РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

Электронный аналог печатного издания,
утвержденного 23.05.12

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТА ДОПУСТИМЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ СУДНА ВО ЛЬДАХ

НД № 2-039901-003

Санкт-Петербург
2012

gost.e-ecolog.ru

Методические рекомендации по выполнению расчета допустимых режимов движения судна во льдах вступают в силу с момента опубликования.

Методические рекомендации используются при выполнении расчета допустимых режимов движения судна во льдах в зависимости от района эксплуатации, ледовых условий и технического состояния судна.

Методические рекомендации могут использоваться при выполнении расчетов допустимых условий плавания во льдах следующих судов:

не имеющих в символе класса категорию ледовых усилений Российского морского регистра судоходства или иного классификационного общества;

имеющих в символе класса категорию ледовых усилений Российского морского регистра судоходства или иного классификационного общества, которая по решению администраций портов не является достаточной для плавания в конкретной ледовой обстановке;

имеющих в символе класса категорию ледовых усилений Российского морского регистра судоходства, но для которых по инициативе судовладельца необходимо уточнение величин безопасных скоростей движения судна во льдах в зависимости от фактического водоизмещения и технического состояния корпуса судна.

ISBN 978-5-89331-222-5

©Российский морской регистр судоходства, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

I Общие положения 4
II Структура расчета 4
1 Введение 4
2 Основные характеристики судна 4
3 Основные понятия и определения 4
4 Ледовые условия 5
5 Расчетные эксплуатационные режимы 5
6 Допустимые скорости движения судна. . . . 5
7 Безопасные дистанции при движении судна под проводкой ледокола 13
8 Общие выводы и рекомендации 17

I ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Данные Методические рекомендации используются для выполнения и оформления расчета допустимых режимов движения судна во льдах[1], который предназначен для определения, выбора и оценки безопасных режимов эксплуатации судна во льдах при автономном плавании и при плавании под проводкой ледокола в зависимости от района эксплуатации, ледовых условий и технического состояния судна.

Расчет выполняется компетентной организацией, имеющей признание Российского морского регистра судоходства[2] на выполнение упомянутых работ.

Расчет подлежит рассмотрению в Главном управлении Регистра; при положительных результатах рассмотрения основные выводы включаются в оформляемое Регистром Свидетельство о допустимых условиях ледового плавания судна.

II. СТРУКТУРА РАСЧЕТА

1 ВВЕДЕНИЕ

В данном разделе приводятся цели и задачи Расчета.

2 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУДНА

В данном разделе приводятся основные сведения о судне:

название;
номер ИМО;
тип;
год постройки;
флаг;
порт приписки;
классификационное общество;
символ класса;
длина наибольшая;
длина расчетная;
ширина;
высота борта;
осадка наибольшая;
осадка в балласте;
водоизмещение;
тип энергетической установки;
мощность на валу максимальная;
тип движителя;
количество гребных винтов;
скорость хода.

3 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Данный раздел является типовым, приводится в каждом документе и содержит основные определения, используемые в Расчете.

Безопасная скорость – максимальная допустимая скорость движения судна в заданных ледовых условиях, при которой воздействие льда на корпус судна не приводит к серьезным повреждениям.

Безопасная толщина льда – максимальная допустимая толщина льда, при которой отсутствует ограничение скорости движения судна, исходя из условия прочности корпусных конструкций.

Минимальная безопасная дистанция – минимальное расстояние между судном и идущим впереди ледоколом или другим судном в составе каравана, равное пути торможения судна при его экстренной остановке в канале.

Сплоченность льдов – отношение площади льдин в зоне, где они распределены относительно равномерно, к общей площади этой зоны, выраженное в десятых долях – баллах (по десятибалльной шкале).

Сплоченный лед – дрейфующий лед сплоченностью 7/10 — 8/10 (7 — 8 баллов), состоящий из льдин, большинство которых соприкасается друг с другом.

Разреженный лед – дрейфующий лед сплоченностью 4/10 — 6/10 (4 — 6 баллов), состоящий из льдин с большим числом разводий; большинство льдин не соприкасается.

Сжатие льда – уменьшение расстояния между отдельными льдинами под действием ветра и течений, в результате чего увеличивается сплоченность и/или происходит сжатие дрейфующего льда (оценивается в баллах по трехбалльной шкале).

Ледовая прочность конструкций при ударе о лед – предельно допустимые значения параметров, определяющих внешние условия и режим взаимодействия корпуса судна со льдом, которым соответствует заданное допустимое состояние конструкций при их фактическом техническом состоянии.

Строительная прочность конструкций – комбинация значений параметров ледовой нагрузки, которой соответствует заданное допустимое состояние конструкций.

Фактическая прочность конструкций – комбинация значений

[1] В дальнейшем – Расчет.
[2] В дальнейшем – Регистр.

параметров ледовой нагрузки, которой соответствует заданное допустимое состояние конструкций при их фактическом техническом состоянии (коррозионном и механическом износах обшивки и коррозионном износе элементов балок набора).

Допустимое состояние конструкций – допустимый уровень напряженно-деформированного состояния элементов конструкций (обшивки, балок набора). Различают безопасное и предельное состояние конструкций. Безопасное состояние соответствует упругой стадии работы конструкций, когда максимальные напряжения в элементах конструкций под действием ледовой нагрузки не превышают номинального предела текучести материала. Предельным считается состояние конструкций, соответствующее локальной ледовой нагрузке, при которой исчерпывается несущая способность рассматриваемых элементов конструкций (в рамках принятой модели определения предельного состояния).

4 ЛЕДОВЫЕ УСЛОВИЯ

Данный раздел содержит информацию о ледовых условиях в предполагаемых районах эксплуатации судна. Исходная информация может быть получена на основании данных многолетних наблюдений, обобщенных в атласах Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ), отчетных материалах региональных управлений Гидрометеорологической службы и региональных филиалов Центрального института морского флота (ЦНИИМФ). При подборе данных многолетних наблюдений необходимо учитывать, что большая изменчивость всех характеристик состояния льда приводит к тому, что в отдельные годы условия плавания существенно отличаются от средних многолетних показателей.

5 РАСЧЕТНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ

В данном разделе указаны подлежащие рассмотрению расчетные режимы взаимодействия корпуса судна со льдом, а также установлены необходимые параметры расчетных режимов.

Принятие решения о выборе расчетных режимов взаимодействия корпуса судна со льдом основы-вается на анализе данных по ледовой обстановке в районах вероятной эксплуатации судна (см. раздел 4). Выбор совокупности расчетных режимов взаимодействия корпуса со льдом осуществляется на основе опыта эксплуатации судов во льдах. В процессе эксплуатации судна возможны нормальные и экстремальные режимы взаимодействия корпуса судна со льдом.

При нормальном режиме судоводитель полностью контролирует поведение судна во льдах. Параметры режима выбираются им в соответствии с фактической ледовой обстановкой и с учетом ресурсов прочности конструкций.

Экстремальные эксплуатационные режимы возникают в тяжелой ледовой обстановке, когда теряется контроль над траекторией движения судна. К таким режимам относятся, прежде всего, вторичные (отраженные) удары корпуса судна о прочные ледовые образования.

При нормальной эксплуатации судна возможны следующие режимы.

Непрерывное движение судна в сплошных льдах. Этот режим плавания представляет наибольший интерес при оценке ледовой ходкости. Из-за относительно малых скоростей движения судна и толщин льда нагрузки на корпусные конструкции будут несущественными.

Непрерывное движение судна в битых льдах. Наиболее распространенный режим эксплуатации судна. Скорость движения судна в таких ледовых условиях определяется сплоченностью льдин. При движении судна с относительно высокой скоростью возможны сильные удары об отдельно плавающие льдины и кромки ледяных полей.

Движение судна в канале, проложенном ледоколом. Скорость судна при движении в канале определяется либо возможностями ледокола, либо прочностью корпуса судна. Наиболее опасны удары корпуса судна о кромку канала. Иногда суда не могут двигаться самостоятельно в канале, проложенном в тяжелых льдах, в этом случае ледоколы буксируют суда.

6 ДОПУСТИМЫЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ СУДНА

В данном разделе содержится методика оценки прочности корпуса судна для расчетных режимов взаимодействия корпуса со льдом при плавании судна во льдах самостоятельно или под проводкой ледокола, а также приводятся исходные данные, необходимые для выполнения Расчета.

6.1 Необходимые данные для определения допустимых значений скорости судна:

условия загрузки судна (в грузу, в балласте);

характеристики формы корпуса судна на уровне расчетной осадки в общем случае в носовом, среднем и кормовом районах;

характеристики льда:

тип льда (льдина конечной массы);

предел прочности льда на изгиб;

масса льдины;

измеритель динамической прочности льда на раздробление;

предел прочности льда на смятие;

параметры расчетных режимов:

скорость судна на чистой воде (спецификационная);

расчетные значения толщины льда и скорости при ударе о лед.

6.2 Методика определения допустимых значений скорости движения судна в различных ледовых условиях

Определение допустимых значений скорости движения судна в различных ледовых условиях основано на расчетах ледовой и фактической прочности корпуса судна. Методика расчетов основана на сопоставлении фактической и ледовой прочности.

Фактическая прочность конструкций определяется величиной суммарной расчетной ледовой нагрузки, вызывающей в рассматриваемых элементах конструкций заданное предельно допустимое состояние. Поскольку ледовая нагрузка имеет локальный характер, характеристикой фактической прочности является в общем случае поверхность. Для расчета используется формула

$$p = p(b, l_s), \qquad (6.2\text{-}1)$$

где p — интенсивность ледовой нагрузки;
b и l_s — высота и длина зоны контакта, соответственно.

При расчете ледовой прочности для районов корпуса, подверженных ударному взаимодействию, имеющих ненулевые значения углов наклона борта, могут использоваться следующие положения и зависимости.

Для случая наклонного борта (β' — угол наклона борта к вертикали в точке контакта со льдом) и заданной геометрии кромки льдины (заданном значении радиуса скругления, R) длина зоны контакта определяется по формуле

$$l_s = 1{,}6\sqrt{2Rb\sin\beta'}\,. \qquad (6.2\text{-}2)$$

В связи с этим фактическая прочность задается кривой фактической прочности, соответствующей заданному предельно допустимому состоянию конструкций. Данная кривая определяется по формуле

$$p = p(b|_{\sigma=\sigma_lim}), \qquad (6.2\text{-}3)$$

где σ_lim — характеристика заданного предельно допустимого состояния рассматриваемого элемента конструкции.

Из этого следует, что заданное предельно допустимое состояние может быть достигнуто при различных сочетаниях p и b.

Предельно допустимое состояние конструкций может задаваться различными способами:

ограничивается уровень напряженного состояния элементов конструкций: $\sigma_{max} \leqslant \sigma_{allowable}$; $\tau_{max} \leqslant \tau_{allowable}$ — это значит, что предполагается работа конструкции в упругой стадии (максимальные значения нормального σ_{max} и касательного τ_{max} напряжений не превышают допустимые значения $\sigma_{allowable}$ и $\tau_{allowable}$);

ограничивается наибольший остаточный прогиб $w \leqslant w_{residual}$ (допускается работа элементов конструкции в упруго-пластическом состоянии);

допускается предельное состояние, когда исследуются пластические механизмы. Параметры ледовой нагрузки, обуславливающие эти механизмы разрушения определяются условием предельной прочности $p = p_{ultimate}(b)$.

Кривые фактической прочности могут быть построены для различных элементов конструкции (обшивки, шпангоутов, стрингеров) при расчетах, выполняемых в упругой стадии, по предельному состоянию и т.д. Из-за неравнопрочности различных элементов конструкций их кривые фактической прочности не совпадают.

В Расчете используется критерий фибровой текучести:

при определении фактической прочности балок набора и критерий ограниченных пластических деформаций, соответствующий условному состоянию – два пластических шарнира в опорных сечениях балки – полоски;

при определении фактической прочности обшивки в местах ледовой нагрузки.

Указанный подход соответствует допущению о малой вероятности повреждений конструкций, воспринимающих ледовую нагрузку под действием нормальных эксплуатационных нагрузок.

Оценка параметра строительной прочности обшивки выполняется по формуле

$$p = R_{eH} s'^2/(1{,}4a)^2, \qquad (6.2\text{-}4)$$

где s' — фактическая толщина обшивки в районе ледовой нагрузки по результатам дефектации;
R_{eH} — предел текучести стали;
a — расстояние между балками основного набора, измеренное по обшивке.

Параметры фактической прочности балок набора определяются по формуле

$$p = \min\{p_M; p_N\}, \qquad (6.2\text{-}5)$$

где $p_M = q_M(b/l)/b$ и $p_N = q_N(b/l)/b$;
b — расчетное значение высоты зоны контакта корпуса судна со льдом;
l — расчетный пролет балки основного набора;
$q_M(b/l)$ и $q_N(b/l)$ — расчетные погонные нагрузки.

Для определения погонных нагрузок $q_M(b/l)$ и $q_N(b/l)$ используются следующие формулы:

$$q_M(b/l) = k_\sigma R_{eH} W'/[k_M(b/l)al]; \qquad (6.2\text{-}6)$$

$$q_N(b/l) = k\tau R_{eH} f_c'/[kN(b/l)a], \qquad (6.2\text{-}7)$$

где k_σ и k_τ — коэффициенты допустимых значений нормального и касательного напряжений. (k_σ = 1,0 и k_τ = 0,57);

W, и f_c' — значения момента сопротивления и площади сечения стенки балки за вычетом добавок на их фактический износ, соответственно;

$k_M(b/l) = M_d/[q_M(b/l)al]$ и $k_N(b/l) = N_d/[q_N(b/l)$ — коэффициенты расчетного изгибающего момента, M_d и перерезывающей силы, N_d.

Значения коэффициентов расчетного изгибающего момента и перерезывающей силы определяются на основании расчета конструкций в упругой стадии при стержневой идеализации. Для определения данных коэффициентов могут быть использованы формулы, содержащиеся в Правилах классификации и постройки морских судов Регистра 1995 г.

Итоговая кривая фактической прочности должна быть представлена в виде огибающих кривых для обшивки и набора.

Ледовая прочность конструкций определяется предельно допустимыми значениями параметров, определяющих внешние условия и режим взаимодействия корпуса судна со льдом, которым соответствует заданное предельно допустимое напряженно-деформированное состояние элементов конструкций с учетом их фактического технического состояния. В рамках модели ударного взаимодействия корпуса судна со льдом в качестве внешних параметров принимаются:

скорость поступательного движения судна во льдах V_0;

толщина ледяного покрова H;

предел прочности льда на изгиб σ_f;

условный измеритель a_p, характеризующий динамическую прочность льда при раздроблении.

При этом каждой точке кривой фактической прочности (p, b, l_s) соответствует определенная комбинация (совокупность) внешних параметров (V_0, H, σ_f, a_p).

При заданных значениях интенсивности ледовой нагрузки p и высоты распределения ледовой нагрузки b суммарное контактное усилие можно представить в следующем виде:

$$P_{sum} = 1{,}216pb^{3/2}(2R)^{1/2}(\sin\beta')^{1/2}, \qquad (6.2\text{-}8)$$

где R — радиус скругления кромки плавающей льдины (ледяного поля), характеризующий ее геометрию в зоне силового контакта корпуса судна со льдом;

$\beta' \neq 0$ — угол наклона к вертикали шпангоута на уровне ватерлинии, соответствующей расчетной осадке судна, в рассматриваемом сечении по его длине.

Разрушение ледяного покрова может произойти или вследствие изгиба при действии вертикальной составляющей суммарного контактного усилия, или в результате потери устойчивости при действии его горизонтальной составляющей, причем реализация механизма потери устойчивости наблюдается, в основном, для ровных льдов небольшой толщины и для льдов, находящихся в контакте с вертикальным или близким к нему бортом:

$$P_d = \min\left[\frac{P_f}{\sin\beta'}; \frac{P_e}{\cos\beta'}\right], \qquad (6.2\text{-}9)$$

где P_d — приведенная к направлению удара нагрузка, разрушающая ледяной покров;

$P_f = m\sigma_f H^2$ — нагрузка, вызывающая разрушение ледяного покрова в результате изгиба;

$P_e = 4{,}23\sqrt[4]{\rho_в g D_л^3}$ — нагрузка, вызывающая разрушение ледяного покрова в результате потери устойчивости;

m — безразмерный коэффициент, характеризующий несущую способность ледяного покрова при изгибе;

σ_f — предел прочности льда на изгиб;

H — толщина ледяного покрова;

$\rho_в$ — расчетная плотность морской воды;

g — ускорение свободного падения;

$D_л = E_л H^3/(1-\mu_л^2)/12$ — цилиндрическая жесткость ледяной пластины;

$E_л$ — модуль нормальной упругости льда;

$\mu_л$ — коэффициент поперечной деформации льда.

Толщину ледяного покрова H, соответствующую конкретной точке кривой строительной прочности (p, b), можно определить, приравнивая приведенную к направлению удара нагрузку, разрушающую ледяной покров, к суммарному контактному усилию ($P_d = P_{sum}$).

Если разрушение ледяного покрова происходит в результате изгиба, то уравнение для расчета его толщины принимает следующий вид:

$$\sigma_f H^2 = \frac{1{,}216pb^{3/2}(2R)^{1/2}(\sin\beta')^{3/2}}{m}. \qquad (6.2\text{-}10)$$

Значение предела прочности льда на изгиб σ_f или задается в качестве фиксированной величины в общем массиве исходных данных, или определяется непосредственно в процессе расчета в зависимости от толщины ледяного покрова H, с учетом сезонного периода его навигации по формулам (6.3-2) — (6.3-4).

Если разрушение ледяного покрова происходит в результате потери устойчивости, то для расчета его толщины H, используется формула

$$H^{9/4} = \frac{1{,}216pb^{3/2}(2R)^{1/2}(\sin\beta')^{1/2}\cos\beta'}{4{,}23\sqrt[4]{\rho_в g\left(\frac{E_л}{12(1-\mu_л^2)}\right)}}. \qquad (6.2\text{-}11)$$

Значения характеристик упругих свойств ледяного покрова $E_л$ и $\mu_л$ задаются в качестве фиксированных величин в общем массиве исходных данных.

Скорость поступательного движения судна во льдах в направлении продольной горизонтальной оси V_0, соответствующая конкретной точке кривой строительной прочности (p, b), определяется по формуле

$$V_0 = \frac{W_0}{L} = \frac{1}{L}\left[0{,}969\left(\frac{p}{F_p}\right)^{1/2}\left(\frac{b}{F_b}\right)^{5/4}\left(\frac{2R}{\Delta^2}\right)^{1/4} \times \right.$$
$$\left. \times\left(\frac{1}{f_p(k)^{1/2}f_b(k)^{5/4}}\right)\right], \qquad (6.2\text{-}12)$$

где $W_0 = V_0 L$ — приведенная к направлению удара скорость движения судна во льдах, соответствующая начальному моменту контакта корпуса с кромкой ледяного покрова;

L — безразмерный коэффициент приведения скорости движения судна;

Δ — массовое водоизмещение судна;

$F_p = L^{13/24}F_p'$; $F_p' = C^{-1/6}(\cos\beta')^{-1/6}(\sin\beta')^{-1/4}$; $F_b = L^{7/12}F_b'$;

$F_b' = C^{-1/3}(\cos\beta')^{-1/3}(\sin\beta')^{-1/2}$ — безразмерные функции влияния формы корпуса судна в расчетной точке удара на значения параметров ледовой нагрузки p и b;

$C = C_1(1 + C_M C_2/C_1)$ — безразмерный коэффициент приведения к направлению удара массы системы «судно – ледяной покров»;

C_1 и C_2 — коэффициенты приведения массы судна и массы ледяного покрова;

$C_M = \Delta/M_л$ — относительная масса ледяного покрова;

$M_л$ — масса ледяного покрова;

$f_p(k) = 1{,}238k^{1/4}(1-k^{7/4})^{1/6}$ и $f_b(k) = (1-k^{7/4})^{1/3}$ — безразмерные функции влияния разрушения ледяного покрова в расчетной точке удара на значения параметров ледовой нагрузки p и b;

k — безразмерный параметр, представляющий собой отношение скоростей внедрения борта судна в лед в момент разрушения ледяного покрова и в начальный момент контакта корпуса с его кромкой.

При последовательном определении совокупности параметров ледовой прочности (V_0, H, σ_f, a_p) для конкретной точки кривой строительной прочности (p, b) безразмерный параметр k рассматривается как внутренний параметр, посредством которого устанавливается взаимосвязь между фактическими характеристиками прочности конструкций корпуса и указанными выше внешними параметрами. Расчетное значение параметра k определяется по формуле

$$a_p = 1{,}668\left(\frac{p}{F_p'}\right)^{35/48}\left(\frac{b}{F_b'}\right)^{-65/96}\left(\frac{2R}{\Delta^2}\right)^{-5/96} \times \times\left(\frac{1}{f_p(k)^{35/48} f_b(k)^{-65/96}}\right). \qquad (6.2\text{-}13)$$

Значение условного измерителя динамической прочности льда при раздроблении a_p или задается в качестве фиксированной величины в общем массиве исходных данных, или определяется непосредственно в процессе расчета в зависимости от толщины ледяного покрова H с учетом прочности корпуса судна и сезонного периода навигации по формулам (6.3-2) — (6.3-4).

При любых комбинациях внешних параметров (V_0, H, σ_f, a_p), которые удовлетворяют условиям 6.2-10 — 6.2-13, в рассматриваемых элементах конструкций возникает заданное предельно допустимое напряженно-деформированное состояние.

Каждый район в местах ледовой нагрузки характеризуется собственными параметрами ледовой прочности вследствие изменения строительной прочности и формы корпуса судна по длине носовой оконечности. При a_p = const и σ_f = const ледовая прочность определяется кривой допустимых скоростей $V_0(H)$. При удалении от носовой оконечности к району перехода в цилиндрическую вставку кривая $V_0(H)$ смещается в зону меньших толщин льда и больших скоростей.

Двигаясь во льдах, судно может удариться о плавающую льдину или о ледяное поле любым районом носовой оконечности. Допустимые значения скорости и толщины льда для судна определяются двумя характерными линиями $H = H_s$ и $V_0 = V_s$ и огибающими кривыми $V_0(H)$, построенными для нескольких сечений корпуса судна.

Кривые допустимых значений скорости регламентируют допустимые режимы эксплуатации судна в ледовых условиях.

В случае наличия вертикальных бортов в районе носового заострения, что характерно для судов с бульбовыми обводами, расчет допустимых значений скорости должен выполняться по методике, согласованной с Регистром.

6.3 Исходные данные для расчета допустимых значений скорости движения судна во льдах

Для расчетов ледовой прочности необходимы следующие данные:

общие сведения о форме корпуса судна в районе его контакта со льдом (данные теоретического чертежа);

значения параметров, характеризующих внешние условия:

относительная масса льдин;

параметры геометрии кромки ледяного поля (плавающей льдины) в зоне контакта корпуса судна со льдом;

предел прочности льда на изгиб и значение коэффициента в формуле для определения несущей способности ледяного покрова;

условный параметр прочности льда на раздробление – измеритель динамической прочности льда;

данные фактической прочности конструкций корпуса судна (обшивки и балок набора) в районе взаимодействия со льдом, представленные в виде кривых фактической прочности.

Общие сведения о форме корпуса судна в районе его контакта со льдом представляются в виде таблиц и графических зависимостей, определяющих значения углов наклона ватерлинии и шпангоута к ДП в нескольких сечениях по длине судна (табл. 6.3-1, рис. 6.3-1 и 6.3-2).

Для транспортных судов такая информация представляется только для района носового заострения.

В общем случае должны быть рассмотрены три случая загрузки судна, различающиеся значением расчетной осадки:

в полном грузу;

в балласте;

промежуточное состояние загрузки.

Таблица 6.3-1

Параметры формы корпуса судна в районе носового заострения на уровне ватерлинии, соответствующей расчетной осадке судна

$x_м$ — отстояние рассматриваемого расчетного сечения от мидель-шпангоута (М), м;
$x_{нп}$ — отстояние рассматриваемого расчетного сечения от носового перпендикуляра (НП), м;
$y_{вл}$ — половина ширины ватерлинии, соответствующей расчетной осадке судна *d*, в рассматриваемом расчетном сечении, м;
α — угол наклона ватерлинии, соответствующей расчетной осадке судна *d*, к диаметральной плоскости (ДП) в рассматриваемом расчетном сечении, град.;
β — угол наклона шпангоута к диаметральной плоскости (ДП) в рассматриваемом расчетном сечении на уровне ватерлинии, соответствующей расчетной осадке судна *d*, град.;
β′ — угол наклона шпангоута к вертикали в рассматриваемом расчетном сечении на уровне ватерлинии, соответствующей расчетной осадке судна *d*, град.;
$\beta_1 \Rightarrow \text{arctg}[\cos\alpha \times \text{tg}\beta]$.

$d =$		м
$L_{pp} =$		м
$\Delta L =$		м

№ теор. шпангоута	$x_м$, м	$x_{нп}$, м	$x_{нп}/L_{pp}$	$y_{вл}$, м	α, град.	β, град.	β_1, град.
6							
5 1/2							
5							
4 1/2							
4							
3 1/2							
3							
2 1/2							
2							
1 1/2							
1							
1/2							
0 (НП)							

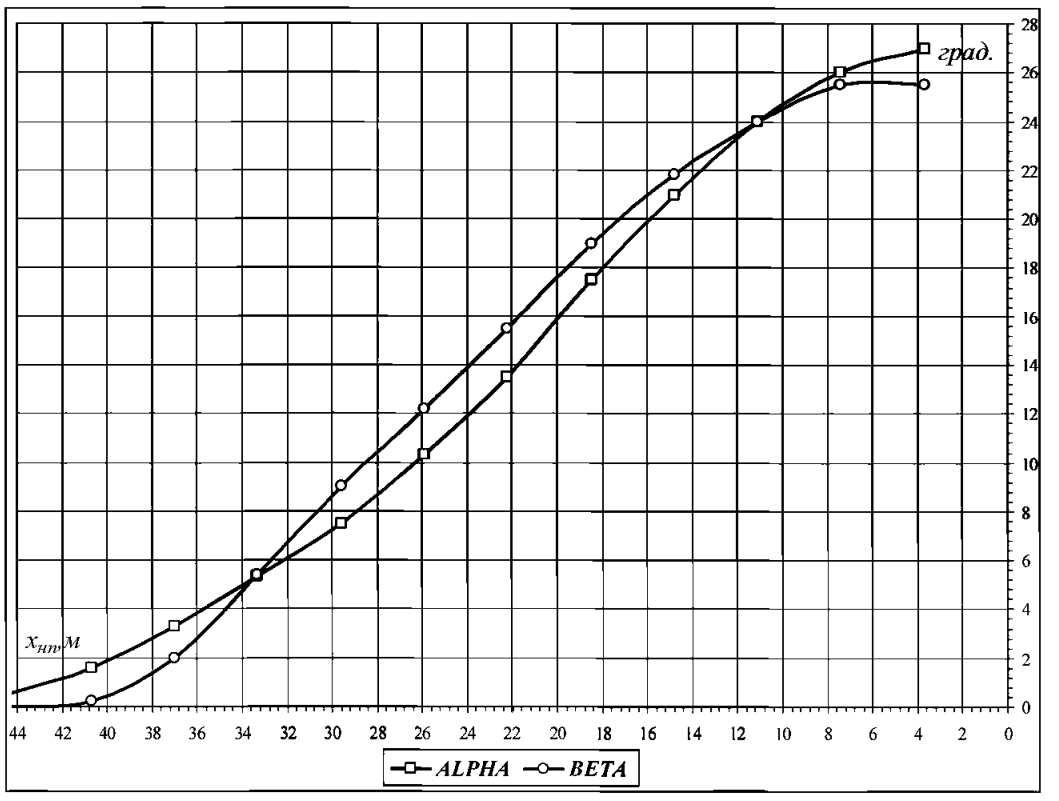


Рис. 6.3-1 Графическое отображение распределения углов наклона ватерлинии и шпангоутов по длине района носового заострения судна

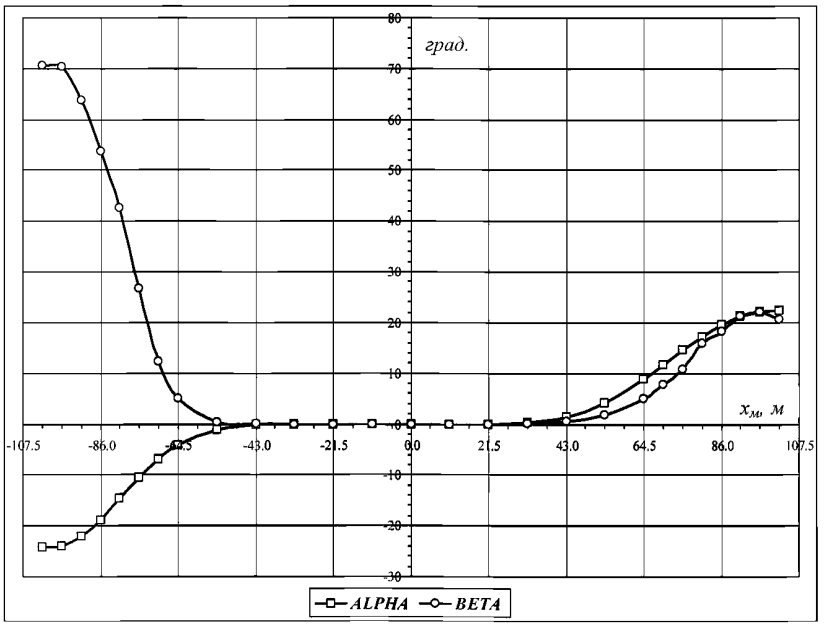


Рис. 6.3-2 Графическое отображение распределения углов наклона ватерлинии и шпангоутов по всей длине судна

Значения параметров, характеризующих внешние условия, принимаются в соответствии со следующими рекомендациями:

геометрия кромки ледяного поля (плавающей льдины) в зоне контакта корпуса судна со льдом определяется радиусом скругления кромки льдины R, который принимается равным 25 м;

относительная масса льдины $CM = \dfrac{\Delta}{M_{Ice}}$ (M_{Ice} — масса льдины; Δ — масса судна) определяется при допущении, что льдина в плане имеет форму круга диаметром d_{Ice}, толщину H и плотность $\rho_{Ice} = 0{,}90$ т/м^3.

$$M_{Ice} = 0{,}25\pi d_{Ice}^2 H\rho_{Ice} = 0{,}707 d_{Ice}^2 H; \qquad (6.3\text{-}1)$$

значение диаметра льдины принимается равным ее характерному размеру в соответствии с принятыми градациями характеристики битого льда:

обломки ледяных полей – льдины размером 100 — 500 м;

крупнобитый лед – льдины размером 20 — 100 м;

мелкобитый лед – льдины размером 2 — 20 м;

куски льда (тертый лед) – льдины размером 0,5 — 2 м.

Предел прочности льда на изгиб, σ_f и измеритель динамической прочности льда на раздробление, a_p определяются по следующим формулам:

$$\sigma_f = 0{,}25 k_n \varphi(H) \text{ МПа}; \qquad (6.3\text{-}2)$$

$$a_p = 100 k_n \varphi(H) \qquad (6.3\text{-}3)$$

$$\text{при } \varphi(H) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{1/6} + \left|\right|_{H > H_0}\left(\frac{H}{H_0} - 1\right);\ H_0 = 0{,}7, \qquad (6.3\text{-}4)$$

где $k_n = 0{,}8$ для осеннего периода навигации;
$k_n = 1{,}2$ для зимне-весеннего периода навигации.

Значение безразмерного коэффициента m в формуле для определения несущей способности ледяного покрова (6.2-9) и зависимости (6.2-10) в соответствии с существующими рекомендациями может изменяться в довольно широком диапазоне, ограниченном следующими экстремальными значениями: $0{,}52 \leqslant m \leqslant 1{,}33$. В качестве расчетного значения коэффициента m следует принимать его наибольшее значение ($m = 1{,}33$).

Выбор расчетного режима взаимодействия корпуса судна со льдом (набора режимов) (табл. 6.3-2) производится в соответствии с рекомендациями разделов 4 и 5.

Данные о фактической прочности конструкций корпуса (обшивки и балок набора) в районе взаимодействия судна со льдом представляются в виде таблиц (табл. 6.3-3 — 6.3-6) и графиков (рис. 6.3-3), определяющих изменение погонной нагрузки и/или максимального давления в зоне контакта в зависимости от высоты зоны контакта $q(b)$ или $p(b)$. Предельное (максимальное) значение высоты зоны контакта зависит от особенности конструкции и принимается таким образом, чтобы пятно приложения нагрузки не выходило за опорный контур (т.е. не пересекало палубы и платформы).

Таблица 6.3-2

Параметры внешних условий

$M_л$ — расчетная масса льдины, т; $C_M = \Delta/M_л$ — относительная масса льдины; R — радиус скругления кромки льда, характеризующий геометрию кромки ледяного поля/плавающей льдины в зоне контакта судна со льдом, м; m — условный коэффициент, характеризующий несущую способность ледяного покрова; σ_f — предел прочности льда на изгиб, т/м^2; a_p — условный безразмерный параметр (измеритель), характеризующий динамическую прочность льда при раздроблении.				
Δ =		т		
№ расч. варианта	1	2	3	4
Тип ледяного покрова				
$M_л$, т				
$C_M = \Delta/M_л$				
R, м				
m				
σ_f, т/м^2				
a_p				

Таблица 6.3-3

Расчетные значения параметров фактической прочности обшивки (два пластических шарнира)

s' = ... мм; R_{eH} = ... МПа					
b, м					
$p(b)$, кПа					

Таблица 6.3-4

Расчетные значения параметров фактической прочности балок основного набора (сдвиг)

f_c' = ... см^2; R_{eH} = ... МПа; a = ... м; l = ... м					
b/l	0,1	0,2			0,8
$k_M(b/l)$					
b, м					
$p(b/l)$, кПа					
$q(b/l)$, кН/м					

Таблица 6.3-5

Расчетные значения параметров фактической прочности балок основного набора (изгиб)

W' = ... см^3; R_{eH} = ... МПа; a = ... м; l = ... м					
b/l	0,1	0,2			0,8
$k_M(b/l)$					
b, м					
$p(b/l)$, кПа					
$q(b/l)$, кН/м					

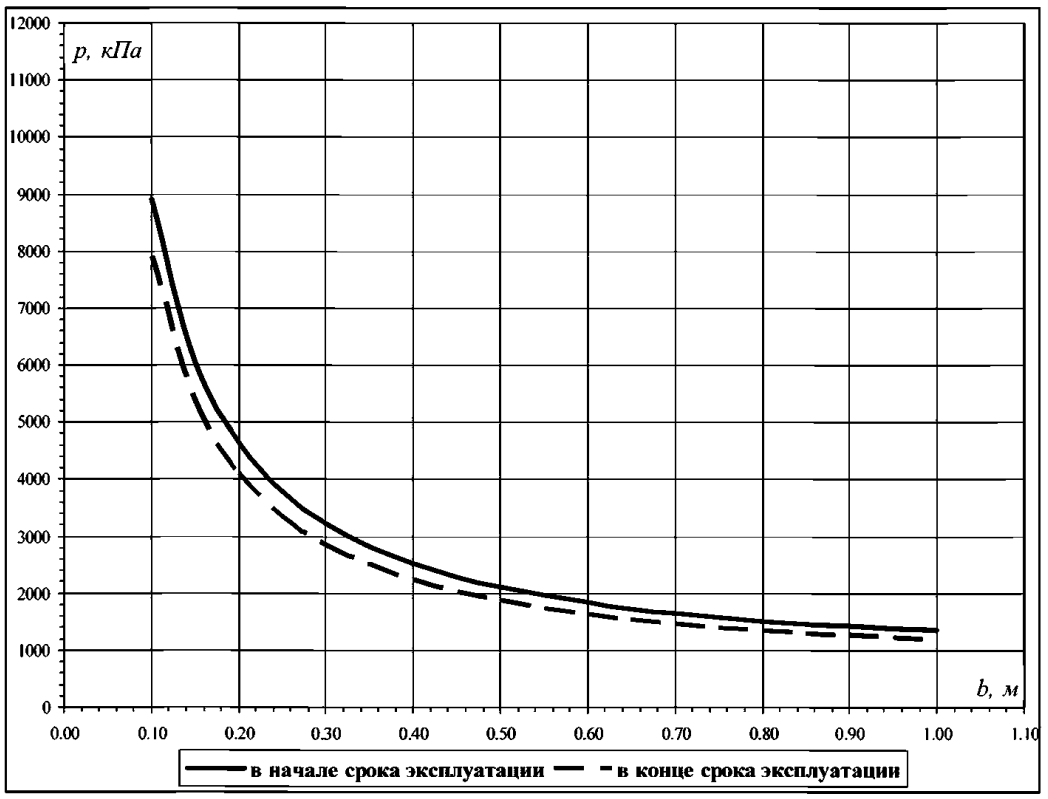


Рис. 6.3-3 Кривая строительной и фактической прочности балок основного набора (изгиб)

Таблица 6.3-6

Расчетные значения параметров фактической прочности конструкций корпуса и параметры огибающей кривой в районе: .....

$s' =$ ... мм; $f_c' =$ ... см^2; $W' =$ ... см^3; $R_{eH} =$ ... МПа; $a =$ ... м; $l =$ ... м						
	b/l					
Тип кривой фактической прочности	$p_1(b/l)$, кПа					
	$p_2(b/l)$, кПа					
	$p_3(b/l)$, кПа					
	$p_4(b/l)$, кПа					
	$p_5(b/l)$, кПа					
	...					
Огибающая	$p(b/l)$, кПа					

Примечание:

$p_1(b/l)$, кПа — расчетные давления для обшивки;
$p_2(b/l)$, кПа — расчетные давления для балок основного набора (пролетное сечение, изгиб);
$p_3(b/l)$, кПа — расчетные давления для балок основного набора (опорное сечение, изгиб);
$p_4(b/l)$, кПа — расчетные давления для балок основного набора (пролетное сечение, сдвиг);
$p_5(b/l)$, кПа — расчетные давления для балок основного набора (опорное сечение, сдвиг);
.... — другое;
$p(b/l)$, кПа — расчетные значения параметров фактической прочности для конструкции в целом (огибающая).

6.4 Результаты расчета допустимых скоростей

Результаты расчета представляются в виде таблиц (табл. 6.4) и графиков, определяющих допустимые сочетания (комбинации) скорости движения судна и толщины льда при заданной кривой фактической прочности конструкций.

Такие результаты приводятся для каждого выбранного расчетного сечения корпуса судна в пределах носового заострения, а также для всей носовой оконечности в целом (огибающих кривых ледовой прочности, полученных для каждого расчетного сечения).

В целях контроля результатов расчета в таблицах приводятся значения параметров кривой допустимых

Таблица 6.4

Параметры кривой допустимых скоростей

Тип кривой фактической прочности															
1				...				NT				Огибающая			
H	$v_0 l$	v_{0I}	v_{0II}	H	$v_0 l$	v_{0I}	v_{0II}	H	$v_0 l$	v_{0I}	v_{0II}	H	$v_0 l$	v_{0I}	v_{0II}

Примечание:
H — толщина льда;
v_0 — расчетная скорость поступательного движения судна;
l — коэффициент приведения скорости судна к направлению удара;
$v_0 l$ — допустимая скорость судна относительного сжатия судна и льдины;
v_{0I} — допустимая скорость судна при первичном (прямом) ударе;
v_{0II} — допустимая скорость судна при вторичном (отраженном) ударе;
v_{0II} — количество типов кривой строительной прочности.

скоростей для каждого типа кривой строительной прочности и огибающая для всех типов кривых для каждого расчетного сечения. Таким образом, если выбирается 5 расчетных сечений по длине оконечности и 4 типа кривых строительной прочности, то выходные результаты будут состоять из $(4 + 1) \times 5 + 1 = 26$ табличных блоков.

Рекомендуется форма представления результатов в табличной форме.

На основании данных табл. 6.4 строится итоговая кривая допустимых скоростей движения судна в графической форме.

7 БЕЗОПАСНЫЕ ДИСТАНЦИИ ПРИ ДВИЖЕНИИ СУДНА ПОД ПРОВОДКОЙ ЛЕДОКОЛА

В данном разделе выполняется расчет минимальной безопасной дистанции проводки судна.

Минимальная безопасная дистанция – один из показателей, который существенно влияет на эффективность эксплуатации судна во льдах.

Безопасная дистанция определяется для случая экстренного торможения судна с реверсированием гребного винта при движении судна в канале за ледоколом при резком торможении и остановке лидирующего ледокола (судна в караване). Судно должно погасить свою инерцию и остановиться, чтобы избежать столкновения.

7.1 Методика определения безопасной дистанции

Безопасная дистанция проводки судна определяется с помощью диаграмм в зависимости от скорости движения судна при фиксированных значениях толщины льда.

При определении дистанции нужно учитывать, что сразу после внезапной остановки ледокола или впереди идущего в составе каравана 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. Длина участка свободной от льда части канала за кормой ледокола составляет 150 — 200 м в зависимости от мощности ледокола и толщины льда. Таким образом, общее время, затрачиваемое судном на совершение маневра, слагается из времени передачи команды, времени реверса гребной установки и времени, которое непосредственно затрачивается на погашение инерции. Соответственно, длина пробега будет зависеть от скорости проводки, параметров льда и загрузки судна. Чем тяжелей ледовые условия, тем меньше значение эффективной безопасной дистанции.

При расчете характеристик инерции судна, от которых зависит эффективная безопасная дистанция, рассматривается общее дифференциальное уравнение неустановившегося прямолинейного движения судна в относительных координатах

$$g\Delta(1 + \lambda_{11})Fr\frac{dFr}{d\zeta} = \overline{T}(Fr) - R_л(Fr), \qquad (7.1\text{-}1)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с^2;
Δ — массовое водоизмещение судна, т;
λ_{11} — коэффициент присоединенной массы воды и льда;
$Fr = v/\sqrt{gL}$ — безразмерный критерий динамического подобия Фруда;
$\overline{T}(Fr)$ — суммарная тяга гребных винтов судна, кН;
$R_л(Fr)$ — полное ледовое сопротивление судна при движении во льдах, кН;
$\zeta = L_{БД}/L$ — относительная длина пробега судна, определяющая минимальную безопасную дистанцию при движении судна во льдах под проводкой ледокола.

Для решения рассматриваемого уравнения вводится допущение о квазистационарности процесса движения судна. В этом случае сопротивление можно определить известными аналитическими или экспериментальными методами, а суммарную тягу гребных винтов судна T — считать постоянной, равной суммарной тяге гребных винтов судна на швартовном режиме $\overline{T}_{шв}$. С учетом вышеизложенного, правую часть дифференциального уравнения движения судна можно представить в следующем виде:

$$\overline{T}(Fr) - R_л(Fr) = \overline{T}_{шв} - [R_в + R_{лч}] =$$

$$= \overline{T}_{шв} - [R_в + (R_{лч} + R_{ск1} + R_{ск2}], \qquad (7.1\text{-}2)$$

где $R_{лч}$ — «чистое» ледовое сопротивление судна при движении во льдах;

$R_{пр}$ — «прямое» ледовое сопротивление судна при движении во льдах, практически не зависящее от скорости его хода;

$R_{ск1} = c_1 Fr$ и $R_{ск2} = c_2' Fr^2$ — «скоростные» составляющие ледового сопротивления судна при движении во льдах, зависящие от скорости его хода и пропорциональные числу Fr и квадрату числа Fr соответственно;

$R_в = c_2'' Fr^2$ — полное гидродинамическое сопротивление судна при движении на чистой воде, зависящее от скорости его хода и принимаемое в данном расчете (с учетом допущения некоторой теоретической условности) пропорциональным квадрату числа Fr; c_1, c_2' и c_2'' — постоянные коэффициенты.

В этом случае общее дифференциальное уравнение движения судна в относительных координатах сводится к нелинейному дифференциальному уравнению первого порядка с разделяющимися переменными, решить которое в дальнейшем можно любым известным методом. В частности, предлагается решать уравнения указанного типа численным методом с последовательным применением известных (табличных) аналитических решений.

Окончательные расчетные выражения для определения длины пробега судна при выполнении того или иного стандартного маневра могут быть получены при следующих начальных условиях:

для длины пробега судна при «останове» во льдах («полный вперед» → «стоп»):

$$\frac{dFr}{d\zeta} = -\frac{R_л(Fr)}{g\Delta(1+\lambda_{11})Fr} = -\frac{R_{пр} + c_1 Fr + (c_2' + c_2'')}{g\Delta(1+\lambda_{11})Fr}; \qquad (7.1\text{-}3)$$

$$\zeta = -g\Delta(1+\lambda_{11})\int_{Fr_н}^{Fr_к} \frac{Fr}{R_{пр} + c_1 Fr + (c_2' + c_2'')Fr^2}\, dFr; \qquad (7.1\text{-}4)$$

для длины пробега судна при «разгоне» во льдах («стоп» → «полный вперед»):

$$\frac{dFr}{d\zeta} = -\frac{R_л(Fr) \pm T_{шв}}{g\Delta(1+\lambda_{11})Fr} =$$

$$= -\frac{(R_{пр} \pm \overline{T}_{шв}) + c_1 Fr + (c_2' + c_2'')Fr^2}{g\Delta(1+\lambda_{11})Fr}; \qquad (7.1\text{-}5)$$

$$\zeta = -g\Delta(1+\lambda_{11})\int_{Fr_н}^{Fr_к} \frac{Fr}{(R_{пр} \pm \overline{T}_{шв}) + c_1 Fr + (c_2' + c_2'')Fr^2}\, dFr, \qquad (7.1\text{-}6)$$

для длины пробега судна при «торможении» во льдах («полный вперед» → «полный назад»):

$$\frac{dFr}{d\zeta} = -\frac{R_л(Fr) \pm T_{зх}}{g\Delta(1+\lambda_{11})Fr} =$$

$$= -\frac{(R_{пр} \pm \overline{T}_{зх}) + c_1 Fr + (c_2' + c_2'')Fr^2}{g\Delta(1+\lambda_{11})Fr}; \qquad (7.1\text{-}7)$$

$$\zeta = -g\Delta(1+\lambda_{11})\int_{Fr_н}^{Fr_к} \frac{Fr}{(R_{пр} \pm \overline{T}_{зх}) + c_1 Fr + (c_2' + c_2'')Fr^2}\, dFr. \qquad (7.1\text{-}8)$$

В последнем случае к длине пробега судна, вычисленного по формуле (7.1-8), необходимо добавить поправку на длину пути, проходимого судном за время, в течение которого осуществляется реверс его гребного винта. Данную поправку вычисляют с помощью формулы (7.1-4), при этом известно, что для ледоколов, у которых время реверса гребной установки незначительно (~ 10 — 15 с), она невелика. У судов, имеющих дизельную энергетическую установку, время реверса гребной установки составляет ~60 — 110 с, поэтому для них значение вводимой поправки оказывается существенным.

Непосредственное вычисление длины пробега судна по формулам (7.1-3) — (7.1-6) производится при помощи следующих табличных аналитических решений уравнений:

$$\int \frac{x}{X}\, dX = \frac{1}{2a} \ln X - \frac{b}{2a}\int \frac{1}{X}\, dX; \qquad (7.1\text{-}9)$$

$$\int \frac{1}{X}\, dX = \frac{2}{\sqrt{D}} \operatorname{arctg} \frac{2ax+b}{\sqrt{D}}, \qquad (7.1\text{-}10)$$

где $X = ax^2 + bx + c$; $D = 4ac - b^2 > 0$;
$x = Fr$;
$a = c_2' + c_2''$; $b = c_1$;
$c = R_{пр}$, $c = R_{пр} \pm T_{шв}$ или $c = R_{пр} \pm \overline{T}_{зх}$ в зависимости от того, какой стандартный маневр выполняет судно.

7.2 Исходные данные для расчета эффективной безопасной дистанции

Для определения эффективной безопасной дистанции проводки необходимы следующие исходные данные:

характеристики условий загрузки судна (осадки носом и кормой, водоизмещение, характеристики формы корпуса). Должны быть рассмотрены, как минимум, два случая загрузки судна: в полном грузу и в балласте;

характеристики сплоченности льда в канале. Рассматриваются три возможные ситуации, различающиеся по сплоченности: 5 — 6 баллов, 7 — 8 баллов, 9 — 10 баллов;

общая информация о движительном комплексе и характеристики работы энергетической установки при реверсе (продолжительность реверса);

диапазон толщин льда в районе вероятной эксплуатации который выбирается в соответствии с рекомендациями, приведенными в разделе 4;

диапазон скоростей движения судна в канале, который выбирается в соответствии с рекомендациями, приведенными в разделе 6.

Рекомендуется следующая структура исходных данных.

7.3 Результаты расчетов

Результаты расчетов должны быть представлены в табличной (табл. 7.3) и графической форме. Графики строятся на основании данных (табл. 7.3) и представляют собой результаты расчетов в виде зависимостей безопасной эффективной дистанции от скорости движения судна в канале за ледоколом при различной толщине льда. Такие графики должны быть приведены для всех рассматриваемых состояний загрузки судна и различной сплоченности льда в канале. Так, если рассматриваются два случая загрузки судна и три градации по сплоченности, количество графических иллюстраций должно быть равно 6.

Таблица 7.2

Исходные данные для расчета минимальных безопасных дистанций

L =		м	расчетная длина судна, соответствующая длине судна по конструктивной ватерлинии
B =		м	расчетная ширина судна, соответствующая ширине судна по конструктивной ватерлинии в сечении мидель-шпангоута
d =		м	расчетная осадка судна, соответствующая осадке судна по конструктивную (летнюю грузовую) ватерлинию (т.е. осадке судна в полном грузу в начале рейса)
L/B =			отношение расчетной длины судна к его расчетной ширине
B/d =			отношение расчетной ширины судна к его расчетной осадке
$C_в$ =			коэффициент общей полноты, соответствующий расчетной осадке судна
C_{WP} =			коэффициент полноты площади конструктивной ватерлинии
$C_м$ =			коэффициент полноты площади мидель-шпангоута
$C_в/C_м$ =			коэффициент продольной полноты
C_{WPB} =			коэффициент полноты площади носовой ветви конструктивной ватерлинии
Ω =		$м^2$	площадь смоченной поверхности корпуса судна
$V = C_B LBd$ =		$м^3$	объемное водоизмещение судна при его расчетной осадке
$\Delta = \rho_B V$ =		т	массовое водоизмещение судна при его расчетной осадке
$l = L/V^{1/3}$ =			относительная длина судна
a_0 =		град.	угол входа (заострения) носовой ветви конструктивной ватерлинии
$\mathrm{tg}a_0$ =			
λ_{11} =			коэффициент присоединенной массы воды и льда
v_{ow} =		уз.	техническая (спецификационная) скорость хода судна в полном грузу на чистой воде ($H_л$ = 0 м)
		м/с	
k_R =			коэффициент реализации технической скорости хода судна на чистой воде
$v_{DOW} = k_R v_{OW}$ =		уз.	расчетная (эксплуатационная) скорость хода судна в полном грузу на чистой воде (Нл = 0 м)
		м/с	
$F_{r\ DOW}$ =			число Фруда, соответствующее расчетной (эксплуатационной) скорости хода судна в полном грузу на чистой воде V_{DOW}
g =		$м/с^2$	ускорение свободного падения
$\rho_в$ =		$кг/м^3$	расчетная плотность морской воды
$\rho_л$ =		$кг/м^3$	расчетная плотность морского льда
$\zeta_в$ =		$м^2/с$	кинематическая вязкость морской воды (при $t_в$ = 4 °С)
$f_{гр}$ =			коэффициент трения движения льда по гладкой стали

Таблица 7.3

Расчетный вариант № 1:	$H_л$ =			м		
	S =			балл.		
	$S_{сж}$ =			балл.		
	$B_{КАН} = f(S,H_л,v_s^{ЛЕД})$ =			м		
	$n_{КАН} = B_{КАН}/B$ =					
	$k_i = f(S, n_{КАН})$ =					
	$k_2 = f(S)$ =					
	k_3 = const =					
	k_4 = const =			$м^2$		
Расчет «чистого» и полного ледового сопротивления судна при движении в мелкобитых льдах						
$Fr = v/(gL)^{1/2}$	—					
v	м/с					
v_s	уз.					
C_{2B}	кгс					
	кН					
$R_В = C_{2B}Fr^2$	кгс					
	кН					
$R_{ПР}$	кгс					
	кН					
$C_{1л}$	кгс					
	кН					
$C_{2л}$	кгс					
	кН					
$R_{СК1} = C_{1л}Fr$	кгс					
	кН					
$R_{СК2} = C_{2л}Fr^2$	кгс					
	кН					
$R_{лч} = R_{ПР} + R_{СК1} + R_{СК2}$	кгс					
	кН					
$R_л = R_В + R_{лч}$	кгс					
	кН					
Расчет минимальных безопасных дистанций при движении судна в мелкобитых льдах в канале за ледоколом						
$\zeta = L_{БД}/L = -\Delta g(1 + \lambda_{11}) \int Fr/[(C_{2В} + C_{2Л})Fr^2 + C_{1л}Fr + R_{ПР}]dFr$						
$x = Fr$	—					
$a = C_{2в} + C_{2л}$	кН					
$b = C_{1л}$	кН					
$c = R_{ПР}$	кН					
$X = ax^2 + bx + c$	—					
$D = 4ac - b^2$	—					

при $D > 0$: $\int[x/X]dx = 1/(2a)\ln X - b/(2a)\int[1/X]dx = 1/(2a)\ln X - b/(2a)2/D^{1/2}\text{arctg}[(2ax + b)/D^{1/2}]$							
$D^{1/2}$		—					
$1/(2a)$		—					
$b/(2a)$		—					
$2/D^{1/2}$		—					
$\ln X$		—					
$(2ax + b)/D^{1/2}$		—					
$\text{arctg}[(2ax + b)/D^{1/2}]$		—					
$\int[x/X]dx$	$x = Fr_H$	—					
$\int[x/X]dx$	$x = Fr_K = 0$	—					
$\zeta = L_{БД}/L$		—					
$L_{БД} = \zeta L$		м					

8 ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Данный раздел является заключительным и оформляется в произвольном виде.

В общем случае в разделе приводятся:

допустимые режимы эксплуатации;

допустимые значения параметров (скорость движения, толщина льда, сплоченность льда и т.п.);

безопасные дистанции при движении судна в канале за ледоколом.

Российский морской регистр судоходства

Методические рекомендации по выполнению расчета допустимых режимов движения судна во льдах

Редакционная коллегия Российского морского регистра судоходства
Ответственный за выпуск *А. В. Зухарь*
Главный редактор *М. Р. Маркушина*
Компьютерная верстка *И. И. Лазарев*

Лицензия ИД 04771 от 18.05.01
Подписано в печать 23.05.12. Формат 60×84/16. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,9. Тираж 200. Заказ 2446.

Российский морской регистр судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8

gost.e-ecolog.ru