигает всего лишь около 0,06—0,075.

Для сравнительной оценки эффективности работы судов во льдах и на чистой воде можно воспользоваться отношением соответствующих пропульсивных коэффициентов $\eta_{\text{л max}}$ и $\eta_{\text{пр}}$:

$$\frac{\eta_{\text{л max}}}{\eta_{\text{пр}}} = \frac{0,34 \bar{T}_{\text{шв}}}{R_{\text{ч. в}}}. \quad (4.52)$$

Результаты расчетов $\eta_{\text{л max}}$ и $\eta_{\text{пр}}$ представлены в табл. 4.6, из которой видно, что наиболее высокое значение $\eta_{\text{л max}}$ имеют средние ледоколы, для малых, а также сверхмощных ледоколов оно несколько меньше.

**Пропульсивные коэффициенты полезного действия ледоколов
и грузовых судов ледового плавания**

Судно	$\eta_{\text{л max}}$	$\eta_{\text{пр}}$	$\frac{\eta_{\text{л max}}}{\eta_{\text{пр}}}$
Ледоколы	0,36	0,42	0,85
	0,32	0,44	0,71
	0,32	0,38	0,84
	0,32	0,41	0,767
Транспортные суда ледового плава- ния	0,38	0,62	0,615
	0,37	0,58	0,644
	0,34	0,69	0,49
	0,36	0,76	0,47

§ 4.3. ОЦЕНКА ХОДКОСТИ СУДНА В БИТЫХ ЛЬДАХ И ПРИ РАБОТЕ НАБЕГАМИ

4.3.1. НЕПРЕРЫВНОЕ ДВИЖЕНИЕ В БИТЫХ ЛЬДАХ

Ходкость судна при непрерывном движении в мелкобитых льдах (как природного образования, так и в канале за ледоколом) принято оценивать на основе методики, основанной на применении полуэмпирического выражения [58]:

$$R_{\text{л.ч}} = \rho_{\text{л}} V r h \left(\frac{B}{2} \right)^2 \left[\bar{k}_1 \left(1 + 2f_{\text{тр}} \alpha_n \frac{L}{B} \right) + \bar{k}_4 f_{\text{тр}} \alpha \frac{L}{B} S_{\text{сж}} \right] + \\ + \bar{k}_2 \rho_{\text{л}} r h B (f_{\text{тр}} + \alpha_n \operatorname{tg} \alpha'_E) Fr + \bar{k}_3 \rho_{\text{л}} r h L \operatorname{tg}^2 \alpha'_E Fr^2, \quad (4.53)$$

где $R_{\text{л.ч}}$ — ледовое «чистое» сопротивление судна в мелкобитых льдах, кгс, представляющее собой разность $R_{\text{л.ч}} = R_{\text{л}} - R_{\text{в}}$; r — протяженность мелкобитого льда, м; h — толщина мелкобитого льда, м; $S_{\text{сж}}$ — сжатие льда, балл; $\rho_{\text{л}}$ — удельный вес льда, кгс/см³; $f_{\text{тр}}$ — коэффициент трения льда о борт судна; L — длина судна, м; B — ширина судна, м; α — коэффициент полноты конструктивной (ледовой) ватерлинии; α_n — коэффициент полноты носовой ветви КВЛ; α'_E — угол входа носовой ветви КВЛ, град;

Fr — относительная скорость; $\bar{k}_1 - \bar{k}_4$ — безразмерные эмпирические коэффициенты, численное значение которых приведено на

рис. 4.15. Коэффициент $\bar{k}_4$ имеет постоянное значение, равное $120 \cdot 10^{-2}$.

Формула (4.53) получена теоретическим путем. Она описывает схематическую математическую модель взаимодействия корпуса судна с мелкобитым льдом. Значения входящих в формулу эмпирических коэффициентов $\bar{k}_1 - \bar{k}_4$ определены с помощью модельных испытаний в опытовом бассейне. Для расчета значения параметров r и h , которые для природного мелкобитого льда, вообще говоря, неизвестны, можно использовать статистические данные натурных наблюдений. Действительно, из параметров мелкобитого льда известными и заданными могут

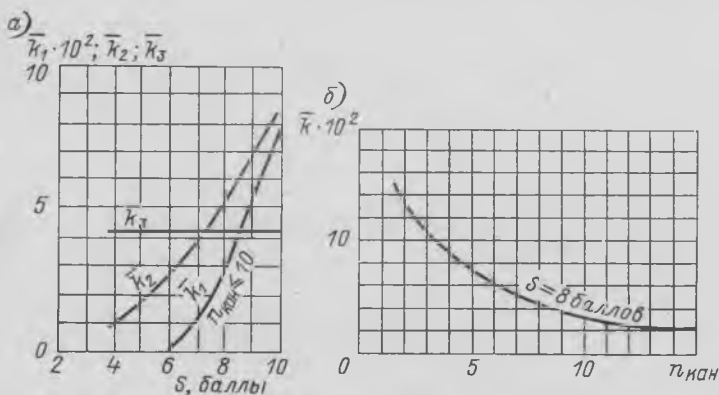


Рис. 4.15. Зависимость коэффициентов $\bar{k}_1$, $\bar{k}_2$, $\bar{k}_3$ от сплоченности (а) и относительной ширины канала (б).

считаться лишь сплоченность и сжатие, которые визуально оценивают по соответствующим шкалам ледовой классификации [46]. Коэффициент трения льда о корпус судна можно установить экспериментально либо по материалам, приведенным в [58], а для приближенных расчетов его можно принимать постоянным, равным 0,1. Среднестатистическое значение параметра rh для так называемых природных мелкобитых льдов сравнительно стабильно. В среднем оно равно $4,0 \text{ м}^2$ (ширина канала $B_{\text{кан}}$ для природного мелкобитого льда неограниченная, т. е. $n_{\text{кан}} = B_{\text{кан}}/B \geq 10$). При плавании судна в мелкобитом льду в канале за ледоколом расчетное значение параметра rh зависит от толщины льда, в котором проложен канал (рис. 4.16). Относительная ширина канала мелкобитого льда, прокладываемого ледоколами, $n_{\text{кан}}$ зависит от толщины и сплоченности льда, скорости движения ледокола, дистанции между ледоколом и судном и т. п. Приближенно определить значение $n_{\text{кан}}$ можно по графику, построенному на основании натурных наблюдений за

каналом во льду, проложенным средним ледоколом, который имеет ширину корпуса $B = 23,5$ м (рис. 4.17).

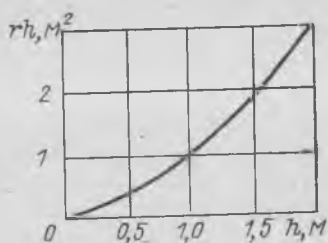


Рис. 4.16. Зависимость rh от толщины льда h , в котором проложен канал.

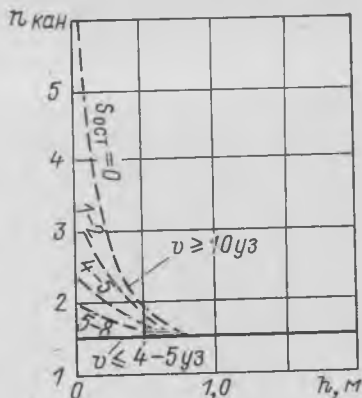
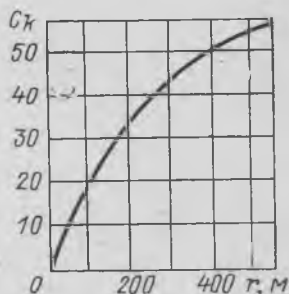


Рис. 4.17. Зависимость $n_{\text{кан}}$ от толщины осенне-зимнего дрейфующего льда h , в котором проложен канал ($S_{\text{ост}}$ — сплоченность остаточного льда).

Наибольшую сложность представляет оценка ходкости судна в дрейфующих крупнобитых льдах и обломках полей. Можно привести лишь чисто эмпирическую зависимость для расчета сопротивления ледокола при движении в этих льдах, полученную на основании систематизации данных натурных испытаний средних ледоколов:

$$R_{\text{л.ч}} = (c_k - 9,0v_{\text{ср}}^{1,3}) h^{1,2}, \quad (4.54)$$

Рис. 4.18. Зависимость коэффициента c_k от протяженности крупнобитого льда r .



где c_k — эмпирический коэффициент, зависящий от протяженности льда r , определяемый по графику (рис. 4.18).

Формула (4.54) пригодна для расчета $R_{\text{л.ч}}$ при толщине льда 0,8—2,0 м, общей сплоченности 8—10 баллов и разрушенности 2—3 балла, а также при скорости судна 1—12 уз.

4.3.2. РАБОТА НАБЕГАМИ

Как отмечалось, к работе набегами прибегают в тех случаях, когда из-за неблагоприятных ледовых условий судно не в состоянии продвигаться непрерывным ходом. Процесс движения судна при работе набегами состоит из периодически повторяющихся циклов (см. подраздел 2.2.2).

Средняя скорость ледоколов $v_{\text{наб}}$ при работе набегами (в узлах)

Ледокол	Характеристика льда				Характер работы ледокола	$v_{\text{наб}}$, уз
	Толщина льда, см	Высота снега, см	Разрушенность, баллы	Торосистость, баллы		
Малый	140—160	0	2	0	Набегами	0,1
	110—140	0	2	0		0,3
	80—120	0	2—3	0		0,6
	60—100	0	2—3	0		1,0
Средний					Набегами, частично непрерывно	
	120—200	0	2	1	Набегами, частично непрерывно	1,1
	120—200	0	2	1		1,5
	90—170	0	2	0—1		2,3
	200	0	2	1	Набегами	0,5
	190	0	2	0—1		0,6
	170	0	2—3	0—1		0,95
	200—300	40	0	3—4		0,05
	180—200	30—40	0	2		0,03
	100—120	20—30	0	2—3		0,2
	140—160	20—30	1	2	Набегами	0,4
	80—100	20—30	0	3		0,3
	140—180	0—20	1	1—2		0,5
	140—180	0—20	1	1—2		1,0

Средняя скорость продвижения судна при работе набегами на практике изменяется в сравнительно нешироком диапазоне: от 0,03 до 1,0 уз (табл. 4.7, рис. 4.19). Следовательно, для практических целей удовлетворительных результатов можно добиться, используя приближенные эмпирические зависимости.

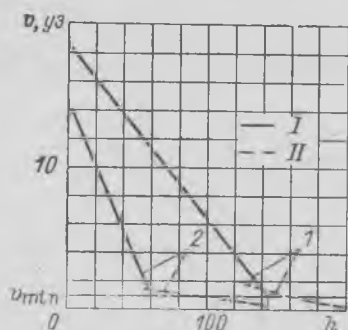


Рис. 4.19. Зависимость скорости от толщины сплошного льда для средних ледоколов (I) и малых (2).

I — непрерывный ход; II — работа набегами.

Как следует из рис. 4.2 и 4.19, зависимость средней скорости судна при работе набегами $v_{\text{наб}}$ (а также частично набе-

гами, частично непрерывным ходом) от толщины льда можно аппроксимировать экспонентой

$$v_{\text{наб}} = v' e^{-\alpha' (h - h')}, \quad (4.55)$$

где v' — наибольшая скорость, достижимая при работе судна набегами во льду, толщина которого h' близка к $h_{\text{пр}}$; α' — постоянный коэффициент.

Формула для практического расчета средней скорости судна, полученная с учетом выражения (4.55), имеет вид

$$v_{\text{наб}} = k_{\text{наб}} v_{\text{min}} \exp \left[\frac{h - h_{\text{пр}}}{h_{\text{эф}} - h_{\text{пр}}} \lg \left(\frac{v_{\text{эф}}}{k_{\text{наб}} v_{\text{min}}} \right) \right], \quad (4.56)$$

где $k_{\text{наб}}$ — эмпирический коэффициент, значение которого при работе судна набегами в среднем равно 1,5, а при продвижении частично набегами — 2,5; v_{min} — минимальная скорость устойчивого непрерывного движения судна во льду предельной толщины $h_{\text{пр}}$; $h_{\text{эф}}$ — максимальная толщина льда, при которой работа судна набегами со скоростью $v_{\text{эф}}$ может считаться эффективной (экономически оправданной).

Скорость $v_{\text{эф}}$ зависит от таких факторов, как тип судна, его ледовый класс, общая длина участка ледовой трассы, форсированного ледоколом, назначение данной ледокольной операции и т. п. Так, в исследовании [42] обоснован следующий вывод: при проводке транспортных судов по трассе Северного морского пути на участках сравнительно большой протяженности работа мощных ледоколов может считаться эффективной, если $v_{\text{эф}}$ равна не менее 0,5 уз. В тех случаях, когда возникает необходимость проводки судов с форсированием сравнительно небольших по протяженности перемычек тяжелого льда, значение $v_{\text{эф}}$ может быть меньше. Это также можно обосновать соответствующим расчетом.

Учитывая сказанное, при использовании формулы (4.56) скорость $v_{\text{эф}}$ можно считать величиной заданной. В общем случае ее можно полагать равной 0,5 уз, а толщину льда $h_{\text{эф}}$ в два раза больше, чем $h_{\text{пр}}$, т. е. $h_{\text{эф}} = 2h_{\text{пр}}$. Тогда $v_{\text{эф}}$ найдем из формулы

$$v_{\text{наб}} = k_{\text{наб}} v_{\text{min}} \exp \left(-1,8 \frac{h - h_{\text{пр}}}{h_{\text{пр}}} \right). \quad (4.57)$$

Хотя такие параметры льда, как заснеженность, торосистость, разрушенность и др. не входят в явном виде в формулы (4.56) и (4.57), фактически они учитываются при расчете, так как их принимают во внимание при вычислении величины $h_{\text{пр}}$.

Теперь важно установить пределы применения полученных расчетных выражений. Они зависят в первую очередь от параметров ледяного покрова. Проиллюстрируем это на примере. На рис. 4.20 приведены кривые зависимости чистого ледового сопротивления среднего ледокола от протяженности льдин. Толщина льда постоянна (120 см), скорость ледокола меняется

от 2 до 10 уз. Как видно из рисунка, пределы применения формулы (4.53) для расчета ходкости судна в мелкобитых льдах ограничены областью между осью ординат и линией $A-B$. Область, в которой пригодны формулы (4.3)—(4.5) и др. для сплошного льда, лежит справа от линии $D-C$, так как при протяженности льдин 600—1200 м и более ходкость судна практически перестает зависеть от параметра r . Соответственно формулу (4.54) при движении судна в крупнобитых льдах и обломках полей можно использовать при значениях протяженности льдин, ограниченных линиями $A-B$ и $D-C$. Из анализа

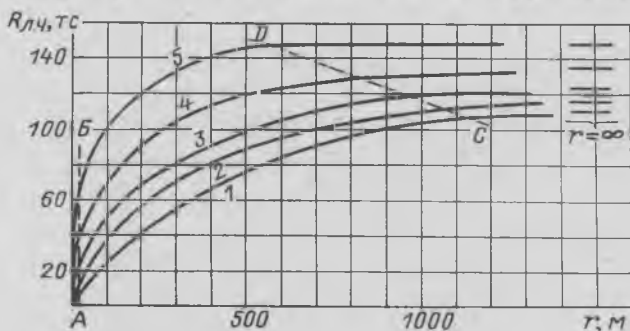


Рис. 4.20. Зависимость $R_{л.ч}$ от протяженности льдин r при $h=120$ см.

1 — скорость ледокола 1—2 уз; 2—2—4 уз; 3—3—6 уз; 4—4—8 уз; 5—5—10 уз.

рис. 4.20 следует, что минимальная протяженность поля, которое судно преодолевает как сплошной лед, зависит также от скорости движения. Дело в том, что силы сопротивления, обусловленные раздвиганием обломков разрушенного судном поля, зависят от скорости.

Действительно, при движении ледокола со скоростью 2 уз к «сплошному» льду можно отнести поля протяженностью 1100 м и более, а при скорости 10 уз — поля протяженностью около 600 м. Как показано в [8], судно, движущееся с некоторой скоростью, будет раздвигать обломки поля, разделенного трещиной, до тех пор, пока работа, расходуемая на раздвигание, меньше работы, необходимой для ломки льда. Рис. 4.20 можно использовать для определения границ применения расчетных формул, относящихся к той или иной категории льда.

§ 4.4. ОЦЕНКА МАНЕВРЕННОСТИ СУДНА ВО ЛЬДАХ

4.4.1. ПОВОРОТЛИВОСТЬ

Маневренность судна во льдах изучена хуже, чем ледовая ходкость и прочность. Методы ее оценки имеют эмпирический характер, что объясняется, с одной стороны, недостаточным ко-

личеством опытных данных и, с другой, — большой сложностью неустановившегося криволинейного движения судна. Взаимодействие корпуса судна со льдом при совершении маневров в ледовых условиях имеет ряд особенностей. Так, при движении

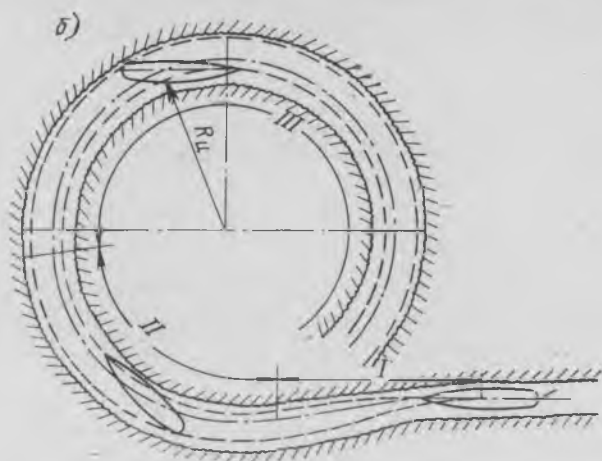


Рис. 4.21. Циркуляция судна в ровном сплошном льду: а — общий вид; б — схема.

судна по криволинейной траектории во льду отмечается асимметрия во взаимодействии ледяного покрова с бортами: внешний по отношению к центру поворота борт почти на всем протяжении от носа до кормы входит в контакт с ненарушенным ледяным покровом, а внутренний соприкасается со льдом лишь частью длины носового заострения корпуса. Таким

образом, сила ледового сопротивления создает при криволинейном движении судна вращающий момент, который приложен к корпусу судна на некотором расстоянии в нос от центра тяжести. В соответствии с этим в систему уравнений движения судна по криволинейной траектории во льду, помимо сил и моментов, учитываемых обычно, необходимо ввести составляющие ледового сопротивления и их моменты, зависимость которых от скорости судна, угла прокладки руля и угла дрейфа, вообще говоря, неизвестна.

Натурные наблюдения позволили установить, что циркуляция судна во льду в целом мало отличается от обычной, в чистой воде. При циркуляции во льду также различают три стадии, последовательно переходящие одна в другую: I — маневренную, II — эволюционную, III — установившуюся (рис. 4.21, б). Правда, продолжительность первых двух стадий меньше, чем при циркуляции по чистой воде, а их особенности менее ярко выражены. На практике их можно не принимать во внимание. Ледяной покров значительно снижает скорость поступательного и вращательного движения судна и, следовательно, увеличивает период циркуляции. В то же время относительный радиус установившейся циркуляции $r_{ц}$ при заданном угле перекладки руля δ_p практически не зависит от характеристик ледяного покрова (толщины льда, сплоченности, разрушенности) и мощности, развиваемой энергетической установкой судна (табл. 4.8).

Таблица 4.8

Радиус циркуляции ледокола $r_{ц}$ при различной мощности энергетической установки

Количество работающих главных дизелей	N , л. с.	$v_{нач. уз}$	Значения $r_{ц}$	
			Абсолютный, м	Относительный, длины корпуса
9	36 000	20,2	560	4,2
6	24 000	18,9	540	4,0
3	12 000	16,2	550	4,1

Среднее значение $r_{ц}$ судна во льду равно примерно радиусу циркуляции на свободной воде при заданном значении угла перекладки руля (табл. 4.9). Крен судна на циркуляции во льду обычно незначителен (не более $1-2^\circ$). Исключение составляют лишь некоторые ледокольно-транспортные суда, у которых при плавании в балласте крен может достигать $5-6^\circ$.

Линейная и угловая скорости установившейся циркуляции зависят от угла перекладки руля и характеристик ледяного покрова. Так, линейная скорость $v_{ц}$ уменьшается

Параметры циркуляции ледоколов во льдах и на чистой воде

Ледокол	Условия испытаний	Характеристики льда				Параметры установившейся циркуляции			
		Толщина льда, см	Высота сне-га, см	Торосистость, баллы	Разрушен-ность, баллы	v , уз	v_{II} , уз	η , %	t , мин
Средний	Чистая вода	—	—	—	—	18,4	16,4	2,0	3,6
	Сплошной лед Крупномелкобитый лед сплоченностью 8—10 баллов	—	—	—	—	17,9	16,0	2,1	3,9
		—	—	—	—	15,5	14,7	2,0	4,3
		—	—	—	—	11,5	10,3	1,7	4,3
Малый	Сморози дрейфующего льда сплоченностью 9—10 баллов	100	30	0—1	0	2,2	1,5	1,8	28,0
		100—130	0—10	1—2	3—4	10,0	8,0	2,0	7,0
		100—250	10—30	3—4	0	0,15	0,1	2,2	240
	Чистая вода	—	—	—	—	14,3	13,8	2,6	2,5
Речной	Сплошной лед	10	0	0	0	12,0	11,6	3,2	3,5
		25	15	0—1	0	3,3	3,4	2,6	10,0
		25—30	0—5	0—1	0	8,6	8,6	3,2	4,8
	Чистая вода	30	0—2	0	0	6,5	5,5	2,5	6,0
Речной	Сплошной лед	55	5—10	0—1	0	1,5	1,0	2,4	3,0
		—	—	—	—	10,0	5,0	1,2	2,3
		15	0—10	0	0	4,6	2,4	1,4	5,2
	Чистая вода	20	0—10	0	0	3,6	1,9	1,5	8,3
Речной	Сплошной лед	26	0—10	0	0	2,8	0,8	1,6	17,0
		30	0—10	0	0	1,6	0,4	1,5	60,0

с увеличением толщины льда и угла перекладки руля (рис. 4.22). Во льду, толщина которого близка к $h_{\text{пр}}$, перекладка руля на угол $20\text{--}30^\circ$ может привести к остановке судна (на рис. 4.22 — участки кривых, изображенных пунктиром). Так, малый ледокол во льду толщиной 60 см при $\delta_r = 0^\circ$ продвигался непрерывным ходом со скоростью 1,8 уз, а при перекладке руля на 35° его скорость быстро снизилась и он остановился.

Впервые попытка создать теоретический обоснованный метод оценки параметров поворотливости судна при движении во льдах была предпринята В. А. Трониным [65, 66]. Ему удалось в общем виде выразить составляющие сил ледового сопротивления

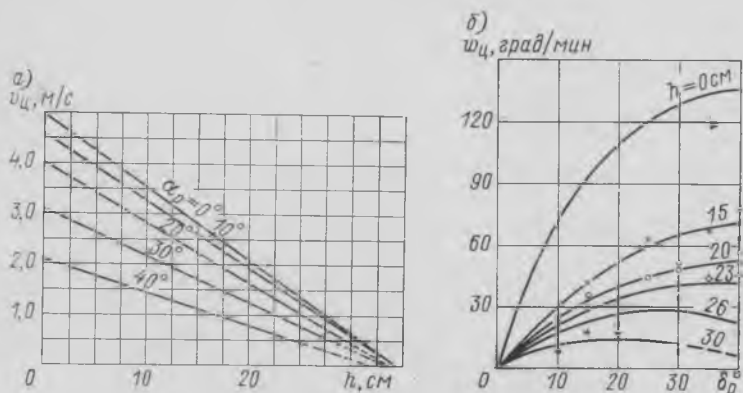


Рис. 4.22. Зависимость линейной скорости $v_{\text{ц}}$ от толщины льда h (а) и угловой скорости $\omega_{\text{ц}}$ от угла перекладки руля δ_r (б).

и ледовый момент, действующий на судно, которое совершает циркуляцию в ровном сплошном льду, а также численно их определить с помощью ЭВМ. Однако даже сравнительно грубые допущения, неизбежные при решении столь сложной задачи, не позволили автору получить достаточно простые расчетные формулы, удобные для практического применения.

Для этих целей можно рекомендовать следующий эмпирический способ расчета. Он построен с учетом того, что, как было показано выше, средняя величина радиуса циркуляции судна в однородной ледовой среде (ровных сплошных или мелкобитых льдах) имеет стабильное значение и приблизительно равна радиусу циркуляции $r_{\text{ц}}$ данного судна на чистой воде. Таким образом, значение $r_{\text{ц}}$ можно вычислять по обычным формулам теории управляемости судна.

По данным натуральных экспериментов зависимость $v=f(h)$ при $N_{\text{в}} = \text{const}$ сохраняет линейный характер при любых заданных значениях угла перекладки руля. Таким образом, скорость судна на циркуляции в ровном сплошном льду при посто-

янном значении δ_p можно вычислять с помощью следующего выражения, аналогичного формуле (4.3):

$$v_{ц.л} = v_{ц.в} - (v_{ц.в} - v_{мин}) \frac{h}{h_{пр}}, \quad (4.58)$$

где $v_{ц.в}$ — скорость судна на циркуляции на чистой воде.

Входящую в формулу (4.58) величину $v_{ц.в}$ можно найти с помощью формулы Р. Я. Першица [13], которая дает хорошие результаты для ледоколов и ледокольно-транспортных судов:

$$\frac{v_{ц.в}}{v_{ч.в}} = \frac{r_{ц}^2}{r_{ц}^2 + 1,9} \quad (4.59)$$

Значения $v_{ц.в}$ для различных ледоколов приведены в табл. 4.10.

Таблица 4.10

Скорость ледоколов при циркуляции на чистой воде

Ледокол	Значения $v_{ц.в}$, уз, при различных углах перекладки руля:	
	6°	40°
Средний 1	20,2	18,1
Малый	14,5	13,7
Средний 2	18,6	16,4
Речной	10,0	4,2

Зная $v_{ц.л}$ и $r_{ц}$, нетрудно определить угловую скорость $\omega_{ц}$ и период $\tau_{ц}$, пользуясь известными формулами:

$$\omega_{ц} = \frac{v_{ц}}{r_{ц}L}; \quad \tau_{ц} = \frac{2\pi r_{ц}L}{v_{ц}}. \quad (4.60)$$

Для более точной оценки поворотливости ледокола недостаточно знать параметры установившейся циркуляции, так как обычно на практике эти суда разворачиваются во льду способом «елочка». При выполнении разворота таким способом требуется меньше времени и меньшая площадь, чем при циркуляции. Отстояние крайней точки разворота «елочкой» от линии первоначального курса судна, как правило, не превышает 1,0—1,5 длины корпуса. Поэтому он особенно эффективен в тяжелых ледовых условиях, в которых ледокол не в состоянии продвигаться непрерывным ходом.

Параметры разворота зависят от способности судна закалываться в кромку льда. Наилучшей закалываемостью обладают

суда, имеющие малый радиус циркуляции, острые носовые образования и специальную форму сечения форштевня в районе действующей ватерлинии (переднюю грань форштевня делают вогнутой вовнутрь с тем, чтобы его боковые ребра при заданном угле входа ватерлинии были более острыми). Эффективность разворота «елочкой» в каждом конкретном случае зависит также от мастерства судоводителя. Это затрудняет анализ и численную оценку данного способа поворота. Основным параметр разворота «елочкой» — время (период) поворота на 180°. Он является важным эксплуатационно-техническим показателем работы ледоколов (табл. 4.11).

Таблица 4.11

Время разворота ледоколов «елочкой» (в минутах)

Ледокол	Характеристика льда				Время разворота на 180°, мин
	Толщина, см	Высота снега, см	Торосистость, баллы	Разрушенность, баллы	
Средний	70—80	30	0—1	0	11,0
	100	0—10	0—1	0—1	10,0
	100	30	0—1	0	15,0
	145	0—5	0—1	2—3	13,0
	110—130	10—30	1—2	0—1	19,0
	100—180	0—20	3—4	3	40,0
Малый	15	0—5	0	0	4,7
	55	5—10	0—1	0	12,0
	57	10—15	0—1	0	13,0

В тех случаях, когда требуется предельно точное маневрирование во льдах (например, при околках судов или при швартовке, а также на заднем ходу), бортовые движители многовинтовых судов работают «враздрай», вращаясь в противоположные стороны, и создают момент

$$M_e = (a_{б.в} - l_{вал} \operatorname{tg} \alpha_{вал}) (\bar{T}_{б.в} + \bar{T}_{б.в.з}), \quad (4.61)$$

где $a_{б.в}$ — расстояние между осями бортовых винтов; $l_{вал}$ — расстояние между центром тяжести судна и проекцией плоскости диска бортового винта на диаметрально плоскость; $\alpha_{вал}$ — угол между линией вала бортового винта и диаметральной плоскостью судна; $\bar{T}_{б.в}$, $\bar{T}_{б.в.з}$ — тяга бортового винта при работе на передний и задний ход.

Расчеты по формуле (4.61) показывают, что момент, который создают бортовые винты при работе «враздрай» на полной мощ-

ности, соизмерим с моментом, развиваемым рулем. Например, для среднего ледокола их значения составляют соответственно 510 и 750 тс. При такой работе двигателей существенно улучшается управляемость судна во льдах, и что особенно ценно, маневренность на заднем ходу. Следует отметить, что для успешной совместной работы ледоколов и грузовых судов ледового плавания выгодно, чтобы у них был примерно одинаковый относительный радиус циркуляции. Это помогает приводимому судну легко «вписываться» в повороты канала, прокладываемого ледоколом. У современных судов ледового плавания и ледоколов это требование в основном выполняется.

4.4.2. ИНЕРЦИЯ

Инерционные характеристики особенно важны для судов ледового плавания, так как от них в значительной степени зависит безопасность движения в канале под проводкой ледокола. Для оценки инерции судна в ледовых условиях используют обычные характеристики, которыми принято измерять инерцию судна на чистой воде: длину и время пробега судна при выполнении определенных стандартных маневров (см. подраздел 2.3.2). Об изменении скорости судна при выполнении указанных маневров можно судить по рис. 4.23, построенному на основании данных натурных испытаний.

Практический способ оценки характеристик инерции судна во льду основан на анализе общего дифференциального уравнения неустановившегося прямолинейного движения судна:

$$\frac{\Delta}{g} (1 + \lambda_{11}) \frac{dv}{dt} = \bar{T}(v) - R_{\Sigma}(v) \quad (4.62)$$

или, в относительных координатах $\zeta = x/\Delta$ и $Fr = v/\sqrt{gL}$,

$$\Delta (1 - \lambda_{11}) Fr \frac{dFr}{d\zeta} = \bar{T}(Fr) - R_{\Sigma}(Fr), \quad (4.63)$$

где λ_{11} — коэффициент присоединенной массы воды и льда; $\bar{T}$ — суммарная тяга винтов судна; R_{Σ} — полное ледовое сопротивление.

Для решения уравнения (4.63) принимается допущение о квазистационарности процесса движения судна. В этом случае сопротивление R_{Σ} можно определить известными методами (аналитическими или экспериментальными), упоминавшимися выше, а тягу гребных винтов судна $\bar{T}$ полагать постоянной,

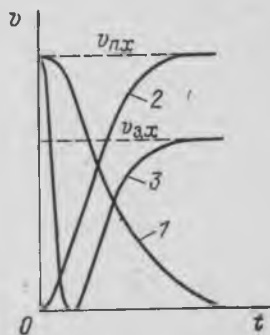


Рис. 4.23. Изменение скорости судна v при маневрах:

1 — останов; 2 — разгон; 3 — торможение.

равной тяге на швартовном режиме $\overline{T}_{шв}$ [49]. (Тождественность характера взаимодействия корпуса со льдом при непрерывном движении судна и при работе набегам, которую подразумевает такое допущение, в целом подтверждается натурными наблюдениями.)

С учетом сказанного правую часть уравнения (4.63) можно представить в виде

$$\overline{T}(Fr) - R_{\lambda}(Fr) = \overline{T}_{шв} - R_{\text{прям}} - c_1 Fr - c_2 Fr^2, \quad (4.64)$$

где $R_{\text{прям}}$ — «прямое» ледовое сопротивление, практически не зависящее от скорости; c_1 и c_2 — постоянные коэффициенты.

Выражение (4.63) в этом случае можно привести к нелинейному дифференциальному уравнению первого порядка с разделяющимися переменными и решить любым из известных способов. На практике удобно решать его графически путем построения ломаных Эйлера [49]. Окончательные расчетные выражения для определения времени и длины пробега судна при выполнении перечисленных выше стандартных маневров получим, подчинив уравнение (4.63) соответствующим начальным условиям:

— для пробега судна при останове

$$\frac{dFr}{d\xi} = - \frac{R_{\lambda}(Fr)}{\Delta(1 + \lambda_{11})Fr}; \quad (4.65)$$

— для разгона и продвижения во льду с разгона

$$\frac{dFr}{d\xi} = - \frac{R_{\lambda}(Fr) \pm \overline{T}_{шв}}{\Delta(1 + \lambda_{11})Fr}; \quad (4.66)$$

— для торможения

$$\frac{dFr}{d\varphi} = - \frac{R_{\lambda}(Fr) + \overline{T}_{3,x}}{\Delta(1 + \lambda_{11})Fr}. \quad (4.67)$$

В последнем случае к длине пробега, вычисленного по формуле (4.67), необходимо добавить поправку на длину пути, проходящего судном за время, в течение которого осуществляется реверс его гребного винта. Ее вычислять с помощью формулы (4.66). Отметим, что для ледоколов, у которых время реверса гребной установки мало (порядка 10—15 с), она невелика, а у судов ледового плавания с дизельной энергетической установкой (время реверса 60—110 с) ее значение существенно.

Вычисление длины пробега судна по формулам (4.65) — (4.67) выполняют в следующем порядке. В правую часть соответствующей формулы подставляют начальное значение скорости Fr_0 и определяют величину $dFr/d\xi$, которую можно представить как тангенс некоторого угла γ . Затем выполняют графическое построение: проводят из начальной точки с координатами $\xi=0$, Fr_0 прямую под углом γ к оси абсцисс (с учетом знака) до пе-

ресекающей с линией, параллельной оси ординат и отстоящей от нее на расстояние $\Delta\zeta$. Затем графически находят значение $F_{Г1}$, служащее точкой отсчета. Расчет заканчивают тогда, когда построенная ломаная линия пересечет ось абсцисс. Результаты на-

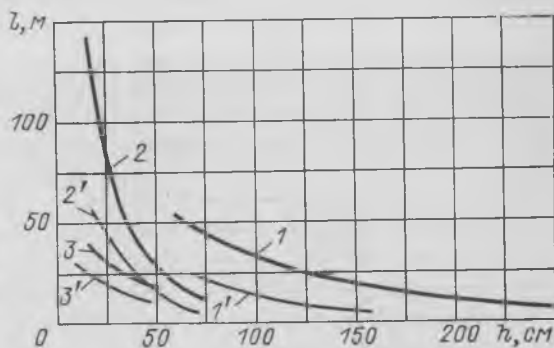


Рис. 4.24. Длина пробега ледоколов при останове.

1 и 1' — средний; 2 и 2' — малый; 3 и 3' — речной при $v_0=3$ уз и $v_0=5$ уз соответственно.

турных испытаний ледоколов, а также транспортных судов ледового плавания и данные расчетов удовлетворительно сходятся.

На практике длина пробега судна при остановах, разгонах и торможениях во льду значительно меньше, чем при выполнении аналогичных маневров на чистой воде (рис. 4.24, табл. 4.12).

Таблица 4.12

Характеристики инерции ледокола на чистой воде и в ровных сплошных льдах

Ледокол	Толщина льда, см	Начальная скорость, уз	Останов		Торможение		Разгон	
			Путь, м	Время, с	Путь, м	Время, с	Путь, м	Время, с
Средний	0	18,7	1200	50	220	62	900	960
	70	8,0	100	—	60	30	—	—
	100	5,5	40	—	27	18	—	—
	120	3,0	15	—	9	9	—	—
	140	1,5	8	10	6	8	—	—
Малый	0	14,6	850	480	120	48	—	—
	20	9,0	170	125	76	32	180	75
	30	7,0	70	46	38	20	140	65
	40	4,0	27	—	15	16	120	60
	50	2,5	12	—	10	11	—	—
	60	1,0	2	9	5	8	—	—
Речной	0	10,5	500	315	160	57	245	105
	30	1,0	7	12	4	10	15	18

В сравнительно легких ледовых условиях (малая толщина и сплоченность льда) длина пробега при останове намного больше, чем при торможении. В тяжелых ледовых условиях (особенно при толщине льда, близкой к $h_{\text{пр}}$) их значения практически одинаковы.

Из числа параметров, относящихся к судну, наиболее сильное влияние на характеристики инерции оказывает начальная скорость v_0 (рис. 4.25) и водоизмещение Δ , которые входят в расчетные зависимости (4.65)—(4.67) в явном виде. При разгоне, торможении и продвижении во льду с разгона к указанным факторам добавляется тяга гребных винтов. Характеристики инерции зависят также от ряда других элементов судна, таких, как мощность энергетической установки, главные размерения, коэффициенты формы обводов корпуса и т. п., так как последние оказывают влияние на значение самого ледового сопротивления.

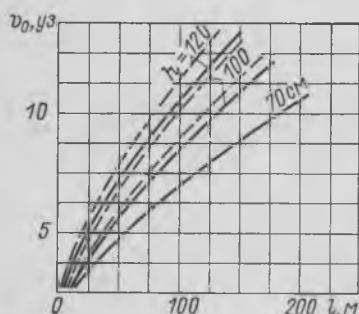


Рис. 4.25. Зависимость длины пробега среднего ледокола от начальной скорости в ровном сплошном льду.

Для толщины льда, близкой к $h_{\text{пр}}$, длина пробега судна при останове и торможении составляет всего 5—10 м (т. е. пренебрежимо мала по сравнению с длиной пробега на чистой воде).

Она практически не зависит от главных элементов ледокола. Время останова и торможения судна в сплошном льду достаточной толщины также мало. При маневрировании судна в канале, проложенном ледоколом, длина пробега намного больше. В этом случае она зависит в основном от параметров льда (сплоченности, толщины, торосистости): в легких ледовых условиях длина пробега судна в канале немногим отличается от пробега на чистой воде, а в тяжелых — значительно уменьшается. Кривые, приведенные на рис. 4.25, позволяют оценить влияние водоизмещения на длину пробега судна при его останове (сплошные) и торможении (пунктирные). Анализ этих кривых, а также формул (4.65)—(4.67) и результатов натурных наблюдений показывает, что в среднем длина пробега судна в ровном сплошном льду при останове и торможении пропорциональна водоизмещению в степени несколько меньшей, чем единица.

4.4.3. УСТОЙЧИВОСТЬ НА КУРСЕ

Устойчивость на курсе для ледоколов и ледокольно-транспортных судов не столь важное качество, как поворотливость и инерция. Наибольшее значение она имеет для ледокола-ли-

дера, который прокладывает канал во льду для проводки каравана судов. Особенности устойчивости судна на курсе при плавании во льдах зависят главным образом от силового контакта корпуса со льдом, которое имеет выраженный случайный характер. Он обусловлен неоднородностью ледовой среды и дискретностью приложения сил ледового сопротивления к корпусу судна. Случайные возмущения при движении судна во льду могут быть достаточно большими. Эти возмущения вызывают рыскания судна, которые определяются углом и периодом рыскания. По мере увеличения неравномерности параметров ледяного покрова угол и период рыскания при прочих равных условиях увеличиваются. Для поддержания первоначального направления движения судна рулевому приходится периодически переключать руль, причем угол переключки в значительной степени зависит от угла рыскания. Иными словами, руль судна используется для противодействия возмущающим силам и их моментам. Чем эффективней работа руля, тем меньше угол рыскания. Вполне очевидно, что угол рыскания зависит также от качества работы рулевого.

Наблюдения позволили установить, что все современные суда ледового плавания (в том числе и ледоколы, которые теоретически неустойчивы на курсе) обладают эксплуатационной устойчивостью на курсе. Последняя оценивается среднестатистическими значениями периодов и амплитуд рыскания судна, периодов и амплитуд переключки руля. Основными характеристиками эксплуатационной устойчивости на курсе являются средняя частота и средний угол переключки руля при плавании судна в различных ледовых условиях. В табл. 4.13 приведены данные наблюдений, выполненных при непрерывном движении малого ледокола в ровном сплошном льду различной толщины, а также на чистой воде.

Таблица 4.13

Характеристики устойчивости на курсе малого ледокола

Условия плавания	Средний угол переключки руля, град	Средняя частота переключки руля, 1/мин	Средний период рыскания, мин	Средняя амплитуда рыскания, град
Чистая вода, штиль	0,5	1,2	1,6	0,2
Сплошной лед толщиной, см:				
10	2,7	4,4	3,0	0,6
20	3,5	6,1	2,9	0,4
30	4,2	6,4	3,3	0,7

Из таблицы видно, что при непрерывном движении в ровном сплошном льду амплитуды рыскания судна малы и имеют примерно тот же порядок величины, что и на чистой воде. Это обстоятельство позволяет успешно использовать при движении судна в ровном сплошном или мелкобитом льду авторулевого, который оказывается столь же эффективным, как при плавании на чистой воде в условиях слабого волнения.

Обоснованных норм для оценки эксплуатационной устойчивости судна на курсе при плавании во льдах пока не существует. Если воспользоваться критерием, часто применяемым для оценки устойчивости на курсе на чистой воде (частота перекладки руля — не более 4—6 в 1 мин, а амплитуда — не выше 3—5° на борт в условиях слабого волнения), то все ледокольно-транспортные суда и ледоколы при плавании в однородных льдах можно отнести к числу судов с удовлетворительной управляемостью. В неравномерном по толщине и прочности льду, а также в дрейфующем крупнобитом льду эксплуатационная устойчивость судна на курсе хуже. Угол рыскания судна часто достигает 30—40°.

Таким образом, удовлетворительной устойчивостью на курсе обладают суда ледового плавания не во всех эксплуатационных режимах работы. При буксировках в плотную составов и отдельных судов, превосходящих ледокол-буксировщик по размерениям и водоизмещению, ледоколы неустойчивы на курсе и часто не слушаются руля. На новых ледоколах добиться повышения управляемости можно за счет обоснованного выбора соотношений главных размерений и улучшения эффективности работы движительно-рулевого комплекса. Отметим, что наилучшая управляемость во льду у одновинтовых ледокольно-транспортных судов ледового плавания и ледоколов, оборудованных тремя винтами в корме. Управляемость двухвинтовых ледоколов значительно хуже.

В последнее время в нашей стране и за рубежом были предприняты попытки создать нормативы, регламентирующие маневренность судов. Они вызваны необходимостью принять действенные меры по предупреждению аварий, связанных со столкновениями судов ледового плавания. Многочисленные повреждения корпусов судов ледового плавания вызваны в основном их столкновениями (навалами) в процессе ледокольной проводки.

ГЛАВА 5

**ОЦЕНКА ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТИ
И ОБЩАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАБОТЫ СУДНА ВО ЛЬДАХ**

§ 5.1. УСИЛЕНИЯ КОРПУСА СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

5.1.1. ПРИНЦИПЫ НАЗНАЧЕНИЯ ЛЕДОВЫХ УСИЛЕНИЙ КОРПУСА

Выбрать рациональные ледовые подкрепления можно, разработав и обосновав соответствующие методы расчета прочности и проектирования корпусных конструкций. Специфика ледового плавания обуславливает повышенные требования к этим конструкциям. Совокупность таких требований находит свое отражение в ледовом классе, присваиваемом судну. Ледовый класс судна можно устанавливать, во-первых, по комплексу параметров, характеризующих его в целом, включая форму обводов корпуса, водоизмещение, мощность энергетической установки, специальные системы и устройства и т. п., во-вторых, по комплексу параметров, характеризующих строительную прочность и конструктивные особенности корпуса судна. Первый, общепроектный, подход целесообразно применять к ледоколам, для которых характерна прямая зависимость между назначением судна, его мощностью и размерениями. Классифицировать транспортные суда, отличающиеся чрезвычайным разнообразием размерений, лучше по прочностному принципу, т. е. следует регламентировать ледовую прочность корпуса.

Как правило, у судов больших размерений местная прочность борта, назначаемая первоначально из условий учета действия гидростатического напора, будет значительно больше, чем у малых судов. Следовательно, большое судно даже без специальных ледовых подкреплений может продвигаться в определенных ледовых условиях. Этот пример показывает, что иногда еще употребляемый метод процентных надбавок, когда за исходные берутся размеры связей судов, не имеющих ледового класса, и проводится их пропорциональное (единое в пределах каждого класса) усиление, необоснован. Ясно, что при назначении ледовых классов транспортных судов прочность судна необходимо рассчитывать с учетом общепроектных требований

и условий их эксплуатации. Именно поэтому общепринятый термин «ледовые усиления», или «усиления для плавания во льдах», по-нашему мнению, неудачен. Корпусные конструкции судов ледового плавания нужно не усиливать, а сразу проектировать на восприятие той или иной ледовой нагрузки, если, конечно, они превосходят нагрузки, задаваемые из иных соображений.

5.1.2. ЕДИНЫЙ ПОДХОД К НОРМИРОВАНИЮ ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТИ

Необходимо добиваться единого подхода к нормированию размеров элементов конструкций ледового пояса для судов любого назначения и всех ледовых классов. В качестве расчетного параметра целесообразно принимать ледовые нагрузки на корпус, определяемые из условия его взаимодействия со льдом. Детали расчетных схем, конечно, могут меняться для разных категорий судов.

Впервые такой подход к назначению ледовых классов судов был применен при составлении Требований к постройке судов ледового плавания и ледоколов в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте и частично использован при составлении Правил Регистра СССР 1968 г. В них высшие ледовые классы установлены в соответствии с расчетной методикой ААНИИ, а низшие — по прежнему способу процентных надбавок.

Современные методы расчета ледовых нагрузок основаны на использовании физической модели взаимодействия корпуса судна со льдом. При этом учитываются форма обводов корпуса судна, его водоизмещение и скорость, физико-механические свойства льда и т. п. [32, 52]. Теоретические решения приведены к виду, пригодному для практического использования путем пересчета строительной прочности прототипов, а также на основе анализа данных тензометрических испытаний и ледовых повреждений судов. Подобный комплексный подход позволяет учесть все основные факторы, определяющие ледовую нагрузку, и учесть опыт эксплуатации судов.

В результате анализа контакта корпуса судна со льдом установлены расчетные методы определения динамических нагрузок на оконечности судов из условия удара о лед и определения статических нагрузок, действующих на среднюю часть корпуса при ледовых сжатиях.

При расчете динамических нагрузок исследуется удар судна о кромку льда, когда кинетическая энергия в направлении удара поглощается в результате раздробления кромки. Для определения ледовой нагрузки на корпус ледокола рассматривается удар о ледяной покров, не разрушаемый изгибом, когда кинетическая энергия удара поглощается полностью. При оп-

ределении ледовой прочности конструкций транспортных судов принимается, что ледяной покров ломается в процессе удара. Это существенно уменьшает величину ударного импульса. Нагрузки, действующие на среднюю часть корпуса, находят из условия статического разрушения льда в результате изгиба, сдвига или потери устойчивости. Эти нагрузки не могут превосходить усилий, разрушающих ледяной покров.

Расчетная ледовая нагрузка характеризуется величиной контактных давлений p и размерами зоны контакта, главным образом высотой в области ее приложения к борту.

В ходе решения соответствующих динамических задач были определены местные давления и размеры зоны контакта борта со льдом [31]. Для инженерных расчетов необходимо схематизировать реальную форму зоны контакта и аппроксимировать эпюры фактических контактных давлений. Все связи корпуса следует рассчитывать на такую ледовую нагрузку с учетом ее перераспределения между различными элементами конструкций. Наружная обшивка воспринимает давление, действующее в зоне контакта со льдом, далее передает эту нагрузку на бортовой набор и т. д.

Зона приложения ледовой нагрузки определяет размеры ледового пояса, т. е. ту часть корпуса, которая может воспринимать эксплуатационные ледовые нагрузки. Размеры ледового пояса по вертикали ограничены положением грузовой (ГВЛ) и балластной (БВЛ) ватерлиний для транспортных судов и конструктивной ватерлинией (КВЛ) для ледоколов. В зависимости от ледового класса судна ледовый пояс простирается выше ГВЛ примерно на 1000—1200 мм. Ниже БВЛ у судов высших ледовых классов ледовый пояс доходит до киля или второго дна в носовой оконечности, а в остальных районах простирается на 1000—2000 мм ниже БВЛ.

По вертикали ледовые нагрузки предполагаются неизменными, однако они меняются по длине судна, т. е. в носовой оконечности, в средней части и в корме. У судов больших размеров могут выделяться промежуточные переходные районы. Ясно, что максимальные ледовые нагрузки действуют в носовой оконечности судна.

Следовательно, нужно проектировать корпусные конструкции для отдельных выделенных районов по длине корпуса на соответствующую ледовую нагрузку, приложенную самым неблагоприятным образом в пределах этого района. При этом нужно согласовать конструкции ледового пояса с прилегающими конструкциями, предусмотреть возможно более плавные переходы и надежное конструктивное оформление узлов. Опыт показал, что это особенно важно выполнять в узлах бимс — шпангоут, шпангоут — второе дно, поскольку они воспринимают и передают реакции бортового набора на палубные и днищевые конструкции.

§ 5.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРОИТЕЛЬНОЙ И ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕДОВОГО ПОЯСА ЛЕДОКОЛОВ

5.2.1. ОЦЕНКА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

Решение задачи об ударе ледокола о кромку ледяного поля позволяет разработать схему расчета ледовых нагрузок на конструкции ледового пояса. Эти нагрузки определяют как контактные давления p , действующие в пределах зоны контакта борта со льдом. И отдельные элементы, и вся бортовая конструкция в целом, включая обшивку, а также набор, должны противостоять воздействию ледовых нагрузок. Для обшивки в качестве такой нагрузки принимают максимальное контактное давление $p_{\max}$, для набора — давление и погонную нагрузку, значения, которых определяют уже двумя параметрами p и b . Длину зоны контакта $l_{\text{кон}}$ при заданной форме кромки льда однозначно находят как функцию параметра b .

Как отмечалось, контактные давления распределены по площади пятна овальной формы по параболическому закону. Для расчета несколько упрощают эпюру контактных давлений. Пятно считают прямоугольным с высотой, равной эффективной теоретической, т. е. с учетом скола и времени достижения максимальных значений давлений, погонных нагрузок и суммарного усилия [33].

Обшивку борта рассчитывают на максимальное давление в середине пятна. Расчет ведут как для жесткозаделанной на шпангоутах балки-полоски, т. е. определяют напряжения в опорных сечениях. Бортовой набор рассчитывают на давление, равное 85 % максимального для обшивки, поскольку при этом достигает максимума погонная нагрузка. Высоту зоны контакта b вычисляют для момента времени удара, соответствующего максимальной нагрузке на набор.

Расчетные максимальные давления p и высоту зоны контакта b в сечении судна с относительной координатой определяют соответственно по формулам [32]

$$p = 0,66 v_0^{13/24} a_p (2R)^{-1/12} M^{1/6} F_p \left(\frac{x}{L} \right); \quad (5.1)$$

$$b = 1,33 v_0^{7/12} a_p^{-2/3} (2R)^{1/6} M^{1/6} F_b \left(\frac{x}{L} \right), \quad (5.2)$$

где v_0 — скорость судна в момент удара; a_p — параметр динамической прочности льда; R — радиус скругления кромки поля; F_p , F_b — функции, характеризующие влияние формы корпуса на параметры p и b :

$$F_p = (C')^{-1/6} l^{13/24} \sin^{-1/6} \beta \cos^{-1/6} \beta; \quad (5.3)$$

$$F_b = (C')^{-1/6} l^{7/12} \sin^{-1/6} \beta \cos^{-1/6} \beta; \quad (5.4)$$

C' и l — коэффициенты приведения массы и скорости к направлению удара. Различают коэффициент приведения скорости l для прямого и отраженного (вторичного) ударов [52].

На эти нагрузки следует рассчитывать прочность конструкций ледового пояса ледоколов. Для анализа результатов таких расчетов целесообразно использовать понятие строительной прочности, впервые введенное в работе [68]. Под *строительной прочностью* понимают расчетную нагрузку, вызывающую в связях корпуса, к которым она приложена, предельное состояние

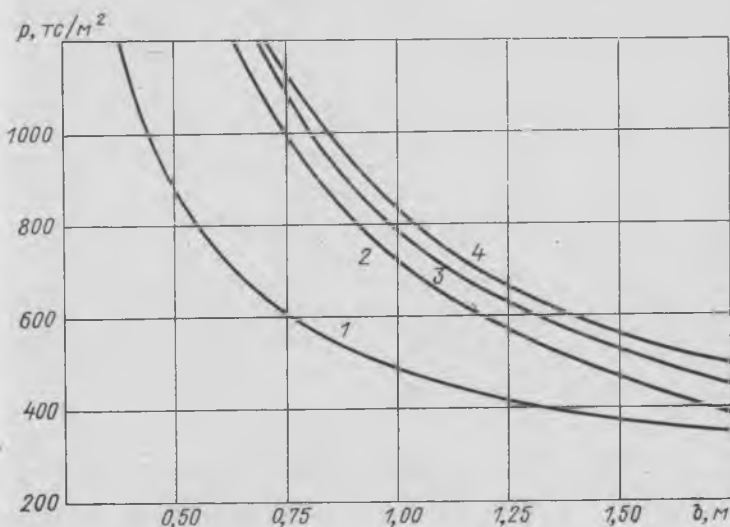


Рис. 5.1. Кривые строительной прочности конструкций среднего ледокола.

1 — шпангоут (изгиб); 2 — рама (срез); 3 — рама (изгиб); 4 — стрингер (срез).

в соответствии с принятым для них критерием прочности. В отечественной практике проектирования ледоколов принимают следующие критерии допускаемых напряжений для конструкций ледового пояса:

максимальные нормальные напряжения в крайней фибре не должны превосходить предела текучести материала;

максимальные касательные напряжения в районе нейтральной оси не должны превосходить предела текучести материала при сдвиге $\tau_s = 0,57\sigma_{\text{тек}}$.

Отметим, что для профилей, применяемых в конструкциях ледового пояса, расчет по второму критерию прочности, по существу, соответствует расчету предельного состояния по сдвигу, так как максимальные касательные напряжения отличаются от средних всего на 5—12 %.

Повреждения ледового пояса ледоколов недопустимы, так как для правки или замены секций их бортовых конструкций потребовались бы значительные затраты: финансовые и временные. Поэтому ледовый пояс ледоколов должен быть «неповреждаемым» в соответствии с нормами прочности для него. Под неповреждаемостью будем подразумевать отсутствие в предельно возможных случаях эксплуатации значительных изменений формы элементов конструкций ледокола.

Строительная прочность ледоколов определяется комбинацией двух параметров: давления p и высоты зоны контакта b . Предельное состояние в различных связях $\sigma = \sigma_{пр}$ будет возникать при различных комбинациях p и b . Поэтому расчеты прочности корпусных конструкций ледоколов следует выполнять также для разных комбинаций этих параметров. По результатам расчетов можно построить кривые строительной прочности $p = f(b)_{\sigma = \sigma_{пр}}$ для каждой связи. Запись $b|_{\sigma = \sigma_{пр}}$ означает, что для заданного b вычисляют такое значение p , при котором возникает предельное по выбранному критерию прочности $\sigma_{пр}$ состояние.

Кривые строительной прочности, построенные по результатам расчетов корпусных конструкций среднего ледокола, приведены на рис. 5.1. Очевидно, при $b \rightarrow 0$ нагрузка приложена по линии вдоль борта, а при $b \rightarrow \infty$ — нагрузка равномерно распределена по всему перекрытию.

5.2.2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТИ

Под *ледовой прочностью* понимают способность корпуса ледокола противостоять ледовым нагрузкам без превышения предельно допустимых состояний элементов бортовых конструкций [68]. Ледовая нагрузка зависит от скорости соударения v_0 , массы судна M , физико-механических свойств льда a_p , формы кромки льда, а также формы корпуса ледокола.

Для конкретного судна водоизмещение и функции формы корпуса являются заданными. Радиус выступа кромки льда также принадлежит к задаваемым параметрам. Ледовую нагрузку, действующую на район корпуса с относительной координатой x/L , и высоту зоны контакта b в этом районе вычисляют по формулам вида

$$\left. \begin{aligned} p &= \varphi_p(v, a_p) F_p\left(\frac{x}{L}\right); \\ b &= \varphi_b(v, a_p) F_b\left(\frac{x}{L}\right). \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

В каждом конкретном случае ледовая прочность определяется двумя расчетными параметрами v и a_p .

Таким образом, в качестве измерителя ледовой прочности корпуса можно принять такую комбинацию внешних параметров v , a_p , при которой расчетная ледовая нагрузка вызывает в связях корпуса предельно допустимое состояние. Из формул (5.5) следует, что для каждого района по длине корпуса ледокола можно установить взаимно однозначное соответствие $(\rho, b) \rightarrow (v, a_p)$ и перейти от кривых строительной прочности к кривым ледовой прочности в координатах v , a_p . Понятно, что для прямого и отраженного ударов получатся две различные совокупности кривых ледовой прочности, так как функции формы в этих случаях различны.

По координатам каждой точки кривой ледовой прочности можно установить комбинацию расчетных внешних параметров, при которой в соответствующей связи возникает расчетное напряженное состояние. Кривые $v = \varphi_v(a_p | \sigma = \sigma_{пр})$ можно построить для любого исследуемого элемента при $\sigma = 0,5\sigma_{тек}$ или при любом другом заданном уровне расчетных напряжений. Ясно, что при увеличении прочности льда, т. е. параметра a_p , расчетная скорость v должна уменьшаться, и наоборот.

Совокупность подобных кривых, построенных для различных элементов бортовых конструкций, характеризует ледовую прочность корпуса ледокола (рис. 5.2). На рис. 5.2 кривая 1 соответствует обшивке и получена из условия фибровой текучести в опорном сечении на шпангоуте; кривая 2 построена для рамных шпангоутов из условия достижения предела текучести максимальными касательными напряжениями в стенке рамы; наконец, кривая 3 построена для обыкновенного шпангоута из условия фибровой текучести в середине пролета. Как видно из рисунка, соотношение прочности между отдельными элементами корпусных конструкций меняется при различных значениях расчетных параметров v и a_p .

Если задано расчетное значение скорости v , то для данной конструкции тем самым определяется параметр a_p , в некоторой

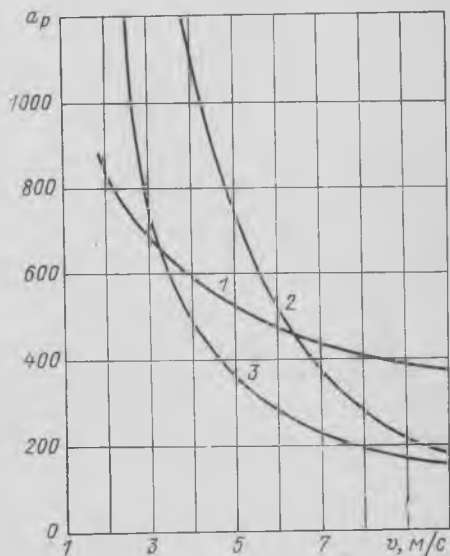


Рис. 5.2. Кривые ледовой прочности перекрытия между 101-м и 111-м шпангоутами на среднем ледоколе при прямом ударе.

1 — обшивка; 2 — рамный шпангоут (срез); 3 — обыкновенный шпангоут (изгиб).

степени характеризующий ледовые условия плавания. Если оговариваются прочностные характеристики льда, то в качестве меры ледовой прочности связей выступает соответствующая расчетная скорость соударения.

В заданных ледовых условиях, т. е. полагая $a_p = \text{const}$, можно построить эпюру допустимых скоростей $v(x/L)$ при $\sigma = \sigma_{\text{пр}}$ по длине корпуса ледокола. Затем эту эпюру отнормируем, приняв $v_{\text{max}} = 1$. Нормированная эпюра v/v_{max} характеризует относительную ледовую прочность бортовых конструкций при ударах о лед. Одинаковые ординаты эпюры соответствуют равнопрочным районам. Такая оценка равнопрочности корпуса судна по длине была впервые сделана в работе [68].

У хорошо спроектированного ледокола эпюра v/v_{max} не имеет «горбов». В идеальном случае это — прямая линия, обрывающаяся где-то в районе средней части, т. е. там, где прочность корпуса определяется из условий сжатия во льдах. Таким образом, при принятой схеме приложения нагрузки в неизменных ледовых условиях требование равнопрочности можно сформулировать так:

$$v = \text{const} = v_p \text{ и } a_p = \text{const}. \quad (5.6)$$

Если расчетная скорость v_p и физико-механические свойства льда a_p заданы, то для любых значений координаты x кривая ледовой прочности должна проходить через точку с координатами v_p , a_p . Пусть принятый критерий прочности выполняется для любых x при расчетном давлении $p(x)$, определяемом по формуле (5.1). Учитывая, что $F_p(x/L)$ и $F_b(x/L)$, как правило, имеют максимум, удобно ввести отнормированные функции формы

$$\bar{F}_p = \frac{F_p\left(\frac{x}{L}\right)}{F_p\left(\frac{x_1}{L}\right)}; \quad \bar{F}_b = \frac{F_b\left(\frac{x}{L}\right)}{F_b\left(\frac{x_1}{L}\right)},$$

где x_1 — координата максимума функции F_p . Тогда формулы (5.1) и (5.2) можно представить в виде

$$p = p_{\text{max}} \bar{F}_p \text{ и } b = b_0 \bar{F}_b,$$

где p_{max} — наибольшее ледовое давление; b_0 — высота зоны контакта в сечении с относительной координатой x_1/L .

Равнопрочность корпуса по длине будет достигнута, если его строительная прочность, определяемая расчетным давлением и высотой приложения этого давления, будет назначена в соответствии с изменением функций формы $F_p(x/L)$ и $F_b(x/L)$. Используемые расчетные схемы позволяют учесть оба параметра p , b , что важно, например, при расчете бортовых перекрытий, когда принимается во внимание перераспределение нагрузки за счет

прогибов рамных связей и влияние упругих реакций обыкновенных шпангоутов.

В упругой зоне при $\sigma < \sigma_{\text{тек}}$ напряжения в связях линейно зависят от ледового давления p , т. е.

$$\sigma = pf(b),$$

где функция $f(b)$ определяется в зависимости от размеров зоны контакта со льдом, прочностных и геометрических характеристик конструкции.

Очевидно, в этом случае условие равнопрочности можно записать следующим образом:

$$\sigma(x) = p(x) f(b, x) = \sigma_{\text{пр}}$$

или

$$\sigma_{\text{пр}} = p_{\text{max}} \bar{F}_p(x) f(b, x). \quad (5.7)$$

Значение b зависит от двух внешних параметров v и a_p , так что равнопрочность в соответствии с формулой (5.7) может быть достигнута при одной комбинации значений v , a_p и не достижима при других. Расчеты показывают, что характеристики $v = \varphi_v(a_p | \sigma = \sigma_{\text{пр}})$ достаточно стабильны для каждой категории связей любого ледокола. Поэтому вполне удовлетворительное соблюдение условий равнопрочности по длине корпуса можно получить, полагая строительную прочность равной расчетному давлению $p_{\text{стр}} = p(x)$. При этом значение b известно из расчета. Тогда

$$\frac{p_{\text{стр}}}{p_{\text{max}}} = \bar{F}_p(x). \quad (5.8)$$

Практически невозможно спроектировать конструкции ледового пояса так, чтобы условие (5.8) строго выполнялось во всех точках. Для этого пришлось бы пойти на применение чрезмерно большого количества типоразмеров балок и листов. Фактическая эпюра строительной прочности имеет ступенчатый вид и должна быть описана вокруг эпюры нагрузок, т. е. должно соблюдаться неравенство

$$p_{\text{стр}} \geq p_{\text{max}} \bar{F}_p\left(\frac{x}{L}\right). \quad (5.9)$$

Отсюда можно найти как длину зоны ледовых усиления, так и их значения.

Определение длины районов ледовых усиления, вообще говоря, неоднозначно. В каждом конкретном случае его следует выполнять с учетом конструктивных особенностей судна. При вторичном, отраженном, ударе длина усиленного района больше, чем при первичном, прямом, ударе. При несоблюдении этого требования, например, на малом ледоколе, отмечается

значительное число повреждений в зоне «провала» прочности (рис. 5.3).

Практически нагрузка на носовую оконечность назначается равной $p_{\max}$, а нагрузки на переходные районы — в долях от максимальной: $p_i = k_i p_{\max}$. В первом приближении коэффициенты k_i можно принимать в соответствии с хорошо зарекомендовавшим себя в эксплуатации прототипом. Определение длины районов усиления ледового пояса сводится к назначению абсцисс x_1 , x_2 и т. д., причем внутри каждого выбранного интервала должно соблюдаться неравенство (5.9).

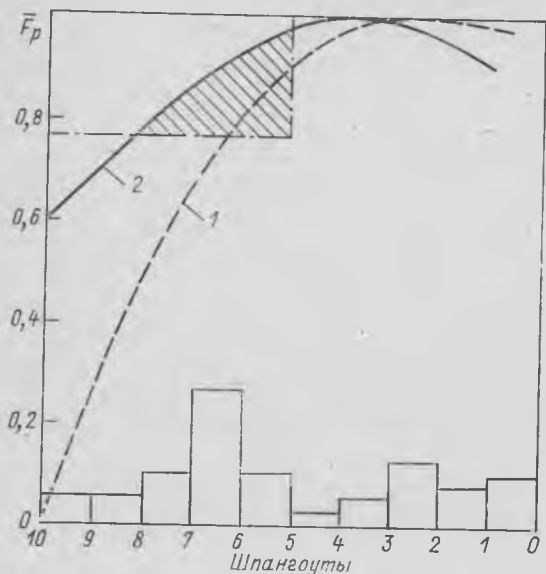


Рис. 5.3. Нормированные эпюры строительной прочности и гистограмма повреждений малого ледокола (зона «провала» прочности заштрихована).

1 — при первичном, прямом, ударе; 2 — при вторичном, отраженном, ударе.

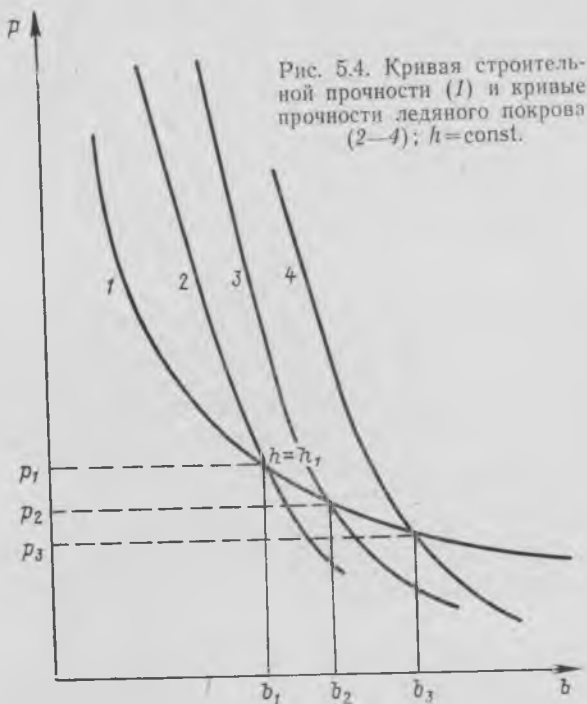
Для большинства построенных ледоколов максимумы функций F_p и F_b либо совпадают по длине, либо близко расположены. Если максимумы оказываются существенно разнесенными относительно друг друга, то может оказаться целесообразным назначать районы усиления для обшивки и набора отдельно. Это наблюдается, например, при проектировании ледоколов с необычным соотношением главных размерений, мелкосидящих и т. д.

§ 5.3. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ СТРОИТЕЛЬНОЙ И ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТЬЮ КОРПУСА ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ

5.3.1. УРАВНЕНИЕ КРИВОЙ ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТИ

Корпусные конструкции носовой и кормовой оконечностей транспортных судов ледового плавания должны противостоять ударам о лед в обычных условиях эксплуатации. Иными сло-

вами, строительную прочность конструкций рассчитывают на восприятие соответствующих ледовых нагрузок. Ледовый класс судна обусловлен главным образом его ледовой прочностью, которая связана со строительной прочностью, но не идентична ей. Поэтому одна из основных задач по определению ледовых подкреплений транспортных судов — найти соотношение между строительной и ледовой прочностью.



Строительная прочность бортовых конструкций транспортных судов, как и ледоколов, характеризуется величиной контактного давления p и высотой зоны контакта b :

$$p = \varphi_p(b |_{\sigma = \sigma_{\text{пр}}}). \quad (5.10)$$

Кривые строительной прочности $p(b)$ могут быть построены при расчетах в упругой и упругопластической зонах, по предельным состояниям и т. п. Характер кривой $p(b)$ зависит от конструкции перекрытий и марки материала.

При расчетах по введенным выше критериям для малых значений b кривые строительной прочности очень близки к гиперболе (рис. 5.4, кривая 1):

$$p = ab^{-1}.$$

При $b \rightarrow \infty$ получаем гидростатическую равномерно распределенную нагрузку на все перекрытие. В этом случае величина p перестает зависеть от b и функция $p(b)$ асимптотически приближается к некоторому значению $p = p_0 = \text{const}$.

При определении строительной прочности не учитывают внешние факторы, обусловленные ледовыми условиями плавания, и лишь при расчете ледовой прочности их принимают во внимание. Если рассматривается удар ледокола о неразрушаемый лед, то такая зависимость устанавливается довольно просто. В качестве внешних параметров принимают скорость судна при ударе v и параметр a_p , характеризующий динамическую прочность кромки льда. Из решения контактной задачи об ударе борта ледокола о неразрушаемый лед имеем однозначную зависимость между давлением p , высотой зоны контакта b и параметрами v , a_p [см. формулы (5.1) и (5.2)]:

$$p = f_p(v, a_p); \quad (5.11)$$

$$b = f_b(v, a_p). \quad (5.12)$$

Следовательно, четыре расчетные величины p , b , v и a_p связаны друг с другом тремя определяющими уравнениями (5.10), (5.11) и (5.12). Ясно, что один из этих параметров должен быть задан независимым образом. При расчетах прочности корпусов ледоколов в качестве такого параметра принимают скорость при ударе v , которая назначается.

Уравнения (5.11) и (5.12) можно решить относительно параметров v и a_p :

$$\left. \begin{aligned} v &= f_v(p, b); \\ a_p &= f_a(p, b). \end{aligned} \right\} \quad (5.13)$$

Используя зависимость (5.10), получим

$$\left. \begin{aligned} v &= f_v(p(b), b) = f_v(b); \\ a_p &= f_a(p(b), b) = f_a(b). \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

Выражения (5.14) определяют уравнение кривой ледовой прочности данной конструкции, записанное в параметрической форме, т. е. в функции от параметра b (или p). Таким образом, каждой точке кривой строительной прочности (p, b) можно поставить в соответствие точку (v, a_p) на кривой ледовой прочности. Если скорость v задана, то однозначно определяется динамическая прочность льда a_p , и наоборот [33].

5.3.2. УЧЕТ ПРОЧНОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ИЗГИБ

Для транспортных судов задача значительно усложняется, так как добавляются внешние параметры, характеризующие прочность ледяного покрова как плавающей пластины, которая

подвергается разрушению. Если эта прочность обусловлена изгибом, то такими параметрами будут толщина льда и предел его прочности при изгибе σ_p . Если зафиксировать значение σ_p , то всего два внешних параметра будут определять нагрузку при ударе о разрушаемый лед: a_p и h .

Из теоретического исследования удара о разрушаемый лед имеем

$$\begin{aligned} p &= f_p(v, a_p, k); \\ b &= f_b(v, a_p, k), \end{aligned} \quad (5.15)$$

где коэффициент k равен отношению скорости в конце удара, т. е. при разрушении льда, к начальной скорости. Этот коэффициент можно найти из условия разрушения ледяного покрова:

$$P_{\text{сум}} = P_p(\sigma_p, h), \quad (5.16)$$

когда суммарное контактное усилие, действующее на конструкции борта, приравнивается предельной нагрузке P_p , разрушающей лед.

Условие (5.16) можно записать следующим образом:

$$P_{\text{сум}} = P_p = P_{\text{стр}}, \quad (5.17)$$

где $P_{\text{сум}}$ — суммарное контактное усилие, определяемое из условия удара корпуса судна о лед; P_p — сила, разрушающая лед толщиной h ; $P_{\text{стр}}$ — величина суммарной контактной силы, которую может воспринять данная конструкция.

Никакого дополнительного уравнения из (5.17) получить нельзя, поскольку равенство $P_{\text{сум}} = P_{\text{стр}}$ означает, что величины p и b , входящие в формулы (5.15), те же, что и в формуле (5.10).

Схематически можно записать

$$P_{\text{сум}}(v, a_p, k) = \alpha \sigma_p h^2, \quad (5.18)$$

где α — численный коэффициент, учитывающий особенности ломки льда, в том числе геометрию кромки, угол наклона борта и т. п.

Это равенство можно рассматривать как условие разрушения льда корпусом судна при ударе и использовать для определения коэффициента

$$k = f_k(v, a_p, \sigma_p, h^2). \quad (5.19)$$

При $(P_{\text{сум}})_{\text{max}} < \alpha \sigma_p h^2$ ($k < 0,37$) разрушения льда не происходит, и следует рассматривать удар о неразрушаемый лед, полагая $k = 0$.

Если строительная прочность борта характеризуется только суммарной силой $P_{\text{стр}}$, то условия $P_{\text{стр}} = P_p$ достаточно для назначения нагрузок на бортовые конструкции. При этом ледовые нагрузки, очевидно, не будут зависеть ни от скорости судна, ни от его массы.

Рассмотрим удар о закругленную кромку льдины радиуса R . Приравняв суммарное контактное усилие предельной силе, разрушающей лед толщиной h , получим

$$\lambda p b^{3/2} (2R)^{1/2} \sin^{3/2} \beta = \sigma_p h^2, \quad (5.20)$$

где λ — численный коэффициент. При больших длинах зоны контакта по сравнению с толщиной льда h этот коэффициент будет в незначительной степени зависеть от b . При фактических соотношениях h/b этой зависимостью можно пренебречь.

Используя выражение (5.20), построим графики зависимостей $p = p(b/h = \text{const})$. Эти графики (см. рис. 5.4) пересекаются с кривой строительной прочности I . В точках пересечения строительная прочность равна нагрузкам, разрушающим лед данной толщины. Участок кривой I справа от точки пересечения, например от точки (p_1, b_1) , соответствует избыточной строительной прочности по сравнению с необходимой для обеспечения восприятия нагрузки, разрушающей лед толщиной h_1 . По мере увеличения толщины льда ($h_3 > h_2 > h_1$) точки пересечения кривых смещаются вправо, т. е. в область меньших контактных давлений и больших размеров зоны контакта.

Таким образом, с помощью зависимостей (5.10) и (5.20) можно для каждой пары чисел p, b , характеризующей строительную прочность, установить соответствующее значение толщины разрушаемого льда h при фиксированном значении σ_p , либо произведение $\sigma_p h^2$.

Для того чтобы перейти к ледовой прочности, надо использовать выражения (5.15) для ледовых нагрузок. Решим эти выражения относительно параметров v и a_p и выделим безразмерные множители, зависящие только от коэффициента k :

$$\left. \begin{aligned} v &= f_v(p, b) \varphi_1(k); \\ a_p &= f_a(p, b) \varphi_2(k). \end{aligned} \right\} \quad (5.21)$$

Графики безразмерных функций $\varphi_1(k)$ и $\varphi_2(k)$ приведены на рис. 5.5. Используя кривую строительной прочности (5.10), можно с помощью системы (5.21) построить семейство кривых ледовой прочности $a_p(v)$ в зависимости от параметра k . Кривая I на рис. 5.6 соответствует удару о неразрушаемый лед, т. е. значениям $k_1 < 0,371$. По мере увеличения коэффициента k кривые $a_p(v)$ будут сдвигаться вправо.

Для окончательного решения задачи необходимо определить значение k либо превратить этот параметр во внутренний. Последний путь оказывается наиболее эффективным. Фиксируя толщину льда на графике (см. рис. 5.4), например $h = h_1$, получаем соответствующие значения p_1 и b_1 . Подставив эти значения в систему (5.21), составим уравнения кривой ледовой прочности в параметрической форме:

$$\left. \begin{aligned} v &= f_v(h) \varphi_1(k); \\ a_p &= f_a(h) \varphi_2(k). \end{aligned} \right\} \quad (5.22)$$

Для различных значений толщины льда h получаем семейство кривых a_p ($v/h = \text{const}$), изображенных на рис. 5.7. Кривая (оггибающая) 1 соответствует удару о неразрушаемый лед ($k \leq 0,371$). Ее можно построить, пересчитав кривую строитель-

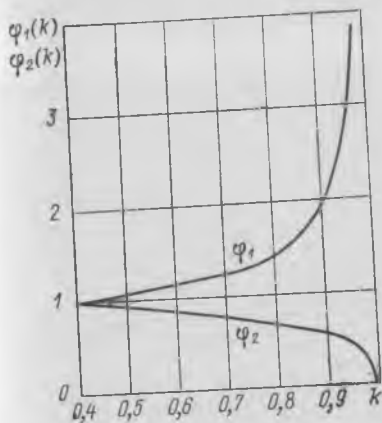


Рис. 5.5. Графики вспомогательных функций $\varphi_1(k)$ и $\varphi_2(k)$.

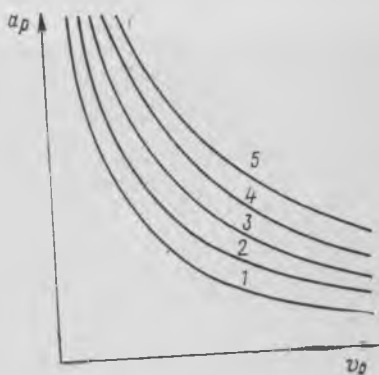


Рис. 5.6. Семейство кривых ледовой прочности.

1 — $k_1 = 0,371$; 2—5 — $k_2 - k_b > k_1$.

ной прочности $p(b)$ по методике, принятой для неразрушаемого льда. Для льда меньшей толщины ($h_1 > h_2$) кривые ледовой прочности 2—5 сдвигаются вправо.

Полученное семейство кривых полностью определяет ледовую прочность конструкции с заданной строительной проч-

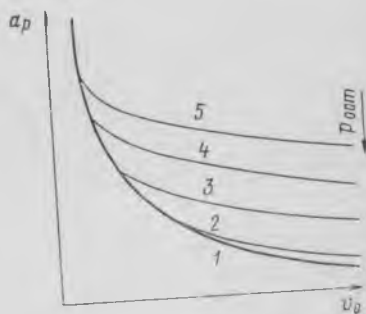


Рис. 5.7. Кривые ледовой прочности для ледяного покрова фиксированной толщины.

ностью $p(b)$ в зависимости от трех внешних параметров v , a_p и h . Фактически шесть расчетных величин p , b , v , a_p , k и h связаны соотношениями (5.10), (5.15) и (5.16). Для решения задачи надо либо задать любые два внешних параметра, либо использовать дополнительные корреляционные зависимости между расчетными величинами.

Для того чтобы получить дополнительные зависимости, о которых шла речь выше, целесообразно рассмотреть отдельно самостоятельное движение во льдах и движение по каналу под проводкой ледокола.

При движении за ледоколом в сплошных льдах толщиной h можно потребовать, чтобы скорость движения судна соответствовала максимальной скорости $v_{\max}$ непрерывного движения ледокола в этих условиях. Положим, например, что ледоколы I класса должны провести транспортные суда высшей ледовой категории УЛА, при этом их скорость проводки не ограничена. Зависимость $v_{\max} = f(h)$ в этом случае определяется ходкостью самого ледокола, незначительно зависит от прочности льда и, как правило, описывается очень простой формулой вида (4.2).

Соединяя на кривых ледовой прочности $a_p(v/h = \text{const})$ точки, соответствующие условию (4.2), получим линию (рис. 5.8, кривая 1), выше которой расположена область допустимых скоростей. Режимы, соответствующие точкам, расположенным ниже кривой 1, не реализуются по условиям ледовой ходкости.

При фиксированных физико-механических характеристиках льда ($a_p = \text{const}$) для данной строительной прочности можно получить зависимость скорости v от толщины льда h . В плоскости (v, h) (рис. 5.9) этим зависимостям соответствуют кривые 3, 4. На рис. 5.8 проведем прямую $a_p = a_p'$, касающуюся кривой 1 в точке минимума O_1 . В плоскости (v, h) на рис. 5.9 она будет соответствовать кривой ледовой прочности 2. Начиная с точки O_2 имеем прямую линию, параллельную оси абсцисс, потому что здесь ледовая прочность определяется из условия удара о неразрушаемый лед и, по сделанным выше предположениям, не зависит от толщины h . В точке касания O_1 имеем точное соответствие ледовой прочности судна его ледовой ходкости. Всюду вне этой точки ледовая прочность избыточна.

Если провести прямую $a_p = a_p''$ (см. рис. 5.8), то в плоскости (v, h) получим зону, где ледовая прочность меньше требуемой по условиям ходкости. Эта зона ограничена точками пересечения кривой 3 и прямой, соответствующей формуле (4.2), и определяется неравенствами

$$P_{\text{стр}} < P_p \text{ при } v_2 < v' < v_1 \text{ и } h_2 > h' > h_1.$$

Таким образом, проявляется возможность нормирования ледовой прочности транспортных судов, поскольку из условия касания кривых ледовой прочности и ходкости в плоскости (v, h) имеем однозначно определяемую комбинацию расчетных внешних параметров v , a_p и h . Предложенный расчетный прием

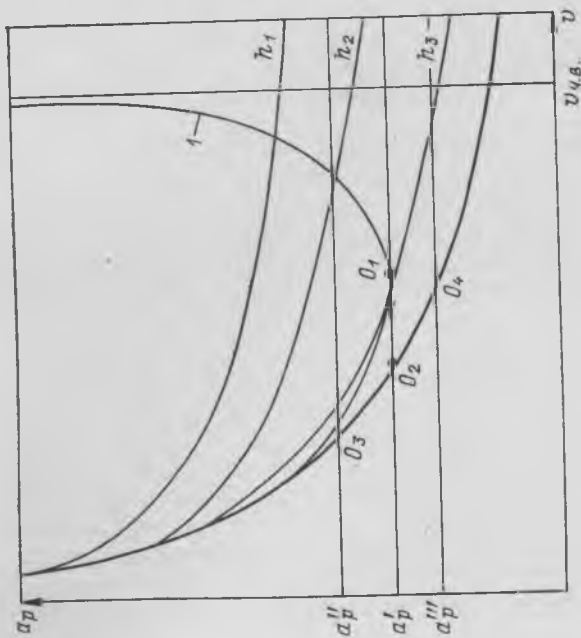


Рис. 5.8. К определению области допустимых скоростей движения в плоскости (a_p, v) .

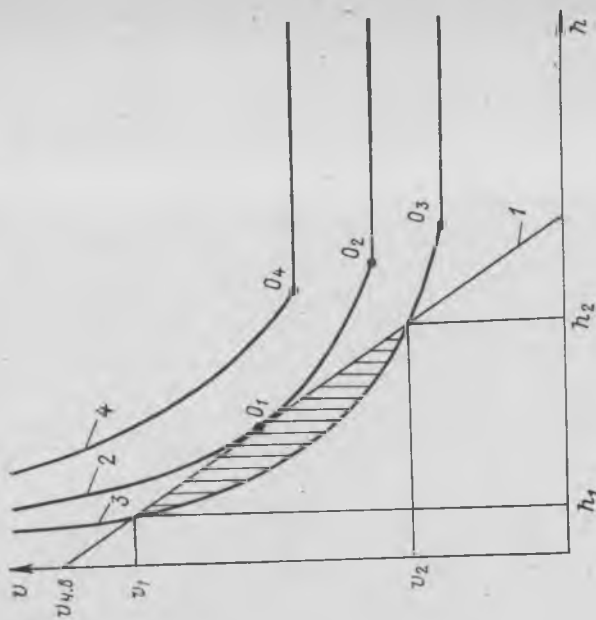


Рис. 5.9. Определение зоны допустимых скоростей в плоскости (v, h) .

позволяет также определять зоны допустимых скоростей движения транспортных судов во льдах, т. е. составить так называемый ледовый паспорт судна.

§ 5.4. ОБЩАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СУДНА ВО ЛЬДАХ

5.4.1. ПОКАЗАТЕЛИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СУДНА

До недавнего времени отсутствовали приемы, позволяющие обоснованно назначать рациональный режим работы судна в тех или иных условиях эксплуатации во льдах. В частности, не было ясно, какими критериями оценивать эффективность работы судна.

Для достижения максимальной эффективности работы судов следует стремиться повысить скорость движения в различных условиях эксплуатации. Впрочем, при плавании по чистой воде скорость часто ограничена гидрометеорологическими и навигационными факторами, а при движении во льдах — ледовой прочностью корпуса. Опыт эксплуатации показывает, что основными причинами ледовых повреждений являются превышение некоторой «безопасной» скорости движения судна, несоблюдение безопасной дистанции в процессе ледокольной проводки, а также сильные ледовые сжатия. Они различны для каждого судна и зависят от ледовых условий. Ясно, что при их выборе надо, с одной стороны, избегать необоснованного риска, а с другой — не перестраховываться. Решение поставленной задачи, по существу, сводится к согласованию требований в отношении ледовой ходкости, прочности и маневренности судна, которые зачастую противоречивы. Исходя из сказанного уместим основные понятия.

Под безопасной возможной скоростью подразумевают максимальную скорость, которую судно при автономном плавании или при движении в канале за ледоколом способно развить в заданных ледовых условиях, не подвергаясь риску получить повреждения корпусных конструкций.

Под безопасной эффективной дистанцией проводки понимают минимально допустимое расстояние между ледоколом и судном, при котором исключается возможность столкновения в случае внезапной остановки ледокола или судна, идущего впереди каравана.

Действительно, наибольшую скорость судно может развить, следуя за ледоколом на короткой дистанции, так как при этом канал медленнее заполняется мелкобитым льдом и имеет наибольшую ширину. По мере увеличения дистанции сплоченность льда в канале возрастает, а при движении в дрейфующем льду его кромки успевают сомкнуться. Однако очень короткая дистанция опасна, так как при внезапной остановке ледокола

судно, следующее за ним, не успеет погасить инерцию и может натолкнуться на корму ледокола. Подобные столкновения (навалы) судов нередки на практике. Иногда они сопровождаются серьезными повреждениями, на ремонт которых требуются значительные затраты. Это отражается на общих экономических показателях работы флота.

Повреждения судов, вызванные ледовыми сжатиями, на практике встречаются редко. Как правило, они имеют место во время экспедиционных рейсов судов, которые проходят в особо сложных ледовых условиях. На действующих трассах судам, попавшим в сильное сжатие, удастся оказать своевременную ледокольную помощь. Для прочности корпуса современного судна опасность представляют только сильные сжатия, при которых оно не может двигаться и вынуждено дрейфовать в ожидании улучшения обстановки. В данном случае для оценки безопасности корпуса судна можно использовать предельную толщину льда, которую он способен выдержать при сжатии. Ее определяют при расчетах прочности.

5.4.2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СУДНА ВО ЛЬДАХ

Безопасную возможную скорость судна в тех или иных ледовых условиях оценивают на основании сопоставления «достижимой» по условиям ледовой ходкости и «допустимой» по условиям ледовой прочности скоростей (см. подраздел 5.3.3). Его целесообразно выполнять графически. Для этого на одной диаграмме строят кривые изменения достижимой и допустимой скоростей в функции от какого-либо параметра льда, например толщины. Кривую изменения достижимой скорости $v=f(h)$ можно получить в результате расчета по формулам разделов 4.1—4.3 или по данным натурных испытаний судна. Зависимость $v=f(h)$ при $N=\text{const}$ для допустимой скорости определяют по методике, приведенной в разделе 5.3. Очевидно, при расчете нельзя учесть все существующие в природе особенности ледяного покрова. Поэтому при решении практических задач приходится рассматривать только типичные виды льда (см. гл. 1). В ряде случаев область безопасных возможных скоростей на описываемых диаграммах во всем диапазоне изменения параметров льда определяется только достижимой скоростью, т. е. не лимитируется прочностью корпуса. Такое положение наблюдается, например, при непрерывном движении судна в ровном сплошном льду, либо при плавании в канале, проложенном ледоколом в тяжелом сплоченном льду, когда судно не в состоянии развить высокую скорость. Иногда безопасная возможная скорость лимитируется частично достижимой, а частично допустимой скоростью, что отражается на диаграммах. Безопасная возможная скорость при разной загрузке судна меняется.

Практическое определение безопасной эффективной дистанции проводки судна удобнее всего проводить с помощью диаграмм, на которых дистанцию наносят в функции от скорости проводки для ряда значений толщины льда h . Рассчитывать характеристики инерции судна, от которых зависит безопасная эффективная дистанция, можно с помощью формул, приведенных в подразделе 4.4.2. При вычислении дистанции нужно учитывать, что сразу после внезапной остановки ледокола или впереди идущего в караване судна, рассматриваемое судно получает соответствующую команду, а затем принимает экстренные меры для торможения, т. е. выполняет маневр «останов» или «реверс». В процессе его выполнения судно продолжает двигаться по инерции в канале сначала по мелкобитому льду, а затем вблизи ледокола, практически по чистой воде. По данным наблюдений, длина участка свободной от льда части канала за кормой ледокола обычно равна 150—200 м, в зависимости от толщины льда и мощности ледокола. Таким образом, общее время, затрачиваемое судном на совершение маневра, складывается из времени передачи команды, времени реверса гребной установки судна и времени, которое непосредственно затрачивается на погашение инерции. Соответственно, длина пробега судна будет зависеть от скорости проводки, параметров льда и загрузки судна. Чем тяжелее ледовые условия, тем меньше значение эффективной безопасной дистанции.

Вопрос о необходимости взятия судна под проводку ледоколом того или иного типа, от решения которого также зависит эффективность работы судов во льдах, может быть решен с помощью специальной диаграммы. На нее должны быть нанесены кривые для определения безопасной возможной скорости судна при самостоятельном и автономном плавании в канале за ледоколом, а также для ледокола при прокладке канала во льду. Очевидно, что проводка судна ледоколом может считаться эффективной лишь при условии, если скорость его движения будет больше, чем скорость самостоятельного плавания судна в заданных льдах.

Сопоставление скорости ледокола при прокладке канала и скорости движения судна по нему позволяет ориентироваться в выборе режима работы энергетической установки. Оптимальным является случай, когда скорость прокладки канала ледоколом, работающим на полную мощность, и скорость полного хода судна по каналу примерно одинаковы. При этом можно избежать простоев судна и ледокола, рационально использовать их мощность, экономно расходовать топливо.

Приведенные в книге выводы и рекомендации относятся главным образом к ледоколам и транспортным судам ледового плавания, участвующим в перевозках грузов по замерзающим морям и Северному морскому пути. В настоящее время перед морским флотом поставлены новые задачи — обеспечить круглогодичную навигацию в Арктике, начать эксплуатацию во льдах крупнотоннажных специализированных судов, освоить высокоширотные трассы. Возможности их успешного решения подтвердили исторические рейсы атомоходов «Арктика» и «Сибирь».

Проектирование и постройка транспортных судов значительного водоизмещения, обладающих ледокольными свойствами, невозможны без дальнейшего развития методов изучения и оценки ледовых качеств судов. При этом главными направлениями являются совершенствование техники и методики натурных испытаний судов во льдах, внедрение современных приемов обработки и анализа данных на основе строгой теории эксперимента, разработка новых методов ледовых наблюдений с помощью электронной аппаратуры. Усложнение натурального эксперимента должно сочетаться с вероятностным подходом к анализу результатов опытов и применением вычислительной техники.

Необходимо также продолжить экспериментальные и теоретические исследования разрушения ледового покрова. Это позволит более точно назначать необходимую прочность корпусов судов, определять величину нагрузок при ледовых сжатиях и при ударе о разрушаемый лед, а также оценивать ходкость судов в сплошных льдах.

Очень важно построить полную математическую модель взаимодействия судна со льдом, с помощью которой можно оценить и ледовую ходкость и величину ледовых нагрузок. Необходимо найти объяснение равновероятности появления больших значений ударных импульсов, что очень важно для определения расчетных ледовых нагрузок. Более тщательно надо исследовать различные компоненты ледового сопротивления движения судна как в модельных, так и в натурных условиях.

Поставленные задачи могут быть решены в результате совместных усилий судостроителей, работников морского флота и исследователей физики льда.

1. Анфимов В. Н., Ваганов Г. И., Павленко В. Г. Судовые тяговые расчеты.— М.: Транспорт, 1970, 224 с.
2. Ашик В. В. Проектирование судов.— Л.: Судостроение, 1975, 351 с.
3. Бартлетт М. С. Введение в теорию случайных процессов.— М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1958, 361 с.
4. Бендат Д. Т. Основы теории случайных шумов и ее применение.— М.: Наука, 1965, 418 с.
5. Бронников А. В. Исследование сопротивления транспортного судна при движении в битых льдах.— Труды/ЛКИ, 1959, вып. XXII, с. 42—54.
6. Бузуев А. Я. Некоторые статистические закономерности распределения толщин многолетнего льда.— Труды/ААНИИ, 1968, т. 284, с. 76—83.
7. Бузуев А. Я., Дубовцев В. Ф. Статистические характеристики некоторых параметров ледяного покрова в Арктике.— Труды/ААНИИ, 1971, т. 303, с. 167—179.
8. Бузуев А. Я., Рывлин А. Я. О расчетах сопротивления льда движению ледокола в различных ледовых условиях.— Проблемы Арктики и Антарктики, 1968, вып. 31, с. 69—73.
9. Бузуев А. Я., Рывлин А. Я. Учет неравномерности распределения характеристик ледяного покрова при оценке ледопроеходимости судов.— Метеорология и гидрология, 1976, № 4, с. 68—73.
10. Буйницкий В. Х. О влиянии диатомовых водорослей на строение и прочность морских льдов.— Труды/САЭ, 1965, т. 44, с. 83—88.
11. Бушуев А. В., Волков Н. А., Лошилов В. С. Атлас ледовых образований.— Л.: Гидрометеиздат, 1974, 138 с.
12. Виноградов И. В. Суда ледового плавания.— М.: Оборонгиз, 1946, 236 с.
13. Войткунский Я. И., Першиц Р. Я., Титов И. А. Справочник по теории корабля.— Л.: Судостроение, 1973, 511 с.
14. Гирс И. В., Русецкий А. А., Нецветаев Ю. А. Испытания мореходных качеств судов.— Л.: Судостроение, 1977, 238 с.
15. Гордиенко П. А., Бузуев А. Я., Сергеев Г. Н. Изучение ледяного покрова моря как среды для судоходства.— Проблемы Арктики и Антарктики, 1966, вып. 27, с. 42—46.
16. Готский М. В. Опыт ледового плавания.— М.: Морской транспорт, 1961, 312 с.
17. Доронин Ю. П., Хейсин Д. Е. Морской лед.— Л.: Гидрометеиздат, 1975, 318 с.
18. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин.— Л.: Наука, 1974, 106 с.

19. Зуев В. А. К вопросу о разрушении ледяного поля при работе ледокола с раскачивающей установкой.—Труды/ГПИ, 1969, т. XXV, вып. 11, с. 19—26.
20. Зуев В. А., Рабинович М. Е. Моделирование ледовой среды при экспериментальных исследованиях движения судна в битых льдах.—Труды/ГПИ, 1967, т. 23, вып. 9, с. 43—50.
21. Зуев В. А., Яковлев М. С. Расчет ледопроходимости ледокола с раскачивающим устройством.—Труды/ГПИ, 1970, т. XXVI, вып. 11, с. 96—106.
22. Игнатьев М. А., Рывлин А. Я. Техничко-эксплуатационные характеристики ледоколов типа «Добрыня Никитич».—Морской флот, 1968, № 2, с. 23—25.
23. Игнатьев М. А., Рывлин А. Я. Экспериментальные исследования ледовых качеств судов в натурных условиях.—Проблемы Арктики и Антарктики, 1970, вып. 33, с. 119—123.
24. Инструкция для наблюдений над льдами с корабля.—Л.: Морской транспорт, 1956, с. 56, 61.
25. Кацман Ф. М., Каштелян В. И., Рывлин А. Я. Определение сопротивления движения ледоколов в свободной воде и во льдах.—Судостроение, 1968, № 11, с. 6.
26. Кацман Ф. М., Музыкантов Г. М., Шмелев А. В. Эксплуатационные испытания морских судов.—М.: Транспорт, 1970, 470 с.
27. Кацман Ф. М., Пустошный А. Ф., Штумпф В. М. Пропульсивные качества морских судов.—Л.: Судостроение, 1972, 510 с.
28. Каштелян В. И. Приближенное определение усилий, разрушающих ледяной покров.—Проблемы Арктики и Антарктики, 1960, вып. 5, с. 71—76.
29. Каштелян В. И., Рывлин А. Я. Учет природных характеристик сплошного льда при оценке его проходимости ледоколом.—Проблемы Арктики и Антарктики, 1966, вып. 22, с. 75—81.
30. Каштелян В. И., Позняк И. Н., Рывлин А. Я. Сопротивление льда движению судна.—Л.: Судостроение, 1968, 238 с.
31. Коржавин К. Н. Воздействие льда на инженерные сооружения.—Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
32. Курдюмов В. А., Хейсин Д. Е. К определению ледовых нагрузок, действующих на корпус ледокола при ударе.—Труды/ЛКИ, 1974, вып. 90, с. 51—59.
33. Курдюмов В. А., Хейсин Д. Е. Характеристики строительной прочности конструкций ледового пояса ледоколов: Науч.-техн. сб./Регистр СССР, 1976, вып. 6, с. 63—71.
34. Курдюмов В. А., Хейсин Д. Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед.—Прикладная механика, 1976, ч. XII, вып. 10, с. 103—109.
35. Лавров В. В. Деформация и прочность льда.—Л.: Гидрометеониздат, 1969, 206 с.
36. Лайхтман Д. Л. О ветровом дрейфе ледяных полей.—Труды/ЛГМИ, 1958, вып. 7, с. 129—137.
37. Ландау Л. Д., Лифшиц И. В. Механика сплошных сред.—М.—Л.: Техтеориздат, 1953, 793 с.
38. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1.—М.: Советское радио, 1969, с. 548.
39. Левит Б. М. Результаты натурных и модельных испытаний опытного ледокола с виброустановкой.—Труды/Коорд. совещаний по гидротехнике, 1965, вып. XVII, с. 10—20.
40. Ледоколы/В. И. Каштелян, А. Я. Рывлин, О. В. Фаддеев, В. Я. Ягодкин.—Л.: Судостроение, 1972, 285 с.
41. Лихоманов В. А. Прочность ледоколов и транспортных судов (по данным тензометрических испытаний)—Труды/ААНИИ, т. 309, 1973, с. 100—110.
42. Мицевич А. А., Мучник Л. М. Вопросы оценки эффективности линейных ледоколов.—Труды/Ин-т комплексных транспортных проблем при Госплане СССР, 1969, вып. II, с. 86—116.

43. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).—СНиП II-57—75. Взамен СН 76—66. Введ. 1/1 1976.
44. Ногид Л. М. Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и битых льдах.—Труды/ЛКИ, 1959, вып. XXVIII, с. 179—185.
45. Ногид Л. М., Дубровин О. В. О вязкостном сопротивлении ледоколов.—Судостроение, 1962, № 6, с. 10—14.
46. Номенклатура морских льдов. Условные обозначения для ледовых карт.—Л.: Гидрометеиздат, 1974, 75 с.
47. Пейтон Х. Р. Некоторые механические свойства морского льда.—В кн.: Лед и снег/Пер. с англ.—М., Мир, 1966, с. 81—93.
48. Петров И. Г. Физико-механические свойства и толщина ледяного покрова: Мат-лы наблюдений науч.-исслед. дрейфующей станции 1950/51 г. Т. 2.—Л.: Морской транспорт, 1955, с. 103—166.
49. Петров Е. Ю., Хейсин Д. Е. Расчет инерционных характеристик судов, плавающих во льдах.—Доклады/XIV науч.-техн. конфер. кораблестроительного ф-та ГПИ, 1967, с. 146—154.
50. Попов Ю. Н. К вопросу удара судна о льдину.—Труды/ЛКИ, 1955, вып. XV, с. 35—44.
51. Попов Ю. Н., Рывлин А. Я. О движительном комплексе ледокола-буксира.—Судостроение, 1961, № 6, с. 11.
52. Прочность судов, плавающих во льдах/Ю. Н. Попов, О. В. Фаддеев, Д. Е. Хейсин, А. А. Яковлев.—Л.: Судостроение, 1967, с. 224.
53. Рабинович М. Е. К определению сопротивления льда движению судна методом моделирования.—Труды/ГПИ, 1970, т. XXVII, вып. 11, с. 107—110.
54. Рабинович М. Е. О влиянии плотности льда на ледовое сопротивление движению судна.—Труды/ГПИ, 1973, т. XXIX, вып. 6, с. 38—40.
55. Рабинович М. Е. Экспериментальное определение коэффициентов трения материалов, имитирующих лед в опытовом бассейне.—Труды/ГПИ, 1970, т. XXVII, вып. 11, с. 111—114.
56. Риман И. С., Крепс Р. Л. Присоединенные массы тел различной формы.—Труды/ЦАГИ, 1947, вып. 635, с. 78—82.
57. Руненберг Р. И. О пароходах для зимнего плавания и ледоколах. СПб, 1890.
58. Рывлин А. Я. Экспериментальное изучение движения судна в битых льдах: Мат-лы по обмену опытом/НТО судпрома, 1965, вып. 71, с. 51—56.
59. Рывлин А. Я. Натурные экспериментальные исследования физико-механических свойств льда.—Труды/ААНИИ, 1975, т. 324, с. 65—71.
60. Рывлин А. Я. Экспериментальное изучение трения льда.—Труды/ААНИИ, 1975, т. 309, с. 186—199.
61. Смирнов В. И. Влияние физико-механических свойств и неравномерности толщин льда на движение судов в осенне-зимний период.—Проблемы Арктики и Антарктики, 1975, вып. 46, с. 91—95.
62. Смирнов В. И. Ледовые плавания и их научно-оперативное обслуживание за рубежом.—Л., Гидрометеиздат, 1970, 222 с.
63. Стефанович А. Н. Ледоколы.—Л.: Морской транспорт, 1958, с. 243.
64. Требования к постройке и классификации транспортных судов ледового плавания и ледоколов.—Л., Изд. ААНИИ (ротапр.), 1964.
65. Тронин В. А. К расчету элементов поворотливости судна при движении в ровных льдах.—Труды/ГИИВТ. 1969, вып. 102, с. 14—19.
66. Тронин В. А., Пушкарев Л. В. Управление речными судами при плавании в ледовых условиях.—М.: Транспорт, 1973, 112 с.
67. Федяевский К. К., Соболев Г. В. Управляемость корабля.—Л.: Судпромгиз, 1963, с. 317.
68. Хейсин Д. Е. Определение и оценка прочности конструкций судов ледового плавания при пересчете с прототипа.—Судостроение, 1961, № 1, с. 12—17.
69. Хейсин Д. Е. Определение контактных усилий при ударе форштевнем о лед.—Проблемы Арктики и Антарктики, 1961, вып. 8, с. 57—63.

70. Хейсин Д. Е. К определению контактных давлений, действующих в зоне удара судна о лед.— Проблемы Арктики и Антарктики, 1966, вып. 22, с. 43—51.
71. Хейсин Д. Е. Динамика ледяного покрова.— Л.: Гидрометеониздат, 1967, 218 с.
72. Хейсин Д. Е. Общая вибрация корпуса судна при движении в сплошных льдах.— Судостроение, 1970, № 9, с. 17—20.
73. Хейсин Д. Е. Некоторые нестационарные задачи динамики ледяного покрова.— Труды/ААНИИ, 1971, т. 300, с. 81—91.
74. Хейсин Д. Е. Возбуждение усилий ледового сжатия на гидродинамической стадии дрейфа сплоченных льдов.— Труды/ААНИИ, 1971, т. 303, с. 89—97.
75. Хейсин Д. Е. Использование вероятностных методов при оценке маневренных качеств судов во льдах.— Труды/ААНИИ, 1973, т. 309, с. 35—50.
76. Хейсин Д. Е. Статический изгиб балок при действии случайных ледовых нагрузок.— Труды/ААНИИ, 1973, т. 309, с. 137—147.
77. Хейсин Д. Е., Ивченко В. О. Распространение ледовых сжатий в сплоченных льдах.— Океанология, 1975, т. XV, с. 5, с. 803—812.
78. Хейсин Д. Е., Лихоманов В. А. Экспериментальное определение энергии механического дробления льда при ударе.— Проблемы Арктики и Антарктики, 1973, вып. 41, с. 71—75.
79. Шепелевский А. А. Определение плотности снега по внешним признакам.— Метеорология и гидрология, 1939, № 6, с. 78—83.
80. Шиманский Ю. А. Условные измерители ледовых качеств судов.— Труды/ААНИИ, 1938, т. 130, 125 с.
81. Шумский Н. А. Основы структурного ледоведения.— М., Изд-во АН СССР, 1955, 492 с.
82. Яковлев М. С. К вопросу об экспериментальном исследовании формы корпуса речного линейного ледокола.— Труды/ГПИ, 1960, т. XIV, вып. 10, с. 18—24.
83. Яковлев М. С. Приближенный расчет ледопроеходимости ледокольных судов.— Докл./XIV науч.-техн. конфер. кораблестроительного ф-та ГПИ, 1967, с. 164—173.
84. Яковлев М. С., Зуев В. А., Рабинович М. Е. О размере парафиновых плиток, имитирующих ледовое поле в модельных испытаниях судов.— Докл./XIV науч.-техн. конфер. кораблестроительного ф-та ГПИ, 1967, с. 177—179.
85. Atkins A. G. Icebreaking Modeling.— Trans. SNAME, 1973, vol. 81, p. 40—43.
86. Coburn J. L., Ehrlich N. A. Advanced Icebreaking Concepty.— Naval Eng. J., 1973, Aug., p. 11—24.
87. Crago W. A., Dix P. J., German J. G. Model Icebreaking Experiments and Their Correlation with Full-Scale Data.— Trans. RINA, 1971, vol. 113, p. 83—108.
88. Erickson R. Friction of runners on snow and ice. SIPRE Transection 44. Wilmette, 1955.
89. Ferris L. W. The Proportions and Form of Icebreakers.— Trans. RINA, 1971, vol. 113, p. 6—25.
90. Frederking R., Gold L. W. Ice Forces on an isolated circular Pile.— Proc. I Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 1971, vol. 1, p. 73—92.
91. German J. G. Design and Construction of Icebreakers.— Trans. RINA, 1971, vol. 113, p. 26—69.
92. Gold L. W. The Failure of Ice.— Proc. I.A.H.R./Symposium on ice and its action on hydraulic structures.— Reykjavik, Iceland, 1970, Sept., p. 1—8.
93. Gold L. W. Ice—a Challenge to the Engineer.— Proc. IV Can. Congress of appl. Mech.— Montreal, 1973, p. G19—G36.
94. Gold L. W. Use of ice covers for Transportation.— Can. Geotechn. J., 1971, vol. 8, N 2, p. 170—181.

95. **Gold L. W.** Effects of ice on structures and on navigation.—XXXIIIzd Int., Nav. Congress, S. II-4, General. Report, 1972, p. 1—19.
96. **Lewis J. W., Edwards R.** Methods for Predicting Icebreaking and Ice Resistance Characteristics of Icebreakers.—Trans. SNAME, 1970, vol. 78, p. 213—243.
97. **Major R. A., Berenger D. M., Lawrie C. I. R.** A model to predict Hull—ice impact loads in the St. Lawrence.—Trans. SNAME, 1975, April 19 (pre-print).
98. **Meyerhof G. G.** Bearing capacity of floating ice sheets.—Proc. Am. Soc. Civil. Eng. Mech. Div., 1960, vol. 86 (EMS), N 10, p. 113—145.
99. **Milano V. R.** Ship Resistance to Continuous Motion in Ice.—Trans. SNAME, 1973, vol. 81, p. 274—306.
100. **Milano V. R.** More Icebreakers to meet demands for longer Arctic navigation season.—Mot. ship, 1973, 54, N 639, p. 324—328.
101. **Scarton H.** On the Role of Bow Friction in Icebreaking.—J. of ship Res., 1975, vol. 19, N 1, p. 34—39.
102. **Shimbo M.** The mechanism of sliding of snow.—International Association of scientific Hydrology. Publ. N 54, Helsinki General Assembly. I.H.C.C., 1961.
103. **Thiele E. H.** Technical Aspects of Icebreaker Operation.—Trans. SNAME, 1959, vol. 67, p. 162—184.
104. **Watson A.** Operation of Department of Transport Icebreakers in Canada.—Trans. SNAME, 1959, vol. 67, p. 140—161.
105. **White R. M.** Prediction of Icebreaker Capability.—Trans RINA, 1970, vol. 112, p. 225—251.
106. **Wittmann W., Schule J. J.** Comments on the man budget of arctic pack ice.—Proc. of the Symp. on the Arctic heat budget and atmospheric circulation.—California, 1966, p. 215—246.

Предисловие	3
Глава 1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОРПУСА СУДНА СО ЛЬДОМ	5
§ 1.1. Характеристика ледяного покрова как среды, преодолеваемой судном	—
1.1.1. Классификация ледяного покрова	7
1.1.2. Режимы плавания судов во льдах	8
1.1.3. Физико-механические свойства льда и снега	14
1.1.4. Прочность и деформации ледяного покрова	19
§ 1.2. Движение судна в битых льдах	—
1.2.1. Движение в сплоченных мелкобитых льдах	22
1.2.2. Движение в разреженных мелкобитых льдах	25
1.2.3. Удар об отдельную льдину	27
§ 1.3. Движение судна в сплошных льдах	—
1.3.1. Ломка ледяного покрова	30
1.3.2. Контактные усилия при ломке	34
1.3.3. Притапливание и поворачивание обломков льда	38
1.3.4. Трение корпуса о лед	41
§ 1.4. Ледовые сжатия судов	—
1.4.1. Возникновение ледовых сжатий и их особенности	44
1.4.2. Деформация льда и торошение при сжатии	47
1.4.3. Действие льда на корпус судна при сжатии	—
Глава 2. НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СУДОВ ВО ЛЬДАХ	52
§ 2.1. Организация и принципы проведения испытаний судов во льдах	—
§ 2.2. Испытания ледовой ходкости судна	53
2.2.1. Испытания при непрерывном движении судна	—
2.2.2. Испытания при работе набегам	60
2.2.3. Швартовные, тяговые и ходовые испытания	62
§ 2.3. Натурные исследования маневренности судна во льдах	65
2.3.1. Испытания поворотливости	—
2.3.2. Испытания инерции судна и устойчивости на курсе	66
§ 2.4. Испытания ледовой прочности судна	—
2.4.1. Ледовые тензометрические испытания	—
2.4.2. Изучение ледовых повреждений корпуса судна	69
§ 2.5. Техника измерения элементов судна и параметров внешней среды	71

2.5.1. Измерение элементов судна	71
2.5.2. Измерение параметров ледовой среды	76
2.5.3. Гидрометеорологические наблюдения	79
2.5.4. Наблюдения за процессом движения судна во льду	80

Глава 3. ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ИСПЫТАНИЙ. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ЛЕДОВЫХ КАЧЕСТВ СУДНА

§ 3.1. Первичная обработка материалов испытаний судна	—
3.1.1. Обработка результатов испытаний ледовой ходкости судна	—
3.1.2. Обработка результатов испытаний ледовой прочности судна	85
§ 3.2. Вероятностные методы анализа движения судна во льду	86
3.2.1. Статистическая модель взаимодействия корпуса со льдом	—
3.2.2. Анализ колебаний судна при движении во льдах	90
3.2.3. Статистический анализ данных тензометрических испытаний корпуса судна	93
§ 3.3. Вероятностные методы исследования ходкости судна во льдах	94
3.3.1. Устойчивость движения судна в сплошных льдах предельной толщины	—
3.3.2. Влияние неоднородности ледяного покрова	99
3.3.3. Определение дисперсии прямого ледового сопротивления	100
§ 3.4. Вероятностные методы исследования маневренных качеств судов	104
3.4.1. Оценка устойчивости движения судна по курсу во льдах	—
3.4.2. Вероятностные методы оценки инерции судна во льдах	106
§ 3.5. Статистические характеристики ледовых нагрузок на конструкции корпуса судов	112
3.5.1. Продолжительность удара корпуса о лед	—
3.5.2. Размеры зоны контакта борта со льдом	115
3.5.3. Распределение ударных импульсов по длине носовой оконечности судна	117
3.5.4. Распределение средних и максимальных напряжений	118
§ 3.6. Вероятностные методы анализа прочности корпуса судов при действии ледовых нагрузок	120
3.6.1. Общие положения и энергетические оценки	—
3.6.2. Изгиб балок бортового набора при действии случайных нагрузок	122
3.6.3. Упругие колебания корпуса судна при движении во льдах	129

Глава 4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ И МАНЕВРЕННОСТИ СУДНА

§ 4.1. Учет влияния природных параметров ледовой среды на ходкость судна при непрерывном движении в сплошных льдах	—
4.1.1. Толщина льда	—
4.1.2. Снежный покров	140
4.1.3. Прочность льда	142
4.1.4. Разрушенность и торосистость льда	147
§ 4.2. Учет влияния эксплуатационных характеристик судна на ходкость в сплошных льдах	148
4.2.1. Эксплуатационная осадка и водоизмещение	—
4.2.2. Крен и дифферент	153

4.2.3. Шероховатость наружной обшивки	156
4.2.4. Пропульсивные качества судна	159
§ 4.3. Оценка ходкости судна в битых льдах и при работе набегами	161
4.3.1. Непрерывное движение в битых льдах	—
4.3.2. Работа набегами	163
§ 4.4. Оценка маневренности судна во льдах	166
4.4.1. Поворотливость	—
4.4.2. Инерция	173
4.4.3. Устойчивость на курсе	176

Глава 5. ОЦЕНКА ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТИ И ОБЩАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СУДНА ВО ЛЬДАХ 179

§ 5.1. Усиления корпуса судов ледового плавания	—
5.1.1. Принципы назначения ледовых усиления корпуса	—
5.1.2. Единый подход к нормированию ледовой прочности	180
§ 5.2. Характеристики строительной и ледовой прочности конструкций ледового пояса ледоколов	182
5.2.1. Оценка строительной прочности	—
5.2.2. Методы определения ледовой прочности	184
§ 5.3. Соотношение между строительной и ледовой прочностью корпуса транспортных судов	188
5.3.1. Уравнение кривой ледовой прочности	—
5.3.2. Учет прочности ледяного покрова на изгиб	190
5.3.3. Соотношение между ледовой прочностью и ходкостью судна	194
§ 5.4. Общая оценка эффективности работы судна во льдах	196
5.4.1. Показатели, определяющие эффективность работы судна	—
5.4.2. Практические приемы оценки эффективности работы судна во льдах	197
Заключение	199
Указатель литературы	200

Александр Яковлевич Рывлин
Дмитрий Евгеньевич Хейсин

ИСПЫТАНИЯ СУДОВ ВО ЛЬДАХ

Редактор *Т. И. Ильичева*
Художественные редакторы *О. П. Андреев, В. А. Пурицкий*
Технический редактор *А. И. Казаков*
Корректоры *С. Н. Маковская, Е. М. Реутская*
Художник *В. И. Харьков*

ИБ № 206

Сдано в набор 04.02.80. Подписано в печать 03.07.80. М-27118. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2. Литературная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л. 13,0. Уч.-изд. л. 13,1. Изд. № 3376-77. Тираж 1050 экз. Заказ № 71. Цена 90 коп.

Издательство «Судостроение», 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6.