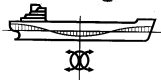


В.Н. Лазарев

Н.В. Юношева

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СУДОВОГО КОРПУСА И ОСНОВЫ ПРОЧНОСТИ СУДОВ

Учебник для судостроительных техникумов



Ленинград
„Судостроение“

1989

Рецензент канд. техн. наук М. К. Глобин, О. Е. Кравченко (приметия Юмессе Невеловского судостроительного техникума)

- Д17 Яздрас В. Н., Юмессе Н. В.
Проектирование конструкций судового корпуса и основы прочности судов: Учебник. — Л.: Судостроение, 1989. — 320 с., ил.
ISBN 5-7355-0132-1

В учебнике изложены основы строительной механики, общие положения проектирования и разработки конструкций корпуса морских транспортных судов. Приведены требования и методы определения расчетных размеров конструктивных связей, данные о конструкциях релл узла.

Предназначен для студентов судостроительных техникумов, обучающихся по специальности «Судостроение» и может быть использован студентами кораблестроительных вузов в курсовом проектировании.

Л 39420000 000 14 экз
04(00)—00

ББК 39.42.01

ISBN 5-7355-0132-1 © Издательство «Судостроение», 1989.

Учебник предназначен для учащихся средних специальных учебных заведений судостроительной отрасли и составлен в соответствии с основной программой по специальности «Судостроение».

Предметом Дисциплины является ознакомление учащихся судостроительных техникумов с научными принципами и технико-экономическими основами проектирования конструкций корпуса морских судов, приобретение навыков практического проектирования и выполнения сложных проверочных расчетов судовых корпусных конструкций. Одной из основных задач проектирования судна является создание прочных и надежных, технологичных и экономичных конструкций корпуса. От качества проектирования, изготовления и сборки конструкций корпуса зависит способность судна выполнять предусмотренные проектом функции и быть рентабельным. В процессе проектирования и постройки судов актуальными остаются задачи по рациональному, экономичному использованию материалов, энергетических ресурсов, снижению трудоемкости производства деталей, узлов, секций, блоков и корпуса в целом, по разработке условий применения малоотходных и безотходных технологических процессов.

Теоретической основой проектирования судовых конструкций является строительная механика морских судов. Предмет этой науки — совокупность аналитических методов, используемых для расчета внутренних усилий (напряжений), возникающих в элементах конструкции корпуса (в балках и в пластинках) внешними силами.

Реализуемые при создании судов технические идеи и конкретные решения должны отвечать уровню развития техники не только текущего периода, но и на ближайшие 10–20 лет. Именно поэтому во всем цикле создания объектов судостроения весьма важна и ответственная роль отводится науке. Именно ученых-кораблестроителей, труды которых способствовали развитию отечественного и зарубежного судостроения, широко известны во всем мире. Это Л. Эйлер — в его труде «Наука о

корабле» был обоснован научный подход к решению проблемы внешних сил; вице-адмирал С. О. Макаров — основоположник учения о непотопляемости; проф. Н. Г. Бубнов, положивший начало формированию самостоятельной дисциплины — строительной механики корабля; академик А. Н. Крылов — ему принадлежат труды по теории корабля и строительной механике. В числе ученых, достойно продолжавших традиции русской научной школы судостроителей, следует назвать имена академиков Ю. А. Шеманского, В. Л. Пондочкина, члена-корреспондента АН СССР П. Ф. Пяковского, профессоров В. Г. Власова, Б. М. Маленкова, А. А. Курдюмова и др.

Необходимая надежность и работоспособность конструкций корпуса закладывается при проектировании, обеспечивается при постройке и реализуется во время эксплуатации.

Опыт эксплуатации морских судов показывает, что повреждение корпусных конструкций в условиях нормальной эксплуатации — не результат недостатка общей или даже местной прочности, за исключением ряда случаев ледовых повреждений при плавании в Арктике, а следствие недостаточного внимания к конструктивному оформлению узлов корпуса, к качеству изготовления деталей и сборки судовых конструкций. Причиной повреждения может быть и материал, не соответствующий условиям работы конструкций.

В практику проектирования широко внедряется электронно-вычислительная техника. В настоящее время около 70 % объема конструкторских документов выпускается с помощью ЭВМ. Ведутся работы по дальнейшей автоматизации проектно-конструкторских работ. Получил развитие обычный метод проектирования, предусматривающий переходом на заводско-строительных блочно-модульного метода организации постройки судов. Все это способствует выполнению задач, поставленных XXVII съездом КПСС, по развитию судостроения, по обеспечению народного хозяйства СССР новыми транспортными, промысловыми и другими судами.

Материал учебника распределен между авторами следующим образом: «От автора», § 2; 12—15 подготовлены совместно Н. В. Юнковой и В. Н. Лазаревым; § 1, 3—11, 22, 56—63 и приложение написаны Н. В. Юнковой; § 16—21, 23—25; 28—53 — В. Н. Лазаревым; § 26, 27, 54 и 55 — М. К. Глазманом.

Отзывы и пожелания по содержанию учебника просьба направлять по адресу: 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8, издательство «Судостроение».

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- B — линия судна на миделе на уровне грузовой ватерлинии (ГВЛ), м.
 C_B — коэффициент обшей плавучести корпуса судна.
 D — высота борта судна на миделе, м.
 d — осадка судна по летнему ГВЛ на миделе, м.
 $g = 9,81$ — ускорение свободного падения, м/с².
 k_{Σ}, k_c — коэффициенты двукратных нормальных и касательных напряжений.
 L — длина судна по уровню летнего ГВЛ, м.
 q — интенсивность внешней нагрузки, мН/м.
 h_{Σ} — добавка на корпусом к толщине летнего обшивки (шпангоута), мм.
 η_{Σ}, η_c — коэффициенты учета коррозии блочек при определении момента сопротивления к моменту истечения допустимого срока.
 Δ — водоизмещение судна, т.
 $\rho = 1,025$ — плотность морской воды, т/м³.
 ϕ — температурная плотность груза, т/м³.
 σ — расчетное нормальное напряжение, МПа.
 σ_{Σ} — нормативный предел текучести сплава, МПа.
 σ_{Σ} — предел текучести сплава, МПа.
 τ — расчетное касательное напряжение, МПа.
 τ_{Σ} — нормативный предел текучести сплава по касательным напряжениям, МПа.

РАЗДЕЛ I. ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ МОРСКИХ СУДОВ

ГЛАВА I. ИЗГИБ И УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЕЙ-БАЛОК И СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

§ 1. Изгиб статически определенных балок

Основные понятия и определения. Твердое тело, длина которого существенно превышает наибольший размер поперечного сечения, называют стержнем. Стержень, нагруженный поперечными по отношению к его оси силами, именуют балкой.

Поперечное сечение балки может быть симметричным и несимметричным в зависимости от используемых в конструкции профилей. У балки постоянного сечения форма и размеры поперечных сечений не изменяются по длине. В конструкции судового корпуса применяют балки и с переменным по длине сечением.

Геометрическое место центров тяжести (ЦТ) поперечных сечений образует продольную ось балки. Балка считается прямой, если продольная ось ее до приложения внешних сил прямолинейна.

Балочные элементы судовых конструкций подвергаются действию распределенной поперечной нагрузки, а некоторые из них — действию сосредоточенных сил. Под действием поперечной нагрузки балка изгибается и ее продольная ось образует кривую линию, называемую линией прогиба. Если балка после нагрузки восстанавливает свою первоначальную форму и размеры, то балку и ее деформацию при изгибе считают упругими. Та же балка при увеличении нагрузки может получить остаточные деформации, которые в конструкции корпуса либо существенно ограничены нормативами, либо же допускаются. Ниже рассмотрим только линейно-упругие стержни-балки, т. е. такие, в которых между напряжениями и деформациями существует линейная зависимость.

Предположим, что внешние поперечные силы, действующие на балку, и линия прогиба расположены в одной плоскости, проходящей через продольную ось балки. Изгиб такой балки называют плоским.

Балки считают статически определенными, если все реактивные усилия можно определить из уравнений равновесия (уравнений статики). Типы статически определенных балок показаны на рис. 1.1.

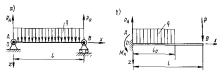


Рис. 1.1. Типы статически определенных балок с положительным изгибанием осей: а — свободно опертая балка (с зависимой опорой А, В); б — консольная балка (с жестко заделанным левым концом).

q — интенсивность поперечной нагрузки; Р — сосредоточенная нагрузка; R_A , R_B — реакции опор; M_A — опорный изгибающий момент; l — пролет балки.

Под действием внешней нагрузки в поперечных сечениях балки появляются нормальные σ и касательные τ напряжения. Эти напряжения характеризуют меру взаимодействия двух частей балки, мысленно разделенных рассматриваемым сечением. Если $\sigma > 0$, части балки отталкиваются одна от другой, а если $\sigma < 0$ — притягиваются. Аналогично в направлении τ обе части балки внешними силами сдвигаются одна относительно другой. Касательному напряжению, действующему в поперечном сечении балки, знак не присваивается.

Результирующими (равнодействующими) в рассматриваемом сечении x являются перерезывающая сила $N(x)$ и изгибающий момент $M(x)$, обуславливающие соответственно касательными и нормальными напряжениями.

Принятые в строительной механике правила знаков показаны на рис. 1.1 и 1.2. Положительным поперечным прогибом считается прогиб, совпадающий с положительным направлением оси oz (см. рис. 1.1), в положительным углом поворота поперечного сечения — его поворот по часовой стрелке. Сосредоточенные силы, реакции опор и распределенные нагрузки положительны, если их направление совпадает с направлением оси oz . Перерезывающая сила $N(x)$ положительна, если сдвигает левую часть балки относительно рассматриваемого сечения вниз, а правую — вверх (см. рис. 1.2). Изгибающий момент положительный, если изгибает балку выпуклостью вверх.

Чистый изгиб. Теория изгиба балок основывается на приближенной гипотезе плоских нормальных сечений, согласно которой поперечные сечения балки, нормальные к ее нейтральной оси до деформации, остаются плоскими и нормальными к этой оси в деформированном состоянии (рис. 1.3). Гипотеза плоских нормальных сечений выполняется достаточно

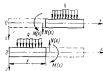


Рис. 1.2. Положительно направленная поперечная нагрузка q , изгибающий момент $M(x)$ и перемещенная ось $N(x)$



Рис. 1.3. Деформация балки при чистом изгибе.
 R — радиус кривизны, N — отклонение (смещение) продольной оси от первоначального положения балки (согбености).

строго лишь в условиях чистого изгиба балки, при котором балка изгибается двумя равными и противоположными направленными моментами. Перерезывающие усилия и касательные напряжения в поперечных сечениях балки при чистом изгибе равны нулю. В результате деформации внутренние, близкие к центру кривизмы волокна сжаты, а внешние — растянуты. Между сжатыми и растянутыми продольными волокнами существует нейтральная поверхность, в которой волокна не меняют своей длины. Линия пересечения нейтральной поверхности балки с плоскостью поперечного сечения называется нейтральной осью данного сечения.

Нормальные напряжения в поперечном сечении балки в случае чистого изгиба определяются по формуле Гука

$$\sigma_x = E\varepsilon_x = E\varepsilon\rho, \quad (1.1)$$

т. е. они линейно изменяются в зависимости от расстояния ε до нейтральной оси (рис. 1.4), где ρ — радиус кривизны изгиба. Используя известную из курса технической механики зависи-

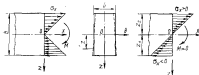


Рис. 1.4. Нормальные напряжения σ_x при чистом изгибе балки.
 h — высота; b — ширина прямоугольного сечения балки.

мость $M/I = E/\rho$, формулу (1.1) можно записать в виде

$$\sigma_x = -Mx/I, \quad (1.2)$$

где I — момент инерции площади поперечного сечения относительно нейтральной оси; M — изгибающий момент. В формулу (1.2) введен знак «минус» для того, чтобы получить $\sigma_x > 0$ при растяжении и $\sigma_x < 0$ при сжатии соответствующих волокон с учетом принятых знаков для моментов и положительного направления (вниз) оси x .

Поскольку напряжения пропорциональны отстоянию данного волокна от нейтральной оси, то при плоском изгибе балки все волокна, равноудаленные от этой оси, имеют одинаковые напряжения. Максимальные напряжения возникают в наиболее удаленных от нейтральной оси волокнах, отстоящих от нее на расстояниях z_1 и z_2 соответственно для нижних и верхних (см. рис. 1.4). Прикладываем изгибающий момент положительным, по формуле (1.2) получим экстремальные значения напряжений:

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_x)_{\max} &= -Mz_1/I = -M/W_1; \\ (\sigma_x)_{\min} &= -M(-z_2)/I = M/W_2, \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

если $|z_1| < |z_2|$.

Отношения $W_1 = I/|z_1|$ и $W_2 = I/|z_2|$, соответствующие наиболее удаленным от нейтральной оси точкам, называются моментами сопротивления изгибу поперечного сечения балки.

Для балок с симметричным относительно горизонтальной оси поперечным сечением, когда $|z_1| = |z_2| = z$, максимальные растягивающие и сжимающие напряжения равны по абсолютному значению

$$\sigma = |\sigma_{\max}| = |-\sigma_{\min}| = -Mz/I = M/W,$$

где величины имеют свои знаки (см. формулу (1.2)).

Пренебрегая величиной малости поперечной деформации балки при изгибе, получим максимальное значение момента сопротивления для прямоугольного сечения высотой h и шириной b

$$W = I/z = (bh^3/12)/(h/2) = b h^2/6.$$

Значения I и W для балок с другой формой поперечного сечения могут быть найдены из справочников по сопротивлению материалов или расчетом.

Общий случай плоского изгиба балок. В общем случае изгиба балки поперечной нагрузкой в сечениях возникают изгибающий момент и перерезывающая сила, которые уравновешиваются соответственно нормальными и касательными напряжениями. Касательные напряжения искажают поперечные сечения балки, бывшие плоскими до изгиба. Однако это искажение, а следовательно, и деформации волокон мало влияют на значения

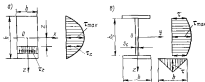


Рис. 1.5. Распределение касательных напряжений в поперечном сечении балки: а — прямоугольного, б — таврового профиля.

нормальных напряжений, полученных по формуле (1.2). Данной формулой можно пользоваться и для определения нормальных напряжений в общем случае изгиба балок.

На основании теоремы Д. И. Журавского, рассмотренной в технической механике, получена формула для вычисления касательных напряжений в горизонтальных слоях балки

$$\tau_x = NS_y / I_x z, \quad (1.4)$$

где N — перерезывающая сила в данном сечении; S_y — статический момент площади сечения, расположенной выше или ниже слоя z , для которого определяются касательные напряжения, относительно нейтральной оси; z — толщина стенки балки. В основу формулы Д. И. Журавского положено допущение о равномерном распределении касательных напряжений по ширине сечения. Согласно известной из курса технической механики теореме о равенстве касательных напряжений в действующих и поперечных сечениях балки, находим по этой же формуле.

Для балки с прямоугольным поперечным сечением высотой h касательные напряжения зависят от z по закону параболы (рис. 1.5, а): $\tau = (N/2I) [(h^2/4) - z^2]$. В крайних верхних и нижних волокнах при $z = \pm h/2$ эти напряжения равны нулю, а на уровне нейтральной оси (при $z = 0$) достигают максимума: $\tau_{max} = N/2I \cdot h^2/4 = 1,5N/F$, где $F = bh$ — площадь поперечного сечения. Следовательно, для балки с прямоугольным поперечным сечением τ_{max} в 1,5 раза больше средних значений $\tau_{cp} = N/F$.

Касательные напряжения в поперечном сечении двутавровой балки по высоте стенки изменяются тоже по закону параболы, но с меньшей разностью между максимальными и минимальными значениями (рис. 1.5, б). В отличие от постоянных напряжений по высоте стенки приближаются к равномерности рас-

пределения касательных напряжений во шпигре полки исключается.

В двутавровых балках стенка воспринимает почти всю перерезывающую силу, поэтому приближение средние касательные напряжения можно найти по формуле $\tau = N/(h_s b_s) \approx \tau_{max}$, где h_s и b_s — соответственно высота и толщина только стенки балки.

Действительные средние касательные напряжения с учетом работы на срез и поворот $\tau_{cp} = N/\bar{\omega} < \tau_{max}$, где $\bar{\omega} = z_0/S_y$ — приведенная площадь стенки; z_0 — допускаемые касательные напряжения. Принятая площадь стенки для сечения на уровне нейтральной оси катаных профилей имеет пределы $0,85 \leq \bar{\omega} \leq 0,95$ (ω — площадь поперечного сечения стенки). На условия прочности стенки на срез приведенная площадь профиля равна $\bar{\omega} = N/\tau_{cp}$. Фактическую площадь стенки двутавровых балок вычисляют по формуле

$$\bar{\omega} = b/0,85 \approx 1,15N/\tau_{cp}, \quad (1.5)$$

откуда $\tau \approx 1,15 N/\bar{\omega} \leq \tau_{cp}$.

Дифференциальное уравнение изгиба балки и его интегрирование. Из курса технической механики известно, что основное дифференциальное уравнение изгиба балки постоянного поперечного сечения имеет вид

$$EIw'''' = \pm M, \quad (1.6)$$

где EI — жесткость балки. Уравнение (1.6) позволяет определить перемещения точек, лежащих на оси балки при изгибе. Двукратно интегрируя обе части этого уравнения, можно найти значение прогиба w балки в зависимости от координаты x . При первом интегрировании уравнения (1.6) получим значения w' в зависимости от x , т. е. угол поворота данного поперечного сечения балки, а при втором интегрировании — прогиб w

$$EIw'' = \int M dx \quad \text{и} \quad EIw = \iint M dx dx.$$

Определим ordinаты (прогибы) изогнутой оси балки и углы поворота поперечных сечений. Рассмотрим консольную балку, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью q (рис. 1.6). Изгибающий момент в произвольном сечении балки с координатой x характеризуется выражением $M = qx^2/2$. Подставляя найденное значение для M в дифференциальное уравнение изгиба, получим $EIw'''' = qx^2/2$. Интегрируя дважды последовательно обе части уравнения, найдем

$$EIw' = qx^3/6 + C_1$$

$$EIw = qx^4/24 + C_1x + D_1$$



Рис. 1.6. Расчетная схема консольной балки.

где C и D — постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий, т. е. из условий закрепления опорных сечений балки. Для балки, жестко заделанной на правом конце, граничные условия имеют вид: при $x = l$ $\psi' = 0$; $\omega = 0$, т. е. на правом конце балки стрелка прогиба и угол поворота равны нулю:

$$0 = qR^2/6 + C; \quad 0 = qR^2/24 + Cl + D,$$

откуда $C = -qR^2/6$; $D = -qR^2/24 + qR^2/6 = qR^2/8$. Подставляя значения C и D в выражения для прогибов и углов поворота, получим

$$EI\psi' = qR^2/6 - qR^2/6;$$

$$EI\omega = qR^2/24 - qR^2/6 + qR^2/8.$$

Выражения для углов поворота и прогибов окончательно примут следующий вид:

$$\psi' = \frac{qR^2}{6EI} - \frac{qR^2}{6EI} = \frac{qR^2}{6EI} \left(\frac{x^2}{R^2} - 1 \right);$$

$$\omega = \frac{qR^2}{24EI} - \frac{qR^2}{6EI} x + \frac{qR^2}{8EI} \left(\frac{x^3}{R^3} - 4\frac{x}{R} + 3 \right);$$

$$\psi_{x=0} = -\frac{qR^2}{6EI}; \quad \omega_{x=0} = qR^2/8EI.$$

Рассмотренный метод интегрирования дифференциального уравнения упругой линии балок используют для определения прогибов и углов поворота балок, у которых изгибающий момент представляет собой непрерывную функцию координаты x на протяжении всей длины балки, т. е. выражение изгибающего момента одинаково для любого сечения балки. При интегрировании такого уравнения число произвольных постоянных не превышает двух. Если на балку действуют сосредоточенные нагрузки, сосредоточенные на отдельных участках балки P , Q (рис. 1.7), то уравнение изгиба надо интегрировать по участкам. В этом случае функция M_x имеет разрыв, что приводит к увеличению произвольных постоянных по две на каждый участок. Для определения произвольных постоянных кроме граничных условий необходимо учитывать еще условия сопряжения на стыке участков. Поэтому указанный метод интегрирования приведет к решению громоздкой системы линейных уравнений с большим числом неизвестных. Интегрирование основного дифференциального уравнения изгиба балки упрощается, если использовать метод Клебша, который в настоящее время получил наименование метода *начальных параметров*. Сущность его состоит в следующем:



Рис. 1.7. Расчетная схема балки. Поперечные нагрузки действуют на отдельных участках.

изгибающий момент M в сечении балки с текущей координатой x следует выражать только через левые (или только через правые) силы;

если капа-либо распределенная нагрузка действует лишь на части длины балки, то нужно считать ее действующей от сечения, где она начинается, до правого конца балки, приложив на том участке, где она уже не действует, равную ей, но противоположно направленную нагрузку (см. рис. 1.7). Например, для балки изгибающий момент в случае использования этого метода необходимо записывать так:

$$\text{на первом участке } 0 \leq x \leq a, \quad M = -R_1x;$$

$$\text{на втором участке } a \leq x \leq b, \quad M = -R_1x + P(x-a);$$

$$\text{на третьем участке } b \leq x \leq c, \quad M = -R_1x + P(x-a) + q(x-b)^2/2;$$

$$\text{на четвертом участке } c \leq x \leq l, \quad M = -R_1x + P(x-a) + q(x-b)^2/2 - q(x-c)^2/2,$$

или сокращенно

$$M = -R_1x + \int_a^x P(x-a) + \int_b^x q(x-b)^2/2 - \int_c^x q(x-c)^2/2,$$

где знаки $\int_a^x$, $\int_b^x$, $\int_c^x$ показывают, что члены, стоящие за ними, учитываются лишь при $x \geq a$, $x \geq b$, $x \geq c$ и т. д.

Последовательно интегрируя выражения для изгибающего момента, не следует расширять скобки, а нужно принимать $(x-b)$ за новую переменную, например:

$$\int P(x-a) dx = \int P(x-a) d(x-a) = P(x-a)^2/2 + C;$$

$$\int [q(x-b)^2/2] dx = \int [q(x-b)^2/2] d(x-b) = q(x-b)^3/6 + C.$$

При таком методе интегрирования условия сопряжения на различных участках балки удовлетворяются автоматически, и число произвольных постоянных при действии любой нагрузки не превышает двух. Произвольные постоянные интегрирования ищутся вычлеле, так как они относятся ко всему выражению. Например, для рассмотренной балки (см. рис. 1.7) дифференциальное уравнение имеет вид

$$EI\omega'' = -R_1x + \int_a^x P(x-a) + \int_b^x q(x-b)^2/2 - \int_c^x q(x-c)^2/2.$$

Дважды интегрируя это уравнение по методу Клебша, последовательно получим выражения для угла поворота и стрелки

$$EI\omega' = C_1 - R_1 x^2/2 + \frac{1}{2} P(x - a)^2/2 + \frac{1}{2} q(x - b)^2/2 - \frac{1}{2} q(x - c)^2/2;$$

$$EI\omega = C_2 + C_1 x - R_1 x^3/6 + \frac{1}{6} P(x - a)^3/6 + \frac{1}{6} q(x - b)^3/24 - \frac{1}{6} q(x - c)^3/24.$$

Здесь произвольные постоянные C_1, C_2 относятся ко всему выражению и определяются только из граничных условий.

В практических расчетах для определения прогиба и углов поворота однопролетных балок обычно используют таблицы элементов изгиба балок, загруженных нагрузками наиболее часто встречающихся видов (20, т. 1, табл. 5.1). Применение с этой целью методов интегрирования нецелесообразно, так как связано с громоздкими вычислениями.

Если на балку одновременно действуют две нагрузки и более, то элементы ее изгиба получают суммирование элементов изгиба от действия каждой нагрузки. Это частный случай применения принципа наложения.

§ 2. Подбор поперечного сечения балок

Характеристики профилей, работающих на изгиб. Сечение балки, работающей на изгиб, должно воспринимать изгибающий момент и передающую силу. Для обеспечения прочности при работе профиля на срез необходимо знать определенную площадь сечения стенки, а при работе на изгиб — ее распределение по высоте сечения. Задача о подборе профиля с требуемым моментом сопротивления не имеет однозначного решения. Обычно критерием рациональности при подборе элементов профиля требуемой прочности считают минимум расчетного поперечного сечения балки, т. е. минимум ее массы.

Наиболее выгодное распределение материала в сечении профиля, работающего на изгиб, — сосредоточение его в двух параллельных равных поясках, расположенных на определенном расстоянии один от другого ($b = 2z$). Такой профиль называют идеальным. Момент его сопротивления $W = [z]F = 0,5bF$. Для восприятия передвигающейся силы и просто для увеличения совместную работу поясков необходимо часть материала выделить на стенку профиля. Поэтому любой реальный профиль, площадь сечения которого одинакова с идеальным профилем, имеет меньший момент сопротивления $W = 0,5\eta bF$, где $\eta < 1,0$ — коэффициент утончения сечения, предложенный И. Г. Вуколовичем. Однако, сопоставляя профили с одинаковой площадью сечения F , но различной высоты b , можно увидеть, что не всегда большее значение η дает и большее значение W .

Более объективной характеристикой использования материала в сечении профиля является так называемая удельная площадь по моменту сопротивления $C_w = F_0/W^{3/4}$ и по моменту инерции $C_I = F_0/I^{3/4}$. Для профилей, присоединенных к обшивке, F_0 — площадь сечения собственно профиля; W и I — момент сопротивления и момент инерции профиля с присоединенным поиском обшивки. Профиль будет тем выгоднее, чем меньше его удельная площадь.

Для геометрически подобных профилей коэффициенты удельной площади примерно одинаковы. Например, у полосообразов, приваренных к обшивке, $C_w \approx 0,55 \div 0,67$ в зависимости от градуса профиля и сортамента (группы «а» и «б»). У тавровых балок с присоединенным поиском $C_w \approx 0,50 \div 0,55$ и т. д. Чем меньше значение C_w , тем при прочих равных условиях профиль выгоднее.

Моменты сопротивления составного профиля. Чтобы исследовать зависимость момента сопротивления профиля от его элементов, рассмотрим несимметричный двутавровый профиль из однородного материала с элементами (рис. 1.8): f — площадь сечения меньшего пояска; F — площадь сечения большего пояска; w — площадь сечения стенки; h — высота балки между ЦТ поясков. Предполагая, что толщина поясков мала по сравнению с высотой профиля, можно пренебречь значениями собственных моментов инерции поясков.

Найдем зависимость минимального момента сопротивления сечения профиля (из уровня свободного — меньшего пояска) от элементов сечения. Примем ось сравнения проходящей через ЦТ большего пояска параллельно его поверхности (см. рис. 1.8). Площадь поперечного сечения профиля $A = f + F + w$. Статический момент площади относительно оси сравнения $B = fh + 0,5\omega h$. Отстояние нейтральной оси от оси сравнения

$$h_2 = B/A = h(f + 0,5\omega)/(f + F + w).$$

Отстояние меньшего пояска от нейтральной оси

$$h_1 = h - h_2 = h(F + 0,5\omega)/(f + F + w).$$

Момент инерции сечения относительно нейтральной оси

$$I = fh^2 + w(0,5h)^2 + \omega h^2/12 - B^2/A.$$

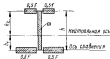


Рис. 1.8. Зависимости составного таврового профиля.

f и F — площади сечения меньшего и большего пояска.

После подстановки значений B и A получим

$$I = k^2 [F + (\alpha/3)(f + F + \alpha/6)(f + F + \alpha)].$$

Минимальный момент сопротивления профиля (на уровне свободного пояска)

$$W = I/b_z = k [f + (\alpha/6)(4F - 2f + \alpha)(2F + \alpha)] = k [f + \alpha/k]. \quad (1.7)$$

Параметр $k = 6(2F + \alpha)/(4F - 2f + \alpha)$. Формула (1.7) была предложена И. Г. Бубновым.

Для анализа зависимости момента сопротивления профиля от элементов его сечения Н. В. Маттес ввел параметр β , характеризующий положение нейтральной оси сечения: $\beta = -h/h_z = (2f + \alpha)/(2F + \alpha) < 1.0$. Поскольку $(4F - 2f + \alpha)/(2F + \alpha) = 2 - \beta$, то формулу (1.7) представим в виде

$$W = k [f + (\alpha/6)(2 - \beta)], \quad (1.8)$$

а формулу момента инерции относительно нейтральной оси — в упрощенном виде

$$I = Wk[1 + \beta] = [k^2(f + \alpha/k)](3 - \beta/k).$$

Сравнивая формулы (1.7) и (1.8), видим, что $k = 6/(2 - \beta)$. Для симметричного двутавра площади поясков равны, т. е. $f = F$; $\beta = 1.0$ и $k = 6$. В случае, когда один поясск большего другого ($F \gg f$), $\beta \rightarrow 0$ и $k \rightarrow 3$. Следовательно, в формуле (1.7) параметр k в зависимости от соотношения площади поясков изменяется в пределах $3 < k \leq 6$.

Минимальный момент сопротивления несимметричного двутавра, как видно из формулы (1.7), в наибольшей степени зависит от высоты профиля h и площади меньшего пояска f . При необходимости увеличить W до требуемого значения в первую очередь следует это сделать за счет пропорционального увеличения h или соответствующего увеличения f , либо за счет увеличения h и f одновременно. В этих случаях потребуется минимальное количество материала для увеличения сечения балки. Увеличение площади сечения стенки и в несколько раз менее эффективно, чем увеличение площади меньшего пояска. Изменение площади большего (присоединенного) пояска мало влияет на изменение минимального момента сопротивления составного профиля.

По необходимому моменту сопротивления поперечного сечения балки с присоединенным пояском выбирается ближайший по сечению профиль симметричного или несимметричного полособульба, у которого момент сопротивления с условным присоединенным пояском больше или равен требуемому (см. табл. 1 и 2 приложения). Если в сечении отсутствует мо-

мент сопротивления профиля с условным присоединенным пояском, то профиль можно подобрать по площади сечения, используя зависимость $F_1 = C_w W^2$.

Подбор составного таврового профиля. Задача подбора составного таврового профиля минимальной массы возникает при проектировании балки, работающей на изгиб. Площадь присоединенного пояска считается известной, так как определяется требованиями к обшивке. Необходимую площадь сечения стенки балки из условия прочности на срез вычисляют по формуле (1.8). Толщину стенки принимают не менее минимально допустимой с учетом интенсивности коррозии, срока службы ($k_s \geq s_{min}$). Отношение высоты стенки к ее толщине, должно удовлетворять условию устойчивости.

Если определяющим для толщин стенки является требование минимальной толщины, то, получив из формулы (1.7) площадь сечения балки $F_0 = f + \alpha$ в зависимости от необходимого момента сопротивления, найдем минимальную площадь по условию экстремальности ($dF_0/dk = 0$). В результате высота балки при $k = 4.5$ оказывается равной $h_{кр} = 1.16 \sqrt{f/s_{min}}$. Получив предварительную высоту балки, необходимо проверить устойчивость ее стенки.

Если определяющим для толщин стенки будет требование устойчивости $s_k \geq k/s$, то аналогичное условие экстремума при $k = 4.5$ приведет к высоте балки $h_{кр} = 0.88 \sqrt{f/s_k}$, где s_k нормируется в зависимости от значения расчетных нормальных и касательных напряжений.

Поскольку в районе экстремума функция изменяется медленно, даже большое отклонение проектной высоты от оптимальной не вызовет значительного утолщения профиля.

После выбора высоты профиля и площади стенки необходимо определить площадь свободного пояска f . Для этого воспользуемся формулой (1.7), откуда $f = W/k - \alpha/k$. Значение k в первом приближении можно принять равным 4.5. Далее, после окончательного выбора площади свободного пояска, уточним значение k (см. формулу (1.7)).

Определив площадь свободного пояска f , следует выбрать его ширину b и толщину s_0 . При этом необходимо обеспечить выполнение условий устойчивости пояска как пластины, а также учесть практические соображения, связанные с коррозионным износом, технологичностью и т. д. Ширина свободного пояска равной балки (в мм), измеренная от ее стенки, должна быть не более определенной по формуле

$$b = 290 s_0 \sqrt{f/s_k}, \text{ но } 2b \geq 10 s_k,$$

где s_k — толщина свободного пояска, мм. Толщину свободного пояска желательно принимать из 2—3 мм.



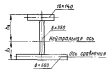


Рис. 1.9. Сечение сварной балки с присоединенным носком (к примеру расчета).

определить толщину присоединенного носка. Расчет выполнен в форме табл. 1.1.

Таблица 1.1. Вычисление момента инерции в моменты сопротивления сварных профилей

Вид профиля	Наименование сечения	Размеры, мм	Площадь F , см ²	Отстояние ЦТ шпангоута от оси симметрии e , см	Собственный момент инерции шпангоута I_x , см ⁴	Моменты инерции, см ⁴	
1	2	3	4	5	6	7	8
свар.	Присоединяемый носок	80x600	48	0	0	—	0
	Стенка	6x380	21	17,9	375	2149	6738
	Свободный овалок	160x140	14	35,9	933	—	18 041
Сумма		—	$A = 83$	—	$B = 828$	$C = 26 910$	

Собственный момент инерции стенки (шпангоута 2) $I_x = \frac{bh^3}{12} = 0,6 \cdot 38^3/12 = 2149$ см⁴. Собственные моменты инерции стенок 1 и 3 распределяем между их осями.

Отстояние нейтральной оси от оси симметрии $e = B/A = 378/83 = 4,6$ см. Момент инерции относительно нейтральной оси $I = C - e^2 A = 26 910 - 10,6^2 \cdot 83 = 17 588$ см⁴.

Отстояние от оси симметрии крайних элементов: присоединяемого носка $A_1 = e + \frac{h}{2} = 18,6 + 0,4 = 19,0$ см; свободного носка $A_2 = s + A + e_1 = 1,0 + 35 + 1,0 = 37,0$ см.

Момент сопротивления крайних элементов: присоединяемого носка $W_1 = \frac{F_1 A_1^2}{I_1} = \frac{48 \cdot 19^2}{17 588} = 1,0$ см³; свободного носка $W_2 = \frac{F_2 A_2^2}{I_2} = \frac{14 \cdot 37^2}{17 588} = 1,0$ см³. Максимальный момент сопротивления — W .

Вычисляем W по формуле (1.7)

$$A = \frac{2 \cdot 48 + 21}{4 \cdot 48 + 2 \cdot 14 + 21} = 3,79; \quad W_{\text{св}} = 35 (14 + 21 \cdot 3,79) = 684 \text{ см}^3.$$

стенки, но не более утроенной толщины стенок у рамных балок.

После подбора профиля арочерочный расчет момента сопротивления и момента инерции составного профиля выполняют в табличной форме.

Пример. Определить момент инерции и момент сопротивления составного арочерочного профиля (рис. 1.9). Для упрочнения ось симметрии приваривают поперечные ребра жесткости.

Из сопоставления результатов расчета $W_{\text{св}}$ в форме таблицы и по формуле (1.7) видно, что разница между ними незначительная (до 3 %).

§ 3. Основные требования, предъявляемые к профилю балок набора

Набор судна составляет около 30 % массы стального корпуса и включает как составные сварные, так и прокатные балки, соединенные с обшивкой. Выбор вида и размера профилей балок набора суднового корпуса — сложная задача, решение которой зависит от многих факторов. При подборе профилей балок набора необходимо обеспечить: прочность и устойчивость профиля и отдельных его элементов; небольшую массу; минимальные габариты балок; удобство установки; возможность простого и надежного соединения с прилегающими конструкциями и простоту замены при ремонте; максимальную стоимость изготовления.

При подборе профилей устанавливают, какое условие для данного случая должно быть определяющим и удовлетворяться в первую очередь. Если для узлов суднового корпуса определяющим условием является минимальная масса, следует уменьшить относительно толщины стенок балок (отношения толщины стенки к высоте профиля), сохраняя необходимую прочность и жесткость.

Выбор формы профильного проката ограничен. Он обусловлен той металлолургией, которую в современных условиях может дать металлургическая промышленность. Наиболее распространены в кораблестроении несимметричный и симметричный поллобульбы, сварные профили. Несимметричный поллобульб поставляется по ГОСТ 21937—76, обеспечивая удобство установки, технологичность и простоту замены при ремонте. Кроме того, этот профиль обладает достаточными запасами на износ и коррозию.

В настоящее время широко применяется симметричный поллобульб (ГОСТ 9235—76), момент сопротивления которого при одной и той же массе больше, чем у несимметричного поллобульба. Кроме того, в случае приварки симметричных профилей менее вероятен казус профиля. Однако вследствие более тонкой стенки у них возможно восприятие перерезывающих сил и устойчивость в собственной плоскости. Применение этого профиля рационально при высоте его более 100 мм.

В сравнении с катаным профилем отечественного сортамента составные сварные профили имеют существенные преимущества, так как позволяют выбрать оптимальные соотношения их элементов (например, снижение относительной толщины стенок профиля δ/h , увеличение площади свободного носка),

что в значительной степени определяет рациональность профилей.

Выигрыш в массе при замене катаных полосуобудов составками сварными профилями составляет от 10 до 30 % [1]. Это объясняется прежде всего относительно меньшей толщиной стенок сварных профилей по сравнению с катаными, имеющими более толстые стенки.

Выбирая элементы поперечного сечения балок набора по оптимальному распределению их площадей, необходимо учитывать надбавки на коррозию. Дифференцированное распределение запасов на коррозию по элементам профиля позволяет получить дополнительную экономию в массе. К недостаткам составных сварных профилей относятся большая трудоемкость и стоимость их изготовления (река полос, сварка, правка). Это нужно учитывать при выборе профилей для набора корпуса судна.

В связи с тем, что для проектирования судов необходимо использовать сварные балки большого размера, которые невозможно заменить катанками, разработаны отраслевой стандарт ГОСТ 5.9573—80 на тавры стальные сварные для морских судов.

§ 4. Изгиб статически неопределимых балок и рам

Раскрытие статической неопределимости однопролетных балок набора. Из технической механики известно, что при действии на балку поперечной нагрузки уравнений статики достаточно для определения неизвестных реакций опор и опорных моментов лишь в том случае, если их число не превышает 2 (горизонтальными проекциями реакций можно пренебречь). В противном случае необходимо составить дополнительные уравнения для их определения. Такие балки называются статически неопределимыми.

В строительной механике корабли рассматривают для основных типов статически неопределимых балок: однопролетные (двухопорные) и многопролетные. Для однопролетной балки возможны два статически неопределимых способа закрепления ее концов (рис. 1.10): 1) оба конца заделаны и не могут, следовательно, поворачиваться при изгибе балки; 2) один конец заделан, второй свободно оперт; не может поворачиваться только сечение балки у заделки.



Рис. 1.10. Закрепления однопролетных статически неопределимых балок.

В обоих случаях горизонтальными реакциями можно прене-

бречь. При заделке обоих концов балки возникают четыре реактивных условия: два опорных момента и две вертикальные реакции, т. е. задача для двух статически неопределимых (число неизвестных 4, число уравнений статик 2, $\Sigma Z = 0$, $\Sigma M = 0$). Если заделан один конец балки и свободно оперт второй, имеем три реактивных условия: один опорный момент и две вертикальные реакции, т. е. задача для двух статически неопределимых (число неизвестных 3, а число уравнений статик 2).

Лишние неизвестные вызывают в конструкции столь же значительное перераспределение напряжений, что не считается с ними нельзя и надо уметь находить их значения, т. е. расширять статическую неопределимость. Для этого необходимо составить дополнительные столько уравнений, сколько лишних неизвестных. Задача сводится к решению системы n линейных уравнений с n неизвестными.

Для раскрытия статической неопределимости однопролетных (двухопорных) балок используется принцип (метод) наложения. Он состоит в следующем:

составить для уравнения статик ($\Sigma Z = 0$, $\Sigma M = 0$);

мысленно устранить лишние закрепления, а их действие заменить соответствующими неизвестными реактивными условиями (моментом — для жесткой заделки и реакцией — для свободной опоры), т. е. балку представить статически определимой;

для полученной таким образом статически определенной балки с помощью таблиц [29, гл. I] определять прогибы или углы поворота от действия внешней нагрузки и лишние реактивные условия в тех опорных сечениях, где были изменены условия закрепления;

учитывая граничные условия на опорах балки и используя принцип наложения, составить дополнительные уравнения

$$w'(M) + w'(Q) + w'(P) = 0 \text{ или } \varphi(R) + \varphi(Q) + \varphi(P) = 0,$$

где $w'(M)$ и $\varphi(R)$ — угол поворота и прогиб от действия лишних неизвестных; $w'(Q)$, $w'(P)$ и $\varphi(Q)$, $\varphi(P)$ — углы поворота и прогибы от действия внешней нагрузки. Граничные условия на концах балки: жесткая заделка $w' = 0$, $\varphi = 0$, $M \neq 0$, $N \neq 0$; свободная опора $w = 0$, $M = 0$, $w' \neq 0$, $N \neq 0$.

Таким образом, вместе с двумя уравнениями статик получится система n уравнений с n неизвестными. Решив эту систему уравнений, можно определить все реактивные условия балки.

Для определения изгибающих моментов и перерезывающих сил в любом сечении балки необходимо построить эпюры изгибающих моментов и перерезывающих сил, используя следующее правило знаков:

изгибающий момент от действия опорных моментов откладывать вверх от оси балки, если он положительный, и вниз, если он отрицательный;

изгибающий момент от действия пролетной нагрузки откладывать вверх от оси балки, если он отрицательный, и вниз, если он положительный;

перерезывающую силу на левой опоре откладывать вверх от оси балки, если она отрицательная, и вниз, если она положительная (на правой опоре — наоборот).

В строительной механике корабля получил распространение способ построения эпюры изгибающих моментов, основанный на применении таблиц изгиба статически определяемых балок. Изгибающий момент в любом сечении балки может быть представлен в виде алгебраической суммы изгибающего момента от действия одного только опорных моментов и изгибающего момента от действия пролетной нагрузки. Поэтому эпюру изгибающих моментов для однопролетных статически неопределимых балок можно строить в последующей последовательности:

от оси балки откладывать в определенном масштабе значения опорных моментов и полученные точки соединять прямой (это эпюра изгибающих моментов только от действия опорных моментов);

от той же оси, используя таблицы изгиба статически определяемых балок на двух опорах, откладывать в том же масштабе значения изгибающих моментов от пролетной нагрузки (это эпюра изгибающих моментов только от действия пролетной нагрузки);

значение полного изгибающего момента в каждом сечении балки измерять от прямой, изображающей значения опорных моментов, до кривой (прямой), изображающей изгибающие моменты от действия пролетной нагрузки.

Эпюра перерезывающих сил строится так же, как для статически определяемых балок. При этом используются таблицы моментов изгиба статически определенных балок.

Пример. Раскрыть статическую неопределенность балки (рис. 1.11), используя правило Кантисани. С этой целью составим для уравнения статики

$$\sum M_A = R_1 l - q l^2/8 + M_1 = 0; \\ \sum \bar{e} = -R_1 - R_2 + q l/2 = 0;$$

исполним условия закрепления на левой опоре (жесткую заделку заменим свободной опорой и моментом M_1);

определим с помощью таблиц [20, т. I] угол поворота на левой опоре для статически определенной балки, нагруженной только пролетной нагрузкой (см. рис. 1.11, б),

$$\alpha'_1 = q l^3/384 E I = 9 Q l^2/192 E I;$$

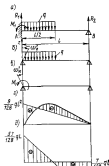


Рис. 1.11. Расчетная схема статически неопределимой балки: б — распределенная нагрузка; в — балка, нагруженная пролетной нагрузкой; г — балка, нагруженная сосредоточенным моментом; д — эпюра изгибающих моментов; е — эпюра перерезывающих сил.

найдем с помощью таблиц [20, т. I] угол поворота на левой опоре балки, нагруженной сосредоточенным моментом (рис. 1.11, г), $\alpha'_2 = -M_1/3EI$; если принять условие жесткой заделки $\alpha' = 0$ и сложим эти два уравнения, составим третье уравнение $\alpha'_1 + \alpha'_2 = 0$; подставив определенные выше значения α'_1 и α'_2 в предыдущее уравнение деформаций, получим

$$9ql^2/384EI - M_1/3EI = 0,$$

откуда $M_1 = 9ql^2/128$;

подставив значение левой неизвестной M_1 в уравнение статики, определим опорные реакции R_1 и R_2 : из уравнения статики $\sum M_A = 0$ найдем R_2

$$R_1 l - q l^2/8 + 9ql^2/128 = 0; \quad R_2 = ql/8 - 9ql/128 = 7ql/128;$$

из уравнения статики $\sum x = 0$ получим R_1

$$-R_1 - 7ql/128 + q l/2 = 0; \\ R_1 = ql/2 - 7ql/128 = 57ql/128.$$

Итак, статическая неопределенность балки раскрыта, т. е. определены все реактивные условия

$$R_1 = 57ql/128; \quad R_2 = 7ql/128; \quad M_1 = 9ql^2/128.$$

Эпюра изгибающих моментов изображена на рис. 1.11, а. Максимальное значение изгибающего момента от действия пролетной нагрузки определено с помощью таблиц [20, т. I]

$$M_{max} = -9Ql^2/64 = -9ql^2/128 \quad \text{при} \quad x = 3/8.$$

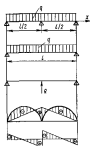


Рис. 1.12. Расчеты staticкой системы непрерывной балки

точке ее приложения $w_{x=l/2} = -RP/48EI$. По условию задачи средняя опора несмещаемая, поэтому прогиб балки на опоре равен нулю. Таким образом, получаем дополнительное уравнение для определения R

$$5q^2/384EI - R_2^2/48EI = 0,$$

откуда находим $R = 5q/8$.

В случае применения принципа наложения при более чем двух пролетах приходится решать произвольную систему алгебраических уравнений. В каждое уравнение входят все лишние неизвестные, а наложение их опорных реакций и определение затем изгибающих моментов в промежуточных опорных сечениях связано с вычислением мало различающихся по значениям величин, что снижает точность вычислений. Этим недостатком лишена расчетная схема, получившая название теоремы трех моментов. Она также основана на принципе наложения. Теорема трех моментов применяется при расчете многопролетных неразрезных балок, свободно опертых на жесткие несмещаемые опоры. Балка мысленно разрезается по всем опорным сечениям, где действуют неизвестные, статически неопределенные внутренние моменты, на ряд статически определенных балок на двух опорах.

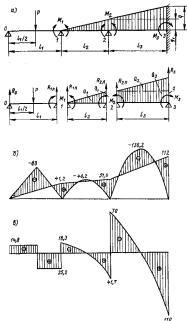


Рис. 1.13. К расчету многопролетной балки по теореме трех моментов: а — расчетная схема балки; б — эпюра изгибающих моментов (размеры в кН·м); в — эпюра перерезывающих сил (размеры в кН).

а 1-3 — опоры

Взаимное влияние нагрузки и пролета балки в местах разреза заменяется опорными моментами, которые относятся к внешним усилениям, приложенным по концам отсеченных пролетов балки. Значения опорных моментов находят из условия равенства углов поворота слева и справа от опоры (рис. 1.13). Приравняв выражения для углов поворота слева и справа от общей опоры статически определенных балок, можно получить сравнительно простую систему уравнений. В каждое уравнение входит не более трех последовательных деформаций. Каждая балка нагружается по концам опорными моментами, а в пролете — заданной внешней нагрузкой.

Для составления системы уравнений необходимо с помощью справочных таблиц [20, т. 1], используя принцип наложения, вычислить углы поворота статически определенными двухпролетными балок.

Пример. Рассчитать статическую неопределимую трехпролетную балку (см. рис. 1.13): $P = 400$ кН, $q = 40,0$ кН/м, $l_1 = 8$ м, $l_2 = l_3 = 6$ м.

Обозначим неизвестные опорные моменты через M_1, M_2, M_3 и мысленно разрежем балку на опоры 1 и 2. Составим выражения углов поворота для всех рассеченных опор, учитывая, что поворот Δl остается во всех балках.

Опора 1. Вычислен угол поворота для левой и правой частей опоры 1 записав в виде алгебраической суммы углов поворота от действующих нагрузок в пролетах 0—1 и 1—2:

$$\begin{aligned} \omega'_1 &= M_1 J_1 / 6EI - P l_1^2 / 16EI; \\ \omega''_1 &= -M_1 J_1 / 6EI - M_2 J_2 / 6EI + 7Q_1 J_1^2 / 160EI. \end{aligned}$$

Приравняв углы поворота слева от опоры к углу поворота справа от опоры $\omega'_1 = \omega''_1$, получим первое уравнение системы трех моментов

$$M_1 J_1 / 6EI - P l_1^2 / 16EI = -M_2 J_2 / 6EI - M_3 J_3 / 6EI + 7Q_1 J_1^2 / 160EI.$$

Перенесем все члены, содержащие неизвестные моменты, в левую часть, а все остальные — в правую часть уравнения; получим

$$M_1 (J_1 + J_1 J_2 / 6EI + M_2 J_2 / 6EI = 7Q_1 J_1^2 / 160EI + P l_1^2 / 16EI.$$

Число таких уравнений равно числу рассеченных опор. Если одна или обе крайние концы балки заделаны, то в этом случае останется уравнение, выражающее условие, что в заделке угол поворота внешней балки равен нулю.

Запишем систему уравнений теорем трех моментов для опор 2 и 3. Опора 2.

$$\begin{aligned} M_1 J_1 / 6EI + M_2 J_2 / 6EI - 2Q_1 J_1^2 / 48EI &= -M_2 J_2 / 6EI - M_3 J_3 / 6EI + \\ &+ 7Q_2 J_2^2 / 160EI + Q_1 J_1^2 / 24EI \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} M_1 J_1 / 6EI + M_2 (J_1 + J_1 J_2 / 6EI + M_2 J_2 / 6EI &= 2Q_1 J_1^2 / 48EI + \\ &+ 7Q_2 J_2^2 / 160EI + Q_1 J_1^2 / 24EI. \end{aligned}$$

Опора 3.

$$M_2 J_2 / 6EI + M_3 J_3 / 6EI - 2Q_2 J_2^2 / 48EI = Q_2 J_2^2 / 24EI = 0$$

или

$$M_2 J_2 / 6EI + M_3 J_3 / 6EI = 2Q_2 J_2^2 / 48EI + Q_2 J_2^2 / 24EI.$$

Разделив каждое уравнение на $1/6EI \neq 0$, запишем систему уравнений в следующем виде:

$$\begin{aligned} M_1 (J_1 + J_2) + 0,5 M_2 J_2 &= 7Q_1 J_1^2 / 60 + 3P l_1^2 / 16; \\ 0,5 M_1 J_2 + M_2 (J_1 + J_2) + 0,5 M_3 J_3 &= 2Q_1 J_1^2 / 15 + 7Q_2 J_2^2 / 60 + Q_1 J_1^2 / 8; \\ 0,5 M_2 J_3 + M_3 J_3 &= 2Q_2 J_2^2 / 15 + Q_2 J_2^2 / 8. \end{aligned}$$

Найдем численные значения Q_1, Q_2, Q_3 . Из подобия треугольных линий

$$q/q_1 = (l_2 + l_3)/l_2 \quad \text{или} \quad 40/q_1 = 12/6, \quad q_1 = 20 \text{ кН/м}.$$

Следовательно, $Q_1 = q_1 l_1 / 2 = 60$ кН, $Q_2 = (q - q_1) l_2 / 2 = 60$ кН, $Q_3 = q_1 l_3 = 120$ кН. Подставляя численные значения нагрузок в левые пролеты, получим систему уравнений

$$\begin{aligned} 16M_1 + 3M_2 &= 732; \\ 3M_1 + 12M_2 + 3M_3 &= 1680; \\ 3M_2 + 6M_3 &= 828. \end{aligned}$$

Определяя неизвестные M_1, M_2, M_3 можно любым известным из алгебры способом. Выразим из первого уравнения M_1 , а из третьего M_3 через M_2 , подставим их значения во второе уравнение:

$$\begin{aligned} M_1 &= (732 - 3M_2)/14; \quad M_3 = (828 - 3M_2)/6; \\ 3(732 - 3M_2)/14 + 12M_2 + 6(828 - 3M_2)/6 &= 1680; \\ 0,86M_2 &= 508,1; \quad M_2 \approx 51,6 \text{ кН} \cdot \text{м}; \\ M_3 &= (732 - 3 \cdot 51,6)/14 = 41,2 \text{ кН} \cdot \text{м}; \\ M_1 &= (828 - 3 \cdot 51,6)/6 = 112 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Для проверки правильности найденных значений опорных моментов необходимо подставить их в переопределенную систему уравнений и убедиться, что все уравнения системы обращаются в тождества.

Построение эпюр изгибающих моментов для многопролетных балок выполняется так же, как для однопролетных статически неопределимых балок.

Выясним максимальные значения прогибов изгибающих моментов с помощью справочных таблиц [20, т. 1].

Для пролета 0—1

$$M_{\max} = -P l_1 / 4 = -40 \cdot 8 / 4 = -80 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad \text{при} \quad x = l_1 / 2.$$

Для пролета 1—2

$$M_{\max} = -0,1283 Q_2 l_2 = -0,1283 \cdot 60 \cdot 6 = -46,2 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad \text{при} \quad x = 0,5773 l_2.$$

Для пролета 2—3

$$M_{\max} = -l_3 (q + 2q_1) x^2 + q_1 x^3 / 2 + x^3 (q - q_1) / 6 l_3.$$

Чтобы определить максимальное значение погибающего момента в пролете, необходимо найти x , при котором момент достигает максимума и тем самым, где перерезывающая сила равна нулю, т. е.

$$\frac{dM}{dx} = 0; \quad \frac{dM}{dx} = -f_2(4 + 3q_1/6 + q_1x + 3q^2(4 - q_1)q/3 = 0.$$

Подставляя известные значения, получим

$$x^2/6 + 2x - 8 = 0 \quad \text{или} \quad x^2 + 12x - 48 = 0;$$

$$x = -6 \pm \sqrt{36 + 48} = -6 \pm \sqrt{84}; \quad x_1 = -6 + 9,16 = 3,16 \text{ м};$$

$$x_2 = -6 - 9,16 = -15,16 \text{ м}.$$

Корень $x_2 = -15,16$ м не имеет смысла. Следовательно, наибольший момент в пролете 2—3 достигается максимумом при $x = 3,16$ м.

Подставив найденное значение x и другие исходные данные в выражение для погибающего момента в пролете, найдем его максимальное значение

$$M_{\max} = -6(40 + 40) \cdot 3,16/6 + 20 \cdot 3,16^2/2 + 3,16^2(40 - 20)/36 = \\ = -252,8 + 99,9 + 17,5 = -135,4 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Максимальный погибающий момент в пролете 2—3 можно вычислить как сумму максимальных погибающих моментов от нагрузки Q_1 и Q_2 . Допустим, что $M(Q_1)$ при $x = 0,5773L$ неизменно отклонится от $M(Q_2)$ при $x = 0,5L$. Тогда

$$M_{\max} = -0,1282Q_1L^2 = -0,1282 \cdot 60 \cdot 6 = -0,128 \cdot 129,6 = \\ = -46,2 - 90 = -136,2 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Определив опорные моменты и максимальные пролетные моменты с помощью сравнительных таблиц, строим эпюры погибающих моментов (см. рис. 1.13.6).

Для определения опорных реакций и построения эпюры перерезывающих сил многопролетной балки обычно рассматривают два ее смежных пролета. Задача сводится к определению опорных реакций для статически определимых балок на двух опорах, нагруженных опорными моментами и пролетной нагрузкой.

Не составляя укрупненной статик, напомним выражения для опорных реакций*, используем сравнительные таблицы и сравнительные таблицы:

$$R_2 = M_1/L_1 - P/2 = 41,2/8 - 40/2 = -14,3 \text{ кН};$$

$$R_{12} = -M_1/L_1 - P/2 = -41,2/8 - 40/2 = -25,2 \text{ кН};$$

$$R_{23} = -M_1/L_2 - Q_1/3 + M_2/L_2 = -41,2/8 - 60/3 + 51,6/8 = -18,3 \text{ кН}.$$

Опора 1 воспринимает нагрузку как от пролета слева, так и от пролета справа. Полюса ее реакции

$$R_1 = R_{12} + R_{23} = -25,2 - 18,3 = -43,5 \text{ кН}.$$

Аналогично определяем опорные реакции реакции

$$R_{34} = -M_2/L_3 + M_3/L_2 - 2Q_2/3 = -51,6/8 + 41,2/8 - 2 \cdot 60/3 = -41,7 \text{ кН};$$

$$R_{23} = -M_2/L_3 + M_3/L_2 - Q_2/3 = Q_2/3 - Q_2/2 = -51,6/6 + 120/2 = \\ = -60/3 - 120/2 = -70 \text{ кН};$$

$$R_3 = R_{23} + R_{34} = -41,7 - 70 = -111,7 \text{ кН};$$

$$R_4 = -M_3/L_4 + M_4/L_3 - 2Q_3/3 - Q_3/2 = -112/8 + 51,6/6 = \\ = -2 \cdot 60/3 - 120/2 = -110 \text{ кН}.$$

Правильность определения опорных реакций проверим путем составления уравнения проходов или так же на вертикальную ось $\sum z = 0$

$$\sum z = R_2 + R_1 + R_3 + R_4 + P + Q_1 + Q_2 + Q_3 = \\ = -14,8 - 43,5 - 111,7 - 110 + 40 + 60 + 60 + 120 = 0.$$

После установления опорных реакций строится эпюра перерезывающих сил многопролетной балки. Уточним, что опорные моменты не оказывают влияния на характер эпюры перерезывающих сил просто балки, эпюру рассмотрим строить в такой последовательности:

на опоре 0 отложить значение опорной реакции R_0 вверх от оси балки, если она отрицательная;

на опоре 1 отложить значение опорной реакции R_{12} вниз, если она отрицательная;

подушка точки соединить прямой (или прямой) с зависимостью от пролетной нагрузки с использованием опорных таблиц;

на опоре 3 вверх отложить значение опорной реакции R_{23} , если она отрицательная, и т. д.

Эпюра перерезывающих сил показана на рис. 1.13. в.

Расчет простых рам. *Простой* называется конструкция, состоящая из стержней-балок, жестко взаимно связанных в точках соединения (узлах). Раму считают легкой, если все ее стержни и действующая на нее нагрузка лежат в одной плоскости.

По типу образующих стержней различают *прямолинейные* рамы, состоящие из прямых стержней, и *криволинейные* рамы, имеющие в своем составе часть кривых стержней. В судовом корпусе наиболее часто встречаются *прямолинейные* рамы, например: флюр, шантоут, бимс, стойки продольной переборки; вертикальный киль, доковые стойки поперечных переборок, отбойный лист и т. д. *Прямолинейные* и *криволинейные* рамы, в свою очередь, разделяются на *простые* (в каждом их узле сходится не более двух стержней) и *сложные* (в отдельных их узлах сходится более двух стержней).

В зависимости от условий закрепления узлов различают рамы с неподвижными и с подвижными узлами. Большинство рам судового корпуса относятся к рамам с неподвижными узлами, поскольку их стержни, образующие набор судна, опираются на плоские перекрытия, обладающие большой жесткостью по отношению к усилиям, действующим в их плоскости. Выгодами этому не являются любые поступательные перемещения узлов рамы.

* Эпюры «нулей» перед значениями реакций означают, что они направлены вверх.



Рис. 1.14. Рамы с подвижными узлами.
1—4—шары узлов.

Рамы с подвижными узлами (рис. 1.14) в судовом корпусе встречаются относительно редко, главным образом в конструкциях различных подкреплений рубок, судовых устройств и т. п. В данной книге рассматриваются расчеты простых плоских рам с неподвижными узлами.

Для раскрытия статической неопределенности рам, составленных из прямых стержней, обычно предполагают: длина всех стержней при нагрузке рамы не изменится;

жесткость всех стержней рамы настолько большая, что осевыми усилиями, действующими в стержнях, можно пренебречь;

стержни рамы на всем их протяжении призматические; перемещения от сдвига можно пренебречь по сравнению с перемещениями от изгиба;

незначительную кривизну стержней допустимо не принимать во внимание (например, при расчете шпангоутной рамы, составленной из флора, двух шпангоутов и бимса, пренебрегают кривизной бимса).

Кроме того, при раскрытии статической неопределенности рам пренебрегают вырезами в стенках балок и местными усилениями в виде книц. Длину стержней рамы принимают равной расстоянию между точками пересечения осей данного стержня с осями двух других стержней. Однако в практике допускается принимать длину стержней равной расстоянию между опорами.

Расчет простых рам с неподвижными узлами принципиально не отличается от расчета многопролетных балок на жестких опорах и, следовательно, может производиться с помощью теоремы трех моментов.

Рассмотрим шпангоутную раму однопролетного судна, нагруженную гидро-статическим давлением воды на флор и шпангоуты и сопротивлением трения по бимсу (рис. 1.15). Зная длину флора и бимса будем считать равными длине судна, длину шпангоута — расстоянию от миделя флора до ЦТ повернутого сечения флора. Примем за основные неизвестные мо-



Рис. 1.15. Расчетная схема шпангоутной рамы.

менты изгибаемости стержней в узловых точках, определим для каждого стержня угол поворота его опорных сечений в функции от абсолютной нагрузки и стержня и его опорных моментов. Угол поворота стержней, соединяемых в каждом узле, стержнями.

Расчет рамы выполняем при следующих исходных данных:

$$Q_1 = Q_2 = 100 \text{ кН}; Q_3 = 300 \text{ кН}; P = 80 \text{ кН};$$

$$l_1 = 7.5 \text{ м}; l_2 = 15 \text{ м}; a_1 = a_2 = 2.5 \text{ м}; l_3 = 3l_2; l_0 = 5l_2,$$

где l_0 , l_1 и l_2 — моменты инерции соответственно бимса, шпангоута и флора. Составим систему уравнений. На симметричной конструкции рамы и нагрузки, действующей на стержни, $M_1 = M_1$, $M_2 = M_2$, следовательно, только четыре уравнения достаточно составить для для узлов 1 и 2 и определить все моменты в узловых сечениях.

Узел 1.

$$M_1 l_1 / 3EI_{f1} + M_2 l_2 / 3EI_{f2} - Q_1 l_1^2 / 24EI_{f1} = -M_1 l_1 / 3EI_{f1} - M_2 l_2 / 3EI_{f2} + \\ + Q_2 l_1 (l_1 - a_1) (6 + 9a_1/l_1 + 3a_1^2/l_1^2) / 160EI_{f1},$$

Узел 2.

$$M_1 l_1 / 3EI_{f1} + M_2 l_2 / 3EI_{f2} - Q_1 l_1 (l_1 - a_1) \times \\ \times (7 + 6a_1/l_1 - 3a_1^2/l_1^2) / 160EI_{f1} = -M_2 l_2 / 3EI_{f2} - M_1 l_1 / 3EI_{f1} + P l_2^2 / 16EI_{f2}.$$

Подставив значения нагрузок и длин пролетов, а также поворотов l_0 и l_1 через l_2 и сократив на $1/EI_{f1}$, получим систему линейных уравнений относительно узловых моментов:

$$4M_1 + 1,25M_2 = 794,5;$$

$$1,25M_1 + 6,25M_2 = 532,2.$$

Ее можно решить любым известным из алгебры способом. В результате получим следующие значения опорных моментов:

$$M_1 = M_2 = 184,6 \text{ кН} \cdot \text{м}; M_3 = M_4 = 48,3 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Для построения эпюр изгибающих моментов с помощью справочной таблицы найдем максимальные моменты от действия пролетных нагрузок.

В пролете стержней 1—2, 3—4

$$M_{\text{max}} = -Q_1 (l_1 - a_1) [a_1/l_1 + 2(1 - a_1/l_1^2)(3a_1^2/l_1^2)/3] = -100(7,5 - 2,5) \times \\ \times [2,5/7,5 + 2(7,5 - 2,5)^2/(3 \cdot 7,5^2)]/3 = -90,4 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

от узла 2 на расстоянии $x = a_1 + (l_1 - a_1)\sqrt{1/3} = a_1/\sqrt{3} = 2,5 + (7,5 - 2,5)/\sqrt{3} \times \sqrt{7,5 - 2,5}/7,5 = 4,86 \text{ м}$. В пролете стержня 2—3 $M_{\text{max}} = -P l_2/3 = -300 \cdot 15/3 = -187,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$. В опоре стержня 4—1 $M_{\text{max}} = -Q_2 l_2/3 = -300 \cdot 15/3 = -187,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$. Эпюры изгибающих моментов изображены на рис. 1.16. а. Особенность построения эпюр изгибающих моментов для рамы заключается в том, что опорные моменты откладываются дважды: вначале для стержней, соединяемых в узлах.

Определим узловых реакций в стержнях и построим эпюры поперечных сил. Для этого найдем реакции для многопролетной балки. На начало отсчета берем момент любой узла, например узла 1, и, условившись, что в узлах, образующих раму, по часовой стрелке. В каждом узле определяем

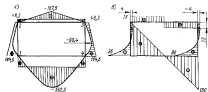


Рис. 1.16. Эпюры изгибающих моментов (а) и нормализованной сил (б) для рамы, показанной на рис. 1.15.

Положительные моменты приняты в кН·м, а отрицательные — в кН; l — узлы рамы.

горизонтальную и вертикальную реакции

$$R_{10} = M_{10}/l + M_{11}/l - Q_1/l = (j_1 - a_1)Q_1/l = -184,5/7,5 + 48,2/7,5 -$$

$$= 100 [1 - (7,5 - 2,5)/7,5] = -96 \text{ кН};$$

$$M_{10} = M_{11}/l + M_{12}/l - Q_1(j_1 - a_1)Q_1/l = -48,2/7,5 + 184,5/7,5 -$$

$$= 100 [7,5 - 2,5]/7,5 = -4 \text{ кН};$$

$$R_{10} = R_{11} = -P/2 = -50/2 = -25 \text{ кН}; \quad R_{10} = R_{11} = -96 \text{ кН};$$

$$R_{12} = R_{13} = -Q_2/2 = -300/2 = -150 \text{ кН}; \quad R_{12} = R_{13} = -4,0 \text{ кН}.$$

Итого:

$$\sum R_i = \sum (P + Q_i)$$

$$\sum R_i = 96 + 4,0 + 25 + 25 + 4,0 + 96 + 150 + 150 = 550 \text{ кН};$$

$$\sum (P + Q_i) = 100 + 50 + 100 + 300 = 550 \text{ кН}.$$

Эпюра нормализованной сил изображена на рис. 1.16, б.

§ 5. Расчет простейших перекрытий

Перекрытие называется система пересекающихся взаимно перпендикулярных балок набора, приваренных к обшивке или настилу, опирающихся на жесткий опорный контур. Перекрытия, образующие корпус судна, воспринимают поперечную нагрузку, т. е. действующую перпендикулярно плоскости обшивки или настила (давление воды, масса грузов и т. д.), и передают ее на жесткий опорный контур. Различают бортовое, днищевое и палубное перекрытия.

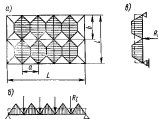


Рис. 1.17. Распределение нагрузки между балками перекрытия: а — расчетная схема перекрытия; б и в — схемы нагрузки поперечной силой и балки главного направления.

Балки судовых перекрытий, как правило, пересекаются под прямым углом. В случае действия на перекрытие распределенного давления воды эта нагрузка воспринимается обшивкой или настилом и передается на балки набора, которые дают обшивку или настил на прямоугольные пластины. При этом балки главного направления (их в перекрытии больше) в перекрестных сечениях (их в перекрытии меньше)* прогибаются. Распределение нагрузки, приложенной к прямоугольной пластине, показано на рис. 1.17. Нагрузку, приходящуюся на треугольные участки пластины, следует отнести к коротким сторонам опорного контура, а приходящуюся на участки, имеющие форму трапеций, — к длинным сторонам. Кроме внешней нагрузки на каждую балку перекрытия действуют реактивные усилия, направленные перпендикулярно плоскости перекрытия.

В практических расчетах используется балочная схема перекрытия, при которой перекрытие заменяется системой пересекающихся балок, соединенных в узловых точках. Жесткость балок находят с учетом присоединенных плоских настилов перекрытия. Предполагают, что вся внешняя нагрузка воспринимается балками главного направления и сторонами опорного контура, им параллельными, а перекрестные связи загружаются лишь реакциями балок главного направления. Эта условность не вносит существенных погрешностей в рас-

* Подробнее о балках перекрытий см. в гл. 3.

чет перекрытий, так как нагрузка, воспринимаемая балками главного направления, оказывается несколько уменьшенной, а передаваемая перекрестным связям, — одной и той же. Расчетная схема балок главного направления и перекрестной связи показана на рис. 1.17, б и а.

Перекрытие представляет собой статически неопределимую систему, в которой число неизвестных равно числу узловых точек (если перекрестные связи и балки главного направления свободно опираются по концам). При небольшом числе балок обоих направлений статическую неопределимость перекрытия можно раскрыть путем приравнивания стрелок прогиба балок перекрытия в их узловых точках. В качестве исходных неизвестных принимают реакции взаимодействия балок главного направления и перекрестной связи.

Остановимся на расчете перекрытия, состоящего из небольшого числа балок главного направления и одной перекрестной связи. Для раскрытия статической неопределимости перекрытия, имеющего большое число (более пяти) балок главного направления и перекрестных связей, применим метод приравнивания стрелок прогиба несимметрично из-за большого числа неизвестных. В этом случае расчет перекрытия можно свести к расчету изгиба перекрестных связей, лежащих на сплошном упругом основании и таким образом избежать составления и решения системы алгебраических уравнений [20, т. 2].

Пример. Раскрыть статическую неопределимость перекрытия, состоящего из четырех балок главного направления и одной перекрестной связи, нагруженного равномерно распределенным давлением p . Балки главного направления и перекрестная связь свободно опираются по концам (рис. 1.18). Введем следующие обозначения: e — расстояние между балками главного направления; l и l_1 — моменты инерции соответственно балок главного на-

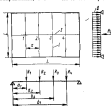


Рис. 1.18. Расчетная схема перекрытия. 1—4 — узлы перекрестной связи.

правления и перекрестной связи; l и l_1 — длины соответственно балок главного направления и перекрестной связи; p — давление, kH/m^2 ; $Q = p \cdot e l_1$ — нагрузка на каждую балку главного направления.

Из симметрии изогнутая перекрестная и основная, действующая на нее, следуют $R_1 = R_4$; $R_2 = R_3$; $w_1 = w_4$; $w_2 = w_3$. Для определения неизвестных реакций вместо четырех уравнений составим два. С этой целью, используя принцип взаимности, с помощью стрелочных точек [20, т. 1] запишем выражение для стрелок балок главного направления и перекрестной связи в точках 1 и 2:

стрелка балки главного на-

правления в точке 1

$$w_1 = 5Ql^3/384EI - R_1 l^3/48EI;$$

стрелка перекрестной связи в точке 1 ($x = a_1$)

$$w_2 = R_1 l_1^3 [(\delta_1 \delta_2 / l_1 - a_1^2 l_1) / 6EI + R_2 l_1^3 \{ a_1 (\delta_2 \delta_1 / l_1^2 - a_1^2 / l_1^2) / 6EI \};$$

стрелка балки главного направления в точке 2

$$w_3 = 5Ql^3/384EI - R_2 l^3/48EI;$$

стрелка перекрестной связи в точке 2 ($x = a_2$)

$$w_4 = R_2 l_1^3 [(\delta_2 \delta_1 / l_1 - a_2^2 l_1) / 6EI + R_1 l_1^3 \{ a_2 (\delta_1 \delta_2 / l_1^2 - a_2^2 / l_1^2) / 6EI + (a_2 - a_1)^2 / l_1^2 \} / 6EI.$$

Подставляя значения $a_1 = l/3$, $a_2 = 2l/3$, $\delta_1 = 4l/3$, $\delta_2 = 3l/3$ и приравняв стрелки балок, получим уравнения в точках 1 и 2, выражения для системы уравнений для определения неизвестных R_1 и R_2 :

$$5Ql^3/384EI - R_1 l^3/48EI = 11R_1 l^3/768EI + 17R_2 l^3/768EI;$$

$$5Ql^3/384EI - R_2 l^3/48EI = 17R_1 l^3/768EI + 35R_2 l^3/768EI.$$

Далее решая систему в общем виде, получим, подставив численные значения исходных величин: $l = 15$ м; $l_1 = 12$ м; $e = 3,0$ м; $i = 0,50$; $p = 100$ kH/m^2 ; $Q = p \cdot e l_1 = 100 \cdot 3 \cdot 12 = 3600$ kH . Подставив эти значения в систему уравнений и перенеся неизвестные в левую часть, а известные в правую часть уравнений, определим unknown реакции

$$229,5R_1 + 76,5R_2 = 405\,000;$$

$$76,5R_1 + 309,5R_2 = 405\,000;$$

откуда $R_1 = 1444$ kH ; $R_2 = 963$ kH . Максимальные изгибающие моменты и средние прогибы соответственно в крайних и средних балках главного направления будут

$$M_{\text{ср}} = -Ql^2/8 + R_1 l/4 = -3600 \cdot 12^2/8 + 1444 \cdot 12/4 = -1998$$
 $kH \cdot м$;

$$M_{\text{кр}} = -Ql^2/8 + R_2 l/4 = -3600 \cdot 12^2/8 + 963 \cdot 12/4 = -2511$$
 $kH \cdot м$.

Максимальный изгибающий момент в перекрестной связи

$$M_{\text{кр}} = -R_1 a_1 - R_2 a_2 = -R_1 l/3 - 2R_2 l/3 = -1444 \cdot 15/3 - 2 \cdot 963 \cdot 15/3 = -10\,155$$
 $kH \cdot м$.

Из расчета перекрытия следует, что перекрестная связь поддерживает балки главного направления.

Если жесткость балок одного направления значительно меньше жесткости балок другого направления, то рассмотреть перекрытие как систему пересекающихся балок не имеет смысла. В этом случае балки меньшей жесткости рассчитывают как изолированные с жесткими опорами на балках большей жесткости (например, балки основного набора и распорки связи).

Важным фактором, определяющим возможность эксплуатации любого инженерного сооружения в заданных условиях, является устойчивость его конструктивных элементов. В составе судового корпуса имеется ряд связей, которые подвержены действию сжимающих нагрузок, способных вызвать потерю устойчивости (т. е. их выходящие). Например, при плавании судна на волновой волне сжатия оказываются продольные связи верхних палуб, а при плавании на вершинах волн — продольные связи днища. Потеря устойчивости основных связей может привести к серьезным нарушениям прочности судового корпуса, а в ряде случаев и к гибели судов. Для ряда элементов конструкций корпуса судна устойчивость является условием, определяющим их размеры (продольные балки палубного набора, палубы, распорки и т. д.).

Из курса технической механики известно, что возможны три состояния равновесия систем:

- 1) устойчивое, когда система, мало отклоненная от состояния равновесия под действием приложенной нагрузки, после удаления этой нагрузки, снова возвращается в состояние равновесия;
- 2) неустойчивое, когда при тех же условиях система не возвращается в состояние равновесия, а стремится еще более отклониться от него;
- 3) безразличное, когда при тех же условиях система не возвращается в состояние равновесия и не стремится увеличить отклонения, т. е. система имеет бесконечно много положений равновесия.

Особенность упругих систем состоит в том, что при изменении действующих на них определяющих нагрузок, они могут переходить из одного состояния равновесия в другое.

Проектируемые конструкции должны находиться в состоянии устойчивого равновесия. Статическая устойчивость называется устойчивостью под действием нагрузок, возрастающих относительно медленно.

Еще во второй половине XVIII в. Эйлер разработал некоторые основные вопросы упругой устойчивости. Однако решения, которые были им получены, до конца XIX в. не входили в практику расчетов, так как они были выполнены для стержней, которые теряют устойчивость при нагрузках, лежащих в пределах пропорциональности, т. е. применимости закона Гука.

Нагрузка, при которой равновесие системы становится безразличным по отношению к одному из возможных малых ее отклонений, называется критической. Условно ее называют Эйлеровой $P_{кр}$ — критическую нагрузку упругих систем, численную в предположении о применимости закона Гука, а критическую нагрузку $P_{кр}$ — истинное значение этой нагрузки, определен-

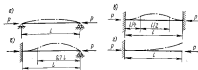


Рис. 1.19. Случаи закрепления концов стержня на опорах при сжатии: а — свободно открытые концы; б — один конец жестко заделан, другой — свободно открыт; в — жестко заделаны оба конца; г — один конец жестко заделан, другой — свободно

ное с учетом отклонения от закона Гука. Те же понятия отнесем и к напряжениям

$$\sigma_{кр} = P_{кр}/F; \quad \sigma_{кр} = P_{кр}/F. \quad (1.9)$$

Формулы Эйлеровых нагрузок и напряжений имеют вид

$$P_{кр} = \pi^2 EI / \mu l^2; \quad \sigma_{кр} = \pi^2 EI / \mu l^2 F. \quad (1.10)$$

где F — площадь поперечного сечения стержня с присоединенным поперечным моментом инерции I ; l — минимальный момент инерции стержня с присоединенным поперечным моментом; μl — приведенная длина стержня — расстояние между точками перегиба на краях; μ — коэффициент приведенности. Если учесть, что $\mu^2 = IF$, где μ — радиус инерции сечения, и обозначить $\lambda = \mu l / r$, то получим $\sigma_{кр} = \pi^2 E / \lambda^2$, где λ — относительная гибкость стержня.

Формулы Эйлера справедливы только в пределах пропорциональности, т. е. $\sigma_{кр} \leq \sigma_{\text{предел}}$, поэтому ими можно пользоваться только при расчете устойчивости стержней с относительной гибкостью

$$\lambda \geq \pi \sqrt{E / \sigma_{\text{предел}}},$$

где $\sigma_{\text{предел}}$ — предел пропорциональности материала. Так, если для углеродистой стали принять $\sigma_{\text{предел}} \approx 196$ МПа, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, то

$$\lambda \geq \pi \sqrt{E / \sigma_{\text{предел}}} = 3,14 \sqrt{2 \cdot 10^5 / 196} \approx 100,$$

т. е. для стержня из углеродистой стали теоретические формулы Эйлеровых напряжений и нагрузок справедливы при $\lambda \geq 100$.

Эйлером были определены значения критической нагрузки для различных случаев закрепления стержней (рис. 1.19):

I случай (рис. 1.19, а), $\mu = 1,0$

$$P_k = \pi^2 EI / l^2; \quad \sigma_k = \pi^2 EI / l^2 F.$$

II случай (рис. 1.19, б), $\mu = 0,7$

$$P_k = 2\pi^2 EI / l^2; \quad \sigma_k = 2\pi^2 EI / l^2 F.$$

III случай (рис. 1.19, в), $\mu = 0,5$

$$P_k = 4\pi^2 EI / l^2; \quad \sigma_k = 4\pi^2 EI / l^2 F.$$

IV случай (рис. 1.19, г), $\mu = 2,0$

$$P_k = \pi^2 EI / 4l^2; \quad \sigma_k = \pi^2 EI / 4l^2 F.$$

Однако в судовых конструкциях относительная гибкость стержней обычно значительно меньше 100, и поэтому теоретические формулы, основанные на использовании закона Гука, не применимы. В конце XIX в. были предложены различные формулы для определения критических напряжений за пределом пропорциональности, основанные на опытных данных. Для таких стержней используют выражения

$$P_{кр} = \eta P_k; \quad \sigma_{кр} = \eta \sigma_k \quad (1.11)$$

где η — коэффициент, учитывающий влияние отступлений от закона Гука на устойчивость.

С целью практического определения критической нагрузки и критических напряжений в судовых конструкциях расчетах в настоящее время применяют обобщенные кривые, построенные по экспериментальным данным [20, т. 3]. На основании этих кривых для удобства пользования составлена табл. 1.2 зависи-

Таблица 1.2. Зависимость коэффициента η в зависимости от отношения σ_k/σ_s

σ_k/σ_s	η	σ_k/σ_s	η	σ_k/σ_s	η
0,60	1,000	1,20	0,728	1,90	0,515
0,65	0,982	1,25	0,706	1,95	0,504
0,70	0,965	1,30	0,691	2,00	0,493
0,75	0,948	1,35	0,676	2,05	0,483
0,80	0,930	1,40	0,660	2,10	0,473
0,85	0,913	1,45	0,645	2,15	0,463
0,90	0,896	1,50	0,629	2,20	0,453
0,95	0,880	1,55	0,613	2,25	0,442
1,00	0,864	1,60	0,598	2,30	0,433
1,05	0,848	1,65	0,579	2,35	0,424
1,10	0,832	1,70	0,563	2,40	0,416
1,15	0,816	1,75	0,549	2,45	0,408
		1,80	0,534	2,50	0,400
		1,85	0,525	2,55	0,392

мости коэффициента η от отношения σ_k/σ_s . Из указанной работы видно, что при

$$\sigma_k/\sigma_s < 0,5 \quad \sigma_{кр} = \sigma_k;$$

$$\text{при } \sigma_k/\sigma_s > 2,5 \quad \sigma_{кр} = \sigma_s.$$

Критические напряжения всегда должны быть больше сжимающих, но не больше σ_s .

Если по заданным геометрическим элементам поперечного сечения и длине стержня необходимо определить критическую силу, то задачу решают в такой последовательности: находят P_k и σ_k , затем по таблице определяют η ; далее вычисляют $\sigma_{кр} = \eta \sigma_k$ и $P_{кр} = \sigma_{кр} F$.

Для подбора сечения стержня, обеспечивающего заданную устойчивость, следует: по заданной величине $\sigma_{кр}$ согласно графику [20, т. 3, с. 330] установить σ_k ; далее, пользуясь формулой $\sigma_k = \pi^2 EI / (l\mu)^2 F$, определить отношение l/F и методом подбора найти F и I для стержня с присоединенным пояском.

Вопросы для заочника

1. Назовите правило закона, применяемое в судовых конструкциях.
 2. Как распределяются нормальные и касательные напряжения по высоте бруса балки при изгибе? По каким формулам их определяют?
 3. Объясните методику подбора профиля балки по $\sigma_{кр}$ и величине нагрузки.
 4. Назовите требования, предъявляемые к профилю балки набора.
 5. Охарактеризуйте статическое поведение балки и назовите последовательность раскрытия статической неопределенности двоярными балками.
 6. Расскажите о последовательности раскрытия статической неопределенности многопролетных балок в порядке построения закор M и N .
 7. Назовите методы раскрытия статической неопределенности простых рам в простейших случаях.
 8. Что такое устойчивость стержня? Какие бывают состояния равновесия упругих систем?
- Для каких стержней справедливы формулы Эйлера? Назовите условия обеспечения устойчивости.

ГЛАВА 2. ИЗГИБ И УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАСТИН

§ 7. Пластины в составе судового корпуса, их размеры и характер закрепления на опорной контуре

Пластины — плоские листовые конструкции, толщина которых существенно мала по сравнению с другими габаритными размерами, ограниченные по толщине двумя поверхностями, а по контуру — двумя рядами параллельных балок. Плоскость, равноудаленная от поверхностей, ограничивающих пластину, называется срединной плоскостью пластины (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Геометрические параметры пластины.

В судокорпусостроении пластины нашли широкое применение. Наружная обшивка днища и бортов, настилы залуб и палубы, обшивка переборок, надстроек, рубок и другие связи представляют собой совокупность тонких пластин (примерно 70 % от массы корпуса составляют пластины и только около 30 % другие связи).

Основное назначение пластин корпуса — обеспечивать водонепроницаемость, прочность и жесткость корпуса при любых условиях плавания судна в море. Пластины корпуса испытывают нагрузки от общего продольного изгиба судна в своей плоскости, от местных усилий в виде давления воды на поверхность пластин перпендикулярно их плоскости.

Водонепроницаемость корпуса будет обеспечена, если пластины корпуса не разорвутся при действии приложенных к ним общих и местных усилий (т. е. если напряжения и деформации пластин не превысят опасных значений, установленных экспериментальным путем и многолетней практикой эксплуатации судов).

Напряжения и деформации пластин при действии заданных нагрузок зависят от размеров пластин и характера закрепления на опорной контуре. По форме пластины судового корпуса могут быть треугольными, круглыми, прямоугольными, но в большинстве случаев они имеют прямоугольную форму с разным отношением сторон.

Расчет пластины в общем случае представляет большие математические трудности. Задача значительно упрощается, если рассматривать тонкие пластины. Тонкими принято называть пластины, у которых отношение толщины к наименьшему размеру в плане не превышает 1/5 (т. е. $a/b \leq 1/5$). В основном пластины, встречающиеся на практике, относятся к категории тонких ($a/b < 1/40$). Для них могут быть приняты следующие, упрощающие расчет, допущения:

справедлива «гипотеза прямых нормалей» Кирхгофа, согласно которой отрезок перпендикуляра к срединной плоскости до деформации остается прямым и перпендикулярным к срединной плоскости после деформации, причем расстояние между точками перпендикуляра не изменяется (т. е. нормаль не растягивается и не сжимается);

нормальные напряжения σ_x в продольных, параллельных срединной плоскости, пренебрежимо малы по сравнению с нормальными напряжениями в поперечных сечениях;

справедлив закон Гука.

Как и в теории изгиба балок, эти допущения позволяют свести решение трехмерной задачи о напряженно-деформированном состоянии пластины к двухмерной задаче (в теории балок — к одномерной) об отыскании формы срединной плоскости после деформации. Для толстых пластин (настилы) все допущения не применимы: любой слой толстой пластины, параллельный срединной плоскости, сходится к объемному напряженному состоянию.

Изгиб пластин возникает от действия поперечной нагрузки, перпендикулярной срединной плоскости.

Пластины судовых переборок являются взаимными опорными контурами. Они нагружаются на краях силами, лежащими в их плоскостях и называемыми тангенциальными, или цепными. Поперечная нагрузка q вызывает в основном изгиб пластин, а цепные краевые усилия — растяжение, сжатие и сдвиг пластин в ее плоскости. Напряжения в поперечных сечениях пластины равны сумме изгибных напряжений (изменяющихся по толщине согласно линейному закону) и постоянных по толщине цепных напряжений. Если при определенных условиях одно из слагаемых оказывается намного меньше второго, им можно пренебречь.

В данной главе приведены формулы для расчета прочности изогнутых пластин, физико-механические свойства которых одинаковы во всех направлениях. Приняты следующие обозначения: a и b — длина и короткая стороны пластины; E — модуль нормальной упругости (модуль Юнга) материала; p — интенсивность распределенной нагрузки (давления); q — цепные напряжения; z — толщина пластины; w — максимальный прогиб посередине пластины; μ — коэффициент Пуассона; $\sigma_{изг}$ — изгибные напряжения.

§ 8. Классификация пластин

Стандартной классификации пластин не существует. В строительной механике корабля применяется условная классификация пластин, которая позволяет упростить расчетные формулы. В зависимости от степени жесткости и действующих напряжений тонкие пластины классифицируются следующим образом:

абсолютно жесткие пластины, при изгибе которых цепные напряжения, возникающие под действием поперечной нагрузки, настолько малы, что ими можно пренебречь, т. е. суммарные напряжения в пластине $\sigma = \sigma_{изг}$;

пластины конечной жесткости — влияние их цепных усилий на изгиб существенно и цепные напряжения соизмеримы с изгибными, а суммарные напряжения $\sigma = \sigma_{изг} + q$;

гибкие пластины или мембраны, при изгибе которых цепные напряжения намного больше максимальных изгибных, поэтому изгибы можно пренебречь, а суммарные напряжения $\sigma = \rho$.

Приведенная классификация относительна. Одна и та же пластина при неизменных условиях закрепления на опорной контуре в зависимости от значения нагрузок ρ может быть отнесена к любой из указанных выше классов.

Для пластины, имеющей определенную толщину и сравнительно малую нагрузку, возникающие цепные напряжения окажутся пренебрежимо малыми по сравнению с изгибными напряжениями, и пластина будет изгибаться как абсолютно жесткая. При дальнейшем увеличении нагрузок цепные напряжения возрастут и станут соизмеримыми с изгибными. Пластина будет изгибаться как пластина конечной жесткости. Наконец, при еще большем увеличении нагрузок цепные напряжения станут преобладающими, и пластина станет гибкой. Вопрос о том, к какому классу следует отнести ту или иную пластину, решается с учетом размеров пластины, вида опорной контуры и значений действующей нагрузки.

Гибкие пластины в составе судового корпуса практически не встречаются, поэтому в дальнейшем все расчетные формулы и методики расчета будут приводиться для жестких пластин. Методика определения класса пластины рассмотрена при исследовании изгиба пластины конечной жесткости.

§ 9. Расчет абсолютно жестких пластин

Изгиб пластин, лежащих по цилиндрической поверхности. Многие пластины судового корпуса работают как абсолютно жесткие и имеют вид удлиненного прямоугольника. Если отношение сторон $a/b > 2$, то с достаточной для практики точностью изгиб такой пластины под действием равномерно распределенной поперечной нагрузки можно считать цилиндрическим. В этом случае на большей части длины пластины прогибается одинаково, и лишь на небольших участках в районе коротких сторон опорной контуры прогибы пластины изменяются по длине (рис. 2.2, а).

Для пластины, лежащей по цилиндрической поверхности, достаточно рассчитать мысленно выделенную из ее средней части балку-полоску единичной ширины (1 см) с прямоугольным поперечным сечением $F = s \cdot 1 = s$ (рис. 2.2, б).

Термин «балка-полоска» был введен в строительную механику корабля И. Г. Бубновым, который разработал теорию сложного изгиба балок и распространил результаты этой теории на изгиб пластин, лежащих по цилиндрической поверхности.

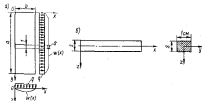


Рис. 2.2. К расчету изгиба, лежащей по цилиндрической поверхности: а — расчетная схема пластины; б — балка-полоска и ее сечение.

Поперечное сечение балки во время изгиба искажается (рис. 2.3). В отличие от обычной балки изгиб балки-полоски не сопровождается искажением поперечного сечения, так как этому препятствуют соседние балки-полоски. Следовательно, прямоугольное сечение в процессе изгиба остается прямоугольным.

Если бы рассматриваемая балка-полоска изгибалась независимо от остальных частей пластины, то для исследования ее изгиба были бы применимы ранее выведенные формулы при условии, что в них $I = bs^3/12 = 1 \cdot s^3/12$. Если же балка-полоска изгибается в составе пластины, то условия изгиба изменяются лишь вследствие того, что ее поперечное сечение не может деформироваться в направлении оси oy .

Таким образом, в случае изгиба изолированной балки-полоски (или обычной балки) $\sigma_y = 0$; $\epsilon_y \neq 0$, а в случае изгиба балки-полоски, входящей в состав пластины, $\sigma_y \neq 0$, $\epsilon_y = 0$.

Согласно закону Гука связь между напряжениями и деформациями балки-полоски, входящей в состав пластины, определяется формулами

$$\begin{aligned} \sigma_x &= (\epsilon_x + \mu \epsilon_y) E / (1 - \mu^2), \\ \sigma_y &= (\epsilon_y + \mu \epsilon_x) E / (1 - \mu^2), \end{aligned} \quad (2.1)$$

где σ_x и σ_y — нормальные напряжения по осям соответственно x и y ; ϵ_x и ϵ_y — относительные удлинения по осям соответственно x и y .

Для обычной балки (как изолированной балки-полоски) $\sigma_y = 0$ и, следовательно, $\epsilon_y = -\mu \epsilon_x$. Подставляя выражение ϵ_y в первое уравнение (2.1), получим для обычной балки $\sigma_x = E \epsilon_x$. Применительно к балке-полоске, входящей в состав пластины $\epsilon_y = 0$ и, следовательно, $\sigma_x = \epsilon_x E / (1 - \mu^2)$.



Рис. 23. Изменение нормальных напряжений вдоль оси балки с удлинением в направлении этой оси, виден их сдвиг.

Сопоставляя формулы, связывающие нормальные напряжения вдоль оси балки с удлинением в направлении этой оси, видим их сдвиг. Различаются же они тем, что для балки-полоски вместо модуля нормальной упругости E принята величина $E/(1-\mu^2)$, называемая приведенным модулем нормальной упругости.

Используя дифференциальное уравнение изгиба балок $EIw'' = M$, получаем дифференциальное уравнение изгиба балки-полоски

$$w''E^2/12(1-\mu^2) = M, \quad (2.2)$$

где величина $E^2/12(1-\mu^2) = D$ — цилиндрическая жесткость пластины; w'' — вторая производная по x прогиба балки-полоски. Формулу (2.2) можно записать в следующем виде:

$$Dw'' = M. \quad (2.3)$$

Дифференциальное уравнение изгиба балки-полоски, выведенное из уравнения изгибающей по цилиндрической поверхности, отличается от обычного дифференциального уравнения изгиба балки только тем, что:

изгибающий момент M относится к единице ширины сечения (размерность силы);

в качестве момента инерции I выступают момент инерции единичных ширины сечений пластины $s^2/12$;

роль модуля нормальной упругости (модуль Юнга) принимает на себя величина $E = E/(1-\mu^2)$;

при ширине балки-полоски, равной 1 см, интенсивность поперечной нагрузки q , приходящаяся на единицу длины, равна интенсивности распределенной нагрузки q (давлению) на пластину.

Используя из теории изгиба балок зависимость $dM/dx = -N$; $d^2M/dx^2 = -q$ и продифференцировав обе части уравнения (2.3) дважды по x , получим $D(w''') = -q$. Определение прогиба и изгибающего момента и нормальных напряжений. Воспользовавшись формулой (1.3) для определения нормальных напряжений балок при изгибе и подставив значение момента сопротивления поперечного сечения балки-полоски $W = 1/0.5s = s^2/6$, получим формулу для наибольших нормальных напряжений в краях волокон балки-полоски

$$\sigma_{\max} = \pm 6M/s^2. \quad (2.4)$$

Касательные напряжения, вызванные перерезывающими силами, при цилиндрическом изгибе пластины оказываются малыми, и их обычно не вычисляют.

В практических расчетах пластины, гнувшиеся по цилиндрической поверхности, широко используют таблицы элементов изгиба статически определяемых и статически неопределяемых балок [20, т. 1]. При этом ограничиваются определением наибольших значений прогибов и изгибающих моментов. В формулах для вычисления прогиба и изгибающего момента заменяют жесткость на изгиб EI цилиндрической жесткостью D , интенсивность равномерно распределенной нагрузки q — интенсивностью нагрузки на пластину q , а длину балки l — длиной короткой стороны пластины b . В результате получают значения прогиба и изгибающего момента для пластин.

Рассматривая цилиндрический изгиб пластины, исключаяющий влияние коротких сторон опорного контура, предполагают, что пластина имеет бесконечно большую длину. При конечной длине пластины короткая сторона опорного контура всегда оказывает благоприятное влияние на условия изгиба, т. е. при небольшом отношении сторон пластины наибольшие прогибы и напряжения всегда меньше, чем в балке-полоске.

В составе судового корпуса имеются пластины, отношение сторон опорного контура которых меньше двух [$(a/b) < 2$]. При расчете таких пластин по приведенным выше формулам получают погрешность в безразличную сторону. Для прикладных расчетов пластин указанные формулы вполне пригодны.

Общий случай изгиба абсолютно жестких пластин. В практике расчетов абсолютно жестких пластин широко применяют приближенные расчетные формулы с использованием таблиц, составленных на основании теоретических решений. Обычно определяют только прогибы и изгибающие моменты. При этом расчетная формула проверки прочности пластин имеет вид

$$\sigma = 6M/s^2 \leq \sigma_{\text{доп}}.$$

В настоящих учебнике приведены формулы (без выводов) для случаев изгиба пластин, наиболее часто встречающихся в практике расчетов.

Пластина свободно опирается по всем четырем краям (рис. 2.4, а). Обозначения: M_1 и M_2 — изгибающие

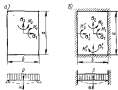


Рис. 2.4. Расчетные схемы общего изгиба абсолютно жестких пластин: а — свободно опирается; б — жестко защемлена.

Таблица 2.1. Численные значения коэффициентов k_i для расчета пластин, свободные опоры по всему контуру

α/β	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}
1,0	0,0443	0,0470	0,0470	0,0470	0,338	0,420	0,430	0,005	0,050	0,250	0,250
1,1	0,0530	0,0494	0,0553	0,346	0,360	0,440	0,443	0,064	—	—	—
1,2	0,0619	0,0501	0,0626	0,352	0,350	0,450	0,455	0,062	0,260	0,265	0,265
1,3	0,0697	0,0504	0,0693	0,357	0,397	0,465	0,468	0,061	—	—	—
1,4	0,0770	0,0506	0,0753	0,361	0,411	0,470	0,478	0,060	0,265	0,210	0,210
1,5	0,0843	0,0510	0,0812	0,363	0,424	0,465	0,466	0,057	—	—	—
1,6	0,0906	0,0505	0,0862	0,366	0,435	0,468	0,461	0,054	0,267	0,232	0,232
1,7	0,0964	0,0485	0,0908	0,367	0,444	0,468	0,499	0,052	—	—	—
1,8	0,1017	0,0479	0,0948	0,368	0,452	0,461	0,491	0,050	0,271	0,217	0,217
1,9	0,1064	0,0471	0,0985	0,369	0,459	0,464	0,502	0,048	—	—	—
2,0	0,1106	0,0464	0,1017	0,370	0,465	0,466	0,500	0,046	0,272	0,244	0,244
3,0	0,1536	0,0401	0,1165	0,371	0,496	0,466	0,505	0,051	0,273	0,410	0,410
4,0	0,1490	0,0384	0,1205	0,371	0,496	0,500	0,502	0,054	0,272	0,425	0,425
5,0	0,1416	0,0375	0,1246	0,371	0,500	0,500	0,500	0,059	0,272	0,422	0,422
∞	0,1422	0,0375	0,1250	0,371	0,500	0,500	0,500	0	0,272	0,500	0,500

Таблица 2.2. Численные значения коэффициентов k_i для расчета пластин, жестко заделанных по всему контуру

α/β	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}
1,0	0,0138	0,0229	0,0229	0,0515	0,0517	0,402	0,452	0,440	0,260	0,250	0,250
1,1	0,0165	0,0234	0,0264	0,0526	0,0554	0,412	0,449	0,453	0,255	0,271	0,271
1,2	0,0191	0,0231	0,0269	0,0554	0,0612	0,381	0,471	0,467	0,265	0,290	0,290
1,3	0,0219	0,0224	0,0307	0,0595	0,0698	0,352	0,481	0,482	0,266	0,305	0,305
1,4	0,0227	0,0215	0,0340	0,0626	0,0714	0,327	0,505	0,494	0,266	0,320	0,320
1,5	0,0241	0,0194	0,0366	—	0,0753	0,305	0,517	0,485	0,265	0,332	0,332
1,6	0,0251	0,0193	0,0381	0,0571	0,0794	—	—	0,485	0,265	0,340	0,340
1,7	0,0260	0,0182	0,0393	0,0571	0,0807	—	—	0,485	0,264	0,352	0,352
1,8	0,0267	0,0174	0,0401	0,0571	0,0821	—	—	0,485	0,263	0,360	0,360
1,9	0,0272	0,0165	0,0407	0,0571	0,0836	—	—	0,485	0,262	0,367	0,367
2,0	0,0276	—	—	0,0571	0,0839	—	—	0,485	0,262	0,374	0,374
3,0	0,0279	—	—	0,0571	0,0832	—	—	0,485	0,261	0,412	0,412
4,0	0,0282	—	—	0,0571	0,0830	—	—	0,485	0,261	0,420	0,420
5,0	0,0284	—	—	0,0571	0,0833	—	—	0,485	0,260	0,420	0,420
∞	0,0284	—	—	0,0571	0,0833	—	—	0,485	0,260	0,500	0,500

моменты в центре пластины, в сечении, параллельном соответствующей короткой и длинной сторонам пластины. Остальные обозначения указаны в § 7. Расчетные формулы:

$$w = k_1 p b^4 / E \delta^3; \quad M_1 = k_2 p b^2; \quad M_2 = k_3 p b^2; \quad \sigma_x = 6 M_2 / \delta^2. \quad (2.5)$$

Числовые значения коэффициентов k_1, k_2, k_3 приведены в зависимости от отношения сторон a/b в табл. 2.1 [20, т. 2].

Пластина жестко заделана на опорном контуре по всем четырем кройкам (рис. 2.4, б). Обозначения: M'_1 и M'_2 — наибольшие и наименьшие моменты соответственно в середине короткой и длинной сторон опорного контура. Остальные обозначения те же, что и для свободно опертой пластины. Расчетные формулы:

$$w = k_1 p b^4 / E \delta^3; \quad M_1 = k_2 p b^2; \quad M_2 = k_3 p b^2; \quad M'_1 = k_4 p b^2; \quad M'_2 = k_5 p b^2; \quad \sigma_x = 6 M'_2 / \delta^2. \quad (2.6)$$

Числовые значения коэффициентов k_2 приведены в зависимости от отношения сторон a/b в табл. 2.2 [20, т. 2].

§ 10. Расчет пластин конечной жесткости

Общие положения. В соответствии с классификацией пластин конечной жесткости* выделяют такие пластины, при изгибе которых изгибные и продольные напряжения — величины одного порядка, поэтому существенно взаимное влияние прогиба $w(x, y)$ и цепных напряжений.

В корпусных конструкциях пластины соединены с другими элементами и имеют большое количество кромок, поэтому являются статически неопределимыми. Статически неопределимы они и по отношению к цепным реакциям на кройках (R_x, R_y), которые оказывают сильное влияние на напряженное состояние пластины конечной жесткости.

Прогиб пластин вызываются поперечной нагрузкой и сам же существенно влияет на цепные усилия, которые, в свою очередь, отражаются на прогибах. Поэтому взаимозависимость прогиба, давления, цепных, изгибных и суммарных напряжений оказывается нелинейной. Принцип наложения при расчете пластины конечной жесткости неприменим. Прямоточному и сильно вытянутой прямоугольной пластине (при $a/b \rightarrow \infty$) И. Г. Бубнов получил точное решение для равномерного давления p и проанализировал напряженно-деформированное состояние. С целью раскрытия статической неопределимости цепного напряжения он принял условие совместной деформации балки-полоски в опорного контура и показал, что эти напряжения зависят от коэффициента распора и размеров пласти-

ны. Связь, препятствующая свободному смещению кромок пластин в ее плоскости и вызывающие статически неопределимые кромоновые цепные реакции, называются распорами. Коэффициент распора элемент от площади распора: $K = P/(F + \lambda)$, где F — площадь распора, приходящаяся на единицу длины большей из сторон. Для корпусных конструкций $K = 0,2 \div 0,8$.

Применение зависимости сложного изгиба и условия совместной деформации привело к расчетным зависимостям для стальных пластин при $\mu = \cos \alpha$, $\mu = 0,3$, $E = 2,1 \cdot 10^5$ кг/см². Ниже приведены формулы (без выводов) расчета пластин конечной жесткости для двух случаев закрепления.

Порядок расчета пластин конечной жесткости. По заданным b, λ , значениям нагрузки p и коэффициенту распора K

Таблица 2.3. Значения неопределимых функций для расчета изгиба пластины конечной жесткости

λ/b	При $\mu=0$			При $\mu=0,3$			
	$\lg P$	$\varphi(b)$	$\chi(b)$	$\lg P$	$\varphi(b)$	$\chi(b)$	$\psi(b)$
3,0*	1,035*	-0,386	-0,449	2,595*	11,591	13,48	7,348
3,5*	2,261*	-0,691	-0,720	2,160*	2,703	3,08	2,086
5,0*	2,746*	-1,021	-1,092	2,055*	1,672	1,768	1,436
1,5*	3,713*	13,38	11,68	2,095*	1,291	1,243	1,192
1,9*	3,960*	1,684	1,782	2,377*	1,111	1,130	1,074
0,5*	3,182*	1,113	1,116	2,443*	1,026	1,030	1,017
0	∞	1,000	1,000	∞	1,000	1,000	1,000
0,5	3,093	0,968	0,965	2,421	0,970	0,972	0,984
1,0	2,687	0,711	0,701	2,090	0,900	0,904	0,923
1,5	2,377	0,532	0,511	1,867	0,817	0,788	0,776
2,0	2,115	0,380	0,367	1,685	0,715	0,673	0,696
2,5	1,888	0,281	0,268	1,524	0,617	0,565	0,574
3,0	1,690	0,213	0,200	1,377	0,539	0,487	0,512
3,5	1,515	0,166	0,153	1,244	0,473	0,385	0,414
4,0	1,389	0,130	0,120	1,120	0,388	0,330	0,363
4,5	1,218	0,107	0,097	1,006	0,345	0,287	0,319
5,0	1,090	0,088	0,079	0,896	0,291	0,234	0,266
5,5	0,975	0,074	0,066	0,798	0,254	0,189	0,240
6,0	0,865	0,063	0,055	0,705	0,223	0,163	0,217
6,5	0,765	0,054	0,042	0,617	0,197	0,139	0,201
7,0	0,671	0,047	0,041	0,535	0,175	0,121	0,187
7,5	0,584	0,041	0,038	0,457	0,159	0,106	0,174
8,0	0,502	0,036	0,031	0,383	0,141	0,092	0,158
8,5	0,425	0,032	0,028	0,318	0,127	0,083	0,141
9,0	0,353	0,028	0,023	0,246	0,115	0,074	0,126
9,5	0,283	0,026	0,022	0,183	0,105	0,066	0,103
10,0	0,218	0,024	0,020	0,122	0,096	0,050	0,070
10,5	0,155	0,021	0,018	0,064	0,088	0,034	0,059
11,0	0,095	0,020	0,017	0,009	0,081	0,020	0,048
11,5	0,039	0,018	0,015	1,065	0,073	0,015	0,038
12,0	1,064	0,016	0,014	1,006	0,069	0,012	0,039

* В этом параграфе используется терминология системы единиц, так как общепринятые таблицы и коэффициенты построены в этой системе.

* Отсутствует значение λ/b и χ/b .

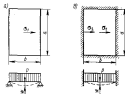


Рис. 2.5. Расчетные схемы изгиба пластины конечной жесткости: а — свободно опертая; б — жестко заделанная.

Свободно опертая пластина (рис. 2.5, а). Коэффициент опорной пары $\kappa = M_0/M^*$, где M_0 — опорный изгибающий момент на длинных сторонах, возникающий при данном закреплении; M^* — опорный изгибающий момент для жесткой заделки краев пластины при той же нагрузке p . В рассматриваемом случае $\kappa = 0$. Напряжения σ и перемещения

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{1600}{\sqrt{K}} \frac{E}{(1-\mu^2)p} (a/b)^2 = \frac{32}{p\sqrt{K}} (100\delta/b)^2; \\ q &= 8\sigma_1^2 (100\delta/b)^2, \quad \sigma_1 = q + 0,75p (b/\delta)^2 \chi_0(a); \\ \omega &= 6,9p\delta (b/100\delta)^2 \varphi_0(a), \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

где σ_1 — полное напряжение на ненагруженной поверхности пластины посредине пролета.

Жестко заделанная пластина (рис. 2.5, б). Коэффициент опорной пары $\kappa = 1,0$. Напряжения σ и перемещения

$$\left. \begin{aligned} q &= 8\sigma_1^2 (100\delta/b)^2, \quad \sigma_1 = q + 0,25p (b/\delta)^2 \chi_0(a); \\ \sigma_2 &= q + 0,5p (b/\delta)^2 \chi_0(a); \quad \omega = 1,4p\delta (b/100\delta)^2 \varphi_1(a), \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

где σ_2 — полное напряжение на нагруженной поверхности в заделке на данной стороне опорного контура.

И. Г. Бубновым и Ю. А. Шиманским были выполнены расчеты цилиндрического изгиба пластин с различными условиями закрепления и различным отношением b/δ . Расчеты сведены в таблицах [20, т. 2, с. 424—430]. Результаты расчетов позволяют сделать выводы:

σ_1 при заданных значениях p и b/δ очень мало зависит от $K > 0,5$, причем влияние K и μ тем меньше, чем больше b/δ и

σ_1 . Если $\sqrt{K} = 0,7-1,0$, возникают максимальные напряжения σ_1 . Поэтому в практических расчетах коэффициент распора принимается равным 0,5;

максимальное напряжение σ_1 очень незначительно увеличивается при уменьшении толщины пластин δ (σ_{lim} падает, а q растет, суммарное почти не меняется), особенно, когда $b/\delta > 100$; ценные напряжения сильнее влияют на изгиб свободно опертых пластин, чем на изгиб жестко заделанных;

параметр жесткости пластин α , определяющий степень влияния цепных напряжений на изгиб пластин, существенно зависит от значения p , поэтому одна и та же пластина при малых нагрузках, пока $\alpha < 0,5$, является абсолютно жесткой, а при возрастании p становится сначала пластиной конечной жесткости, а затем абсолютно гибкой.

§ 11. Устойчивость пластин

Сжимающие условия. В процессе эксплуатации судна пластины воспринимают растягивающие и сжимающие нагрузки, действующие в их плоскости. Растягивающие условия обычно не представляют опасности для пластин. Сжимающие условия без заметного их возрастания могут вызвать потерю устойчивости (т. е. искривление ее срединной плоскости) и появление больших деформаций.

Теоретические сжимающие условия в плоскости пластин, при которых происходит потеря устойчивости пластин (выпучивание), называют эйлеровыми, или критическими; отношение этих усилий к площади поперечного сечения пластины — эйлеровыми (критическими) напряжениями.

Решая задачи устойчивости пластин, применяют методы, аналогичные тем, которые были изучены при рассмотрении задачи устойчивости стержней. Однако сжатые пластины менее чувствительны к отклонению от закона Гука, чем сжатые стержни [22, § 17 и 53].

В практических расчетах на устойчивость пластину рассматривают как изолированную от других пластин и свободно опертую на опорный контур. Однако пластины судовой корпуса работают не изолированно, а в составе перекрытия. «Распор» оказывает определенное влияние на пластину, подверженную действию сжимающих усилий, направленных параллельно срединной плоскости. Влияние его состоит в том, что пластина может выдерживать усилия больше эйлеровых. Однако после потери устойчивости пластин, при дальнейшем возрастании нагрузки основная ее часть будет передаваться на более жесткие связи (балки), подверженные пластин, вызывая в них увеличение напряжений. Поэтому расчет устойчивости пластин является важной частью расчета прочности. Критериями устой-

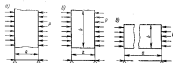


Рис. 2.6. Схемы расчета устойчивости пластин: а — с боковыми отношениями сторон и нагрузкой, действующей параллельно короткой ее стороне; б и в — пластины с симметричной нагрузкой, соответственно действующей параллельно короткому и длинному из краев.

чivosti пластин, работающих на сжатие, являются эйлеровы (критические) напряжения. В некоторых случаях потеря устойчивости пластин может вызвать значительные повреждения конструкций и привести к авариям.

Приближенный способ расчета свободно опертых пластин на устойчивость (рис. 2.6). Введем следующие обозначения: а — сторона пластины, вдоль которой направлены усилия; б — сторона пластины, перпендикулярная направлению усилий.

Для пластин с отношением сторон $a/b \rightarrow 0$ (см. рис. 2.6, а) эйлеровы напряжения определяются по формуле

$$\sigma_y = \pi^2 E s^3 / 12 (1 - \mu^2) a^2,$$

Примем для стали $E = 2,0 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$, тогда эйлеровы напряжения (в МПа) будут

$$\sigma_y = 9,86 \cdot 2 \cdot 10^5 (s^3/a^2) / 12 (1 - \mu^2) \approx 18 (100 s/a)^2. \quad (2.9)$$

Если пластина с конечным отношением сторон, то формула (2.9) преобразуется

$$\sigma_y = k \cdot 18 (100 s/a)^2, \quad (2.10)$$

где $k = [m + (a^2/\pi^2 b^2)]^2$ — коэффициент, зависящий от отношения сторон к числу полуволн сжатия, характеризующей форму потери устойчивости в направлении действия сжимающих напряжений. Число получено m и k :

$$0 \leq a/b \leq 1,415; \quad k = (1 + a^2/b^2)^2; \quad m = 1,0;$$

$$1,415 \leq a/b \leq 2,45; \quad k = (2 + a^2/2b^2)^2; \quad m = 2,0;$$

$$2,45 \leq a/b \leq 3,46; \quad k = (3 + a^2/3b^2)^2; \quad m = 3,0;$$

$$3,46 \leq a/b \leq \infty; \quad k = 4a^2/b^2; \quad m \geq 4,0.$$

Для пластин с отношением сторон $a/b \rightarrow \infty$ ($3,46 \leq a/b \leq \infty$) — см. рис. 2.6, в

$$\sigma_y = 4 (a/b)^2 \cdot 18 (100 s/a)^2 = 72 (100 s/b)^2. \quad (2.11)$$

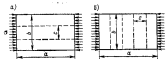


Рис. 2.7. К расчету устойчивости пластин, подкрепленным жесткими ребрами, расположенными параллельно (а) и перпендикулярно (б) сжимающим усилиям.

В практических расчетах можно пользоваться следующими двумя формулами, приводящими примерно к тем же результатам, что и формула (2.10):

для пластин, сжатых вдоль короткой стороны опорного контура $a/b \leq 1,0$ (см. рис. 2.6, б),

$$\sigma_y = 18 (100 s/a)^2 (1 + a^2/b^2)^2; \quad (2.12)$$

для пластин, сжатых вдоль длинной стороны опорного контура $a/b \geq 1,0$ (см. рис. 2.6, а),

$$\sigma_y = 72 (100 s/b)^2. \quad (2.13)$$

Критические напряжения и критические нагрузки пластин определяют с помощью тех же графиков и таблиц, что и для стержней — см. § 6. Критические напряжения сравнивают с пределом текучести σ_t материала конструкции. Они не должны превышать этого предела.

Устойчивость пластин, подкрепленных ребрами жесткости. Устойчивость пластин, сжатых в одном направлении, можно повысить двумя путями: увеличить толщину пластин или подкрепить пластину жесткими ребрами. Увеличение толщины не всегда целесообразно, так как значительно возрастает масса конструкции. Более рационально увеличивать жесткость пластин путем установкой ребер жесткости. Положим, что пластину, сжатую вдоль длинной стороны, подкрепленными ребрами, направленными вначале вдоль действия сжимающих усилий (рис. 2.7, а), а затем поперек действия сжимающих усилий (рис. 2.7, б). В обоих случаях расстояние между ребрами обозначим через c . В первом случае пластина разбивается на ряд пластин, сжатых вдоль длинных кромок, при этом $a \geq c$. Эйлеровы напряжения для полученной пластины со сторонами a и c определяют по формуле (2.13), в которой b следует заменить на c . Во втором случае пластина разбивается на ряд пластин, сжатых вдоль короткой стороны, со сторонами b и c , при этом $c \leq b$. Эйлеровы напряжения для полученной пластины вычисляют по формуле (2.12), заменив a на c .

Отношение $c^2/b^2 \rightarrow 0$, а выражение $(1 + c^2/b^2)^2 \rightarrow 1,0$, следовательно, для пластины с малым отношением c^2/b^2 формула (2.12) для определения эйлеровых напряжений примет вид

$$\sigma_e = 18(100s/c)^2. \quad (2.14)$$

Сравнивая формулы (2.13) при $b=c$ и (2.14), можно сделать важный вывод: если направление подкрепляющих пластину ребер совместить с направлением сжимающих усилий, то устойчивость пластины увеличится практически в 4 раза по сравнению с устойчивостью пластины, подкрепленной ребрами, установленными перпендикулярно направлению сжимающих усилий. Это одно из основных преимуществ продольной системы набора корпуса судна по сравнению с поперечной. Так как сжимающие усилия от общего продольного изгиба корпуса всегда направлены вдоль судна, то установка продольных ребер более рациональна.

В практических расчетах всегда решают обратную задачу, т. е. по заданным значениям эйлеровых напряжений определяют расстояние между ребрами и, следовательно, их число.

Максимально допустимое расстояние между ребрами свободно опертой пластины:

$$\begin{aligned} \text{при подкреплении поперечным набором } c_{\max} &\approx 100s \sqrt{18/\sigma_e}; \\ \text{при подкреплении продольным набором } c_{\max} &\approx 100s \sqrt{72/\sigma_e}. \end{aligned}$$

Число полей, на которые ребра разбивают пластину, при продольном наборе $n \geq b/c_{\max}$ и при поперечном наборе $n \geq a/c_{\max}$.

Вопросы для заочников

1. Перечислите допущения в расчетах тонкой пластины.
2. Охарактеризуйте пластину, подверженную изгибно-крутильной деформации, в зависимости от расчета этих пластин.
3. Что такое безразмерность? Как определяется ее жесткость и момент сопротивления?
4. Оцените влияние коэффициента раскрытия и толщины на суммарные напряжения в середине пластины конечной жесткости.
5. Охарактеризуйте методику определения эйлеровых напряжений для склепанной пластины и объясните зависимость от устойчивости.
6. Объясните, почему изгибаемый склепаный вдоль деформации стороны, более устойчив.

РАЗДЕЛ II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА МОРСКИХ СУДОВ

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА

§ 12. Общие сведения об архитектурно-конструктивных типах судов

Понятие «архитектурно-конструктивный тип судна». Это совокупность определенных архитектурных и конструктивных признаков, которые характеризуют конструкцию корпуса в соответствии с функциональным назначением судна как плавучего сооружения.

Архитектурные особенности судов обусловлены требованиями эксплуатации, надежности, экономии и эстетики. В судостроении предпочтение отдается судам, архитектурно-конструктивные признаки которых обеспечивают при экономных затратах материалов безопасность плавания, наибольшую приспособленность в соответствии с их назначением и достаточную надежность.

Архитектурно-конструктивные типы судов с увеличением объема перевозок, номенклатуры грузов постоянно развиваются: появляются новые, совершенствуются традиционные. Развитие архитектурных достоинств судов непосредственно связано с улучшением мореходности, функциональности (приспособленности), с повышением надежности и экономичности конструкции. Степень технического совершенства судов определяется исходя из их соответствия предъявляемым, часто противоречивым требованиям при достижении наибольшей экономической эффективности.

Проектируя конструкцию корпуса, принимают во внимание только те характерные признаки, которые непосредственно влияют на прочность и надежность конструкции судна. К таким признакам относятся: количество, расположение и протяженность надстроек, положение машинно-котельного отделения (МКО) по длине судна, число и степень раскрытия палуб, установка внутренних бортов, продольных переборок, размеры и общая протяженность грузовых помещений и др.

Количество и протяженность надстроек. Объемные, ограниченные палубой, боковыми и концевыми стенками сооружения на всей ширине верхней палубы или отстоящие от ближайшего борта на расстоянии не более 0,04 ширины судна называют надстройками. В надстройках оборудуют различные служебные

жилище, грузовой, пассажирские и другие помещения. Все суда, за редким исключением, имеют мостовую (балковую) и кормовую (ахтерную) надстройки.

При расположении МКО в середине над ними обычно предусматривают среднюю наиболее развитую надстройку. Суда с тремя надстройками называют трехостровными, поскольку приближающиеся из-за горизонта судно первоначально появляется как бы в виде трех островов. В зависимости от протяженности средней надстройки может принимать участие в общем изгибе судна (см. гл. 4 и 12). Условия обитаемости экипажа и пассажиров в ней наиболее благоприятны.

По конам надстроек, особенно средней, как в временных салях, при общем изгибе судна появляется концентрация напряжений, что требует усиления конструкции основного корпуса и самих надстроек в районе их окончания. К недостаткам размещения надстроек в середине относятся разделение палубы на два участка, а также потеря части площади открытой верхней палубы (ВП). Это уменьшает возможности веревочных палубных грузов и снижает эффективность грузовых работ. В послевоенные годы многие сухогрузные суда стали строить без средней надстройки и увеличивали соответственно размеры кормовой. Такому решению способствовал и перенос МКО из средней части в корму.

Для увеличения скорости судна пришлось уменьшить коэффициент общей полноты, т. е. строить корпус более острым в оконечностях. Сжатие вместимости носового трюма для грузов компенсировали устройством дополнительного типидека над верхней палубой, удлинив соответственно носовую надстройку. Таким образом появились суда с удлиненным баком. Аналогично из судов с кормовым и особенно с промежуточным положением МКО кормовую надстройку часто делают удлиненной для образования необходимых грузовых, производственных и других помещений. Такие суда называют судами с удлиненным ютом.

На сравнительно небольших судах с целью обеспечения высоты кормовых помещений, компенсации потерянной кубитурой из-за устройства туннеля гребного вала приходится верхнюю палубу в корме приподнимать над носовой ее частью. Эти суда называют кватердецими. Суда, не имеющие надстроек, называются гладкопалубными, а с надстройкой по всей длине — судами со сплошной надстройкой. Последние суда получают развитие в виде шельтердекших.

Все современные суда имеют не менее одной надстройки. Количество, протяженность, размещение надстроек по длине зависит от назначения судна, рода и вида перевозимых грузов. Надстройки могут существенно увеличить грузоемкость и

в некоторой степени грузоподъемность судна. Наиболее развитую надстройку обычно располагают над МКО.

Расположение МКО по длине судна. Сухогрузные суда традиционно имели МКО и развитую надстройку посередине длины. Такое расположение первоначально грузовых и тяжелых главных механизмов было необходимо. К тому же улучшалась дифферентность судна, улучшалась обитаемость экипажа. Сравнительно малые размеры грузовых мест в то время и большая полнота корпуса не вызвали при укладке грузов значительной потери вместимости концевых трюмов.

В связи с заменой паровых машин компактными и сравнительно легкими двигателями внутреннего сгорания обводы МКО в средней части оказались избыточными. Это позволяло пересмотреть дислокацию МКО по длине судна и устранить недостатки, вызванные таким его расположением. К недостаткам грузовых судов с МКО в середине относятся: уменьшение вместимости кормовых трюмов из-за устройства туннеля гребного вала, увеличенные протяженность и масса выносов. Кроме того, с переносом МКО в корму на сухогрузных судах освободилось наиболее удобное место для размещения грузов внутри корпуса и на его палубе, что до 3% увеличило грузоемкость судна. Именно поэтому лесовозы, контейнеровозы, суда с горизонтальной грузообработкой и другие имеют МКО только в корме.

Однако и кормовое расположение МКО не лишено недостатков. В частности, увеличивается расчетный нагибающий момент на тилей воле (см. § 24), из-за сдвига ЦТ перевозимых грузов и нос появляется значительный дифферент на нос при плавании с грузом и на корму при плавании с балластом, что требует выделения дополнительных балластных цистерн за счет некоторого уменьшения грузоемкости судна. Компромиссным решением является промежуточное расположение МКО, когда в корму от него располагается один и реже два (из шести-семи) трюма. На некоторых крупнотоннажных судах с МКО в корме, кроме танкером, наиболее развитую надстройку с ходовым мостиком для удобства обзора и управления располагают в носу.

Конструктивные типы суден определяются прежде всего высотой надводного борта, который измеряется от так называемой палубы надводного борта до грузовой ватерлинии (ГВЛ). На однопалубных судах таковой может быть только ВП. На судах с двумя и более палубами палубой надводного борта может быть или самая верхняя, или вторая сверху непрерывная палуба, до которой доходят все главные поперечные аварийные переборки, разделяющие корпус на грузовые помещения и другие непроницаемые отсеки.

От высоты надводного борта зависит многие общепроектные характеристики судна, определяющие безопасность плавания и эффективность эксплуатации (непотопаемость, остойчивость, грузоподъемность, экономичность и др.), а от соответствующей надводному борту осадки — размеры и, следовательно, масса элементов конструкции (обышники, балок набора), т. е. масса корпуса.

Минимальная высота надводного борта установлена Международной конвенцией по грузовой марке 1956 г. на основании опыта эксплуатации судов с целью обеспечения необходимого запаса плавучести, остойчивости, «высоты платформ» над уровнем моря. Высота надводного борта определяется архитектурными и геометрическими факторами (типом, назначением и размерениями судна, протяженностью надстроек, седловатостью и погибкой верхней палубы и др.).

Суда, конструкция корпуса которых соответствует максимально допустимой осадке, т. е. минимальному надводному борту, называются также полнотонаборными. Общую прочность корпуса и местную прочность его перекрытий, балок набора, пластин обышники рассчитывают на максимальные для данного судна нагрузки. Естественно, что полнотонаборные суда наиболее металлоемкие. Минимальный надводный борт имеют десовы, танкеры без балластных танков, рудовозы.

Если предполагается постоянно перевозить легкие грузы с повышенной удельной кубатурой, то при полном использовании грузоподъемности водолазачные суда соответствует меньшей осадке, чем при минимально допустимом надводном борте. Конструкцию корпуса этих судов целесообразно в целях экономии материала проектировать с учетом необходимой осадки. Такие суда называют судами с избыточным надводным бортом.

В большинстве случаев сухогрузные суда неограниченного района плавания имеют избыточный надводный борт. По коммерческим соображениям у многих из них палубой надводного борта является вторая палуба.

§ 13. Основные архитектурно-конструктивные типы судов

Универсальные сухогрузные суда. Наиболее многочисленная группа судов мирового транспортного флота — универсальные сухогрузные суда, предназначенные для перевозки генеральных, а иногда и других грузов. Среди строящихся судов на их долю приходится до 30 % всего количества.

Генеральные грузы — это смешанные грузы, принимаемые на судно как в таре (грузы в ящиках, явках, мешках, тюках, бочках и т. д.), так и без упаковки (трубы и металлоконструкции, сталь и рубероид в рулонах, кирпич, проволока и бухты и

т. д.). Особо тяжеловесные и крупногабаритные грузы (малые суда, вагоны, паровозы, турбины и т. д.) относятся также к генеральным грузам.

В зависимости от организации грузоперевозок и состава груза современные суда мирового транспортного флота делятся на линейные, трамповые и торгово-промышленные. Унифицированные линейные суда (лайнеры) в основном предназначены для транспортировки всевозможных генеральных грузов, унифицированных грузов в пакетах и контейнерах, а также (в зависимости от назначения, на котором работает судно) специальных, жидких и рефрижераторных грузов. Основное назначение универсальных трамповых судов — перевозка массовых (насыпных и навалочных) грузов и лес. Суда торгово-промышленного назначения обслуживают нужды отдельных промышленных предприятий и являются как бы составной частью оборудования промышленных комплексов.

Делят большинство универсальных судов — от 500 т до 15 тыс. т, реже до 20 тыс. т и более. В зависимости от размеров универсальные сухогрузные суда условно подразделяют на три группы: малые, или малотонажные, действом до 1,5—2 тыс. т, крупнотонажные действом 8—10 тыс. т и более, среднетонажные действом 2—8 тыс. т.

По архитектурно-конструктивному типу универсальные суда двухпалубные, реже трехпалубные, с нормовым или промежуточным расположением машинного отделения (МО) и жилой надстройки, с удлиненным баком. Основным недостатком универсальных судов является большая продолжительность грузовых операций.

Суда открытого типа. Открытым называют судно, на котором все грузовые операции могут быть осуществлены береговыми или судовыми средствами без горизонтального перемещения груза по трюму. У таких судов люки занимают большую часть площади палубы. Это усложняет конструкцию палубных перекрытий. С увеличением ширины грузовых люков значительно увеличивается масса и габаритные размеры люковых крышек, а при ширине люка более 12 м трудно обеспечить непроницаемость закрытия из-за деформаций корпуса. Поэтому часто применяют парные или тройные грузовые люки. Ширина каждого парного люка равна 6—8 м. Для тройных люков она различается: у боковых — 4—6 м, у центрального — до 8,0 м (рис. 3.1). Мидель-планом открытого универсального сухогрузного судна с парными люками показан на рис. 3.2.

Рациональным конструктивным решением для судов открытого типа является проектирование корпуса судна с развалом бортов до 12—15° от диаметральной плоскости (ДП) на всей высоте над частью (см. рис. 3.1, 6). В этом случае грузовые

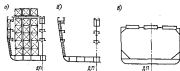


Рис. 3.3. Поперечные сечения судов открытого типа: а, б — с двойными бортами; в — с тройными бортами.

помещения более доступны для установки грузов. Главное же состоит в том, что у судов открытого типа по сравнению с судами, имеющими вертикальный борт, при той же ширине вырезов площадь сечения палубы обеспечивается не за счет увеличения толщины настила, а за счет возрастания его ширины. Наклон бортов улучшает остойчивость на больших углах крена и увеличивает площадь палубы с целью размещения на ней контейнеров или лесных грузов.

Чтобы удобно расположить грузы в трюмах, а также обеспечить жесткость корпуса, ослабленную большими вырезами в палубе, устанавливают двойные борты (рис. 3.3). В двойных бортах размещают балластные цистерны.

Основная тенденция развития сухогрузных судов в настоящее время — это их специализация, поскольку эксплуатация таких судов, как, например, контейнеровозы, обеспечивает пароходству в несколько раз большую прибыль, чем при использовании универсальных сухогрузных судов прежнего типа.

Контейнеровозы — это суда, предназначенные для перевозки грузов в стандартных контейнерах. При погрузке контейнеров полностью отсутствует горизонтальное перемещение в трюме, так как каждый контейнер устанавливается краном сразу на свое место. На таких судах необходимо предусмотреть максимальное раскрытие палубы, минимальные палубные карнизы и специальные направляющие стойки в трюмах. Конструктивное оформление направляющих стоек разнообразно. Обычно используют профильную сталь, чаще всего угольники размерами от 100×100 до 150×150 мм. Вертикальные стойки образуют в трюмах контуры клеток (ячеек) по размерам контейнера. Чтобы предотвратить заклинивание контейнера, опускаемого с небольшим наклоном при крене $5-6^\circ$, необходимо между направляющими стойками предусмотреть расстояние, несколько превышающее размеры контейнера. Однако эти зазоры не должны быть большими во избежание смещения и перекоса

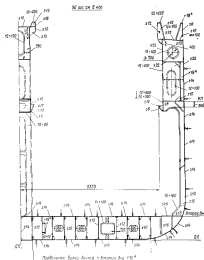


Рис. 3.2. Мидшп-сечение универсального сухогрузного судна с двойным дном ($B = 22$ м, $H = 13,5$ м).

контейнеров при установке одного на другой по вертикали. Вверху, у комингсов люков, волки угольников отгибают наружу; образовавшийся расступ облегчит заводку контейнеров в ячейку.

Наиболее распространенные международные контейнеры имеют размеры: $2,44 \times 2,44 \times 12,2$ м (тип 1А — масса с грузом до 40 т) и $2,44 \times 2,44 \times 6,1$ м (тип 1С — масса с грузом около 20 т). Такие же размеры и у отечественных унифицированных

тировку лесоматериалов россыпью, зернового и навалочного грузов. Более новые лесовозы предназначены в основном для перевозки пакетируемых лесоматериалов и контейнеров.

Конструкция корпуса лесовозов в районе грузовых трюмов зависит от требований, предъявляемых к погрузке и выгрузке конкретного груза. Такие конструктивные особенности характерны для лесовозов и пакето-возов отечественной и зарубежной постройки.

Последние лесовозы отечественной постройки типов «Палани Виноград», «Истергальес», «Сибирялес», «Константин Шестаков» и польские лесовозы «Волголес» имеют практически одинаковое конструктивное решение: высокий фальш-борт, относительно небольшое раскрытие палуб (ширина люка 8,2—9,4 м), полупероборки в трюмах, отсутствие промежуточных палуб и платформ. Эти особенности были продиктованы условиями перевозки лесоматериалов россыпью в прямом рейсе в зерновых трюмах в обратном рейсе. Наличие полупероборок упростило установку шифтине-бордов при погрузке зерна.

Развитие пакетных перевозок потребовало внесения ряда изменений в конструкцию корпуса судна. На построенных в 70-х годах отечественных и зарубежных пакето-возах предусмотрены двойные борты и значительно увеличены размеры грузовых люков — ширина люка 12,8 м (рис. 3.9). Двойные борты, отсутствие киля, шпалеров и полупероборок в трюмах резко повысило пропускную способность грузовых работ. Укладка груза стала возможной без каких-либо дополнительных приспособлений.

На пакето-возах дейдейт свыше 10 тыс. т применяют парные люки. Конструктивная особенность трюмов этих судов — продуманность в ДП корабельной балки. Переход к парным люкам на круизных судах осуществляется в основном благодаря техническим трудностям при создании люковых закрытий широкой свыше 15 м. На пакето-возах практически вся ширина палубы, за исключением палубных стрингеров, занята люками, поэтому общая прочность и достаточная жесткость корпуса при скручивании обеспечиваются установкой двойных бортов и перепредельной жесткостью люков.

По архитектуре конструктивным признакам лесовозы-пакето-возы — однопалубные суда с минимальным надводным бортом, удлиненным баком, кормовым расположением МО и надстройки. Исходя из районов эксплуатации, все лесовозы строят на деловой класс УЛ.

Суда для перевозки навалочных грузов. Основное навалочное грузы — руда и ее концентраты, каменный уголь, зерно, химикаты, удобрения и бониты. В последние годы все чаще перевозят без тары сахар и цемент.

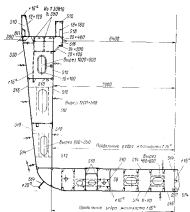


Рис. 3.9. Модель-эскиз ледового пакето-воза типа «Пакет Мо-осм» (б.к.д. = 17,3 м, Н = 8,5 м).

Специализированные суда для перевозки навалочных грузов различаются по двум направлениям. Во-первых, углубляется специализация, что выражается в постройке судов, приспособленных к перевозке какого-либо одного конкретного груза. К ним относятся рудовозы, углевозы, бонитовозы, цементовозы и сахаровозы. Такие узкоспециализированные суда вполне оправдывают себя на направлениях с устойчивыми потоками определенных грузов, несмотря на то, что постройка кругового рейса от, как правило, совершают в балласте. Однако из-за различия в плотности, сыпучести и удельной погрузочной кубатуре иногда технически невозможно или экономически нецелесообразно использовать узкоспециализированные суда для транспортировки грузов, не отвечающих основному назначению. Так, запрещается перевозить руду на судах, не

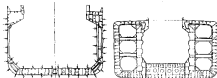


Рис. 3.12. Поперечное сечение комбинированного судна для перевозки каменных грузов.



Рис. 3.13. Конструктивный анализ танкера-рудовоза, работающего по продольной системе.

грузы. При загрузке судна зерном, занимающим трюмы на всю высоту, ЦТ груза поднимается, устойчивость становится меньшей, и судно испытывает явную качку в волнении плавную качку с большими амплитудами. Во время такой качки зерно может пересыпаться, и вызванный им крен увеличивается. Если судно загружается рудой, ЦТ груза располагается очень низко, и судно испытывает реакцию качку, под действием которой может произойти опасное смещение груза при сравнительно малых углах крена. Для получения минимально необходимой устойчивости комбинированных судов, перевозящих каменный уголь, тяжелое зерно, в подпалубные и скуловые цистермы прижимают балласт. Однако в случае перевозки легких сортов зерна под зерно используют и подпалубные цистермы. С этой целью в палубе делают один-два грузовых дна, ведущих в каждую подпалубную цистерму, а в их днищах — отверстия, закрытые крышками, через которые зерно сыпается в трюмы при разгрузке. Закрывают грузовые люки и крышки сыпучих отверстий выполняют водонепроницаемыми.

Для улучшения устойчивости судов типа I при перевозке руды применяют так называемую чередующуюся загрузку трюмов. Это значит, что рудой закладывают не все грузовые трюмы, а лишь каждый второй, т. е. через трюм. Трюмы закладывают значительно выше, чем при равномерной загрузке, что благоприятно сказывается на устойчивости. Однако чередующаяся загрузка вызывает значительный рост изгибающих моментов и перерезывающих сил, действующих на судно с полными трюмами.

Устойчивость судов типа I можно улучшить путем применения трюмов разной длины. На таких судах руду грузят только в короткие трюмы, которые занимают диаметр, а remainder чего ЦТ волнивается выше.

Рис. 3.14. Схема разделения цистерн для загрузки трюмов на нефтерудовозах.
1 — грузовые цистермы; 2 — балластные цистермы.



Опыт эксплуатации рудовозов показал, что их постройка для перевозки только руды экономически нецелесообразна. Удельный грузовой объем руды очень низкий ($0,35-0,6 \text{ м}^3/\text{т}$), поэтому вместимость рудовозов при полном использовании грузоподъемности всегда избыточна. В начале XX в. стали строить комбинированные суда — нефтерудовозы — для перевозки в одном направлении руды, а в другом — нефти. Нефтерудовозы по конструкции и общему расположению не отличаются от рудовозов (рис. 3.13). Характерные особенности этих комбинированных судов: предусмотренные грузовые нефтерудовозы имеют с соответствующими трубопроводами, коффердамы между подпалубными коридорами и бортовыми грузовыми цистермами; выполнены газонепроницаемыми крышки цистерм, предназначенных для транспортировки нефти. На нефтерудовозах используют более тяжелые сорта нефтепродуктов плотностью $0,80-0,90 \text{ т/м}^3$, что соответствует удельно-грузовой кубатуре $1,10-1,25 \text{ м}^3/\text{т}$.

Жидкие грузы на нефтерудовозах размещают в цистермах трех основных типов: раздельных бортовых и лицевых (рис. 3.14), L-образной формы, образуемых бортовыми и днищевыми отсеками, и также в днищах, расположенных между рудными трюмами.

Наливные суда. Танкеры перевозят нефть и нефтепродукты. Погрузку и выгрузку перевозимого груза производят с помощью насосов, поэтому на верхней палубе танкеров отсутствуют большие вырезы для грузовых люков. По архитектурно-конструктивному типу танкеры — однопалубные суда с МО, расположенными в корме. На многих танкерах применены бульбобразные носовые обводы. Грузовая часть по ширине судна разделяется одной, двумя и даже тремя продольными переборками, а по длине — поперечными переборками, образуя изолированные танки.

В последние годы на танкерах отказались от средней надстройки, а следовательно, отпала необходимость в переходном мостике.

Грузовое носовое отделение на современных танкерах размещают, как правило, в корме. В соответствии с Правилами Регистра СССР [17] это отделение должно иметь выходы на открытую палубу. Грузовые отсеки на танкерах отделены коффердамами от МО и скуловых трюмов. Замена

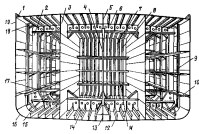


Рис. 3.15. Модель-схематизм танкера с системой двойного дна.

1 — продольный угольник; 2 — рамный элемент; 3 — продольная переборка; 4 — двойное дно; 5 — вертикальный лист; 6 — рамный лист; 7 — поперечная переборка; 8 — стойка переборки; 9 — шпангоут; 10 — бортовой стропут; 11 — штырь; 12 — продольная двойная балка; 13 — вертикальный киль; 14 — флюр; 15 — продольная балка; 16 — продольная балка; 17 — поперечная балка; 18 — поперечная балка.

коффердамов могут служить насосные отделения, балластные цистерны. Протяженность коффердамов составляет одну шпангоут, но не менее 600 мм. Из условий удиферентоки танкера с полным грузом толщина, балластные цистерны и сухотрунный трюм размещают в носу. В этом случае иногда предусматривают насосное насосное отделение, где устанавливают тоннажноперекладывающие, балластные и пожарные насосы.

Жидкие грузы, перевозимые в грузовых не полностью заполняемых танках, при качке перекачиваются в продольном и поперечном направлениях. Перекачивающиеся жидкости отрицательно влияют на остойчивость танкера и на прочность его конструкции. Поэтому танки должны быть полностью заволены. Для уменьшения негативного влияния сил инерции жидкого груза на прочность конструкции в дополнение к волнопероническим продольным и поперечным переборкам, при определенных размерах танка устанавливают прошивные (отбойные) поперечные переборки и отбойный лист под палубой в ДП (рис. 3.15).

Конструктивной особенностью танкеров до 70-х годов считалось отсутствие второго дна. После вступления в силу Меж-

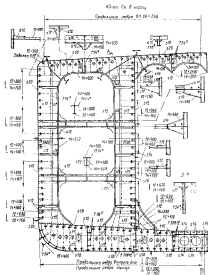


Рис. 3.16. Модель-схематизм танкера «Крым» (L=45 м, B=25,4 м).

дународной конвенции об охране окружающей среды (1973/78) на ряде новых строящихся танкеров устраивают двойное дно, чтобы предотвратить вытекание нефти из грузовых танков при повреждении внешней обшивки. Двойное дно есть на новых

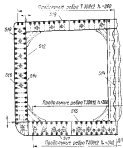


Рис. 3.17. Мемно-гидрограф тисора «По-
беда» ($N = 32.2$ м, $H = 16$ м).

ного типа баллам кабора находятся внутри балластных танков, поэтому уменьшается коррозия.

§ 14. Судовые перекрытия — структурные части корпуса судна

Назначение перекрытий. Судовой корпус, его надстройки, как и любое инженерное сооружение, состоит из частей, жестко связанным создаваемых и выполняющих определенные функции. Основными структурными частями, образующими корпус судна и непосредственно воспринимающими внешние нагрузки, являются судовые перекрытия: днищные, бортовые, палубные. Внутри корпуса судна расположены перекрытия поперечных и продольных переборок, а также платформ. Надстройки и рубки судна ограничены перекрытиями палуб, боковых и концевых стенок. Перекрытия судного корпуса, за исключением особых декебоек и платформ, изготавливаются:

Размеры перекрытий определяются габаритами основных судовых отсеков, длина которых составляет 0,1—0,2 л. В пределах каждого отсека расположенные взаимно перпендикулярно стальные перекрытия создают по периметру жесткий опорный контур. Опорный контур перекрытий в плане чаще всего имеет прямоугольную или близкую к ней форму в средней части и трапециевидную — в оконечностях.

отечественных танкерах
типа «Крым» действом
150 тыс. т (рис. 3.16).

В нашей стране построена первая экологически чистая среднетонажных танкеров типа «Победа», представляющих собой одноэтажные, однонитовые теплоходы длиной 68 мс. т. На них предусмотрено: бак, кормовое расположение МКО и ластового отделения, булыбобразная носовая оконечность, крейсерско-граненная корма, двойные дни, двойные борты и продольная гофрированная переборка в ДП (рис. 3.17). Балласт принимается в L-образные бортовые — двойные цистерны. На танкерах та-

Мысленно рассматривая корпус судна на перекрытия, представляется собой одну из возможных схем идеализации конструкции, принятой для ее проектирования или выполнения проверочных расчетов. Особенности работы перекрытий в составе корпуса судна учитываются выбором, а при необходимости и расчетным определением граничных условий. В отличие от береговых наплавных сооружений, проектируемых с разделением функций, выполняемых отдельными элементами в деталях, судно, перекрытия и их конструктивные элементы одновременно выполняют несколько функций. Во-первых, перекрытия обеспечивают непроницаемость судового корпуса как плавучего сооружения. Во-вторых, кроме внешних нагрузок со стороны моря, перекрытия судового корпуса воспринимают нагрузки от перевозимых грузов, разбегивших механизмов, суточных устройств и др. В-третьих, в составе корпуса судна перекрытия обеспечивают еще и работу в условиях акселерации как единого целого.

Конструктивные элементы судовых перекрытий. Все перекрытия корпуса судна, несмотря на то, что они различны в выполняемых функциях, подвержены изгибам, действующим как по нормали к поверхности, так и в плоскости перекрытия. Поэтому конструктивными элементами перекрытий являются обшивки или настилы и подкрепляющие их балки. Одного или двух названий перпендикулярных взаимнодействий. Обшивка (настил), собранный из листового стали, обеспечивает герметичность перекрытия как части корпуса. Обшивка (настил) разделяется балками набора на отдельные участки, называемые ялостями.

Балка набора служит для соединения и зависимости от принадлежности к тому или иному перекрытию, от ориентации и выполняемой функции при восприятии внешних нагрузок. По ориентации они могут быть поперечными (расположенными поперек судна) и продольными (расположенными вдоль судна); по восприятию нагрузок — балками основного и рамного наборов. Балка основного набора устанавливается на растоянии, равном шагам. Балка рамного набора — это усиление на расстоянии с балками основного набора сайн перекрытия, устанавливаемое, как правило, перпендикулярно балкам основного набора и служащее для них промежуточными опорами. Положение рамных балок определяется конструктивным оформлением перекрытия (см. гл. 8—10). Конструктивные элементы судовых перекрытий показаны на рис. 3.15 и 3.18.

Судовые перекрытия могут быть однопарными или двойными. **Однoпарные** составляются из одного листового поперзница и приваренных к нему балок набора с выступившей по отношению к корпусу стороной. Однoпарными в составе корпуса служат палубы, бортовые, а на малых судах длиной до 50 м и дивизионные перепокрытия. Все перепокрытия также однопарными. Двойные перекрытия

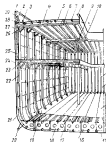


Рис. 3.18. Поперечное сечение сухогрузного судна.

1 — днище судна; 2 — стойка фальшборта; 3 — жесткая заплата борта; 4 — двойной борт; 5 — вставка под борт; 6 — переборка; 7 — продольная переборка; 8 — жесткая заплата борта; 9 — жесткая заплата борта; 10 — жесткая заплата борта; 11 — жесткая заплата борта; 12 — жесткая заплата борта; 13 — жесткая заплата борта; 14 — жесткая заплата борта; 15 — жесткая заплата борта; 16 — жесткая заплата борта; 17 — жесткая заплата борта; 18 — жесткая заплата борта; 19 — жесткая заплата борта; 20 — жесткая заплата борта; 21 — жесткая заплата борта; 22 — жесткая заплата борта; 23 — жесткая заплата борта; 24 — жесткая заплата борта; 25 — жесткая заплата борта; 26 — жесткая заплата борта; 27 — жесткая заплата борта; 28 — жесткая заплата борта.

образованием двумя листовыми полостями (наружной и внутренней) и привариванием к ним балками набора, предусмотренными для обеспечения безопасности плавания судна, образующими необходимые кассеты, для защиты внешней среды при перевозке нефти и других жидкостей. Двойными переборками являются двойные и в ряде судов — бортовые (см. § 13). Некоторые проекты предусматривают двойные и залубные переборки.

Поперечные балки набора залубных переборок называются балками, бортовыми — шпангоутами, двойными — фальсами. Перпендикулярные поперечные балки переборок соединяются с поперечными сечением корпуса судна, образуя шпангоутные рамы.

Ориентированные вдоль судна продольные балки основного набора, опирающиеся на поперечные шпангоутные рамы, называют по месту расположения переборки палубными, бортовыми, двойными.

Рамный продольный набор в виде сварных тавровых балок или листов, подкрепленных ребрами, а палубных, бортовых и двойных переборочных называется соответственно карликами, бортовыми и двойными стрингерами. Двойной стрингер, установленный в ДП по всей длине судна или на большей его части, является вертикальным калем. Горизонтальный или наклонный лист второго дна, приваренный к наружной обшивке в районе скула, называется краевой ледостойким листом (складным стрингером). Вертикальные балки переборок и продольные переборки называют стойками, горизонтальные балки

основного набора — ребрами, а горизонтальные рамные балки — шпалками.

Таким образом, продольные и поперечные балки, обеспечивающие местную прочность, устойчивость, заданную форму поверхности листов обшивки (заплата) и переборочный корпус, в своей совокупности образуют определенную систему набора рассматриваемого переборки. Поперечные балки переборок и шпангоутные рамы соединяются в узлах с помощью клям — плоских листовых деталей обычно треугольной формы. Нижнюю клям, соединяющую шпангоут с двойным набором, называют складной, а клям, соединяющий шпангоут с набором верхней и нижней палуб, — балочным. С помощью клям соединяются концы и других балок набора смежных переборок.

§ 15. Система набора переборки. Шпалки

Определение системы набора переборки. По составу система набора может быть простой, если переборка содержит балки только одного направления, и сложной, если имеются балки двух взаимно перпендикулярных направлений. Примером переборки с балками одного направления являются поперечные переборки и бортовые переборки сухогрузных судов без ледовых усилений. В большинстве же случаев переборки подкреплены балками двух направлений (двойные, залубные на сухогрузных и все переборки на плавучих судах).

По конструкции система набора может быть поперечной, продольной или кассетной (рис. 3.19). Для определения системы набора судных переборок имеется три признака классификации. Силовой признак, предложенный И. Г. Вульфовым, определяет систему набора в зависимости от того, на какие стороны опорного контура переборки передается балками набора большая часть поперечной нагрузки. В транспортном судостроении этот признак классификации систем набора не применяется.



Рис. 3.19. Системы расположения балок переборок: а) поперечной (а), продольной (б) и кассетной (в) системы набора.

1 — стрингер; 2 — фальс; 3 — продольная балка.

Формальный признак классификации определяет систему набора в зависимости от ориентации большинства балок. Если в пределах перекрытия балки расположены в основном поперек корпуса, система набора считается поперечной и, наоборот, продольной, если балки расположены вдоль корпуса (см. рис. 3.19). Однако на сильно вытянутом участке палубных перекрытий вдоль широким (более 0,8 В) грузовых люков формальный признак классификации может оказаться ошибочным.

Третий признак классификации определяет систему набора независимо от ориентации пластин обшивки (вазелина), расположенных между двумя парами параллельных смежных балок. Если прямоугольные пластины вытянуты поперек корпуса, система набора называется поперечной. Если пластины вытянуты вдоль судна, система набора считается продольной независимо от числа продольных балок. Если пластины окажутся квадратной или близкой к ней по форме, система набора называется комбинированной.

Система набора считается комбинированной, когда в конструкции одного перекрытия (или корпуса) используются две системы набора. Например, если днищевые перекрытия в МО имеют продольную систему набора, а в районе расположения машинного фундамента по требованию Правил Регистра СССР катантура, то в целом система набора этого перекрытия будет комбинированной.

Единая (поперечная) система набора всех перекрытий корпуса допустима только на судах длиной до 100 м. Размеры, ориентация, условия работы перекрытий в составе судовых корпусов различны. Поэтому, проектируя перекрытия, для каждого из них выбирают наиболее рациональную, согласованную систему набора. Следовательно, на судах длиной более 100 м применяются комбинированные системы набора корпуса.

Преимущества и недостатки систем набора. Еще в начале металлического судостроения, в 50-х годах XIX в., кроме постройки судов с поперечной системой набора, традиционной для деревянных судов, в Англии было изготовлено несколько железных судов с продольной системой набора. Однако из-за сложности конструкции, отсутствия опыта у рабочих, высокой стоимости постройки, особенно в отношении использования продольных систем набора перекрытий судов не получила распространения.

Поперечная система набора сравнительно проста по конструкции, эффективна в работе перекрытий под действием поперечной нагрузки, технологична не только в районе пилляжечной ватанки, но и в оконечностях корпуса. Органическим недостатком поперечной системы набора являются низкие значения напряжений (см. § 11), которые для пластин ВР и днища часто оказываются меньше допустимых скручивающих напряжений даже в обычном эксплуатационном режиме плавания. С пе-

реходом при сборке судовых конструкций на сварку вместо клепки обнаружилось еще один существенный недостаток применения поперечной системы набора: из-за поперечной усадки угловых сварных швов в торцовых соединениях появляется и со временем увеличивается прогиб пластин. В случае применения поперечной системы набора устойчивость уже деформированных пластин, сжимаемых напряжениями, параллельными короткой стороне опорного контура, значительно уменьшается.

Устранить отрицательное влияние сварочных деформаций на устойчивость пластин можно только заменой поперечной системы набора продольной. При продольной системе набора сварочные деформации не устраняются, а уменьшаются на 90° ориентации пластин, что в значительной мере нейтрализует отрицательное влияние усадки сварных швов. Другое преимущество продольной системы набора — высокие значения напряжений (см. § 11). Это позволяет обеспечить устойчивость пластин даже тогда, когда с целью уменьшения массы в конструкции использована сталь пониженной прочности. Преимущество продольной системы по сравнению с поперечной проявляется и в уменьшении массы конструкции, работающей на изгиб, если расчетная толщина обшивки не менее минимально допустимой.

Недостатками продольной системы набора являются сложность конструкции, большая трудоемкость и стоимость изготовления перекрытий и корпуса судна в целом. В условиях воздействия переменных эксплуатационных нагрузок может проявиться еще один недостаток продольной системы набора — снижение работоспособности и надежности конструкции в зонах пересечения продольных балок с поднепривинчиваемыми флорами и поперечными переборками [2]. Вследствие концентрации напряжений, обусловленной при растяжении конструктивными, технологическими, сварочными дефектами, в зонах соединения продольных балок часто появляются усталостные повреждения в виде трещин, особенно при разрезе балок на поперечных связях, и в случае низкого качества материала.

Факторы, влияющие на выбор системы набора. Выбор системы набора перекрытий при проектировании конструкции корпуса представляет ответственную задачу, от практического решения которой зависят не только технико-экономические показатели (масса, стоимость, технологичность), но и надежность конструкции. Рассмотрим основные факторы, влияющие на выбор системы набора.

Назначенные, размеренная, архитектурно-конструктивный тип судна. Эти факторы, характеризующие индивидуальные особенности судна, являются исходными для вычисления расчетной нагрузки, действующей по нормали к поверхности перекрытия, а также для определения вида и значения напряжений в их плоскости (см. гл. 4 и 5). Данные

а нагрузках, воспринимаемых перекрестками корпуса, позволяют выбрать для каждого из них наиболее рациональную систему набора. В частности, в перекрестках, работающих преимущественно на изгиб, балки основного набора в шельх экономичнее их массы следует располагать параллельно короткой стороне опорного контура. Именно поэтому на судах длиной примерно до 100 м предусматривается поперечная система набора перекрестий.

Размеры пластины настила ВП, второго дна, днищевой обшивки кроме обеспечения местной прочности при действии расчетной поперечной нагрузки должны удовлетворять требованиям устойчивости. При необходимости повышения эйлеровых напряжений ВП в диле подразделяются продольными балками.

Недостатки поперечной системы набора. Указанные выше недостатки конструкции перекрестий с поперечной системой набора (низкие эйлеровы напряжения, развитие потги пластин из-за поперечной узловой сварки швов) исключают ее применение для ВП и дилы на сухогрузных судах длиной более 120 м и на плавниках длиной более 80 м.

Район расположения перекрестий. В середине судна на длине 0,4 L у сухогрузных и на длине грузовых танком у плавников суднопрямая система набора односторонних перекрестий сохраняется. На длине форштеня и ахтерштеня перекрестий почти всех судов имеют поперечную систему набора. Между средней частью корпуса и соответствующими пиком (на длине 0,25 L) в конструкции ВП и дилы продольная система набора постепенно переходит в поперечную.

Механические свойства сталей. Применение сталей повышенной прочности (СПП) в судостроении позволяет значительно уменьшить массу конструкций. Однако продольные связи корпуса из СПП, особенно связи верхней палубы и дилы, снимаются более высокими напряжениями, чем при использовании обычной углеродистой стали. Требования устойчивости продольных элементов конструкции становятся определяющим. Рациональное (полное) использование СПП возможно лишь при продольной системе набора снимаемых перекрестий. Применение СПП в поперечной системе набора в конструкции ВП и дилы несовместимо.

Условия эксплуатации судов. Суда, эксплуатируемые в ледных условиях, подвергаются значительным ледовым нагрузкам, влияющим, как правило, локальный характер. С целью разнесения ледовой нагрузки на большую площадь перекрестий целесообразно применение поперечной системы набора для бортовых перекрестий по всей длине ледового пояса и килевой системы набора для конструкций дилы в носу, особенно у детолома, на длине (0,25 ÷ 0,30) L . Аналогично для судов,

швартующихся в море, конструкция борта усиливается и выполняется по поперечной системе набора.

Минимальные строительные толщины обшивки (настила). Если при продольной системе набора толщина обшивки (настила) перекрестия до юзоса оказывается меньше минимально допустимой, то ее преимущества не реализуются полностью. Поэтому суда сравнительно небольших размеров, у которых для настила ВП и днищевой обшивки минимально допустимые толщины являются определяющими, целесообразно проектировать и строить с поперечной системой набора. Окончательный выбор системы набора перекрестий таких судов — длиной более 60 м — принимается после расчета общей прочности (см. гл. 4 и 5).

Принятая система набора конструктивно может быть реализована различно в зависимости от типа, назначения, размеров судна и перекрестий, определяющих условия работы балок.

Шпанца набора перекрестий. Шпанца поперечного и продольного наборов является характерным параметром при проектировании конструкции корпуса судна. От шпанцы зависят расчетные размеры всех конструктивных элементов корпуса: толщины наружной обшивки, настила палуб, обшивки переборки, геометрические характеристики поперечного сечения балок набора. Со шпанцей связаны габаритные теоретические размеры грузовых помещений, грузовых люков. Шпанца является исходной базой при технологических операциях (разметке, проесске и др.), влияет на стоимость и трудоемкость постройки, на массу, раскрой и стоимость материалов.

Выбор оптимальной шпанцы при проектировании конструкции корпуса представляет собой комплексную задачу. За критерий оптимизации обычно принимают минимум массы или минимум стоимости.

Согласно Правилам Регистра СССР [17] нормальной шпанцей в средней части судна считается $a_s = 0,002L + 0,48$ м. Допускаемое отклонение проектной шпанцы равно $\pm 25\%$. В форштевне и ахтерштевне шпанца должна быть не более 0,6 м, а в районе (0,05 ÷ 0,20) L от носового перпендикуляра — не более 0,7 м. Размеры шпанцы в отраслевом стандарте приняты: 400, 500, 550, 600, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000 мм.

При проектировании предпочтительнее шпанцы, усиленные по сравнению с нормальной. Увеличение проектных шпаней сокращает количество балок, их общую протяженность, число соединений и, следовательно, трудоемкость и стоимость работ по изготовлению, установке и сварке. Масса конструкции перекрестий с увеличением шпанцы на 10—12% возрастает теоретически на 1—3%, что находится обычно в пределах неизбежного округления расчетных размеров связей до соответствующих и при использовании нормальной шпанцы. В ряде случаев (из

судах длиной до 140—150 м) требование устойчивости пластин не позволяет увеличивать шагция набора ВП в длину.

Проектные шагция смежных переборок должны быть согласованы даже при различных системах набора. Например, расстояние между флорами в днище и между рядами балок надуб, в случае применения на этих перекрытиях продольной системы набора, обязательно должно соответствовать расстоянию при поперечной системе набора борта.

В трехмерном судостроении шагция подбирают по экономическому критерию, т. е. по минимуму суммарных затрат на материал и изготовление конструкции. Оптимальным по стоимостному критерию шагция превышает нормальную более чем на 10—12%.

Вопросы для проверки

1. Перечислите архитектурно-конструктивные типы судов в зависимости от расположения надстроек и МКО на длине судна.
2. Назовите архитектурные типы судов, определяемые высотой надводного борта.
3. Назначение и особенности конструкции универсальных судовых корпусов.
4. Перечислите типы специализированных судовых корпусов и укажите их архитектурно-конструктивные особенности.
5. Назовите архитектурно-конструктивные особенности рудовозов, комбикорпусов судов в танкерах.
6. Перечислите архитектурно-конструктивные особенности кораблей.
7. Какие системы набора переборок корпуса существуют? В чем особенности каждой из них?
8. Применение систем набора: их преимущества и недостатки.
9. Перечислите факторы, влияющие на выбор системы набора.
10. С учетом каких факторов выбирается оптимальная система набора?

ГЛАВА 4. ОБЩИЙ ИЗГИБ И ОБЩАЯ ПРОДОЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ СУДА

§ 14. Внешние силы, вызывающие общий изгиб судна

Во время эксплуатации в море судно подвергается действию гравитационных, гидростатических, гидродинамических и инерционных сил. Степень воздействия внешних сил зависит от состояния моря, глубины воды, а также от размеров, общего устройства и скорости судна, формы и полноты обводов корпуса, вида загрузки и распределения нерасованных грузов или балласта и др.

До 50-х годов размеры конструктивных элементов корпусов морских торговых судов определялись только в зависимости от главных размеров, считая их условными размерами внешних сил. Такой эмпирический метод оценки внешних сил, основанный на опыте эксплуатации, был в сущности способом оправдания, поскольку суда этого назначения создавались по архитектурно-конструктивному типу, форме обво-

дов, распределению нерасованных грузов, имели универсальную прочность. К тому же наука не достигла тогда достаточных обоснованных методов определения действительных величин внешних сил и их механики нагрузок. С начала 50-х годов появилась возможность быстрого развития торгового флота, углубился специализация, появились новые типы морских судов, увеличились их скорости. В этих условиях стало необходимым учитывать индивидуальные особенности общего устройства судна.

Для удобства определения и изучения расчетных значений внешние силы рассматривают раздельно в зависимости от состояния моря, а именно: силы, действующие на судно на тихой воде, и дополнительные силы, возникающие в движении. Указанное разделение внешних нагрузок отражает и различие их физической природы. На тихой воде действующие силы — гравитационные (силы тяжести) и гидростатические (силы поддержания) — являются практически постоянными, поскольку изменяются очень медленно в течение рейса. На волнении же действующие гидродинамические и инерционные нагрузки, наоборот, изменяются во времени очень быстро, т. е. являются переменными.

Увеличение размеров и скорости судов, применение новых конструктивных материалов, проектирование и постройка судов новых типов потребовали разработки научных методов оценки внешних сил и работоспособности судовых конструкций. При проектировании таких судов нельзя было пользоваться опытом их эксплуатации. Перенос же требований правил классификационных обществ к традиционным типам судов на суда новых архитектурно-конструктивных типов для больших размеров привел к серьезным недостаткам: либо переутяжелению (при избыточной прочности), либо порожждению и разрушениям (при недостаточной прочности) конструкций из-за учета ранее не проявившихся компонентов внешних сил.

Исследования и анализ внешних сил и особенно тех, что действуют на волнении, — наиболее сложная проблема строительной механики корабля. Многочисленные теоретические и экспериментальные работы, выполняемые учеными ряда стран, в том числе и отечественными (Г. В. Войновым, В. В. Козляновым, Я. И. Коротких, А. А. Курдюмовым, А. И. Максименко, О. М. Палеем, Д. М. Ростовским и др.), позволили научными методами получить необходимые для проектирования судовых конструкций достаточно достоверные расчетные нагрузки. Однако исследование внешних сил, возникающих в движении моря, еще далеко от завершения, и появление результатов новых типов и конструкций станет перед наукой более сложные задачи.

Общая деформация корпуса и продольной вертикальной плоскости судна под действием вертикальных составляющих внешних сил называется общим продольным изгибом. Общий

продольный изгиб судна характеризуется тем, что вызванные внешними силами напряжения распределяются по всему поперечному сечению корпуса подобно напряжениям при изгибе пружинистой балки.

Общий изгиб корпуса наблюдается как при плавании судна на тихой воде, так и на волнении. В зависимости от распределения по длине судна и направления действующих внешних сил характер деформации корпуса при общем изгибе может быть различным. Общую деформацию корпуса в продольной вертикальной плоскости, при которой палуба сжимается, а днище растягивается, называют *прогибом*. И наоборот, общую деформацию корпуса, при которой палуба растягивается, а днище сжимается, называют *перегибом*.

На тихой воде характер общей деформации корпуса (прогиб или перегиб) обычно сохраняется в течение всего рейса, пока постоянно распределение основных грузов или балласти, хотя степени кривизны корпуса и ДП изменяется по мере расхода топлива и заправки. На волнении общая доопределяемая деформация корпуса является циклической: прогиб корпуса чередуется с перегибом. Волновые деформации, как и волновые изгибы, суммируются с деформацией корпуса на тихой воде.

На волнении, кроме общего изгиба в вертикальной плоскости, корпус судна испытывает общий изгиб в горизонтальной плоскости, параллельной основанию, а также подвергается кручению. Общий изгиб в горизонтальной плоскости в основном обусловлен асимметрией погруженных площадей шпангоутов и, как следствие, появлением не уравновешенных в сечениях по длине судна гидродинамических сил, а также силами инерции при бортовой качке. Учет напряжений, возникающих обобщенным изгибом и кручением корпуса стал актуальным для судов с большим раскрытием палубы (судов открытого типа) и в для судов с бортовыми лапидарками (вырезами).

Внешние силы, вызывающие общий изгиб корпуса в вертикальной плоскости, являются доминирующими. Поэтому ниже рассмотрены методы определения расчетных значений внешних сил, действующих только в вертикальной плоскости.

При постройке, спуске и ремонте корпус судна испытывает действие опорных и силовых устройств, которые также учитывают при проектировании конструкции корпуса.

§ 17. Изгиб судна на тихой воде

Общие положения. На тихой воде корпус судна подвергается статическому действию сил тяжести и гидростатическому давлению воды (рис. 4.1). Силы тяжести обусловлены суммарной массой судна, равной возмещению и расчетном состоянии

загрузки судна (с грузом, балластом и др.) в кН:

$$F_T = g\Delta = g \sum_{i=1}^n m_i, \quad (4.1)$$

где Δ — водоизмещение судна, т; m_i — составляющие массы переносимых в данном рейсе грузов, энергетической установки, топлива и т. п., включая массу и собственную корпус, т.

Равнодействующая сил тяжести приложена к ЦТ судна (в точке G с координатами x_G , y_G и z_G) и направлена вертикально вниз.

В каждой точке погруженной в воду поверхности корпуса по нормали к соответствующей элементарной площадке этой поверхности действует гидростатическое давление, определяемое (в кПа) по формуле

$$p_{ст} = \rho g z_1, \quad (4.2)$$

где z_1 — расстояние по вертикали точки приложения гидростатической нагрузки от поверхности воды, м. Вертикальные составляющие давления воды на погруженную часть корпуса называют силами плавучести, или силами подержания.

Из теории корабля известно, что равнодействующая сил гидростатического давления (в кН) по закону Архимеда равна

$$F_A = \rho g V - g m_w, \quad (4.3)$$

где $V = c_d L B d$ — теоретический объем погруженной части корпуса, м³; m_w — масса вытесненной воды (направлена вертикально вверх и приложена к ЦТ погруженного в воду объема корпуса), т^{*}. ЦТ погруженной части объема корпуса называют центром водичины (ЦВ — точка C с координатами x_C , y_C и z_C).

В целом для судна как твердого тела в равновесном состоянии равнодействующие сил тяжести и сил подержания равны по модулю, направлены в противоположные стороны и действуют по одной вертикали, проходящей через ЦТ (точку G) и ЦВ (точку C — см. рис. 4.1). Однако характер распределения сил тяжести и сил подержания по длине судна различен (рис. 4.2, а). Разность между ординатами сил тяжести и сил подержания создает распределенную по длине корпуса нагрузку, интегральными характеристиками которой являются результирующие силы и изгибающие моменты (рис. 4.2, б).

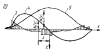
* Без учета массы воды, вытесненной выступающими частями (наружной обшивкой, шпангоутами и др.), которая составляет около 0,005%. В расчете общей прочности этой массой можно пренебречь.



Рис. 4.1. Равнодействующая сил тяжести и сил плавучести при плавании судна на тихой воде.



Рис. 4.2. Силы, возникающие на тихой воде: а — силы тяжести (1) и силы подталкивания (2); б — внешние нагрузки (3), перерезывающий сил (4) игибающих моменты (5).



Если в средней части судна силы подталкивания превышают по модулю силы тяжести, корпус судна испытывает перегиб. И наоборот, если в средней части судна силы тяжести превышают по модулю силы подталкивания, корпус судна

подвергается прогибу. Характер общей деформации корпуса, значения перерезывающих сил и изгибающих моментов зависят в наибольшей степени от состояния загрузки судна, положения и протяженности МКО, грузовой концентрации, наличия и размеров динатика, расположения топливных и балластных цистерн и др. Расчетные состояния нагрузки судна регламентирует Правила Регистра СССР [17]. Проектируя судно, необходимо стремиться, насколько возможно, к распределению перевозимых грузов подобно распределению сил подталкивания, что способствует уменьшению расчетных значений перерезывающих сил и изгибающих моментов, а следовательно, и экономии материалов.

Перерезывающие силы и изгибающие моменты на тихой воде вычисляют методом интегрирования нагрузки с построением соответствующих эпюр. В отдельных случаях могут быть допущены другие одобренные Регистром СССР методы. Ниже рассмотрим кратко сущность метода интегрирования нагрузки.

Силы тяжести и их распределение по длине судна. Для определения расчетных значений изгибающих моментов и перерезывающих сил учитывают из неблагоприятных в эксплуатации реально возможных случаев распределения нагрузки масс по длине судна. Для всех судов распределение перевозимых грузов рассматривают с полным грузом при максимальной осадке и в балластном и в якорном, так и в якорном рейсах. Кроме того, для отдельных типов судов принимают за наиболее неблагоприятные случаи загрузки, например, на сухогрузных судах при перевозке контейнеров и др. Для танкерных судов дополнительно рассматривают предусмотренные проектом варианты частичной и неравномерной загрузки, а также состояние загрузки в середине рейса, в процессе мойки танков и др.

Поскольку ординаты кривой сил тяжести (n кН/м)

$$f_g(x) = gw(x) \quad (4.4)$$

пропорциональны массе на единицу длины (n т/м) соответствующих составляющих и судна в целом, то построение кривой сил тяжести можно заменить построением кривой распределения массы судна $m(x) = \sum_{i=1}^n m_i(x)$ с учетом при последующем интегрировании ускорения g .

Предварительные значения изгибающих моментов определяют построением кривой сил тяжести из укрупненных составляющих массы в рассматриваемом состоянии загрузки судна (корпус судна с оборудованием, энергетическая установка, перевозимый груз, топливо, балласт и т. п.). Обычно в практике проектирования аппроксимируют для численного интегрирования нагрузки фактическое распределение сил тяжести (см. рис. 4.2, а) заменят статически эквивалентным в виде ступенчатой кривой сил тяжести.

Силы подталкивания на тихой воде. По длине сил подталкивания распределены пропорционально погруженному в воду объему корпуса и вычисляются при условии равновесия судна, когда $|F_b| = |F_g|$ и $x_g = x_b$. Ординаты кривой сил подталкивания (n кН/м) равны статическому.

$$f_b(x) = \rho g v(x) \Delta L = \rho g u(x), \quad (4.5)$$

где $v(x) = u(x) \Delta L$ — объем воды, вытесняемой корпусом судна на длине теоретической шпангоута ΔL , м³; $u(x)$ — погруженная площадь шпангоута, м². Таким образом, ординаты кривой сил подталкивания оказываются пропорциональными ординатам строевой по шпангоуту $u(x)$.

Ординаты ступенчатой кривой сил подталкивания (n кН/м) равны полусумме действительных ее ординат в сечениях, ограничивающих рассматриваемый теоретический отсек:

$$(f_b)_{x, x+1} = 0,5 \rho g (u_i + u_{i+1}),$$

где u_i и u_{i+1} — погруженные до уровня действующей ватерлинии площади смежных теоретических шпангоутов, м².

Расчетная нагрузка и ее интегральные характеристики. Нагрузку (n кН/м), действующую на судно на тихой воде, определяют алгебраически суммированием ординат сил тяжести и сил подталкивания (см. рис. 4.2)

$$p_{r, s}(x) = f_t(x) - f_b(x). \quad (4.6)$$

При построении кривой нагрузки ординаты сил тяжести считают положительными, а ординаты сил подталкивания отрицательными. Поэтому избыток сил тяжести откладывают над осью, а избыток сил подталкивания под осью. Поскольку в равновесном положении судна площадь под кривыми $f_t(x)$ и $f_b(x)$ равно-

величины, должны быть равны и суммы площадей кривой нагрузки, соответствующие избытку сил тяжести и избытку сил поддержания. В противном случае приравное соотношение судна, т. е. равенство между его массой и массой вытесненной судном воды ($\Delta = \rho V$), будет нарушено. Для обеспечения равенства $x_d = x_c$ необходимо, чтобы, например, относительно центра статический момент площадей кривой нагрузки, расположенных над осью, был равен по модулю статическому моменту площадей, расположенных под осью.

Если силы тяжести и силы поддержания при условии равновесия судна представлены ступенчатыми кривыми, то вычисление перерезывающих сил и изгибающих моментов на такой воде выполняется непосредственно интегрированием суммарной нагрузки по формулам

$$N_{x,c}(x) = - \int_{-x_d}^x \rho(x) dx; \quad (4.7)$$

$$M_{x,c}(x) = - \int_{-x_d}^x N_{x,c}(x) dx, \quad (4.8)$$

принимая начало координат на модели.

Интегрирование нагрузки обычно начинается с кормы и выполняется в табличной форме [7] или по специальной программе на ЭВМ. По результатам расчета строят эпюры изгибающих моментов и перерезывающих сил на такой воде. В строительной практике принято докладывать значения прерывающихся сил откладывая вверх от базисной линии при суммировании с кормы и вниз при суммировании с носа. Изгибающий момент, вызывающий растяжение палубы, т. е. порыв корпуса судна, считается положительным, и его эпюра строится над базисной линией. Изгибающий момент, вызывающий прогиб корпуса судна, считается отрицательным, и его эпюра строится под базисной линией.

Кривая нагрузки, эпюры перерезывающих сил и изгибающих моментов являются интегральными кривыми. Следовательно, возможность вычисления $N_{x,c}(x)$, $M_{x,c}(x)$ и построения эпюр можно проверить, пользуясь свойствами интегральных кривых.

Если кривая сил поддержания не строится в виде ступенчатой кривой, а остается плавной, толовой строеной по шпалотам с ординатами $f_{\text{ш}}(x)$ по формуле (4.5), то перерезывающие силы следует определять раздельным интегрированием ступенчатой кривой сил тяжести и плавной кривой сил поддержания

$$N_{x,c}(x) = g \int_{-x_d}^x m(x) dx - \rho g \int_{-x_d}^x a(x) dx, \quad (4.9)$$

где первый интеграл вычисляют по правилу прямоугольников, а второй — по правилу трапеций.

Постоянный метод расчета изгибающих моментов. Рассмотренный выше метод определения перерезывающих сил и изгибающих моментов путем численного интегрирования кривой нагрузки является трудоемким, поскольку требуются предварительная уаифференцировка судна и такие исходные данные, которые достаточно достоверно могут быть получены лишь на завершающей стадии проектирования. Использование в расчетах приближенных данных о составляющих массы судна и их распределении обуславливает приближенные значения изгибающих моментов. В связи с этим в начальной стадии проектирования часто применяют более простые и менее трудоемкие, но достаточно приемлемые методы. Одним из таких приближенных методов является раздельное вычисление изгибающих моментов в изломах или в любом другом сечении судна от сил тяжести и сил поддержания с последующим алгебраическим суммированием моментов этих сил. Такой метод называют постоянным.

Постоянный метод универсален, поскольку может быть применен при различных состояниях нагрузки судна (с грузом, с балластом), при любой компоновке нагрузки (в случае приема или снятия части грузов) и при любом допуске (до 2—3%) конструктивных дифферентов. Не требуются распределение грузов по теоретическим площадям и предварительная уаифференцировка судна. Метод прост и нагляден в исполнении.

Однако постоянный метод позволяет определить изгибающий момент или его значение только в одном предварительно выбранном, например в изломе, интересном сечении судна. При необходимости вычисления изгибающего момента в другом сечении все расчеты повторяют заново с учетом изменения абсцисс сил тяжести и сил поддержания по отношению к новому сечению.

Особенность постоянного метода является обязательное разделение всех составляющих нагрузки (сил тяжести и сил поддержания) на основной плоскостью, в которой вычисляется изгибающий момент, на носовые и кормовые части с соответствующими абсциссами их ЦТ относительно рассматриваемого сечения корпуса.

Для определения изгибающего момента в изломе сечении равнодействующую сил тяжести и сил поддержания (см. рис. 4.1) разделим на носовые и кормовые составляющие (рис. 4.3). Изгибающий момент в изломном сечении от кормовых сил

$$M_1 = F_{\text{ш}} x_{\text{ш}} - F_{\text{ш}} x_{\text{ш}} = M_{\text{ш}} - M_{\text{ш}}$$

Аналогично изгибающий момент от носовых сил

$$M_2 = F_{\text{ш}} x_{\text{ш}} - F_{\text{ш}} x_{\text{ш}} = M_{\text{ш}} - M_{\text{ш}}$$



Рис. 4.3. Морские и кормовые составляющие сил тяжести и сил подталкивания.

В случае равновесного состояния судна, когда $|F_g| = |F_b|$ и $x_g = x_c$, изгибающий момент в мидельном сечении определяется полусуммой моментов M_1 и M_2 , т. е.

$$M_{\Sigma} = 0,5(M_1 + M_2) = 0,5[(M_{гк} + M_{гв}) - (M_{мв} + M_{мк})] \quad (4.10)$$

где в круглых скобках указаны арифметические суммы моментов всех сил тяжести и сил подталкивания соответственно относительно миделя.

Анализ [19, ч. 1] показывает, что для судов с допустимым дифферентом нагибающие моменты тоже можно вычислять по формуле (4.10), как и для судов без дифферента.

Для определения изгибающего момента в мидельном сечении судна на тихой воде формулу (4.10) представляющей в виде суммы моментов (в кН-м) от окружающих составляющих действующих сил

$$M_{г, в} = M_g + M_m + M_{гв} - M_{мв} \quad (4.11)$$

где $M_g = k_{g, в} g / m_{г, в}$ — момент от сил тяжести корпуса с надстройками; $M_m = k_{m, в} g / m_m$ — момент от сил тяжести заводской установки и оборудования МО; $M_{гв} = 0,5 \sum g_{гв} x_{гв}$ — момент от сил тяжести грузов, входящих в декейт, равный половине арифметической суммы моментов относительно миделя от каждой составляющей декейта $g_{гв}$ в носовой и отдельно в кормовой частях судна; $M_{мв} = k_{мв} g / A$ — момент от сил подталкивания (Δ — расчетное водоизмещение судна в рассматриваемом состоянии загрузки, т).

Среднестатистические значения коэффициентов $k_{г, в}$ вычисляются для сухогрузных судов по формулам:

$k_{г, в} = c_{г, в}^2 (0,135 - 0,061 / L)$, если МКО расположено в средней части;

$k_{г, в} = c_{г, в}^2 (0,138 - 0,031 / L)$, если МКО вне средней части, а для танкеров по формуле $k_{г, в} = c_{г, в}^2 (0,134 - 0,041 / L)$. Относительная длина средней надстройки ($l_{г, в} / L$) принимается не более 0,6.

Значение коэффициента $k_{мв}$ зависит от положения МКО по длине судна. Если МКО перекрывает мидельное сечение, то $k_{мв} = 0,5 \frac{0,25 (l_{мв} / L)^2 + (l_{мв} / L)^3}{l_{мв} / L}$; если не перекрывает, то $k_{мв} = 0,5 k_{г, в} / L$, где $l_{г, в}$ и $x_{г, в}$ — длина и абсцисса центра масс МКО относительно миделя, м.

Коэффициент $k_{г, в}$ зависит от положения ЦВ погруженных в воду частей носовой и кормовой половин судна, т. е. от полноты обводов корпуса, и его среднее значение определяют по формуле $k_{г, в} = 0,0315 + 0,0695 c_{г, в}$.

Составляющие изгибающего момента на тихой воде в соответствии с формулой (4.11) можно суммировать в форме таблицы.

В целях сопоставления изгибающий момент на тихой воде приближенно определяют (в кН-м) по формуле

$$M_{г, в} = 10 \Delta l_{г, в} / k_{г, в}$$

где Δ — водоизмещение судна с полным грузом (независимо от того, для какого состояния нагрузки вычисляется изгибающий момент), т; $l_{г, в}$ — численный коэффициент с учетом знака изгибающего момента, получаемый по этой же формуле при наличии подобного по общему устройству и распределению грузов прототипа, имеющего длину и форму обводов, как у проектируемого судна [7].

Для сухогрузных судов с МКО в середине и с полным грузом характерен перегибающий момент на тихой воде ($k_{г, в} = 70 \div 80$), а в балластном переходе — меньший по абсолютному значению прогибающий момент. Для сухогрузных судов с МКО в корме и с полным грузом — наоборот, в балластном переходе — перегиб с наибольшим по абсолютному значению моментом ($k_{г, в} = 45 \div 50$). У наливных судов изгибающий момент на тихой воде существенно зависит от относительной протяженности грузовых танков, полноты обводов корпуса, наличия балластных танков и др. Поэтому и расчетные значения коэффициента $k_{г, в}$ при проходе танкера изменяются в пределах от -80 до -130 [7].

§ 18. Нагибающие моменты на регулярном волнении

Общие положения. Морское волнение чаще всего вызывается взаимодействием ветра и воды. Реальное морское негустое волнение является нерегулярным, т. е. представляет собой непрерывно меняющееся сочетание волн, различающихся по форме, размерам, направлениям перемещения и по протяженности гребней. На волнении по сравнению с положением на тихой воде все время происходит нераспределение сил подталкивания по длине судна, возникающие гидродинамические и инерционные внешние нагрузки. В результате действия внешних сил корпус судна на волнении испытывает общий изгиб, вибрацию и кручение.

Учитывая трудности определения гидродинамических сил и сил инерции при качке судна на действительно волнении, последние в расчетах общей прочности судна до конца 50-х



Рис. 4.4. Профиль регулярной волны.

$г$ — волновая высота; $λ$ — длина волны; h — высота; $г = h/2$ — амплитуда волны.

годов условие принималось регулярным. Применение модели регулярного волнения, хотя и не давало представления о действительных волновых нагрузках, многие годы достаточно благоприятно использовалось с целью сравнения условий критериев прочности проектируемых и удовлетворительно зарекомендовавшихся и эксплуатируемых судов. Распознавание общегогиба судна на регулярном волнении интуитивно можно представить условия появления основных волновых нагрузок (изгибающих моментов, перерезывающих сил), определят, так называемые амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) корпуса, т. е. реакцию судна на регулярное волнение с амплитудой, равной $г$ м, которая используется в расчете нагрузок на нерегулярном волнении. Таким образом, модель регулярного волнения сохраняет важное практическое значение и в настоящее время.

Статическая постановка судна на регулярную волну. Волнение называется регулярным, если форма и элементы всех параллельных волн одинаковы. Регулярное волнение является двумерным, поскольку представляет цилиндрическую поверхность, образующие которой перпендикулярны направлению распространения волн и простираются на столько позволяет экватория моря (рис. 4.4). Профиль волны, образующий пересечением волновой поверхности с вертикальной плоскостью, можно установить и направление распространения волн, чаще всего в расчетах общей прочности принимается трехмерный, поскольку достаточно близко соответствует действительной форме волн морской зыби, образующейся после шторма. Верхние части волны, выступающие над спокойной поверхностью моря, называют гребнями, а нижние — впадинами. Самая верхняя точка волнового профиля будет вершиной, а самая нижняя точка — дном волны.

Появление волновых изгибающих моментов главным образом обусловлено искривлением первоначально плоской поверхности спокойной воды. На волнении с малой длиной волны по сравнению с длиной судна, когда $λ \ll L$, высота волн и дополнительный изгибающий момент оказываются тоже небольшими. На волнении с очень большой длиной волн, когда $λ \gg L$, наиме-

нше ее высоты на длину судна незначительно и поэтому волновой изгибающий момент будет малым. В результате таких упрощенных рассуждений судостроители давно пришли к выводу, что максимальные значения волновых моментов следует ожидать при условии равенства длинам волн и длины судна. Поэтому в качестве расчетной принимают длину волны, равную длине судна, т. е. $λ = L$.

В случае хода судна в направлении бега волн со скоростью, равной скорости волны, размещение корпуса относительно волнового профиля, по крайней мере какое-то конечное время, отсутствует и судно на волне оказывается в состоянии статического равновесия. Такое положение, при котором главный вектор и главный момент сил тяжести и сил поддержания равны нулю, называют статической постановкой судна на волну. Предполагается, что при статической постановке корпус судна не оказывает профиля волны на-за влияния отраженных волн, не изменяет поле давления за счет сил сопротивления, возмущающих при относительном движении судна. Ввиду отсутствия ускорений нет и сил инерции.

Замена действительного волнения регулярным и указанные предположения придают методу статической постановки на волну большую условность. Однако простота и наглядность метода, возможность получения расчетных, хотя и условных волновых нагрузок, но применяемых для сопоставительных расчетов общей прочности, предопределяют его использование в течение многих десятилетий. К тому же до конца 50-х годов специалисты не имели возможности оценивать волновые нагрузки на действительном волнении.

В случае статической постановки судна на волну давление в волновом профиле считается гидростатическим, пропорциональным отстоянию по вертикали погруженной в воду рассматриваемой точки от волновой поверхности [см. формулу (4.2)]. Значения волновых изгибающих моментов и перерезывающих сил оказываются экстремальными при последовательном смещении района надельного сечения судна с вершины и дна волны (рис. 4.5).

Волновые (дополнительные) изгибающие моменты и перерезывающие силы при статической постановке на волну получаются только за счет изменения в распределении сил поддержания на волнении по сравнению с положением на спокойной воде. Объемы корпуса, выходящие в воду в районе гребня волны, испытывают дополнительные силы поддержания, направленные вверх, а объемы корпуса, выходящие из воды в районе впадины, образуют дополнительные силы тяжести, направленные вниз. В результате может быть построена крайняя линия или ступенчатая кривая волновой нагрузки, интегрирование которой подобно интегрированию на спокойной воде и позволяет получить

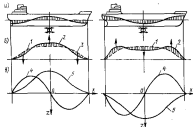


Рис. 4.5. Система, позволяющая доопределять образ якоря судна на регулярном волнении: а — расчетные положения судна на волне; б — волновая нагрузка (F), равная разности ordinат кривых сдвиг давления на такой волне (1) и на регулярном волнении (2); в — волновые перерезывающие силы (3) и изгибающие моменты (4); г — волновые моменты (5).

изгибания и распределение изгибающих величин (см. рис. 4.5). Возможное перемещение кривых $N_x(x)$ и $M_x(x)$ на нулевой инпуте допускается в тех же пределах, что и для соответствующих зигор на такой волне.

Полные значения изгибающих моментов, действующие на судовой корпус на волнении, определяются алгебраическим суммированием их значений на такой волне и доопределяемых на волнении.

$$\left. \begin{aligned} \sum M_{x, \lambda}(x) &= \pm M_{x, \lambda}(x) + M_{x, \lambda}(x); \\ \sum N_{x, \lambda}(x) &= \pm N_{x, \lambda}(x) - M_{x, \lambda}(x). \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

Аналогично суммируют значения перерезывающих сил на такой волне и регулярном волнении и осевых, где их сумма становится максимальной. В качестве расчетного принимают изгибающий момент на вершине волны, если на такой волне наблюдается перегиб судна, и на подножке волны, если на такой волне — прогиб. Отсюда видно, что суммарный изгибающий момент можно уменьшить в основном только за счет уменьшения изгибающего момента на тихой волне.

Приближенное определение волновых изгибающих моментов. Вместо довольно трудоемкой статической постановки судна на волну наибольшие значения доопределяющего изгибающего

момента и районе средней части корпуса можно определить (в кН·м) по формуле

$$M_{\lambda} = g k_{\lambda} B L^2, \quad (4.13)$$

где k_{λ} — коэффициент волновых моментов; $r = L/2$ — полувысота расчетной волны, м.

Для корпусов с примостенными или близкими к ним обводами в пределах высоты профиля волны коэффициенты k_{λ} устанавливаются ЦНИИМФ в зависимости от коэффициента полноты ватерлинии α и с учетом плотности воды при положении судна на вершине и на подножке волны, можно приближенно определить соответственно по формулам

$$k_{\lambda, \alpha} = 0,01 (8,0\alpha - 3,40); \quad k_{\lambda, \alpha} = -0,01 (5,0\alpha - 1,20).$$

Высота расчетной волны (в м) принималась равной $A = \lambda/30 + 2$ для $\lambda \leq 120$ м и $A = \lambda/20$ для $\lambda \geq 120$ м (по Английскому Lloyd с учетом вероятности встречи с расчетной длиной волны $A = 0,607 \sqrt{\lambda}$).

Нормальные напряжения, рассчитанные для построенных судов статической постановкой на указанную волну или с использованием формулы (4.13), оказались значительно большими, чем завершенные при эксплуатации в штормовых условиях. Существенное влияние на уменьшение расчетных напряжений оказывает учет так называемого гидродинамического давления, обусловленного силами инерции частиц воды, вращающихся равномерно по круговым орбитам в составе жидкости, содержащей волнение: дисперсия. Центробежные силы инерции как бы уменьшают силы тяжести частиц воды, расположенных в районе гребня, и увеличивают силы тяжести частиц в районе впадины. В результате кривая сил подергивания при расположении судна на вершине и на подножке волны сглаживается [19, ч. 1], что приводит к уменьшению волновых изгибающих моментов (в кН·м): $M_{\lambda} = g k_{\lambda} B L^2$, где $k_{\lambda} = f(d/\lambda; \chi)$ — гидродинамическая поправка к давлению воды на регулярном волнении, равная 0,8–0,7 при изменении осадки судна от 0,04 L до 0,065 L.

Предлагалось учитывать и другие динамические факторы. Однако, несмотря на введение динамических поправок, сближающих значения расчетных волновых моментов с действительными, модель регулярного волнения остается условной.

§ 19. Изгибающие моменты на нерегулярном волнении

Краткая характеристика нерегулярного волнения. Нерегулярность является основным свойством реального волнения. Рассматривается развитое морское волнение, когда под действием аэтра данной скорости рост волн прекращается. Такое волнение

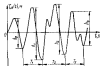


Рис. 4.6. Фрагмент записи волны для замера высоты волн нерегулярного волнения (1) — средний волновой наклон, 2) — средняя волновая высота, 3) —

и значения высоты волн являются случайными величинами, поскольку заранее неизвестно, кому они будут равны в следующий момент времени. Статистическая обработка замеренных данных показала, что высота волн распределяется по закону Рэлея.

В СССР для количественной характеристики интенсивности стационарного нерегулярного волнения принята высота волн 3 %-ной обеспеченности ($h_{3\%}$), больше которой в данном режиме волнения имеется только 3 %, а меньше и равнее ей — 97 % всех замеренных по высоте волн. Под обеспеченностью случайной величин понимается вероятность превышения характерного ее значения.

Волновые нагрузки с учетом нерегулярности волнения. Судно как линейная динамическая система преобразует воздействие нерегулярного волнения («каждого» случайного процесса) в «каждый» процесс, т. е. в волновые нагрузки (волновые изгибающие моменты) с такими же статистическими закономерностями.

Для составления прочности судов волновые изгибающие моменты принятой обеспеченности, полученные расчетом их одновременных распределений, представляют (в кН-м) в форме, подобной статической постановке судна на минимальную волну длиной $\lambda = L[2, 9 \text{ и др.}]$:

$$M_w(Q_3) = \alpha k_w(\alpha, Fr, M_{\text{изб}} \dots) B L^3 h_{3\%} / 2, \quad (4.14)$$

где $k_w(\alpha, Fr, M_{\text{изб}} \dots)$ — коэффициент волнового изгибающего момента, принимаемый в зависимости от параметров судна, распределения грузов и гидродинамических поправок; $h_{3\%}$ — эквивалентная высота волны, не зависящая от индивидуальных особенностей судна (его скорости, осадке, распределения статической нагрузки по длине).

Волновые изгибающие моменты по Нормам прочности. Требования к определению расчетных нагрузок на нерегулярном

волнении, к общей и местной прочности морских стальных судов традиционных типов включены в современные Правила Регистра СССР (см. гл. 5). Для расчета прочности основных конструкций корпусов судов новых конструктивных типов, судов с необычными соотношениями главных размеров, а также эксплуатационных в условиях, не предусмотренных Правилами Регистра СССР, в СССР разработаны «Нормы прочности морских судов» [13]. Как в Правилах, так и в Нормах требования к прочности конструкций, т. е. конкретные нормативы, устанавливаются в зависимости от расчетных значений внешних нагрузок и принятой методики расчета.

Современный подход к проектированию конструкций, к определению и анализу внешних нагрузок логически связан с выбором физических обобщающих критериев и соответствующих законов прочности. Волновые нагрузки представляются для двух режимов волнения: эксплуатационного с обеспеченностью $Q_3 = 10^{-3}$ и экстремального с обеспеченностью $Q_2 = 10^{-6}$. Указанные волновые нагрузки являются стационарными величинами, осредненными за время эксплуатации уровней нагрузок, определяющих требования соответственно к устойчивости и предельной прочности. Основное логическое критериев прочности — установление функциональных закономерностей между требованиями к соответствующей прочности конструкции (устойчивости или предельной) и расчетной нагрузкой с учетом особенностей архитектурно-конструктивного типа судна, материала корпусов, условий эксплуатации.

Критерий устойчивости прочности ограничивает уровень переменных (нормальных) напряжений, чем обеспечивает необходимый запас устойчивости долговечности конструкции корпусов морских судов. Критерий предельной прочности предусматривает требования к общей прочности, исключая опасное состояние (разрушение) конструкций, по крайней мере при однократном действии возможной наиболее неблагоприятной (экстремальной) совокупности нагрузок. Наименьшие запасы по критерию устойчивости прочности имеют суда длиной 80–130 м, а по критерию предельной прочности — суда длиной более 250 м.

Указанные критерии являются необходимыми, но еще недостаточными, чтобы полностью исключить появление опасных состояний конструкции (консольный или даже разрушений). Поэтому в нормативных материалах по проектированию и проверке прочности судовых конструкций предусмотрены дополнительные требования к качеству и свойствам материала, конструктивному оформлению и количеству исполнению узлов корпуса и др.

Расчет волновых изгибающих моментов, действующих в вертикальной плоскости, производят (в кН-м) по формуле (4.14).

Указанные критерии являются необходимыми, но еще недостаточными, чтобы полностью исключить появление опасных состояний конструкции (консольный или даже разрушений). Поэтому в нормативных материалах по проектированию и проверке прочности судовых конструкций предусмотрены дополнительные требования к качеству и свойствам материала, конструктивному оформлению и количеству исполнению узлов корпуса и др.

Расчет волновых изгибающих моментов, действующих в вертикальной плоскости, производят (в кН-м) по формуле (4.14).

Указанные критерии являются необходимыми, но еще недостаточными, чтобы полностью исключить появление опасных состояний конструкции (консольный или даже разрушений). Поэтому в нормативных материалах по проектированию и проверке прочности судовых конструкций предусмотрены дополнительные требования к качеству и свойствам материала, конструктивному оформлению и количеству исполнению узлов корпуса и др.

Расчет волновых изгибающих моментов, действующих в вертикальной плоскости, производят (в кН-м) по формуле (4.14).



Рис. 4.7. Зависимость высоты расчетных волн от периода волны по критерию устойчивости $h_w = h_{w1}$ и по критерию предельной прочности $h_w = h_{w2}$.

$$h_{w1} = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0,001 \cdot T \quad C_{w1} = 0,75 \cdot T - 1$$

$$h_{w2} = 0,001 \cdot T^2 \quad \text{или} \quad h_{w2} = 0,001 \cdot T^2 + 0,001 \cdot T$$

записанной в виде

$$M_{z1} = 0,5 A_1(\alpha) \rho_0 g L^2 \varphi_0(x), \quad (4.15)$$

где h_1 — высота расчетных волн (рис. 4.7); $i=1$ для нагрузки с обесцененностью $Q_1=10^{-4}$; A_1 — коэффициент момента, соответствующий статической постановке судна на расчетную волну, для $i=1$ $A_1(\alpha)=0,60\alpha-0,17$; для $i=2$ $A_2(\alpha)=0,68\alpha-0,23$ при перегибе судна на эллипсе и $A_2(\alpha)=0,52\alpha-0,09$ при перегибе судна на подкове расчетной волны; α — коэффициент наклона расчетной наклонной на тихой воде [на ранней стадии проектирования можно принять равным $(2C_u + 1)/3$]; ρ_0 — гидродинамический поправочный коэффициент (рис. 4.8); $\varphi_0(x) \leq 1,0$ — коэффициент, учитывающий изменение волнового изгибающего момента по длине судна (в средней части между 8-м и 13-м теоретическими шпангоутами $\varphi_0=1,0$, а по концам длины корпуса $\varphi_0=0$).

Необходимая для расчета волновых изгибающих моментов максимальная относительная скорость судна на волнении в первом приближении по Нормам определяется формулами: при проверке устойчивости $Fr_{12} = 0,125 Fr_0 [2,5 + 1,5 \times$

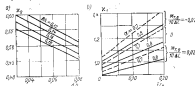


Рис. 4.8. Поправочные коэффициенты к расчетной высоте волн: α — гидродинамический; β — учитывающий изменение скорости судна на волнении φ_0 .

$$\rho_0 = 0,30 - 0,001 \cdot T \quad \text{или} \quad \rho_0 = 0,30 - 0,001 \cdot T$$

$$\varphi_0 = 1,0 - 0,001 \cdot T \quad \text{или} \quad \varphi_0 = 1,0 - 0,001 \cdot T$$

$\times (L/100)^{1/3}$, при проверке предельной прочности по формуле $Fr_{12} = 0,125 Fr_0 [1 + 1,5 (L/100)^{1/3}]$, где число Фруда $Fr_0 = 0,5148 v_0 / \sqrt{g L}$; v_0 — максимальная специфическая скорость судна на тихой воде, уз.

Во время интенсивной проволочной качки на волнении у судов с относительно малыми осадками, в частности, при ходе с балластом, когда $d < (0,040 + 0,45) L$, днище корпуса в поднахвостной оконечности может оторваться. Последующее погружение оконечности корпуса в воду сопровождается ударным действием забегающей волны. Ударные нагрузки, происходящие на днище судна, называются диническими slamming, а ударные нагрузки в развал бортов — бортовыми slamming. Под действием динических и бортовых гидродинамических ударных нагрузок появляются динамические изгибающие моменты. Для проверки предельной прочности корпуса судна по Нормам [13] изгибающие моменты на тихой воде и волнении суммируются с изгибающим моментом от slamming.

§ 20. Требования к общей продольной прочности судна

Понятие общей прочности. Общая прочность — это способность корпуса при общей киле судна воспринимать внешние нагрузки в предусмотренных проектом условиях эксплуатации без разрушения, с сохранением непроницаемости и формы конструкций (с возможными деформациями в допустимых пределах). Понятие прочности конструкции, в том числе и общей прочности судна, является составной частью более общего понятия — их надежности. Надежность — это гарантированная способность конструкции корпуса нормально выполнять предусмотренные функции в течение заданного срока службы в условиях обычной эксплуатации.

Учитывая экономические и социальные последствия в случае гибели судна, его общая прочность должна быть полностью гарантирована и не должна допускать разрушения конструкции корпуса в эксплуатационных условиях. Однако учесть, при проектировании конструкции корпуса все экстремальные нагрузки практически невозможно, да и экономически не оправдано. Ввиду такого противоречия между требованием абсолютной общей прочности судна и отсутствием ее практической реализации, приходится принимать вероятностный принцип расчета. Прием вероятности разрушения конструкции корпуса при общей киле судна должна быть весьма низкой, поэтому ниже вероятности гибели судна от других причин. Этому условию обеспечения общей прочности соответствует вероятность поломки $P = 10^{-4} + 10^{-5}$, что пока трудно гарантировать. Таким образом, риск разрушения конструкции корпуса судна в море, хотя и очень малый, сохраняется.

Общей прочностью должны обладать все суда, эксплуатируемые в море. В явном виде требования к общей прочности нормативными документами [13, 17] предъявляются к судам длиной $L \geq 60$ м, а с 1990 г. — к судам длиной $L \geq 60$ м при условии обычных соотношений главных размерений. Суда меньшей длины, как правило, требованиям общей прочности удовлетворяют даже при значительно допустимых размерах продольных конструктивных связей. Для судов новых типов, а также судов с несоблюдением соотношений главных размерений, неравномерной по длине загрузки, после модернизации и ремонта требуется проверка общей продольной прочности в соответствии с Нормами [13].

Условия общей прочности. Подобно изгибу арматуростекляных балок при общей прочности судна в поперечных сечениях корпуса появляются нормальные и касательные напряжения, уравновешивающие внешний изгибающий момент и перерезывающие силы. Значения изгибающей, а следовательно, и сопротивляющей изгибу общей прочности, зависят не только от площади поперечного сечения продольных связей, но и от распределения этой площади по высоте корпуса.

Распределение материала продольных связей по высоте поперечного сечения корпуса характеризуется моментом инерции данного сечения относительно нейтральной оси I_0 , а сопротивление общему изгибу — моментом сопротивления, равным отношению $W_x = I_0/z_0$, где z_0 — расстояние по вертикали рассматриваемой продольной связи от нейтральной оси поперечного сечения.

Условие общей прочности судна по нормальным напряжениям (в МПа) записывается в виде

$$\sigma_x = -10M_x/I_0 \leq \sigma_{\text{норм}}, \quad (4.16)$$

где M — расчетный изгибающий момент с учетом знака, кН·м; $z_0 = z_{\text{норм}}$ — расстояние от нейтральной оси поперечного сечения до наиболее удаленной по высоте продольной связи, и (ось z направлена вниз); I_0 — момент инерции поперечного сечения корпуса относительно нейтральной оси, см⁴·м²; $\sigma_{\text{норм}}$ — напряжение, соответствующее опасному состоянию конструкции, МПа; $\sigma_0 \geq 1.0$ — коэффициент запаса по нормальным напряжениям.

Наибольшие касательные напряжения имеются на уровне нейтральной оси поперечных сечений, в которых действуют наибольшие перерезывающие силы ($N_{\text{норм}}$, кН) и определяются (в МПа) по формуле

$$\tau_{\text{норм}} = N_{\text{норм}} S_0 / I_0 \leq \tau_{\text{норм}}, \quad (4.17)$$

где S_0 — статический момент площади сечения продольных связей корпуса, расположенных выше или ниже нейтральной оси, относительно этой оси, см²·м; δ — сжатия из уровня ней-

тральной оси толщиной обшивки бортов и продольных переборок, если она установлена, мм; $\tau_{\text{норм}}$ — касательные напряжения, соответствующие опасному состоянию, МПа; $\delta_0 \geq 1.0$ — коэффициент запаса по касательным напряжениям.

В районе действия максимального изгибающего момента значения перерезывающих сил минимальны и искривление поперечных сечений практически не происходит, поэтому при общем изгибе судна, как и при изгибе балок под действием вертикальной нагрузки, считается справедливой гипотеза плоских сечений. Предполагается также, что при общем продольном изгибе судна в ДП нормальные напряжения по ширине корпуса не изменяются. Как показали многочисленные натурные эксперименты, распределение нормальных напряжений по высоте поперечного сечения корпуса на судах с продольной системой набора шалубы и днища мало отличается от линейного распределения нормальных напряжений в соответствии с теорией изгиба балок. На судах с поперечной системой набора распределение нормальных напряжений по высоте корпуса и особенно сжимающих напряжений по ширине существенно отличается от расчетных по формуле (4.16).

Формальное соблюдение условий общей прочности при проектировании [см. формулы (4.16) и (4.17)] еще не обеспечивает надежности конструкции. Дефекты материалов, конструкции, технологии сборки и сварки, если отсутствует надлежащий контроль, могут непредсказуемо снизить надежность и тем самым повысить вероятность наступления опасного состояния (повреждения или даже разрушения конструкции). Грамотная же и техническое отношение к эксплуатации судна, т. е. рациональное размещение грузов, балласта, правильный выбор курсовых углов, скорости с учетом состояния моря и других факторов, значительно уменьшает вероятность экстремальных нагрузок и таким образом повышает безопасность плавания.

Опасные состояния конструкции. Во время эксплуатации судов необходимо частично изменить форму корпуса, его прочность, а также целостность. Конструктивные, технологические, сварочные дефекты, а также износ, коррозия, остаточные деформации, другие эксплуатационные дефекты снижают эффективность и уменьшают общую и местную прочность конструкций корпуса. Под действием внешних переменных или экстремальных нагрузок возможны повреждения или даже разрушения конструкций.

Повреждениями считаются большие (более допускаемых) остаточные деформации из-за местной текучести материала, остаточные трещины или потеря устойчивости отдельными конструктивными элементами. Усталостные повреждения конструкций, обусловленные циклическими нагрузками, коррозией, другими факторами, чаще всего возникают в местах концентрации

напряжений при растяжении связей. Конструкции с поврежденными еще способами ограничительно выводят свои функции, однако нуждаются в ремонте. Чтобы предупредить распространение усталостных трещин, необходимо при проектировании предусмотреть уменьшение напряжений в конструкции.

Опасным по возможным последствиям является развитие усталостных трещин в хрупкие повреждения, поскольку они могут привести к разрушению конструкции. Этому явлению способствуют низкие вязкостные свойства материала, динамичность внешних нагрузок, объемность напряженного состояния конструкции, высокие температуры окружающей среды. В случае разрушения конструкции уже не способна выполнять свои функции, например, при распространении хрупкой трещины, при общей потере устойчивости перекрытия, в случае нарушения пластичности материала при растяжении.

Таким образом, опасными являются состояния напряженности, предельные значения и развитие в данной конструкции физических явлений, сопровождающихся ее повреждением или разрушением.

Критерии прочности. Прочность и надежность конструкции корпуса могут быть в определенной степени гарантированы при условии соблюдения физических критериев прочности, соответствующих возможным опасным состояниям. Качественные значения критериев прочности устанавливают главным образом в результате анализа опыта эксплуатации подобных конструкций, экспериментов на моделях и теоретических исследований по обоснованию требований к конструкции судна и в частности, судов новых типов.

Нормами [13] предусмотрены критерии усталостной и предельной прочности. Усталостная прочность (долговечность) зависит от параметров (цикла шквал и амплитуда) переменных волновых нагрузок и от работоспособности узла нарушенных конструкций в условиях действительного напряженного состояния. Основой для определения уровня требований к усталостной прочности являются регламентируемые правилами классификационных обществ минимально допустимые моменты сопротивления поперечного сечения корпусов судов (см. гл. 5) и статистика повреждений.

Критерий общей предельной прочности устанавливает несущую способность корпуса в случае полного действия наиболее неблагоприятной совокупности внешних нагрузок, в качестве которых в процессе проектирования принимают наибольшие изгибающие моменты, действующие в продольной вертикальной плоскости при прогибе и перегибе судна. Предельное состояние корпуса формально наступает, когда расчетные нормальные напряжения в наиболее удаленных от нейтральной оси продольных связях при общем изгибе достигают минимального предела

текучести материала или критическим напряжением при сжатии конструктивных элементов. Фактически предельная несущая способность судовых корпусов зависит также от многих других факторов, и ее определение пока невозможно из-за отсутствия необходимых решений.

Общая прочность судов из обычной углеродистой стали длиной примерно до 130 м определяется критерием усталостной прочности, а длиной более 250 м — критерием предельной прочности. Для судов из стали повышенной прочности критериям определяющим общую прочность критериев сдвигаются в сторону уменьшения длины судов. На судах промежуточных размеров необходима проверка общей прочности корпуса по обоим критериям с учетом их антинормальных особенностей и знания внешних сил в эксплуатационном и предельном режимах движения.

Требования Норм к общей прочности. Нормы прочности морских судов [13] рекомендуют для расчетов проверки прочности основных конструктивных стальных корпусов автономных судов традиционных типов и обязательным к применению для расчета прочности судов новых конструктивных типов, необычных соотношений главных размеров и эксплуатируемых в условиях, не предусмотренных Правилами Регистр СССР. Проверка прочности конструкций производится по состоянию на середину срока службы судна, т. е. с учетом в явном виде влияния зазора и коррозии на размеры конструктивных связей.

Общая продольная прочность судов считается обеспеченной при условии выполнения требований, соответствующих критериям усталостной и предельной прочности. Расчетные напряжения в крайних по высоте корпус продольных связях согласно критерию усталостной прочности с учетом состояния судна к середине срока его службы равны (в МПа)

$$\sigma = (k_0 M_H + k_{0.1} M_{0.1}) / W \leq \sigma_{\text{дл}} \quad (4.18)$$

где $k_0 \geq 1$ — коэффициент, учитывающий влияние многократных напряжений от ударных нагрузок; M_H — полный изгибающий момент, определяемый по формуле (4.15), кН·м; $k_{0.1}$ — коэффициент, принимаемый не менее 0,7 при определении W на уровне паступатных продольных связей и не менее 0,5 при определении W на уровне связей на такой же связи; $M_{0.1}$ — наибольший по абсолютному значению из расчетных изгибающих моментов на такой же, растягивающей продольные связи, на уровне которых определено значение W , кН·м; W — момент сопротивления поперечного сечения корпуса на уровне крайних по высоте верхних и нижних продольных связей без учета сдвинутированных в случае потери устойчивости от сжатия, см³; ΔW — уменьшение момента сопротивления корпуса в результате износа продольных связей к середине срока

службы судна, см²; σ_k — допускаемое напряжение, определяемое по Нормам прочности на уровне рассматриваемых связей в зависимости от экстремальных значений (амплитуд) изгибающих моментов на тихой воде, МПа. Допускаемые напряжения по сравнению с напряжениями в верхней палубе уменьшены в одинарном диле на 5 %, а в двойном диле на 10 %.

Проверка общей прочности по предельному состоянию как при згогибе, так и при перегибе корпуса судна заключается в выполнении условия

$$k_b = M_{кр}/(M_{кр,в} + M_p + M_{к,в}) \geq k_{кр,в}, \quad (4.19)$$

где k_b — фактический коэффициент запаса; $M_{кр}$ — предельный изгибающий момент; $M_{кр,в}$ — волновой момент на подходе волны; $M_p \geq 0,1 M_{кр,в}$ — изгибающий момент от удара корпуса о волну дилем и развалами бортов носовой оконечности при прогибе судна (при перегибе судна на вершине расчетной волны $M_p = 0,1 M_{кр,в}$); $M_{к,в}$ — момент на тихой воде при перегибе и прогибе судна соответственно из згогибе и подходе расчетной волны; $k_{кр,в}$ — минимальный коэффициент запаса, равный 1,15 при прогибе и 1,25 при перегибе корпуса судна; k_k — коэффициент относительного увеличения изгибающего момента $M_{кр,в}$ равный $k_k = 0,9 + 0,1 M_{кр,в}/M_{т,в} \geq 1$ при перегибе и 1,0 при згогибе на тихой воде; $M_{т,в}$ — изгибающий момент на тихой воде, соответствующий минимальному моменту сопротивления поперечного сечения корпуса судна. Наибольшее значение волнового изгибающего момента $M_{кр,в}$ вычисляют по формуле (4.15), приведенной в § 19, принимая эквивалентную высоту волны по рис. 4.7 для предельного режима волнения.

Предельный изгибающий момент (в кН·м), воспринимаемый корпусом судна,

$$M_{кр} = \sigma_k W_{кр} 10^{-3}, \quad (4.20)$$

где $\sigma_k = k_{кр} \sigma_t$ — нормативный предел текучести материала жестких продольных связей расчетной палубы, МПа ($k_{кр}$ — коэффициент, учитывающий комплексность механических характеристик материала);

$$k_{кр} = 1/[1 + 0,16(\sigma_t/\sigma_{кр,в}) - 1]^{1/2}, \quad \sigma_{кр,в} = 236 \text{ МПа};$$

$W_{кр}$ — предельный момент сопротивления провераемого поперечного сечения корпуса на уровне самых верхних продольных связей, определяемый с учетом редуцирования тертящих устойчивости пластин настила и наружной обшивки под действием сжимающих усилий от общего изгиба, а также с учетом зноса связей к середине расчетного срока службы судна, см³.

Если критические (исправленные эйлеровы) напряжения $\sigma_{кр}$ верхних жестких продольных связей в условиях сжатия

меньше σ_k , значение предельного изгибающего момента для соответствующих условий нагружения вычисляют по формуле $M_{кр} = \sigma_{кр} W_{кр}$.

Нормами прочности предусмотрена также проверка по предельному состоянию корпуса на срез (с запасом 20 %) при действии в рассматриваемом сечении максимальных перерезывающих сил от нагрузки судна на тихой воде, а также от волновой и ударной составляющих на волнении. Особая проверка общей прочности предусмотрена в Нормам прочности для судов, имеющих палубные вырезы более 70 % общей ширины палубы.

Заключение об общей прочности судна производится по расчетным значениям моментов сопротивления и момента инерции поперечного сечения корпуса, которые должны быть соответственно не менее требуемых Правилами Регистра СССР или Нормами прочности [13]. Нормы прочности допускают значительное уменьшение момента сопротивления поперечного сечения корпуса при условии обеспечения обоих критериев прочности примерно на 5 % меньше, чем Правила Регистра СССР.

§ 21. Расчет общей прочности

Эквивалентный брус. Определяя продольную прочность при общем изгибе судна в вертикальной плоскости расчетное поперечное сечение корпуса выделено представляются в зависимости от числа палуб и чиса дедек как многотавровой монолитной толкостенной балки, заменяемой эквивалентным брусом, для которого справедливы гипотеза плоских сечений. Эквивалентный брус является конструктивной идеализацией (прочностной моделью) поперечного сечения корпуса формально с такими же геометрическими характеристиками сечения, как и у проектируемого судна. Он состоит из совокупности одноосно нагруженных продольных конструктивных связей, принимающих эффективное совместное участие в общем изгибе судна (рис. 4.9).

Продольными связями являются конструктивные элементы, образующие поперечное сечение корпуса и идущие по всей или значительной части длины судна, а именно: обшивки дилла, бортов и продольных переборок, настилы палуб, второго дла, конструктивно непрерывные продольные балки, приваренные к соответствующей обшивке и настилам. К продольным связям с некоторым редуцирующим коэффициентом $\eta \leq 1,0$ могут быть отнесены борта и палуба дилной средней надстройки.

На площади поперечного сечения соответствующих продольных связей (ластов настила, обшивки и стенок рамных балок) неключают большие вырезы шириной (высотой) более 1,2 м и (или) длиной более 2,5 м. Малые по размерам вырезы (лазы, облегчающие вырезы и др.) могут не вычитаться при определении

расположенные в ДП (вертикальные и горизонтальный кил, средние карлингс и продольная переборка) рассчитывают для половины площади своего поперечного сечения. Размеры связей принимают с чертежа или схемы расчетного (наиболее ослабленного) среднего сечения корпуса.

Для удобства выполнения последующих расчетов общей прочности во втором приближении листовые элементы и афодальные балки каждого перекрытия объединяют в отдельные группы и записывают в соседние строки таблицы. Раздельно записывают в таблицу также размеры стоек и свободного конца карлингсов, непрерывных продольных коммунс и других составных балок. На судах с парными грузowymi лыками продольные межкоммунсные переборки, не поддерживаемые эффективно продольной переборкой в ДП, включают в эквивалентный брус с редуцированным коэффициентом в соответствии с требованиями Правил Регистра СССР.

Горизонтальную несущую ось сравнения можно принимать на любом уровне по высоте корпуса. Однако удобнее совместить ее с основной лышкой, проходящей по верхней поверхности горизонтального кила, чтобы иметь одинаковые знаки алгебр для всех продольных связей и этим исключить одну из причин возможных ошибок. Размещая ось сравнения в районе половины высоты корпуса или совмещая ее с лышкой палубой, необходимо при направлении осей z вниз принимать, $z_{01} < 0$ для связей выше и $z_{02} > 0$ для связей ниже оси сравнения. Собственный момент инерции вычисляют по формуле $I_0 = \pi d^4/12$ только для поясков обшивки борта, продольных переборок, вертикально расположенных листовых балок, размер которых по высоте более 0,1 высоты борта. Связи с меньшей высотой имеют сравнительно малое значение собственного момента инерции и в расчете эквивалентного бруса им можно пренебречь.

Определяя в табл. 4.1 сумми столбцов 4, 6, 7 и 8, находят отстояние нейтральной оси поперечного сечения корпуса от оси сравнения $z_0 = B/A$, и, потом, значение центрального момента инерции полного поперечного сечения (на оси лышки судна) вычисляют (в см⁴-м²) по формуле

$$I_0 = 2(C - Az_0^2) = 2(C - B^2/A). \quad (4.21)$$

Для сопоставления с требуемыми значениями устанавливают фактические моменты сопротивления (в см⁴-м): на уровне ВП (расчетной палубы) у борта по формуле $W_{\text{вп}} = I_0/(D - z_{\text{вп}})$ и на уровне дна (горизонтального кила) по формуле $W_{\text{дн}} = I_0/z_{\text{дн}}$, где $z_{\text{дн}}$ — отстояние нейтральной оси от основной лышки (ОЛ). При совмещении осей сравнения с ОЛ $z_{\text{дн}} = z_0 = B/A$.

Если полученные расчетом эквивалентного бруса фактические моменты сопротивления и момент инерции окажутся мень-

ше соответствующих значений, обусловленных Правилами Регистра СССР (см. § 24) или Нормами прочности (см. § 20), необходимо для обеспечения общей прочности и жесткости корпуса увеличить в первую очередь размеры поперечного сечения палубных связей. Если же указанные геометрические характеристики поперечного сечения корпуса превысят необходимые значения более чем на 10 %, следует уменьшить толщину настила верхней палубы, днищевой обшивки, сохраняя их устойчивость и местную прочность путем уменьшения шага, при условии, что это допустимо в соответствии с требованиями к минимальным толщинам.

Данные табл. 4.1 позволяют при необходимости оценить роль отдельных продольных связей в общей прочности судна или определять влияние изменения их размеров, например, из-за коррозии и напоя, при ремонте или модернизации корпуса.

Напряжения в продольных связях корпуса. Нормальные напряжения в продольных конструктивных связях при общем изгибе судна вычисляют по формуле (4.16), а касательные — по формуле (4.17), приняв $z_1 = z_2 = z_0$. Наибольшие по абсолютному значению нормальные напряжения действуют в палубных и днищевых продольных связях, наиболее удаленных от нейтральной оси (см. рис. 4.9). Нормальные напряжения вычисляют для всех продольных связей, сжимаемых при перегибе и прогибе судна, чтобы убедиться в их устойчивости. Для этого табл. 4.1 дополняют четырьмя столбцами: 9-м с ординатами z_1 , 10-м с суммированными напряжениями σ_{Σ} по перегибу, 11-м с суммированными напряжениями σ_{Σ} на подпоре расчетной волны и 12-м с экстремальными или критическими напряжениями. В качестве расчетных принимают наибольшие по абсолютному значению суммарные изгибающие моменты с учетом знака (на тихой воде и на волнении), действующие при перегибе и прогибе судна соответственно. В формуле (4.17) вместо расчета отношения S_0/I_0 для поперечного сечения корпуса с максимальной переизгибающей силой можно воспользоваться отношением этих величин для среднего сечения, поскольку оно мало изменяется по длине судна. Статический момент отсекаемой части площади эквивалентного бруса удобно определять, используя вычисления, сделанные в табл. 4.1.

Устойчивость продольных связей. Некоторые гибкие продольные связи (пластины листов настила палуб, наружной обшивки) под действием сжимающих напряжений от общего изгиба, особенно в экстремальных условиях плаванья, могут потерять устойчивость. Потеря устойчивости конструктивными элементами снижает эффективность эквивалентного бруса в общем изгибе и приводит к соответствующему увеличению напряжений в продольных связях, сохраняющих устойчивость.

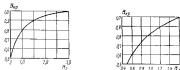


Рис. 4.10. Критические напряжения стальных балок и пластин при изгибной системе заделки.

$\lambda_{cr} = 0$, при $\sigma_{cr} < 0.5 \sigma_E$; $\lambda_{cr} = 1$, при $\sigma_{cr} > 0.5 \sigma_E$; $\lambda_{cr} = \lambda_0$, при $\sigma_{cr} = \sigma_E/4$; $\lambda_{cr} = \lambda_0/4$, при $\sigma_{cr} = \sigma_E/4$; $\lambda_{cr} = \lambda_0/4$, при $\sigma_{cr} = \sigma_E/4$; $\lambda_{cr} = \lambda_0/4$, при $\sigma_{cr} = \sigma_E/4$.

Рис. 4.11. Критические напряжения стальных пластин при продольной системе заделки.

$\lambda_{cr} = 0$, при $\sigma_{cr} < 0.5 \sigma_E$; $\lambda_{cr} = 1$, при $\sigma_{cr} > 0.5 \sigma_E$; $\lambda_{cr} = \lambda_0$, при $\sigma_{cr} = \sigma_E/4$; $\lambda_{cr} = \lambda_0/4$, при $\sigma_{cr} = \sigma_E/4$.

Устойчивость продольных конструктивных элементов при сжатии напряжениями σ_c считается обеспеченной при условии [13]:

$$\sigma_c \leq \sigma_{cr} \quad (4.22)$$

где σ_{cr} — критические (исправленные Эйлеровы) напряжения, определяемые с учетом уменьшения модуля нормальной упругости (рис. 4.10 и 4.11), но по Нормам прочности [13] без учета влияния изгиба связей; коэффициент $k_c = 1.0$ для продольных балок и перекрытий в целом; $k_c = 0.9$ для листовых элементов ширитрека, стрингера ВШ, горизонтального кила, скуловых поясов, верхнего и нижнего поясов продольных переборок; $k_c = 0.6$ для остальных листовых элементов корпуса, включаемых в эквивалентный брус.

Сжимающие напряжения, соответствующие предельному изгибающему моменту, вычисляют по формуле

$$\sigma_c = \sigma_{cr} + (k_{axl}/k_b) \cdot (I_x/I_R) \quad (4.23)$$

где σ_{cr} — критические (исправленные Эйлеровы) напряжения верхних жестких продольных связей корпуса; k_{axl} и k_b — соответственно эквивалентный и фактический коэффициенты запаса [см. формулу (4.19)]; I_x — отношение ЦГ рассматриваемой связи от нейтральной оси, м; I_R — то же для крайних верхних продольных связей, принимающих участие в общем изгибе корпуса судна, м. Критические напряжения балок продольного набора и перекрытий верхней расчетной палубы должны быть не менее $0.9\sigma_{cr}$, а палубы — не менее $0.5\sigma_{cr}$.

В случае потери устойчивости пластинками палубы, наружной обшивки или других гибких связей от сжатия в со-

став сечения эквивалентного бруса во втором приближении вводят все продольные жесткие связи (продольные балки, ребра жесткости) с присоединенными поясками шириной не $0.25a$ от размера меньшей стороны пластин с каждой стороны жесткой связи (рис. 4.12). Оставшаяся часть сечения пластин, потерявших устойчивость, включается в эквивалентный брус, будучи уменьшенной на коэффициент $\eta = \sigma_{cr}/\sigma_{cr,cr}$, где σ_{cr} — критические напряжения гибкой связи; $\sigma_{cr,cr}$ — абсолютное значение сжимающего напряжения от общего изгиба.

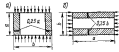


Рис. 4.12. Приближенные жесткие связи при потере устойчивости (а) и продольной (б) системы набора.

Определение момента инерции и моментов сопротивления поперечного сечения корпуса с учетом снижения эффективности продольных связей из-за потери ими устойчивости является расчетом эквивалентного бруса во втором приближении и приведено в справочнике [21, т. 3].

§ 22. Силы, действующие на корпус при постановке судна в док и при сауске с продольного стапеля

На корпус судна при постановке в док действуют силы тяжести (масса судна) и реакции килблоков, распределенные вдоль корпуса по разным законам. Распределение сил тяжести по длине судна выражается ординатами кривой распределения масс. Что касается реакции килблоков, то известно лишь значение и положение их равнодействующей. Закон распределения реакции килблоков неизвестен; он зависит от способа постановки судна в док и подлежит определению.

Изгиб корпуса в доке неповрежденного судна обычно не вызывает опасений в отношении общей продольной прочности, так как возникающие наибольшие изгибающие моменты в поперечных сечениях корпуса не достигают значений, получаемых при расчете общей продольной прочности корпуса. Однако может потребоваться дополнительный расчет общей прочности в случае ее уменьшения, вызванного изгибом основных продольных связей или повреждением их в результате аварии.

При постановке судна в док масса корпуса и реакция килблоков воспринимаются бортами и переборками с прилегающими к ним поясками палуб и днища. Продольные связи (борта и продольные переборки с прилегающими к ним поясками палуб и днища) воспринимают усилие от общего продольного изгиба,



Рис. 4.13. Силы, действующие на поперечную переборку при постановке судна в док: пережимающие балки (I); выгибающие моменты (II).

а поперечные переборки с пралетающими к ним носками надуб и дна — усилием от поперечного изгиба.

Усилия, вызываемые поперечным изгибом корпуса при постановке в док, значительно превышают аналогичные усилия при плавании судна во время качки. Поэтому общую поперечную прочность корпуса следует проверить по усилиям постановки судна в док. Усилия постановки судна в док должны выбираться с учетом обеспечения поперечной прочности корпуса судна в доке.

Изгиб корпуса в доке в поперечном направлении представляется в виде изгиба очень широкой балки длиной, равной ширине судна и состоящей из нескольких поперечных стенок (поперечные переборки) с носками (надубы и дна). Стенки соединены несколькими продольными стенками (борта и продольные переборки), поэтому вертикальные перемещения балки по всей ее ширине не могут быть независимыми. Прочность продольных стенок балки с их носками обеспечивается проверкой общей продольной прочности корпуса.

Проверка прочности поперечных стенок (поперечных переборок) балки с их носками выполняется при расчетах общей поперечной прочности корпуса. Каждую поперечную переборку корпуса условно рассматривают как балку, опорами для которой служат борта и продольные переборки корпуса, загруженную реакциями от продольного набора дна и сосредоточенной нагрузкой, приложенной непосредственно к ней (рис. 4.13).

При спуске судна на воду с продольного стапеля на его корпус действуют следующие нагрузки:

масса корпуса и спускового устройства; эти усилия остаются неизменными во время спуска; значение и закон распределения их по длине корпуса известны и могут быть представлены в виде кривой распределения масс;

силы поддержания, т. е. силы плавучести входящих в воду частей корпуса и спускового устройства. Значения и закон распределения этих сил изменяются во время спуска, но для каж-

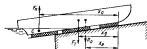


Рис. 4.14. Силы, действующие на корпус при спуске судна.
 R_0 — равнодействующая сил тяжести G_0 и сил поддержания G_1 .

дого момента спуска они могут быть вычислены и представлены в виде кривой сил поддержания;

реакция спускового фундамента, распределенная на некоторой части длины корпуса, соприкасающейся со спусковым фундаментом. Значения и закон распределения этих сил изменяются во время спуска, причем в каждый момент спуска равнодействующая сила равна и противоположна по направлению равнодействующей сил тяжести и сил поддержания.

Целью расчета прочности корпуса при спуске является проверка его общей и местной прочности при наиболее неблагоприятных случаях действия на корпус перечисленных выше усилий, которые изменяются в процессе спуска судна. Силы, действующие на судно в процессе спуска, показаны схематично на рис. 4.14.

Вопросы для повторения

1. Какой изгиб возникает общий?
2. Какие силы вызывают общий изгиб корпуса судна на таковой воде?
3. Как определить изгибающие моменты и пережимающие балки на таковой воде методом интегрирования нагрузок?
4. В чем состоит статический метод расчета равнодействующей моментов?
5. Какие силы действуют на корпус судна на таковой воде?
6. В чем состоит метод статической постановки судна на таковой воде и что является под таковой водой изгибающим моментом?
7. Как учитывать неравномерность волнения при расчете изгибающих моментов?
8. В чем состоит принцип расчета общей прочности?
9. Перечислите требования к общей продольной прочности корпуса судна. Как определяют нормальные и касательные напряжения?
10. Что такое эквивалентный брус и в чем его отличие от действительного таковой формы корпуса судна?
11. Назовите условия обеспечения устойчивости при скатывании продольными силами.
12. Какие силы действуют на корпус судна при постановке в док и при спуске на воду?

§ 28. Правила классификации и постройки морских судов

Классификация судов. Регистр СССР и его функции. Для обеспечения безопасности мореплавания, сохранности человеческой жизни и перевозимых грузов требуется максимальное внимание к техническому состоянию судов, позволяющее выявить из конструкции и эксплуатации. Предоступающий опыт в области надзора и классификации исторически сложился для судостроения в России в 1915 г. национальная классификационная организация «Русский Регистр». Декретом ВЦИК и СНК СССР от 20 июня 1923 г. учрежден единый государственный орган технического надзора и классификации судов гражданского флота — Российский Регистр, переименованный в 1924 г. в Регистр Советов СССР.

На Регистр СССР возложены многообразные задачи, главными из которых являются: установление технических требований, обеспечивающих условия безопасной эксплуатации морских судов в соответствии с их назначением; охрана человеческой жизни на море; поддержание морского транспорта; предупреждение загрязнения моря с судов и др. Регистру СССР и его органам на местах предоставлено право технического надзора за выполнением определенных требований и право по результатам надзора проводить классификацию судов. Техническому надзору и классификации подлежат все морские торговые суда. Надзорная деятельность осуществляется на основании изданных Регистром СССР Правил, Норм, Инструкций и других нормативных документов, обязательных для всех организаций, предпринимателей, собственников и владельцев за проектирование, постройку, эксплуатацию и ремонт судов. Регистр СССР проводит также общий учет безопасности судовых грузовых компаний, проводит наблюдения грузовых марок, выдает установленные судам допуски и предоставляет классировку судам, находящимся под флагом СССР. К функциям Регистра СССР относятся: изучение особенностей и недостатков судов, конструкций, оборудования, материалов; разработка предложений по повышению прочности и безопасности судов и многое другое.

Регистр СССР входит в состав Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО), образованной в 1968 г. с целью унификации требований к техническим качествам судов, конструкций, материалов.

Правила постройки морских судов. Одной из основных функций Регистра СССР является разработка, непрерывное совершенствование и издание Правил и Норм прочности, регламентирующих технические требования по обеспечению безопасности эксплуатации судов. Первые отечественные Правила постройки полностью сварных морских судов были разработаны в Ленинградском морехозяйственном институте под руководством проф. Н. Е. Пүтөна в 1948—1951 гг. и после доработки изданы в 1956 г. Новые методы проектирования и производства судовых конструкций, достижения научно-технического прогресса в отрасли, современные требования к техническому состоянию и надежности судов различных типов и назначений нашли отражение в структуре, построении и содержании новых

Правил Регистра СССР*. Разработка этих правил выполнена ЦНИИМФ при участии Регистра СССР, ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, ЛКИ и других организаций под руководством д-ра техн. наук, проф. А. И. Максимаджид. Как и предыдущие издания, новые Правила Регистра СССР являются согласованным нормативным документом органов технического надзора и классификации (ОТНК) стран СЭВ.

В процессе переработки Правил Регистра СССР авторы исходили из необходимости сохранения в учете накопленного опыта постройки и эксплуатации судов, достигший зрелости в области изучения внешних сил и поведения конструкций, использования современных методов расчета и оценки прочности судовых конструкций.

Учитывая случайный характер и многовариантность большинства нагрузок, действующих на конструкции корпуса в море, для определения их расчетных значений использованы статистические методы анализа и суммирования случайных процессов с целью установления не только характерной нагрузки, но и вероятности ее появления. Последнее совершенно необходимо для обоснованного назначения критерия нормирования и коэффициентов запаса прочности. В результате такого анализа получены расчетные нагрузки как для корпуса судна в целом, так и для его конструктивных элементов. Одновременно сформулированы требования к расчетным схемам и методам расчета при использовании полученных расчетных нагрузок и коэффициентов запаса.

Опыт эксплуатации учитывается, как и в предыдущих изданиях, введением дополнительных требований и ограничений к конструкциям корпуса, их оформлению, инженерным определениям размеров ряда связей и деталей, рекомендаций типовых конструктивных схем и узлов, других указаний, включенных в Правила Регистра СССР. Кроме указанных выше технических требований в явном виде указаны и технико-экономические требования к конструкциям корпуса, а именно: срок службы судна, влияние износа и коррозии на эффективность, а следовательно, и на расчетные размеры конструктивных связей, экономические критерии, используемые для обоснования коэффициентов запаса.

В Правилах Регистра СССР приведены минимально необходимые, обоснованные опытом и теорией, требования к проектным размерам конструктивных связей и деталей корпуса с учетом назначения и условий эксплуатации судна, специфики и особенностей его конструкций.

* Правила постройки, структура новых Правил Регистра СССР изложены в работах [10, 11, 14], и сообщаются на техническом симпозиуме в секции [12].

§ 24. Нормирование общей прочности корпуса судна в Правилах Регистра СССР

Этапы развития стандарта прочности. Под стандартом общей прочности понимается требуемые моменты сопротивления расчетного поперечного сечения корпуса судна (эквивалентного бруса) на уровне палубы у борта W_2 и на уровне основной деcksности (ОД) — горизонтального кила — W_0 .

Моменты сопротивления эквивалентного бруса обеспечивают способность суднового корпуса сопротивляться внешним силам, гарантируют на заданном уровне безопасности его общую прочность. Установление и обоснование необходимого для безопасной эксплуатации судна стандарта общей прочности — одна из наиболее сложных и практически важных задач.

В развитии стандартов общей прочности можно выделить три периода. Начальный, сравнительно короткий, когда, возможно интуитивно, были заложены удачные основы. Второй весьма длительный период, в течение которого стандарт прочности наметился независимо с достижением теоретическим обоснованием. Волновые изгибающие моменты оставались условными. Определялись они путем статической постановки судна на регулярную волну тропического профиля. Наконец, в последние годы наступил третий современный период научного обоснования стандарта прочности, характеризующийся глубоким теоретическим и экспериментальным исследованием.

Международная конвенция по грузовой марке, принятая в 1965 г. в Лондоне, предлагала нормирование общей прочности осуществлять в национальных Правилах, а не в акте международного свода правил, как было ранее. Моменты сопротивления эквивалентного бруса, требуемые правилами ведущих классификационных обществ после Конвенции 1965 г., можно представить в виде обобщенной формулы

$$W = W_2 [n_1 + n_2 (M_{\text{расч}}/M_{\text{волн}})^2], \quad (5.1)$$

где W_0 — минимально допустимый момент сопротивления поперечного сечения корпуса судна; $M_{\text{расч}}$ — расчетный изгибающий момент на тиковой воде; $M_{\text{волн}}$ — изгибающий момент на тиковой воде, соответствующий минимально допустимому моменту сопротивления; n_1 и n_2 — коэффициенты пропорциональности изгибающих моментов соответственно на волнении и на тиковой воде, причем $n_1 + n_2 = 1.0$.

Зависимость момента сопротивления палубы сухогрузных судов от изгибающего момента на тиковой воде и соответствия

Рис. 5.1. Зависимость момента сопротивления палубы сухогрузных судов от изгибающего момента на тиковой воде по различным классификационным обществам.

1 — Американский; 2 — Австралийский; 3 — Японский; 4 — Бюро Верита (Франция); 5 и 6 — Регистр СССР соответственно 1965—1971 и 1981—1986 гг.



с различными правилами показана на рис. 5.1. При проектировании судна в целях снижения металлоемкости корпуса целесообразно всемерно уменьшать изгибающий момент на тиковой воде до крайней мере до значения $M_{\text{расч}}$ соответствующего W_0 . Дальнейшее уменьшение $M_{\text{расч}}$, хотя и не дает снижения металлоемкости продольных связей, тем не менее желательным, поскольку уменьшаются напряжения на тиковой воде, а следовательно, и суммарные.

С 1967—1968 гг. согласно правилам классификационных обществ минимальный момент сопротивления поперечного сечения корпуса в средней части на длине $0.4L$ до изгиба нужно определять (в см^2) по формуле

$$W_0 = C_w B L^2 (c_2 + 0.7), \quad (5.2)$$

где расчетная высота волн обеспеченностью 10^{-4} на перегрузочном волнении для судов длиной менее 300 м принята (в м)

$$C_w = 10.75 - (3 - 0.01L)^{0.2}, \quad (5.3)$$

При использовании стали повышенной прочности базисный момент сопротивления (5.2) может быть уменьшен умножением на коэффициент $\eta = 0.83 + 0.68$ (см. § 29) в зависимости от предела текучести стали. Ограничением такого уменьшения служит требуемый момент инерции поперечного сечения корпуса судна (см. ниже).

Современные требования к общей прочности. Многие годы исследователи пытаются теоретически объяснить, какому или какому физическому критерию прочности должны соответствовать требования к общей прочности судов. Большой вклад в эти исследования внесли упомянутые в гл. 4 отечественные ученые. В их работах на основе оценки современными методами внешних сил, работоспособности судовых конструкций и анализа повреждений корпусов сформулированы основные физические критерии общей прочности. Не все задачи решены однозначно. Некоторые из них пока остаются дискуссионными. Ряд проблем нуждается в дальнейшем исследовании.

Определено установление, что требования правил классификационных обществ к общей прочности не соответствуют полно-

* В обобщенной формуле сопротивления указаны индексом 1 от изгибающего сечения палубы; 2 от изгибающего сечения волнения — дна.

ство какому-то одному из физических критериев прочности. Г. В. Бойцов предположил, что эти требования при изменении длины судна аппроксимируются «оглабляющей» двух основных критериев прочности (усталостной и предельной), полученных вероятностными методами для судов традиционных типов и размеров».

Задача проектирования конструкции корпуса заключается в обеспечении заданного уровня надежности и эксплуатационных качеств судна в течение планируемого срока эксплуатации. Нормирование прочности судовой конструкции, работающих под действием случайных нагрузок, должно выполняться с учетом реального изменения размеров связей во времени вследствие износа и коррозии [10, 14].

При разработке новых Правил Регистра СССР за основной критерий оценки общей пролонговой прочности принята равная вероятность превышения действующими напряжениями опасного уровня за весь срок службы судна, что является объективным условием равнопрочности конструкций, испытывающих износ и коррозию. Этому условию отвечает расчет размеров связей для конструкций корпуса по состоянию примерно в середине срока службы [10, 14].

Нормативные уровни опасных напряжений установлены на основе двух условий прочности, а именно: критерия предотвращения массового появления трещин, т. е. критерия усталостной прочности, и критерия прочности при возможной разовой перегрузке с учетом ударов волн в поперечном сечении, т. е. критерия предельной прочности.

Практический смысл критерия усталостной прочности (или усталостной долговечности) заключается в обеспечении должной сопротивляемости конструкций корпуса появлению и развитию усталостных трещин, в первую очередь, в районах неизбежно существующей концентрации напряжений. Уменьшить вероятность появления усталостных трещин и их развития в крупных разрезах конструкций можно путем ограничения напряжений в растянутых связях, применением материалов с хорошими вязкостными свойствами и снижением концентрации напряжений. Вот почему минимальный стандарт общей прочности, определяющий напряжения при общем изгибе судна, многие годы остается практически без изменений.

Уменьшение стандарта общей прочности, т. е. увеличение напряжений в продольных связях корпуса, должно быть очень осторожным и достаточно обоснованным. Повышение же качества проектирования и особенно качества изготовления конструкций не только уменьшает концентрацию напряжений и

вероятность появления трещин, но и дает возможность уменьшить размеры связей и их массу. Пока же правила классификационных обществ при разработке своих требований к прочности вынуждены исходить из посредственного качества как самих конструкций, так и технологий их изготовления.

Существующие и разрабатываемые для новых Правил Регистра СССР стандарты общей прочности исходят из необходимости иметь также достаточно большой запас по критерию предельной прочности. Уменьшать его пока считается недопустимым, поскольку в продольных связях корпуса напряжения могут увеличиться, например, от сдвига при увеличении скорости судна с малой осадкой в воду, от других динамических факторов и изменения параметров реального волнения, из-за потери устойчивости или деформации некоторых связей и иных причин. Нарушение же критерия предельной прочности чревато катастрофическими последствиями.

Моменты сопротивления палубы W_{dx} и днища W_{dx} нового судна в сечении с координатой x от носового перпендикуляра по Правилам Регистра СССР должны быть (в см^3) не менее

$$\left. \begin{aligned} W_{dx} &= W'_{dx} + \Delta W_x; \\ W_{dx} &= W'_{dx} u_x + \Delta W_x, \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

где W'_{dx} — нормируемая часть момента сопротивления палубы по состоянию на середину срока службы судна, см^3 ; ΔW_x — дополнительная часть момента сопротивления, учитывающая износ и коррозию, см^3 ; $u_x < 1.0$ при перегибе и $u_x = 1.1$ при прогибе судна из такой воды.

Момент сопротивления палубы в сечении срока службы в сечении с координатой x определяют (в см^3) по формуле

$$W_{dx} = (M_{max} + M_{min}) 10^3 / \sigma_y, \quad (5.5)$$

где M_{max} — абсолютное значение наибольшего изгибающего момента на такой воде (при прогибе судна со знаком минус, при перегибе — со знаком плюс), $\text{кН} \cdot \text{м}$; M_{min} — волновой изгибающий момент с учетом знака, $\text{кН} \cdot \text{м}$; σ_y — суммарные допускаемые напряжения в середине срока службы, МПа. Допускаемые напряжения в эксплуатационном режиме плавания приняты равными $\sigma_y = 160/\eta$ и случае прогиба и $\sigma_y = 150/\eta$ в случае перегиба корпуса судна на такой воде. Коэффициент η установлен в зависимости от предела текучести сталей (см. § 29).

Абсолютное значение изгибающего момента на такой воде, используемое в формуле (5.5) для средней части судна на длине 0,4L, предельно можно принять равным (в $\text{кН} \cdot \text{м}$)

$$M_{max} = f L B L^2 (c_0 + 0,7), \quad (5.6)$$

* Г. В. Бойцов. О критериях общей прочности судов // Судостроение. 1977. № 8. С. 8—12.

где $f_0 = 0,07$ при перегибе корпуса сузогозного судна с грузом и МКО, расположенным в середине; $f_0 = 0,08$ при перегибе сузогозного судна с грузом и МКО в корме и $f_0 = 0,10$ при перегибе такого судна с балластом; $f_0 = 0,04$ при перегибе танкера; C_m — см. формулу (5.5).

Волновой изгибающий момент, действующий в вертикальной плоскости, вычисляют (в кН·м) по формуле

$$M_{из} = k_z k_m C_m BL^2 (c_2 + 0,7) \Phi \alpha_n, \quad (5.7)$$

где коэффициенты $k_z = 1,05 - 2425/(L^2 + 8530) \leq 1$; k_m находят по Правилам Регистра СССР или Нормам прочности в зависимости от наибольшего по абсолютному значению изгибающего момента на тиков воде и размерений судна; C_m — по формуле (5.3); $\Phi \geq 1$ учитывает волновую вибрацию судна; $\alpha_n \leq 1$ обусловлено увеличением рассматриваемого сечения по длине (для 0,2L в средней части $\alpha_n = 1$).

Коэффициент k_m определяют по формуле

$$k_m = 0,0665 [0,0165 - 0,825k_{из}] F + 1,04 - 2k_{из},$$

где $k_{из} = M_{из}/10AL \leq 0,02$ ($M_{из}$ — наибольший по абсолютному значению изгибающий момент на тиков воде, кН·м; в средней части судна перегибающий момент принимается со знаком «минус», перегибающий — со знаком «плюс»); $\Delta = \rho c_0 L B d$ — водоизмещение судна, т; $F = c_0/(0,01L + 9)$. Для судов со спецификационной скоростью на тиков воде $v \leq 15 + 16$ уз коэффициент Φ в формуле (5.7) можно брать равным единице.

При плавании в экстремальном режиме момент сопротивления палубы в середине срока службы в сечении x определяют (в см⁴) по формуле

$$W'_{дл} = (-M_{из} + \gamma \chi M_{из} + M_{уд}) 10^5 / \sigma_r, \quad (5.8)$$

где $M_{из}$ — наибольший по абсолютному значению перегибающий момент (со знаком «минус») на тиков воде либо наименьший перегибающий, если в данном сечении действуют только перегибающие моменты (со знаком «плюс»), кН·м; $\gamma = 1$ для судов неограниченного района плавания; $\delta = 1 + 0,12(2 + 0,01L)$; $\chi = 0,77 + 0,23c_0$ и $\chi = 1,23 - 0,23c_0$ соответственно для судов, расположенных ниже и выше нейтральной оси; $M_{уд}$ — волновой изгибающий момент; его находят по формуле (5.7) при $\Phi = 1$; $M_{уд}$ — ударный изгибающий момент, вычисляемый по формулам Правил, кН·м; $\sigma_r = 215/\eta$, МПа.

В качестве требуемого момента сопротивления палубы в середине срока службы принимают большее из двух значений, полученных по формулам (5.6) и (5.8).

Часть момента сопротивления, учитывающая запас на износ и коррозию, в средней части на длине 0,4L (в см⁴)

$$\Delta W = k_z C_m BL^2 (c_2 + 0,7),$$

где $k_z \geq 0,05$ определяют по Правилам Регистра СССР в зависимости от типа и размеров судна, количества палуб, срока эксплуатации.

В любом случае момент сопротивления палубы в днища в средней части нового судна не должен быть меньше полученного по формуле (5.2).

Необходимая общая жесткость корпуса обеспечивается моментом инерции (в см⁴) поперечного сечения корпуса в средней части нового судна

$$I \geq 3W'_{дл}. \quad (5.9)$$

Значение $W'_{дл}$ находят по формуле (5.2) при коэффициенте $\eta = 1$.

§ 25. Требования к размерам элементов конструкции корпуса

Основные конструктивные элементы. Корпус судна представляет собой сложную систему, состоящую из большого количества взаимосвязанных конструктивных элементов, обеспечивающих его непроницаемость и надежность под действием реальных нагрузок, возникающих во время эксплуатации. Расчетные прочностные модели корпуса и отдельных его частей условны, идеализированы, учитывают только основные факторы, влияющие на прочность и надежность действующих конструкций.

Основными конструктивными элементами корпуса судна являются листы, образующие наружную обшивку, настила палуб, обшивку переборки, а также балочные, соединяемые с листами с целью их подкрепления. Под листом элементом понимают участок обшивки или настила, ограниченный двумя парами смежных, обычно ортогонально расположенных закрепляющих балок.

Обшивку переборок подкрепляют балки основного и рамного набора. Основными называют балки, определяющие систему набора переборки и обеспечивающие кроме местной пропости обшивки ее устойчивость при сжатии. Рамные — это поперечные и продольные составные балки, обеспечивающие прокруточную, а иногда и концевые опоры для остальных балок, а также местную прочность и устойчивость соответствующего переборки. К рамным балкам относятся флоры при продольной системе набора днища, рамные шпангоуты, бизмис (полу-бизмис), вертикальный киль, днищевые и беговые стрингеры, карлингс, концевые бизмис, шельфы и рамные стойки переборки. Расстояние между рамными балками равно двум—пяти

нормальным шпангоутам по длине и ширине судна, до 2,0—2,5 м по высоте корпуса.

Балки рамного набора воспринимают почти всю поперечную нагрузку, действующую на обшивку (настил) и передаваемую на них балками основного набора. Небольшая часть поперечной нагрузки воспринимается непосредственно опорным контуром перекрытия. Разные балки, расположенные в одной плоскости, образуют поперечные и продольные шпангоутные рамы, расположенные в вертикальной, а в ряде случаев и в горизонтальной плоскости. В составе перекрытий, разные балки образуют несущий каркас, взаимно обеспечивая гибкостатическую устойчивость плоской формы при изгибе перекрытия.

Условия определения размеров элементов конструкции. Размеры конструктивных элементов судовых корпусов вытекают из зависимости от расчетной нагрузки по принятому методу, обеспечения выполнения нормативных требований к прочности, устойчивости, жесткости в остаточных деформациях. Это отчасти является причиной проецирования судовых конструкций в условиях ряда неопределенностей. Наличие хотя бы одной из основных величин расчета прочности или устойчивости должно полностью соответствующее изменение остальных.

В нормах Правил Регистра СССР в отличие от всех предыдущих принципиально иной является методика нормирования прочности и определения размеров связей. Если ранее нормирование прочности относилось к сеченным размерам, то теперь — к размерам связей по состоянию на середину планового срока службы судна с учетом в явном виде износа и коррозии материала. Запасы прочности, устойчивости и допускаемые деформации, как и размеры конструктивных элементов, установлены также с учетом влияния износа и коррозии на эффективность конструкции по состоянию на середину срока службы. Размеры связей нового судна получают суммированием расчетных размеров и соответствующих добавок к толщине обшивки, моментам сопротивления и моменту инерции балок, обусловленных коррозией и износом.

Основными требованиями, определяющими расчетные размеры листовых элементов, являются местная прочность при изгибе разнородной поперечной нагрузкой, устойчивость листов при сжатии и изгибах из них при сдвиге. Толщина наружной обшивки, настила ВП вместе с продольными балками также должна обеспечивать общую продольную прочность судна. В любом случае проектные значения толщин листовых элементов, полученные суммированием расчетной толщины с прибавки на коррозионный износ, должны быть не менее минимальных, установленных нормативом.

Толщина листов на условия местной прочности. Листовые элементы под действием поперечной нагрузки, кроме небольших

участков, примыкающих к коротким сторонам опорного контура, изгибаются по цилиндрической поверхности. Напряжения в таких пластинах определяют расчетом изгиба балки-полоски (см. § 9)

$$\sigma = 60kr (a/s)^2 / m_0 \leq \sigma_r,$$

откуда к середине срока службы судна толщина пластины (в мм)

$$s = 10a \sqrt{60kr / m_0 \sigma_r} = m \sqrt{kr / k_2 \sigma_r}, \quad (5.10)$$

где $m = 77,5 / \sqrt{m_0}$ — коэффициент, значения которого приводятся в соответствующих главах ($m_0 = 12$ и $m_0 = 24$, если в качестве расчетного принят изгибающий момент соответственно в опорном сечении балки-полоски и в пролете); a — короткая сторона пластины, м; $k = f(a, a)$ — коэффициент, учитывающий отношение сторон пластины ($k = 1$ при $a/a \geq 2$, a — большая сторона пластины, м); r — интенсивность расчетной нагрузки, кПа; $m_0 = A_0 \sigma_r$ — допустимое напряжение, МПа (k_2 — коэффициент допустимых напряжений, значения которого приводятся в соответствующих главах; σ_r — нормативный предел текучести стали, МПа — см. § 29).

Толщина листов на условия устойчивости. Для проверки устойчивости продольные связи корпуса судов длиной $L \geq 60$ м разделены на две группы. Первая группа включает наибольшее ответственные, так называемые жесткие связи (шпретстел, залубный стрингер, горизонтальный киль, скуловой пояс, продольные балки основного и рамного набора), устойчивость которых обеспечивается при действии сжимающих напряжений, соответствующих критерию предельной прочности. Вторая группа продольных связей включает остальные листовые элементы (настил палубы, наружная обшивка и др.), устойчивость которых проверяется при действии эксплуатационных сжимающих напряжений.

Устойчивость элементов конструкции после износа связей считается обеспеченной, если $\lambda_{cr} \leq \lambda_{lim}$ и $\kappa \leq \kappa_{lim}$, т. е. если нормальные сжимающие σ_s и касательные напряжения на контуре пластины τ , умноженные на коэффициент запаса по устойчивости $\kappa = 1,0 \div 1,15$, не превышают критических напряжений, вычисленных для этих связей по формулам

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cr} &= \sigma_s \\ \tau_{cr} &= \tau_s \end{aligned} \right\} \text{ при } \sigma_s < 0,6\sigma_{cr} \text{ и } \tau_s < 0,6\tau_{cr}; \\ \sigma_{cr} &= \sigma_s (1,1 - 0,3\sigma_s/\sigma_s) \text{ при } 0,6\sigma_s \leq \sigma_s < 3,0\sigma_s; \\ \tau_{cr} &= \tau_s (1,1 - 0,3\tau_s/\tau_s) \text{ при } 0,6\tau_s \leq \tau_s < 3,0\tau_s; \\ \sigma_{cr} &= \sigma_s \\ \tau_{cr} &= \tau_s \end{aligned} \right\} \text{ при } \sigma_s \geq 3\sigma_s \text{ и } \tau_s \geq 3,0\tau_s. \quad (5.11)$$

Эквивалентные нормальные и касательные напряжения прямоугольных свободных поверхностей пластин определяют (σ МПа) по формулам

$$\sigma_x = 0,20n(\alpha/b)^2 \quad \text{и} \quad \tau_x = 0,20n(\alpha/b)^2, \quad (5.12)$$

где n — коэффициент, зависящий от вида нагружения пластины и отношения сторон (табл. 5.1); $\alpha = \alpha_1 = 1,75a$ — толщина пластины с учетом коррозии по состоянию на 0,85 срока службы, мм; b — сторона пластины, перпендикулярная направлению действия нормальных сжимающих напряжений; при действии на пластину касательных напряжений b принимают меньшую сторону пластины, м.

Таблица 5.1. Виды нагружения пластин при анализе их устойчивости

Вид нагружения	$\alpha = \alpha_1$	n
	$\alpha = 1,75a$	$n = 8,4(q + 1,3) \cdot \frac{2,1}{q + 1,1}$
	$\alpha = 1,75a$	$n = 10q^2 - 6,4q + 7,6$
	$\alpha = 1,75a$	$n = 6 \left[10q^2 - 14q + 1,3 \left(1 + q \right) \left(1 + \frac{1}{q} \right)^2 \right]$
	$\alpha = 1,75a$	$n = 5,34 + 4/q^2$

Примечание. Коэффициент Φ равен: для стальных элементов — 1,0; для элементов из алюминия — 1,2; для элементов из нержавеющей стали — 1,5; для элементов из титана — 1,8; для элементов из композитных материалов — 1,0.

Размеры балок набора. Поперечные и продольные балки набора должны обладать большим запасом прочности и устойчивости, чем подкрепляемая ими обшивка. Размеры балочных

элементов основного и рамного набора определяются, подобно листовым элементам, требованиями прочности на изгиб и в ряде случаев при срезе, а также требованиями устойчивости, минимально допустимых значений толщин стенки балок и конструктивными соображениями. Кроме того, размеры балок должны обеспечивать так называемую изгибно-крутильную жесткость.

Требуемый на уровне свободного пояса момент сопротивления (W в см³) и необходимый момент инерции (I в см⁴) поперечного сечения балок основного набора с присоединенным пояском вычисляют по формулам

$$W = W' \alpha_k \quad \text{и} \quad I = I' \gamma_k$$

где момент сопротивления балки основного набора из условия прочности к середине срока службы

$$W' = Ql / 10^3 m k_c \sigma_k \quad (5.13)$$

($Q = \rho a l$ — поперечная нагрузка на балку, кН; ρ — интенсивность расчетной нагрузки, кПа; a — расстояние между балками, м; l — расчетный пролет балки, м; m, k_c — коэффициенты изгибающего момента и допускаемых напряжений, приведенные в Правилах Регистра СССР); α_k, γ_k — множители, учитывающие поправку на коррозионный износ (значения γ_k принимают равными α_k); I' — момент инерции сечения рассматриваемой балки из условия устойчивости.

Множитель, учитывающий запас на коррозию для стальных балок таврового, уголкового и симметричного полосообразного профиля, принимают равным большому из двух значений, определяемых формулами

$$\alpha_k = 2,15 / \sqrt[3]{W'} + \sqrt[3]{0,5 \alpha_k} \quad \alpha_k = 0,1 \alpha_k + 0,96$$

Для балок полосообразного и несимметричного полосообразного профиля

$$\alpha_k = 0,85 / \sqrt[3]{W'} + \sqrt[3]{0,5 \alpha_k} \geq 1,05$$

где W' — момент сопротивления балки основного набора, вычисляемый по формуле (5.13); α_k — коррозионная добавка к толщине стенки балки (см. § 29).

Необходимые значения толщин стенки и свободного пояса составных и рамных балок, момент сопротивления которых определяют также по формуле (5.13), где вместо l принимают расстояние между этими балками, суммированное с коррозионной добавкой α_k .

Расчетный пролет балок основного и рамного набора определяется как расстояние между их опорными сечениями. Для длинных и галубых продольных балок, для бимсов за рас-

четный пролет следует принимать большее расстояние между соответствующими рамными балками-опорами.

Размеры катальных балок основного набора, полученные из условия прочности при их изгибе, обычно удовлетворяют требованиям прочности и на срез. Однако симметричные полосообразные и многие рамные связи, в частности, дельцовые и бортовых перекрытий танкеров, бортовой набор судов ледового плавания, рамные боксы судов с горизонтальной трубообработкой и другие, кроме изгиба, требуются отдельно проверять на прочность при срезе по формуле

$$J_c = (10N/k_1\tau_k) + 100k_2, \quad (5.14)$$

где J_c — площадь поперечного сечения стенки, см²; $N = Q/n$ — передаваемая сила в расчетном сечении балки, кН (n — коэффициент υπερпередаваемой силы); k_1 — высота балки, м; k_2 — корректирующий индекс балки в середине срока службы, мм.

Устойчивость продольных балок основного набора должна быть больше устойчивости закрепленных или листовых элементов наружной обшивки, настила палуб, второго дна. Если это требование не будет выполнено, потеря устойчивости обшивки повлечет за собой потерю устойчивости балок и, как следствие, споживание несущей способности эквивалентного бруса. Чтобы не произошло разрушения конструкций, снижаемые при условии изгиба судна продольные балки, полученные из условия прочности, проверяют на устойчивость при действии на корпус эквивалентного изгибающего момента.

Продольные балки при сжатии напряжениями σ_x , соответствующими критерию предельной прочности, считаются устойчивыми, если критические напряжения, определяемые по формулам (5.11), не менее значений $\sigma_{cr} \geq k\sigma_x$, где коэффициент запаса $k = 1,15$.

Эйлеровы напряжения балок для случая изгиба устойчивости, т. е. в плоскости изгиба, определяют (в МПа) по известной формуле

$$\sigma_x = \pi^2 E' / (l^2 A^2) = 2(3E' / A^2), \quad (5.15)$$

где E' — момент инерции поперечного сечения балки с присоединенным настилом, см⁴; A — площадь этого сечения, см²; l — пролет балки, м.

Испытания судовых конструкций до разрушения показывают, что обычно продольные балки теряют устойчивость не в плоскости своей наибольшей жесткости (устойчивость по Эйлеру), а в перпендикулярно к ней расположенной боковой плоскости, т. е. с отклонением в бок. Такой вид деформации сжатых балок обуславливает потерю так называемый изгибно-крутильной, или боковой устойчивости.

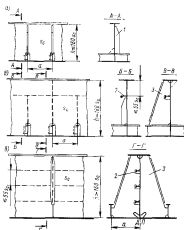


Рис. 5.2. Подкрепление стенок рамных балок (а) вертикальными ребрами (1) при высоте $60h$, $h \leq 160h$; поперечных балок (б) жесткой $h > 160h$, — вертикальными и горизонтальными (2) ребрами; вертикального настила в обшивке листа танкера (а) горизонтальными ребрами (2) и изгибно-устойчивости (б). Толщина стенки балок $\delta > 0,60$ на участке 0,11 у опор и $\delta > 0,90$ в пролете рамных балок.

Эйлеровы напряжения, соответствующие потере изгибно-крутильной устойчивости балок, значительно ниже эйлеровых напряжений по формуле (5.15). Критические напряжения, обеспечивающие изгибно-крутильную устойчивость для палубных продольных балок сухогрузных и наливных судов, составляют 0,7–0,8. Изгиб поперечной нагрузкой сжатых балок понижает изгибно-крутильную устойчивость, а приварка балок к присоединенному настилу повышает ее. В случае применения

сталк повышенной прочности проблема изгиба-крутальной устойчивости становится более актуальной.

Для обеспечения устойчивости палубных перекрытий Правила Регистра СССР регламентируют необходимую жесткость балок.

Устойчивость стенки рамных балок после износа на $1,7\sigma_k$ при действии напряжений от общего и местного изгиба обеспечивается при условии

$$(\sigma_1/\sigma_{1cr}) + (\sigma_2/\sigma_{2cr})^2 + (\tau/\tau_{cr})^2 \leq 0,85,$$

где σ_1 — сжимающие напряжения от общего изгиба в экстремальном режиме волнения; σ_{1cr} , σ_{2cr} , τ_{cr} — критические напряжения, определяемые по формулам (5.11) и (5.12); σ_2 , τ — нормальные и касательные напряжения в рамной балке под действием поперечной нагрузки, например, в вертикальном киле при изгибе дилла.

Стенки рамных балок, высотой $A \geq 60\delta$, подкрепляют пертикальными (неребрами), а высотой $A \geq 160\delta$, параллельными свободной кромке ребрами жесткости и в сочетании с килем устойчивости (рис. 5.2). Расстояние между поперечными ребрами, нормальными к свободной кромке рамной балки, допускается не более 90%, а между ребрами, параллельными свободной кромке, — не более 55%, где δ_x — проектная толщина стенки рамной балки.

Вопросы для зачетки

1. Назовите основные функции Регистра СССР.
2. Каковы особенности структуры и построения Правил классификации и постройки морских судов Регистра СССР?
3. Раскройте в обобщенных требованиях к обшивке прочность судов, изложенных в Правилах Регистра СССР.
4. Назовите конструктивные элементы корпуса и условия определения их размеров.
5. Раскройте требования к толщине листовых элементов (пластин) корпуса.
6. Какие требования предъявляются к размерам поперечного сечения балки набора корпуса?
7. Как учитываются коррозии при определении толщин пластин в размер поперечного сечения балок набора?
8. Раскройте о конструкции подкрепления стенки рамных балок.

ГЛАВА 6. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И МАТЕРИАЛЫ

§ 26. Общие положения и принципы технологичности

Понятие технологичности. Проектируя судовые конструкции, удовлетворяющие требованиям прочности, надежности, долговечности, функциональному назначению, необходимо также



Рис. 6.1. Виды технологичности конструкций корпуса и области ее применения.

предусматривать инженерные решения, способствующие всемерной экономии материалов, трудовых, энергетических затрат на постройку и ремонт судов. Разумная экономия перечисленных затрат может быть достигнута за счет технологичности конструкций в условиях прогрессивной техники.

Под технологичностью применительно к судокорпусостроению согласно ГОСТ 18831—73 понимается совокупность свойств конструкций, удовлетворяющих заданным условиям эксплуатации при оптимальных затратах материала и трудоемкости, минимальных стоимости и сроках изготовления, возможности использования прогрессивной технологии при постройке. Технологичная конструкция характеризуется высокой ремонтопригодностью и доступностью при обслуживании.

В соответствии с ГОСТ 14202—73 различают два вида технологичности конструкций в зависимости от области и сущности проявления: производственную и эксплуатационную (рис. 6.1). В представлении схеме учтены особенности проектирования и постройки корпусов судов. Оценочно, «уровень технологичности» — понятие относительное, так как на технологичность и ее проявления влияют: вид производства (массовое, серийное, мелкосерийное или единичное), конкретные особенности и возможности заводо-строителей, действующая технология и цикл постройки, тип судна и другие факторы. Уровень технологичности не остается статичным и во времени.

Уровень технологичности судовых конструкций повышается при использовании:

технологичных материалов, не имеющих своих свойств в процессе обработки, сварки и эксплуатации;
простых по возможности геометрических форм и увеличенных шапий базиса;
преимущества и доступности конструкций;
увеличенных габаритных размеров, особенно ширины листовой стали, и возможно меньшего числа типоразмеров материала.

Технологичность как совокупность свойств конструкции задается в основном при проектировании, обеспечивается при технической подготовке производства, а реализуется в процессе производства и эксплуатации судов.

Принципы технологичности. Экономичность судна примерно до 85% от приведенных затрат определяется строительной стоимостью, поэтому технологичность должна обеспечивать всемерно ее уменьшение за счет возможности большей экономии материалов, снижения трудоемкости постройки и ремонта с учетом совершенствования технологии, повышения ремонтопригодности. Первый принцип технологичности, ее главный критерий — обеспечение максимальной экономической целесообразности при постройке и эксплуатации судна. Естественно, что должна быть гарантирована надежная функциональность конструкций корпуса и судна в целом в заданных условиях эксплуатации.

Главные факторы, определяющие технологичность конструкций, показаны на рис. 6.2. Основным из них является технология постройки и в первую очередь пригодность конструкции корпуса к автоматизированному и механизированному изготовлению. Для применения комплексной механизации и автоматизации, внедрения ГАП (гайков автоматизированных производств) и робототехники в основных и вспомогательных технологических процессах и операциях в корпусных цехах необходимо обеспечить комплектование корпуса судна из оптимального количества секций, блоков, функциональных модулей, достаточное насыщение необходимым оборудованием, механизмами, арматурой и трубопроводами, с завершенной отделкой помещений. Переход в судостроении на такое комплектование судна, т. е. полное использование модульного принципа в проектировании и постройке судовых конструкций, окажется возможным и экономичным при обеспечении соответствующей технологичности конструкций корпуса. Расчеты показывают, что только комплексная механизация секционной сборки и сварки технологичных конструкций в корпусных цехах позволяет повысить производительность труда и увеличить выпуск продукции с существующих площадей не менее чем в 2,0—2,5 раза.

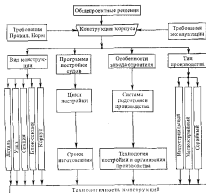


Рис. 6.2. Главные факторы, определяющие технологичность конструкций.

Вторым принципом технологичности конструкций корпуса является комплексно-системный подход при ее обосновании. Поскольку технологичность представляет одно из свойств конструкции, а сама конструкция корпуса — сложную систему, применение системного подхода оправдано.

Системный подход предполагает объективное решение вопросов технологичности конструкций корпуса главным образом на стадии разработки эскизного и технического проектов, поскольку на последующем этапе рабочего проектирования, а тем более в процессе постройки изменение наиболее важных конструктивных решений (форма корпуса, марка материала основных шпаций, система набора, шпация и др.) в целях повышения технологичности конструкций практически невозможно. Обеспечение технологичности конструкций на различных стадиях проектирования судна рассмотрено в работе [6].

Комплексный подход при обосновании технологичности конструкций корпуса предполагает выполнение подчас кропотли-

чных требований, связанных с конструктивными, технологическими решениями проекта, обоснованием и ремонтом конструкций эксплуатируемого судна.

Третий принцип технологичности конструкций — оценка ее по показателям. Предприятие в первую очередь заинтересовано в получении на стадии эскизного и технического проектов общих показателей технологичности, которые бы характеризовали возможность сокращения трудоемкости изготовления конструкций и могли служить для сравнения с аналогичными базовыми.

Определение показателей технологичности судовых конструкций — сложная проблема, поэтому никакие официальные показатели или нормы технологичности в судостроении пока нет. Показатели технологичности, приемлемые для судовых конструкций, могут быть классифицированы:

- по стадиям проектирования — характерные для эскизного, технического и рабочего проектов;
- по значимости — основные и дополнительные;
- по области применения — производственные и эксплуатационные;
- по способу выражения — абсолютные и относительные;
- по области применения — для корпуса судна в целом и для отдельных его конструкций;

по системе оценки — базовые и разрабатываемые конструкции. Число показателей технологичности должно быть ограниченным, но достаточным для полной ее характеристики. Показатели технологичности следует выбирать из экономической целесообразности, т. е. с учетом изменения стоимости производства, эксплуатации и ремонта конструкций. Они должны быть достаточно универсальными, чтобы их можно было использовать при проектировании и постройке судов различных типов, названий и размеров.

§ 27. Технологичность деталей, узлов и секций корпуса

Детали корпуса. Деталь — это часть конструкции корпуса, изготавлиемая без применения сборочных операций. В составе корпуса судна есть много различных по размеру и геометрической форме деталей. Листовые детали могут выражаться на механическом оборудовании, на газорезательных автоматах или плазмотронах. Небольшое количество таких деталей (до 10—12 штук, бракет) толщиной 3—8 мм с прямоугольными кромками можно вырезать на механическом оборудовании. Эти детали не должны иметь круглых вырезов или полукруглых срезов, чтобы после резки на тыльной не арабегать к газовой резке углов и не вызывать дополнительных расходов на транспортировку деталей с участка на участок.

С целью повышения уровня технологичности деталей корпуса из листового и профильного проката необходимо по возможности упрощать их конфигурацию, сокращать число типовых листов и профилей, применяемых для раскроя. Увеличение габаритных размеров листов способствует лучшему использованию материалов. К сокращению числа типовых листов аккамулируемой стали относятся и существующие правила перевозки ее железнодорожным транспортом. Каждая партия заказанной стали должна быть являться логотипной нормой (для углеродистой листовой — 62 т, для стали марки 09Г2 и 10ХСНД — 30 т). Отраслевым стандартом установлено наибольшее допустимое число типовых листов и профильной стали, используемой в конструкциях одного судна в зависимости от его водоизмещения.

При выборе типовых листов проката для наружной обшивки и вставки в палубу в первую очередь следует стремиться к увеличению ширины листов, так как это более эффективно, чем на уменьшение кратчайших размеров листов, а следовательно, и трудоемкости, чем увеличение длины продольно расположенных листов [6].

Технологичность узлов корпуса и секций. Узел — это технологически законченная часть конструкции, состоящая из нескольких соединенных деталей. Номенклатура узлов широка, а их оформление во многом определяет не только работоспособность, но и технологичность. Технологичность узлов обеспечивается использованием возможно большего числа одинаковых (унифицированных) деталей; типизацией узлов, заменой криволинейных вырезов и соединений рамных балок криволинейными с прямой, «сметной» по концам килей; применением в допустимых узлах, в том числе со свободными вырезами при пересечении балок, закрытых соединений и др.

Конструкция, форма узлов и места соединения входящих в них деталей должны способствовать снижению трудоемкости их изготовления, быть удобными для сборки и сварки с применением приспособлений, уменьшающих объем работ. Детали и узлы корпусных конструкций надо проектировать с учетом возможности их изготовления механизированными и автоматизированными методами. Базовые кройки одноименных деталей и все вырезы в них (лазы, шпигаты и др.) следует делать совмещенными, чтобы можно было одновременно вырезать наибольшее количество таких деталей и отверстий в них. Особое внимание при проектировании необходимо уделять специальным корпусным конструкциям — судным фундаментам. Обеспечение технологичности фундаментов, несмотря на трудности, возникающие из-за разнообразия их форм и конструкций, может принести значительную экономию трудовых и материальных затрат.

Из выполненных узлов (листовых полонитов, балок, бракет и пр.) собирают секции корпуса судна. Размеры секций и нормы

по обеспечению их технологичности зависят как от размеров и конструкции корпуса, так и от возможностей и условий завода-производителя. Например, при пропанной системе набора перекрытий, чтобы добиться минимального количества контактных стыков по набору и, следовательно, уменьшить объем стальной сборки и сварки, предпочтительны секции с минимально возможным размером по длине судна. При пиллерной системе, наоборот, для получения тех же преимуществ наибольший размер секции необходим по ширине судна. Размеры и конструкция секций должны обеспечивать формирование блоков при блочном методе стальной сборки, а масса их должна соответствовать грузоподъемности кранового оборудования.

Межсекционные стыки и пазы следует располагать в местах, удобных для установки сборочных приспособлений и применения автоматической сварки. Монтажные соединения предусматриваются прямолинейными. Их размещают от ближайшей переборки или листовой балки на расстоянии не менее 200—300 мм. С целью уменьшения объема стальных работ и обеспечения надежности конструкции секций (блоков) в районе монтажных соединений должна быть наиболее технологичной. Необходимо тщательно продумать отношение (включенные) соединительных деталей к секциям, так как место и время их из установки складываются на удобстве стальной сборки и сварки [6].

§ 28. Требования к судокорпусным сталям

Общие положения. Углеродистые и низколегированные стали — основной конструкционный материал для морских судов. От качества материала, его работоспособности в составе корпуса во многом зависят прочность и надежность конструкций, безопасность и технико-экономические показатели эксплуатации судна.

Конструктивные требования к судокорпусным сталям обусловлены условиями и особенностями работы конструкций корпуса под действием различных нагрузок во время эксплуатации, продлением сроков маневрирования и повышением эффективности использования транспортного флота, ростом размеров судов, всемерным снижением металлоемкости конструкций, трудовых и энергетических затрат. В СССР широкое применение в судокорпусостроении нашли стали повышенной прочности (СПП) с соответствующим уменьшением размеров конструктивных связей корпуса судна.

Судокорпусные стали характеризуются комплексом механических свойств (статическая и динамическая прочность, ударная вязкость и твердость, упругость и пластичность и др.), технологических качеств (свариваемость, термообрабатываемость

и др.), эксплуатационно-экономических характеристик (стойкость к износу и коррозии, стоимость и др.). Требованиями данного качества корпусных сталей обусловлено главным образом стремлением избежать хрупких разрушений конструкции не только в условиях нормальной эксплуатации, но и в случаях возможных перегрузок. Для этого материал корпуса не должен быть чувствительным к неизбежным конструктивным и технологическим концентраторам напряжений. На судах с ледовыми усилениями критическая температура хрупкости материала сварных связей корпуса должна быть ниже наиболее низкой температур воздуха в районе эксплуатации, а количество конструктивных, технологических и сварочных дефектов (мест концентрации напряжений), как и на других судах, — минимальным.

Качество судостроительной стали определяется химическим составом, композицией элементов, способом производства и внутренней структурой, зависящей и значительной степени от условий обработки и толщин. Поэтому Правила Регистра СССР представляют строго определенные требования к химическому составу, механическим свойствам конструкционных сталей, методу раскисления, термической обработке при их изготовлении. Регламентированы виды, методы и условия испытания образцов.

Требования к сталям нормальной и повышенной прочности унифицированы в рамках Международной ассоциации классификационных обществ и включены в Правила Регистра СССР. Для изготовления судовых конструкций стали состоят из одного или нескольких групп по динамическому составу и механическим свойствам (группы В). Жестко регламентированы содержания химических элементов и допустимые отклонения, так как от этого существенно зависит свойства стали.

Требуемые характеристики механических свойств являются минимальными и при изготовлении стали должны быть полностью гарантированы. Однако эти характеристики, например, предел текучести, предел прочности, относительное удлинение, являются только условными измерителями, а не физическими константами. Из-за нестабильности технологических условий выплавки и проката стали они оказываются случайными величинами с большой изменчивостью, имеющими нормальный закон распределения, параметры которого зависят от марки стали и толщин испытываемых образцов. Испытания на стандартных образцах позволяют сузить о значении и возможности сопоставления получаемых характеристик механических свойств стали.

В процессе технологической обработки материала и длительной эксплуатации конструкций из-за износа, старения и других факторов свойства сталей ухудшаются, вероятность появления хрупких трещин увеличивается.

Категории сталей. Высокое качество стали обеспечивается необходимой вязкостью в сочетании с хорошей эластичностью и свариваемостью. Качество материала, его вязкостные свойства оказывают наибольшее влияние на распространение трещин. Если число циклов нагружения до появления трещины зависит от конструкции узла и его напряженности, то распространение трещины и возможное перерастание ее в хрупкое разрушение определяется качеством материала и в первую очередь вязкостью. По способности ограничивать распространение появившихся трещин, препятствовать превращению их в хрупкие разрушения обычные конструкционные стали разделяют на категории А, В, D, E, а стали повышенной прочности — на категории А32, D32, E32, А36, D36, E36, D40 и E40. Категории сталей распределены по группам в зависимости от гарантированного значения предела текучести стали (в кгс/мм²) и нормативной ударной вязкости, а в каждой группе — в зависимости от температуры, при которой нормируется ударная вязкость.

Для уменьшения вероятности хрупкого разрушения стали категории D при толщинах более 25 мм и более 35 мм в зависимости от фракции зерна, а также стали категории E и стали повышенной прочности всех категорий после прокатки подвергаются термической обработке — нормализации. В результате нормализации образуется мелкозернистая однородная структура, снимаются и снижаются внутренние напряжения, вызванные прокаткой. Термическая обработка сталей обеспечивает необходимую способность деформироваться пластически при неблагоприятных условиях работы в составе корпуса судна.

Известно, что хрупкому разрушению материала способствует ряд неблагоприятных факторов (недостаточное качество материала, большие начальные растягивающие напряжения, низкая температура окружающей среды, взаимность действующей нагрузки, концентрация напряжений в конструкции и т. п.). Склонность стали к хрупкому разрушению возрастает и с увеличением толщины листов обшивки и других элементов конструкции. Однако главным среди неблагоприятных факторов является качество материала. Препятствие в судовых конструкциях неуплощенной стали для сталей категорий А и В с низким значением ударной вязкости по многим случаям способствовало хрупким разрушениям.

§ 29. Выбор материала для судовых конструкций

Ограничения Правил Регистра СССР по выбору материала. Для использования в судостроении листовая и профильная сталь поставляется в соответствии с ГОСТ 5521—86 «Сталь свариваемая для судостроения», ГОСТ 380—71 «Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки и общие требования». Все

элементы конструкций корпуса в зависимости от уровня напряженности, степени ответственности связей, предполагаемых последствий их возможного разрушения для безопасности судна разделяются на три группы. Для каждой из трех групп связей устанавливаются наибольшие допустимые строительные толщины конструктивных элементов в зависимости от расчетной температуры воздуха в районе эксплуатации судна.

Определена строительная толщина рассматриваемой связи как сумму расчетной толщины и добавки на коррозию и ее принадлежность к конкретной группе, по Правилам Регистра СССР легко найти необходимые категории материала, а уже по ним и применяемые марки стали. Использование допустимых максимальных толщин возможно при условии высококачественного изготовления конструкций.

Однако выбор марок стали в конкретном проекте затрудняется из-за противоречивости требований, предъявляемых к материалам. С одной стороны, необходимо обеспечить прочность, надежность конструкций, а с другой — всемерно снизить металлоемкость корпуса, затраты на постройку, эксплуатацию и ремонт судна. Компромисс при выборе материала за счет снижения прочности, надежности конструкций, естественно, исключается. Требуемые критерии прочности, минимальные допустимые размеры связей безусловно должны быть выполнены. Поэтому экономия материалов при постройке судна, кроме совместного анализа общепроектных решений и повышения качества самих сталей, может быть получена только в результате технико-экономического анализа вариантов конструкции и применяемых марок материала. Иные Правила Регистра СССР предусматривают уменьшение требуемых размеров конструктивных элементов корпуса, а следовательно, и расхода стали при проектировании судна на сокращенный срок эксплуатации.

Снижение металлоемкости конструкций. Этот показатель очень важен не только для экономии металла как такового, но и для повышения полезной грузоподъемности судна при прочих равных условиях. Возможности уменьшения массы конструкций корпуса еще не использованы даже при существующем качестве судостроительных материалов. Металлоемкость судовых конструкций снижается за счет уменьшения расчетного изгибающего момента при положении судна на тихой воде, возмещения до приемлемых значений допустимых напряжений в конструктивных связях, улучшения качества изготовления конструкций и их антикоррозионной защиты.

Повышение качества изготовления деталей, узлов конструкции и надежная защита их от коррозии позволяют уменьшить толщину конструктивных связей, а следовательно, и массу стали на 5—10 %, если она не ограничена минимально допустимыми

размерами и если при этом обеспечивается требуемая жесткость корпуса.

Отходы материала могут быть уменьшены при условии разработки и внедрения в практику проектирования судовых конструкций комплексной системы стандартизации, включая и согласованную с ней отраслевую стандартизацию судостроительных материалов [6]. Оптимизация раскроя листов на детали с помощью ЭВМ и предварительная стыковка стандартных профилей перед их разрезанием на более удобной длины позволяют уменьшать отходы металла до 10%.

Наиболее существенное снижение металлоемкости конструкций достигается при использовании СПП. Исследованиями являясь, связанным с применением СПП в отечественном судостроении, посвящены проф. А. И. Маческинд [9] и других ученых. Уменьшение размеров связей из СПП ограничивается минимальными допустимыми толщинами, требованиями к их устойчивости, а также к жесткости искривлений и корпуса судна.

Эффективность использования СПП несколько уменьшается из-за большей относительной коррозии, ухудшения прочностных и пластических свойств со временем и других факторов. Однако, несмотря на отмеченные недостатки и большую стоимость, СПП в отечественном судостроении нашли широкое применение при постройке судов не только новых типов и назначений, но и традиционных. С увеличением длины судна и понижением предела текучести СПП относительная экономия металла возрастает.

Минимизация массы корпуса транспортные суда из СПП имеет в свои пределы (не только технические, но и экономические). При проектировании и постройке конструкций корпуса кроме уменьшения массы металла необходимо обеспечить всемерное снижение трудоемкости и стоимости их изготовления, последующего ремонта, высокую эффективность в процессе эксплуатации. Стоимость же СПП за тонну по сравнению с обычной углеродистой выше примерно на 20% для стали марки 09Г2 и на 75% для стали марки ЮХСНД. Правда, для сталей повышенной категории (D и E) разность в стоимости углеродистой стали и СПП уменьшается примерно до 5 и 50—65% соответственно.

Противоречивые требования к стали по массе и стоимости могут быть в определенной степени удовлетворены разработкой компромиссных, технологических конструкций, показателями которых в итоге являются экономические (стоимостные) категории [6]. Применение СПП экономически оправдано, если достигнутое уменьшение массы корпуса можно использовать для увеличения грузоподъемности или скорости судна, т. е. повышения производительности, для улучшения других эксплуатационно-экономических показателей [4].

Учет коррозии. Сталь, используемая для судовых конструкций, подвергается износу и коррозии. Ряд факторов способствует коррозионным процессам в среде их главной — действии внешней коррозионной среды (солесность морской воды, ледовые условия и др.). Коррозионный износ может быть общим и местным [14]. Под общим износом понимается уменьшение толщины элементов судового корпуса по всей их поверхности, характерное для данной связи или группы однородных связей. Местная коррозия может быть в виде пятен, точечной, сквозной, поверхностной, межкристаллитной. При определении размеров связей учитывают общий износ. Состояние конструкций корпуса после износа характеризуется остаточными толщинами.

Среднегодовой износ элемента корпуса (в мм/год) вычисляют по формуле $\alpha = (\lambda_0 - s)/T$, где λ_0 — начальная строительная толщина связи, мм; s — средняя остаточная толщина, мм; T — продолжительность эксплуатации данной связи между замерами толщины, год. Среднегодовой износ зависит от марки стали. Сталь марки 09Г2 имеет несколько большую, а сталь марки ЮХСНД — несколько меньший износ, чем обычная углеродистая. Коррозия стальных конструкций, несмотря на принимаемые меры по их защите, наносит большой ущерб морскому флоту, всему народному хозяйству.

Учет влияния износа и коррозии на размеры связей корпуса основан на нормировании прочности к середине срока службы конструкции для принятой продолжительности эксплуатации. Износ обшивки (в мм) определяют по формуле $\lambda_0 = \alpha T/2$, где α — принимают по Правилам Регистра СССР при отсутствии данных об износе и о сроке эксплуатации аналогичных конструкций; $T = 24$ года, если не установлен другой полный срок эксплуатации судна. Начальная проектная толщина (в мм) равна сумме $\lambda_0 = s + \lambda_0$, где s — расчетная толщина связи, соответствующая середине срока службы судна.

Момент сопротивления и момент инерции поперечного сечения катаных балок основного набора с учетом износа определяют по формулам: $W_0 = W_{\text{ном}}$; $I_0 = I_{\text{ном}}$, где λ_0 и $\lambda_{\text{н}}$ — множители, учитывающие поправку на коррозионный износ за половину срока службы судна.

Расчетные характеристики материала. Размеры конструктивных связей корпуса судна вычисляют в зависимости от предела текучести стали. В качестве расчетных характеристик принимают: нормативный предел текучести (в МПа) по нормальным $\sigma_n = \sigma_{\text{н}}/\eta = 235/\eta$ и касательным напряжениям $\tau_n = 0,57\sigma_n$. Коэффициенты учета механических свойств стали в зависимости от минимального предела текучести приведены ниже:

$\sigma_{\text{н}}$	335	315	305	390
η	1,0	0,77	0,70	0,65

Нормативными прочностями конструкций корпуса и их отдельных элементов являются допускаемые напряжения для расчетных нормальных $\sigma_1 = A_0 \sigma_s$ и расчетных касательных $\tau_1 = A_0 \tau_s$ напряжений (A_0 и A_1 — коэффициенты допускаемых напряжений, указанные в Правилах Регистра СССР).

Вопросы для авторов

1. В чем заключается принцип технологичности и какие виды технологичности конструкций предусмотрены ГОСТом?
2. Какими конструктивными решениями обеспечивается технологичность судовых конструкций?
3. Назовите три фактора технологичности и поясните их содержание.
4. Какими мерами обеспечивается технологичность деталей, узлов и секций судовых корпусов?
5. Назовите основные конструктивные требования к судовооружным стальным чам или шпандарам?
6. С какой целью судовооружные стальные разъемы не являются чамом или шпандаром?
7. Назовите известные пути снижения металлоемкости конструкций. Чем это основание оправдано?
8. Как учитываются коррозия и класс материала при определении проектных размеров связей?

ГЛАВА 2. НАРУЖНАЯ ОБШИВКА

§ 30. Требования к наружной обшивке

Определение и назначение наружной обшивки. Наружная обшивка — внешняя стальная непроницаемая оболочка корпуса, обеспечивающая вместе с переборками и подкрепляющими обшивку балками заданную теоретическим черчением форму обводов поверхности судна. По периметру внешнего сечения корпуса наружная обшивка состоит из днищевой, включая обшивку скула, и бортовой, расположенной выше скула до ВП.

Одно из основных назначений наружной обшивки — обеспечение непроницаемости корпуса при действии внешних нагрузок в период эксплуатации судна. В составе днищевых и бортовых переборок наружная обшивка принимает участие в местном изгибе в качестве присоединенных поясков соответствующих балок. В то же время как часть продольных связей корпуса она участвует в общем изгибе судна: днищевая — в составе нижнего пояса, а бортовая — в качестве стенок эквивалентного бруса. Верхний пояс эквивалентного бруса состоит из непрерывных по длине судна участков настила ВП и ее продольных балок. Наружная обшивка, обеспечивая с другими продольными связями требуемые моменты инерции и моменты сопротивления расчетного поперечного сечения корпуса, вносит значительный вклад в общую прочность.



Рис. 7.1. Нагрузки, действующие на элементы днищевой обшивки (1); атмосферное давление воды p со стороны моря; атмосферное p_0 от общего изгиба судна и изгиба днищевых продольных балок [касательные связи (2)]; динамическое сопротивление (3); давление груза (4); давление оборудования (5); в составе днищевой переборки.



Рис. 7.2. Нагрузка, действующая на наружную обшивку со стороны моря: гидростатическая p_0 (1); волновая p_1 (2).

Нагрузка на наружную обшивку. Пластины наружной обшивки, расположенные между смежными поперечными и продольными балками, подвергаются одновременному действию поперечной внешней нагрузки и усилий в их плоскости. В плоскости днищевой обшивки на увеличение поперечно действуют продольные растягивающие и сжимающие напряжения, обусловленные общим изгибом судна соответственно на подъем и на перегиб волны, а также усилия от местного изгиба днищевых балок (рис. 7.1).

В плоскости бортовой обшивки при общем изгибе судна действуют нормальные напряжения, вызываемые изгибными моментами, и касательные напряжения, обусловленные перегибающими силами. Таким образом, пластины наружной обшивки находятся в условиях плоского напряженного состояния и подвергаются сложному изгибу.

Интенсивность и характер действия гидростатических, волновых, гидродинамических сил зависят от условий плаванья (состояние моря, ледовая обстановка), от размеров, скорости, кривизны угла судна, от района наружной обшивки по длине и высоте корпуса и от других факторов.

При погружении судна на тихой воде без движения погруженной в воду часть наружной обшивки подвергается гидростатическому давлению, действующему по нормали к ее поверхности увеличивающемуся с глубиной по линейному закону (рис. 7.2). Расчетное статическое давление на тихой воде определяют по формуле (4.2).

У судна на волнении появляются качка и кренящиеся по длине волновые давления воды, которые на уровне расчетной

внутренняя согласно Правилам Регистра СССР выходит (в кПа) по формуле

$$p_{w0} = 0,59 g_{w0} a_{w0} \quad (7.1)$$

где a_{w0} — расчетная высота волны [см. формулу (5.3)], м; a_w и a_{w0} — коэффициенты, учитывающие влияние скорости, длины судна и положение рассматриваемого сечения. Произведение коэффициентов $a_w a_{w0}$ принимают не менее 1,15, что обычно характерно для средней части транспортных судов с ограниченным скоростью движения.

Возможное давление (в кПа) ниже уровня расчетной внутренней с учетом общей гидродинамической поправки

$$p_w = p_{w0} [1 - 4,75 (d/L + B/(4L)) z_1/d] \quad (7.2)$$

а выше уровня расчетной внутренней

$$p_w = k_w (p_{w0} - 0,75 g_{w0} z_1) \quad (7.3)$$

где z_1 — см. формулу (4.2); $k_w = 1,0$ для надводного борта. В любом случае для точек надводного борта возможное давление (в кПа), принимаемое в расчете нагрузки, должно быть не менее

$$p_{wmin} = 0,03L + 3,5 \quad (7.4)$$

Характер изменения волновой составляющей нагрузки по контуру поперечного сечения судна показан на рис. 7.2.

Внешнее давление (в кПа) на наружную обшивку ниже расчетной внутренней сухогрузных и наливных судов с двойным дном при положении на вершине волны равно сумме значений статического давления по формуле (4.2) и волнового давления по формуле (7.2):

$$p = p_{ст} + p_w \quad (7.5)$$

На судах с двойным дном и двойными бортами противодействие со стороны толпильных, масляных или балластных цистерм внешней нагрузке не учитывают, так как расчетным будет внешнее давление при пустых цистерках.

На наливных судах с одинарным дном и одинарными бортами необходимо учитывать противодействие жидких грузов p_r . При положении танкера, например, на подвое волны расчетное давление на наружную обшивку (в кПа)

$$p = p_r - [p_{ст} + p_w] \quad (7.6)$$

Противодействие жидких грузов в рассматриваемой точке приложенной нагрузки определяют с учетом размеров и степени заполнения грузового танка, а также расчетных параметров качки. За расчетное противодействие жидких грузов принимают большее значение давления из полученных по формулам (7.5) и (7.6).

Толщина наружной обшивки. Требования к толщине наружной обшивки рассматривают отдельно. Толщину прямоугольных пластин, гнувшихся под действием поперечной нагрузки по цилиндрической поверхности, определяют расчетом балки-полоски «единичной ширины» (1 см) и пролетом, равным расстоянию между длинными сторонами пластины [см. формулу (5.10)].

Расчетную толщину наружной обшивки (в мм) исходя из требования местной прочности получают по формуле (5.10), принимая $m = 12$, а строительную — с учетом добавки на износ и коррозию s_k (см. § 29) по формуле

$$s_0 = 22,4 \sqrt{k p / k_{\sigma} \sigma_{\sigma}} + s_k \quad (7.7)$$

где k — коэффициент, зависящий от отношения сторон опорного контура пластины [$k = 1,0$ при $a_1/a > 2$ и $k = 0,16(a_1/a + 4,2)$ при $1,5 < a_1/a \leq 2,0$]; p — расчетная нагрузка, кПа; $k_{\sigma} = 0,75 \div 1,20$ для длинной и $k_{\sigma} = 0,80 \div 1,20$ для бортовой обшивки в зависимости от системы набора и района по длине судна.

Кроме местной прочности к пластинкам наружной обшивки судов длиной более 80 м предъявляют требование устойчивости при действии в их плоскости нормальных или касательных напряжений. Устойчивость пластин считается обеспеченной, как отмечалось в § 23, если во времени 0,85 срока службы напряжения от общего изгиба судна с учетом коэффициента запаса не превысят критических.

Для длинной обшивки судов длиной более 80 м из двух рассмотренных требований определяющим обычно является требование местной прочности при продольной системе набора и требование устойчивости при поперечной системе набора. Толщина бортовой обшивки, как правило, обусловлена требованием местной прочности. В некоторых случаях на судах с большими прогибами на тной воде моментом для верхней части обшивки борта определяющим может оказаться требование устойчивости.

Проектные толщины наружной обшивки, равные сумме расчетной толщины и надбавки к толщине на износ и коррозию, как уже отмечалось, в любом случае должны быть не менее минимальных (в мм)

$$\left. \begin{aligned} s_{min} &= 0,04L + 6,0 \quad \text{при } L \geq 80 \text{ м;} \\ s_{min} &= 0,05L + 5,2 \quad \text{при } 30 \leq L < 80 \text{ м.} \end{aligned} \right\} \quad (7.8)$$

Необходимую из условия общей продольной прочности толщину длинной обшивки можно установить лишь в результате расчета эквивалентного бруса, т. е. после вычисления фактических моментов сопротивления лабубы и донца. Этот расчет выполняют при известных размерах всех продольных связей,

входящих и рассматриваемое поперечное сечение корпуса судна. Поэтому в первом приближении толщину наружной обшивки принимают равной большей из полученных по условиям местной прочности, устойчивости или минимально допустимую.

Окончательно проектные значения толщины наружной обшивки, как и толщины настила ВП (см. гл. 10), устанавливают после сопоставления фактических и требуемых Правилами Регистра СССР [см. формулы (5.4) и (5.5)] значений моментов сопротивления палубы и днища. Если фактический момент сопротивления палубы или днища окажется меньше требуемого более чем на 3—5%, необходимо соответственно увеличить толщину настила ВП или днищевой обшивки. И наоборот, если фактические значения моментов сопротивления превышают требуемые более чем на 10%, следует в целях экономии материала уменьшать соответственно толщину настила ВП, днищевой обшивки, сохранить на устойчивость и местную прочность путем уменьшения шпангоут и выкладки требования к минимальным толщинам. Проектная толщина обшивки принимается также с учетом отраслевого стандарта на толщину судостроительной стали и необходимости ее унификации в рамках проекта.

§ 31. Конструкция наружной обшивки

Пояс наружной обшивки. Наружная обшивка формируется из стальных листов, соединяемых между собой швами электросварки. Листы обшивки ориентируют вдоль судна. Продольное расположение листов технологичнее, поскольку позволяет рационально и экономно изменить толщину обшивки по высоте корпуса с учетом местных условий ее работы (больших изгибов при общем изгибе в районе ВП и днища, повышенного износа и коррозии в районе переменных ВЛ, действия ледовых нагрузок и др.). Поперечное расположение листов обшивки применяют в оконечностях судна на длине не более 0,15 L от соответствующего перпендикуляра.

Соединяемые смежные продольно ориентированных листов по продольным швам называют *лозом*, а по поперечным — *стыком*. Листы, соединяемые по длине судна и имеющие, как правило, одинаковую ширину в районе стыков, образуют пояска наружной обшивки. Среди поясков имеются характерные, отличающиеся по толщине или форме поверхности и длине относительно по всей или почти по всей длине судна, а именно: горизонтальный киль, скуловой пояс, шпрингек (рис. 7.3). Суда, плавающие во льдах, имеют дополнительно утолщенный ледовый пояс, состоящий из нескольких бортовых и частично (в оконечностях) днищевых поясков.

Горизонтальный киль (ГК)—средний утолщенный пояс днищевой обшивки, расположенный симметрично ДП из

Рис. 7.3. Пояс наружной обшивки: горизонтальный киль (ГК); днищевые (А, Б, В); скуловой (С); бортовые (Д, Е, Ж, З); шпрингек (И).



всех судов, не имеющих брускового киля. Ширина ГК, равная $\Delta_k = 5L + 800 \leq 3000$ мм, обеспечивает необходимую опорную поверхность и допускаемое удельное давление на кильблоки при постановке судна в док. В средней части по длине судна ГК обычно плоский на всей своей ширине, а в оконечностях имеет продольные пазы или постоянный подъем боковых кромок в соответствии с обводами днища в каждом поперечном сечении. В районе фор- и ахтерштевня ГК соединяется с соответствующим шпангоутом. Толщина ГК в средней части на $\Delta_k = 0,03L + 0,6 \leq 4$ мм больше толщин днищевой обшивки из-за повышенных износа и коррозии, особенно в местах установки на кильблоки при постройке и ремонте. На судах без конструктивного дифферента полностью, а с конструктивным дифферентом только в middle-сечении сечения верхняя поверхность ГК совпадает с ОП, параллельной ГВЛ.

Скуловой пояс входит в состав днищевой обшивки и в зависимости от обвода судна имеет либо арочную в виде части окружности, либо сложную криволинейную форму поперечного сечения. По длине судна на цилиндрической астаки форма поверхности и кривизна скулового пояса меняются. Многие суда имеют скуловой пояс, состоящий в поперечном сечении из одного листа. Однако на больших судах и на судах с более плавными обводами приходится по сечению скулового пояса вводить два листа. Толщина скулового пояса равна большему из значеий толщин смежных поясков днищевой и бортовой обшивки.

Шпрингек—верный пояс бортовой обшивки, вместе с ледом непосредственно контактирующий палубу в работу эквивалентного бруса. Ширина шпрингека составляет не менее ширины горизонтального киля, а толщина — не менее большей из толщин смежных поясков, т. е. бортовой обшивки или палубного стрингера. Часто применяемое утолщение шпрингека по сравнению с бортовой обшивкой обусловлено тем, что он входит в состав верхнего пояса эквивалентного бруса. Утолщение шпрингека позволяет уменьшить напряжения при общем изгибе судна, особенно при крене. Шпрингек подвергается большим потерям нагрузкам от удара волн, во время швартовки в море на волнении. Кроме прочности толщина шпрингека должна удовлетворять требованиям устойчивости.

Шпрингек соединяют с палубным стрингером либо непосредственно сваркой, либо на больших судах при помощи промежу-



Рис. 7.4. Варианты (а—д) соединения шпангоута с палубной обшивкой.
1—шпангоут; 2—палубная обшивка; 3—стыковая планка; 4—стыговой уголок;
 $t \geq 0,5t_{ш}$; $t_{ш} \geq 0,5t_{п}$.

точного элемента (стыгового угольника или полосы) с введением в качестве барьера капанного шва (рис. 7.4). На палубных судах иногда применяют круглый шпангоут для «смягчения» жесткого узла соединения с палубой.

Ширина остальных поясов наружной обшивки выбирается из условия размещения предпочтительно одинаковых листов между горизонтальным поясом и скуловым поясом в составе днищевой обшивки, а также между скулой и шпангоутом — в составе бортовой обшивки. Назначая размеры поясов, учитывают необходимость обработки кромок устанавливаемых листов для придания им правильной геометрической формы и по технологическим соображениям — под сварку. Ширину горизонтального пояса, шпангоута или скулового пояса в целях унификации остальных поясов можно увеличить по сравнению с минимальной. Для сокращения объема и стоимости оборочно-сварочных работ предпочтительно использовать круглобарную листовую сталь. Причем, чтобы уменьшить протяженность сварных швов, более выгодно применять широкие листы, чем длинные [6].

Растяжка наружной обшивки. Рациональной с минимальными отходами раскрой наружной обшивки, уточнение положения ее пазов и стыков с учетом расположения палуб, платформ, второго дна, поперечных и продольных переборок, балок набора, подкрепляющих обшивку, выполняют с помощью специального конструктивного чертежа — растяжки наружной обшивки, фрагмент которой показан на рис. 7.5. На чертеже от продольной основной линии в соответствующих сечениях по длине вертикально нанесены растнувшие теоретические шпангоуты правого борта, отмечен на каждом из них точки присоединения к наружной обшивке всех указанных выше продольных связей.

Отмеченные точки соединяют плавными линиями, после чего, исключая пересечение с ними, уточняют положение пазовых швов и необходимую ширину листов по длине поясов. Далее вертикальными линиями на расстоянии ширины козлышекуют практические шпангоуты, переборки, стыки листов, монтажные стыки, а также границы левого борта, толщину и обозначения всех листов, донные и бортовые отверстия и др.

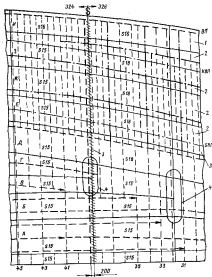


Рис. 7.5. Фрагмент растяжки наружной обшивки ледового с ледяными усилениями корпуса.

1 — шпангоут; 2 — донный пояс; 3 — монтажные стыки; 4 — район наружной обшивки, где для обшивки применялись листы (так обозначены шпангоуты).

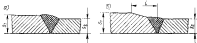


Рис. 7.6. Допускаемая разность значений толщин в поперечных стыковых соединениях листов наружной обшивки $\Delta z = \delta_1 - \delta_2 \leq 0,5 \delta$, или 5 мм; а — соединения при $\Delta z \leq 3$ мм; б — та же же при $\Delta z > 3$ мм.

Монтажные сварные стыковые соединения обшивки секций и блоков при сборке обязательно совмещают по всему внутреннему сечению корпуса судна. Сварные швы необходимо располагать вне зоны высоких напряжений и резкого изменения сечения стенок. Следует всемерно избегать сосредоточения сварных швов обшивки и набора. В целях уменьшения влажного термического влияния на блочки распределяемому параллельными сварными швами к улучшению условий сборки секций [17] минимальное расстояние между этими швами ограничено.

В оконечностях диаметр обводов поперечных сечений корпуса уменьшается. Поэтому в нос и в корму от цилиндрической вставки ширина осевых поясков становится меньше и некоторые из них образуются, образуя так называемые «вторичы» (см. рис. 7.5).

Разность значений толщин стыкуемых по длине судна листов допускается до 30 % от большей из соединяемых или 5 мм — в зависимости от того, что меньше. Это ограничение не относится к толщине листов, соединяемых по пазам, и к местным утолщениям у концов надстроек, в районе шкворных килей и др. Кромки более толстого листа при разности значений толщин более 3 мм скашиваются с уклоном 1:3 (рис. 7.6). Форма разреза кромки стыковых и пазовых швов зависит от толщины соединяемых листов, способа сварки и степени ответственности соединения.

В последние годы согласование обводов корпуса судна, определение положения стыков и залив наружной обшивки, трассировка балок продольного набора и другие работы, связанные с построением теоретического чертежа и чертежа раскладки наружной обшивки, выполняются аналитическими методами автоматизированно с применением ЭВМ, для чего разработаны специальные программы-модули: «Поверхность», «Раскладка», «Развертка», «Конструкция» и др.

Скеловые кили. В средней части длины судна по нормам к скеловым пояскам с внешней стороны наружной обшивки присоединяется специальная продольная составная балка, не выходящая за габариты поперечного сечения корпуса, — скеловой

(боковой) киль. На судах, плавающих во льдах или на мелко-водье, установка скеловых килей не рекомендуется.

Скеловые кили являются самыми старейшими и простейшими устройствами плавного уклонения катки судна на волнении. Размеры килей уменьшаются за счет волно- и изгибобразований, а также подъемной силы. Если высота килей достаточная, степень умеренная зачка составляет около 20—25 %. В случае правильного проектирования и размещения скеловых килей по линиям тока воды они создают при движении судна небольшое дополнительное сопротивление, уменьшающее скорость на 2—3 %.

Требования к конструкции и материалу скеловых килей приведены в Правилах Регистра СССР, а сама конструкция рассмотрена в отраслевом стандарте. Вероятность повреждения наружной обшивки при разрушении скелового киля уменьшается, если он крепится к корпусу судна при помощи промежуточной полосы (плавки).

Вопросы для повторения

1. Назовите назначение и функции наружной обшивки.
2. Какие нагрузки действуют на наружную обшивку?
3. Перечислите требования, предъявляемые к толщине листов наружной обшивки.
4. Назовите конструктивные элементы наружной обшивки и способы соединения шпарты с валубым шпартером.
5. На каком чертеже разрабатывается конструкция наружной обшивки? В чем заключается особенность его выполнения?

ГЛАВА 8. ДНИЩЕВЫЕ ПЕРЕКРЫТИЯ

§ 32. Общая характеристика длины сухогрузных судов

Назначение, особенности днищевых перекрытий. Нижнюю часть корпуса судна называют *днищем*. Поперечными переборками по длине, а при установке продольных переборок и по ширине днище разбивается на ряд перекрытий. Днище служит платформой, несущей полностью или большую часть аксиальных на судне грузов, энергетическую установку, различные оборудование, топливо, балласт. При общем изгибе судна днище в качестве нижнего пояса эквивалентного бруса принимает участие в обеспечении общей прочности корпуса.

Особенностью работы днищевых перекрытий является одновременно восприятие поперечной нагрузки и знакопеременных усилий в плоскости днища от общего изгиба. Днищевые перекрытия в лозовой части судна на длине 0,20—0,25 L, в балластном переделе могут подвергаться большим ударным нагрузкам (сдвигу). При плавании во льдах на днище и особенно на

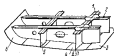


Рис. 8.1. Одинарное дно.
1 — вертикальный бал; 2 — фланец;
3 — днищевая обшивка; 4 — горизонтальный бал; 5 — днищевой стрингер;
6 — оребренный пояс.

скулы корпуса, как и на борту судна, действует ледовая нагрузка, возникающая во времени по интенсивности и месту приложения. Днищевые перекрытия испытывают также нагрузки, обусловленные работой дизельных энергетических установок, кручением корпуса при ходе судна косым курсом на волнении, постановкой в док и других факторами.

Перекрытие, состоящее из наружной обшивки и подкрепляющих ее балок, называют одинарным дном, часть которого показана на рис. 8.1.

Для образования топливных, масляных, балластных и других цистерн, а также защиты негерметичных грузов от затопления воды в случае повреждения днищевой обшивки в составе днища многих судов включают еще внутреннее (второе) дно. Перекрытие, состоящее из наружной днищевой обшивки, настила второго дна и расположенных между ними взаимосвязанных поперечных и продольных балок, называют *двойным дном* (рис. 8.2).

Правилами [17] предусмотрено устройство двойного дна от МО и в нос от него до переборки форпика на судах длиной от 50 до 61 м и на всех протяжениях корпуса между переборками форпика и ахтерика на судах длиной более 61 м. Со стороны бортов двойное дно ограничено наклонными листовыми балками — *кредитом* междуборными листами (рис. 8.3) или скуловыми поясками (см. рис. 8.2).

По ширине с целью повышения безопасности плавания двойное дно должно возможно больше перекрывать скулу особенно в носовой оконечности судна. Минимально допустимую ширину двойного дна на основе опыта эксплуатации определяют как расстояние между точками А левого и правого борта (см. рис. 8.3).

Между заклепками накладным листом шириной не менее $b = 0,0035L + 0,40$ м и скуловым пояском образуется вдоль каждого борта углубление, называемое *ляком*, для сбора жидких остатков, попавших в трюмы, в МО. Глубину ляка принимают не менее половины высоты двойного дна, чтобы уменьшить вероятность попадания жидких остатков на второе дно при крене судна.

В последние годы чаще применяют *горизонтальный междуборный лист*, устанавливаемый в плоскости настила второго дна и по существу являющийся его частью. Это обусловлено увеличением высоты двойного дна, некоторыми технологическими

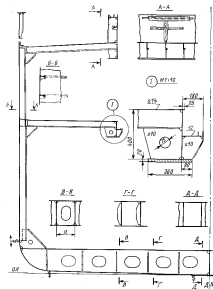


Рис. 8.2. Поперечное сечение корпуса сухогрузного судна с двойным дном и поперечной системой набора днаца.

ОД — оребренный пояс; А — ляк.



Рис. 8.3. Возможные положения крайнего междудонного листа: а) — поперечное; б) — продольное; в) — комбинированное в междудонных листах (Г).

оние конструкцию днища упрощают из-за возможности сегменты. В районе МО с целью исключения резонанса конструкции при работе главных двигателей также требуется подкрепление днища.

Разнородность конструкции днища может быть обусловлена и специализацией судна. В частности, комбинированные суда, например нефтеразвозы, имеют двойное дно только в среднем трюме по ширине корпуса для руды, а в бортовых цистернах для нефти (в обратных рейсах) — одинарное дно (см. рис. 3.11 и 3.13). Судя для массовых грузов имеют плоское дно также только частично по ширине корпуса, а у бортов это дно граничит со скуловыми цистернами с наклонным настилом.

Если для днища принята поперечная система набора в средней части корпуса, то она, естественно, сохраняется и в оконечностях судна с учетом необходимости уменьшения площадей в установках дополнительных подкреплений. Если в средней части на длине 0,4L система набора продольная, то в оконечностях она постепенно переходит в поперечную.

Основными органическими недостатками конструкции с поперечной системой набора, как уже указывалось, являются высокие изгибные напряжения и снижение эффективности обшивки при сжатии из-за ее деформации (поперечной погонии), вызываемой усадкой поперечных сварных швов (рис. 8.4). Поэтому Правила Регистра СССР ограничивают применение поперечной системы набора для днища и ВП, допуская ее на судах длиной не более 100—120 м. Однако конструкции с продольной системой набора значительно более сложны и, следовательно, более дороги в изготовлении. Пересечение и сочленение продольных балок

преимуществами при установке поперечных переборок и бортовых секций. Толщина горизонтального междудонного листа из-за повышенной коррозии бодыше толщиной настила второго дна на 1 мм, а заклепочного листа из-за складной коррозии в лыжах — на 2,5 мм.

Ввиду различия условий работы и требований, предъявляемых к длинным перекрытиям в зависимости от района по длине судна, конструкции днища неоднородны. В фор- и ахтерштевях, за редким исключением, днище одинарное с поперечной системой набора. Между фороникой и ахтерштевевой переборками практически уже на судах длиной более 50 м предусматривается двойное дно. В носовом районе

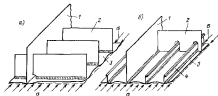


Рис. 8.4. Деформация донной обшивки из-за усадки сварных швов: а) — при поперечной системе набора; б) — при продольной системе набора. 1 — перпендикулярный шов; 2 — флюг; 3 — донная обшивка; 4 — продольная балка.

с поперечными связями, особенно разрезных балок с поперечными переборками, часто снижают надежность, конструкции узлы при работе этих балок на растяжение — сжатие.

Габаритные размеры перекрытий. Длинными перекрытия в средней части по длине судна имеют в плане прямоугольную, а в оконечностях трапециевидную или близкую к ней форму. Для выбора системы набора и конструкции, определения размеров поперечного сечения и положения донных балок, проверки местной прочности кроме расчетных нагрузок необходимо знать габаритные размеры перекрытий.

Габаритные размеры длинных перекрытий определяются размерами грузовых и иных помещений, которые зависят от назначения судна, его архитектурно-конструктивного типа и района по длине корпуса, от категории и вида перевозимых грузов. На судах без продольных переборок ширину донного перекрытия обычно считают равной ширине корпуса в рассматриваемом сечении. В расчетах местной прочности днища сухогрузных судов за ширину перекрытия B_1 по предложению проф. В. В. Коллонтая можно принимать расстояние между серединами скуловых юзов, что составляет примерно 0,92 ширины корпуса в данном сечении. На судах с двойными бортами расчетная ширина донного перекрытия принимается равной расстоянию между внутренними бортами. При наличии продольных переборок, например на рудовозах, комбинированных судах, расчетной шириной донных перекрытий является расстояние между этими переборками.

Для длинных перекрытий определяется расстоянием между смежными поперечными переборками, требующая к размещению которых приведены в таб. 11. По данным статистики, около 70 % отечественных годовых сухогрузных судов имеют

длину трюмов 15—22 м. На носовых новых судах предусматривается возможность перевозки контейнеров. Поэтому доля удлиненных трюмов (20—22 м), с следовательно, и движущих перекрытий возрастает. В любом случае длина перекрытий должна быть кратна целому числу практических шагов поперечного набора.

Расчетная нагрузка на днище. Размеры движущих балок и палубы второго дна определяют с учетом нагрузок, обусловленных воздействием внешней среды (моря), перевозимых грузов и работой механизмов, а также с учетом испытательного и эксплуатационного аварийного давлений. Для судов, плавающих во льдах, размеры элементов конструкций (обычно, балок набора) движущих перекрытий в пределах ледового зона проверяют на действие расчетной ледовой нагрузки.

Расчетные поперечные нагрузки предполагаются равномерно распределенными по площади перекрытия. Дополнительные нагрузки на движущие перекрытия, в частности от удара ялан, давления льда, являются локальными и рассматриваются отдельно в соответствующих главах.

Внешние нагрузки на корпус судна со стороны моря, как уже отмечалось в главе 7, определяются суммой статического и волнового давления воды [см. формулу (7.5)]. Ординату точки приложения внешней статической нагрузки для днища в центре перекрытия в плане принимают равной расчетной осадке судна.

Волновые нагрузки на конструкции корпуса, обусловленные перемещениями и ускорениями судна при качке на волнении, определяют по формуле (7.2).

Давление на бортах от перевозимого груза зависит от рода и вида груза, сил накрени при ходе судна на волнении, от условий с расположенных выше конструкций и т.д. Его определяют (в кПа) по формуле

$$p_g = h_0 g \gamma_g (1 + \alpha_0 g), \quad (8.1)$$

где h_0 — наибольшая высота укладки груза в трюме, м; $\gamma_g \geq 1,0$ — коэффициент учета случайной нагрузки, передаваемой на днище; α_0 — расчетные ускорения (в м/с²) для вычисления сил инерции при качке судна, определяемые по специальным формулам в Правилах Регистра СССР.

Расчетное давление на днище принимают (в кПа) равным большему из абсолютному значению давления при условии положения судна на вершине и подошве волны

$$p_{g, \pm} = p_{gx} + p_w = p_{g \max} \quad (8.2)$$

$$p_{g, \pm} = p_{gx} - p_w = p_{g \min} \quad (8.3)$$

Собственная масса днища при расчете статической составляющей поперечной нагрузки не учитывается из-за ее относительной малости.

При перевозке легких грузов ($p_{g, \max}$) их противодействие меньше внешнего давления при положении судна на вершине волны. Поэтому в таких случаях расчетная нагрузка на днище определяется по формуле (8.2) и направлена сверху вниз. При перевозке тяжелых грузов ($p_{g, \max}$) их противодействие может преобладать внешнее давление со стороны моря при положении судна на подошве волны. В этом случае расчетное давление на днище определяется по формуле (8.3) и направлено сверху вниз. Чтобы исключить ошибку в определении расчетной нагрузки, ее следует вычислять для заданного количества и плотности груза в трюме при положении судна как на вершине, так и на подошве волны и принять большую по абсолютному значению.

Расчетное давление на второе дно, расположенные флор и дашевой створки принимают не менее чем давление, соответствующее испытательному напору до верха поддувной трубы.

Местная прочность двойного дна. Движущие перекрытия при расчете прочности рассматривают как балочные системы, состоящие из балок двух взаимно перпендикулярных направлений с определенными граничными условиями. Изгибающие моменты (в кН·м) и перегибающие силы (в кН) в вертикальном киле, движущих створках и флорах в зависимости от отношения сторон перекрытия $k_1 = L_1/B_1$ определяют по формулам

$$M = \rho L_1^2 \beta_1 \alpha_1 \alpha_2, \quad (8.4)$$

$$N = \rho L_1 \delta_1 \alpha_1 \alpha_2, \quad (8.5)$$

где ρ — расчетная нагрузка, определенная по формуле (8.2) или (8.3), кПа; L_1 — длина рассматриваемой балки, м; β_1 — среднее расстояние между балками одного направления, смежными с рассматриваемой, м; $\alpha_1 = \alpha_1^0 + \delta \delta_1 + c$ и $\alpha_2 = \alpha_2^0 + \delta \delta_2 + c_2$ — безразмерные значения изгибающего момента и перегибающей силы соответственно; $\alpha_1^0, \beta_1, c, \alpha_2^0, \delta \delta_1, \delta \delta_2, c_2$ — эмпирические коэффициенты в таблицах Правил Регистра СССР. Коэффициенты α_1 и α_2 учитывают отстояние рассматриваемого сечения балки от ее середины, а α_1 и α_2 — отстояние балки от середины перекрытия.

Требуемые моменты сопротивления (в см³) и площади поперечного сечения стенок (в см²) рассматриваемой балки определяют из условия прочности при изгибе и срезе соответственно по формулам

$$W = m \gamma_1 \gamma_2 \rho L_1 \beta_1 / [\sigma_x], \quad (8.6)$$

$$I_{\tau} = 10 \alpha_1 \alpha_2 \rho L_1 \beta_1 / [\tau_x], \quad (8.7)$$

где $\sigma_x = \sigma_{x \max}$; $\tau_x = \tau_{x \max}$ — допустимые нормальные и касательные напряжения, МПа. Для опорных сечений балок $\alpha_1 = 1$ и $\alpha_2 = 1$. Для средних в перекрытии днища балок, т. е. для вертикального кила и среднего флора, $\alpha_1 = 1$ и $\alpha_2 = 1$.

Высоту вертикального килля (h_k м) из условия изгиба однополного по конструкции движущего перекрытия в Правилах Регистра СССР определяют по формуле

$$h_k = (k_n/k_{\sigma} \sigma_n) (\pi r L_k^2 / \delta_{\text{изг}}), \quad (8.8)$$

где $k_n = 1,0$ на сухогрузных и наливных судах и $k_n = 0,8$ на судах для массовых грузов; $k_{\sigma} = M_k / \rho L_k^3 \delta$ — коэффициент, зависящий от соотношения сторон днищевой переборки; ρ — расчетное давление, определяемое по формуле (8.2) или (8.3); $\delta_{\text{изг}}$ — средняя толщина днищевой обшивки между вертикальным килем и ближайшим длинным стрингером, мм.

Высоту вертикального килля не следует принимать меньше минимально допустимой по эксплуатационным требованиям $h_{\text{мин}} = 0,005L + 0,35 \geq 0,65$ м. Используя формулу (8.7), найдем площадь поперечного сечения стенки вертикального килля (в см^2) до изгиба

$$F_k = 10 (\pi r L_k \delta_k h_k / k_{\sigma} \sigma_n + k_n h_k^2) \quad (8.9)$$

и толщину его стенки (δ_k мм) $\delta_k = 0,1 F_k / h_k$. Аналогично из условия прочности на срез определяют толщину днищевых стрингеров в сплошных флорах.

Толщину вертикального и стенок туннельного килля (δ_k мм) принимают в любом случае не менее $\delta_{\text{мин}} = 0,005L + 6,5$, а толщину флоров и днищевых стрингеров — не менее $\delta_{\text{мин}} = 0,35L + 6,0$ при продольной системе набора и на 1 мм меньше при поперечной.

Полученные толщины вертикального килля и днищевых стрингеров проверяют на устойчивость при действии нормальных (от общего изгиба) и касательных (от изгиба днища) напряжений. Стенку сплошных флоров в районе опор проверяют на устойчивость при действии касательных напряжений, вызванных переизгибающей силой.

§ 33. Конструктивные типы днища сухогрузных судов

Однорядное дно. Оно состоит из наружной обшивки и подкрепляющих ее составных тавровых балок, установленных чаще всего по поперечной (до допустимой и по продольной) системе набора. При поперечной системе набора днища большее число балок устанавливают поперек корпуса судна. Их размещают на расстоянии практической шагания.

Валь судна в ДП устанавливают обычно завершающий по длине трюма вертикальный киль (средний кильсон) в виде составной тавровой балки или брусковой киле в виде профильной балки (рис. 8.5). При огибании сторон движущего перекрытия более 1,5—1,6 несущими балками являются только флоры и поэтому вертикальный киль может быть разрезным, т. е. состоять

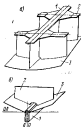


Рис. 8.5. Киль однорядного днища: а — вертикальный; б — брусковой. а — киль; б — флор; в — днищевая обшивка.

Рис. 8.6. Однорядное дно в районе МО.



из отдельных брант, расположенных между флорами. Возможна усиленная конструкция вертикального килля, состоящая из бруска и приваренного к нему вертикального листа с пояском по верхней кромке. На малых судах иногда применяют установленный снаружи коробчатый киль, или волосообразный профаль, поставленный изнутри за днищевую обшивку.

В районе МО вертикальный киль в виде листовой балки может отсутствовать, если продольные балки машинного фундамента занимают всю длину МО и заканчиваются постепенно в виде килля на длине до трех шагов (рис. 8.6).

С каждой стороны от ДП на расстоянии не более 2,2 м устанавливают по одному разрывному на флорах днищевому стрингеру (боковой кильсон), если ширина судна $B \leq 10$ м, и по два стрингера — при большей ширине. Функции вертикального килля и днищевых стрингеров в однорядном дне, за исключением разделительных и отбойных, — такие же, как и в двойном дне. Из-за большего отстояния сторон однорядного дна по сравнению с двойным функциям вертикального килля и длинных стрингеров как поддерживающих флоры балок значительно ослаблены или отсутствуют вовсе.

При продольной системе набора в поперечных сечениях однорядного дна на расстоянии 2—4 шагов устанавливают флоры, а вдоль судна — равностоящие на размер шпация продольные балки катаного профиля. Продольные балки идут непрерывно на длину отсека, не разрезаясь при пересечении с флорами (рис. 8.7). На поперечных волнопроницаемых переборках продольные балки разрезаются, а конструктивная непрерывность



Рис. 8.7. Одинарное дно с поперечной переборкой.

обеспечивается установкой в их плоскости килей с обеих сторон переборки. В этой же плоскости устанавливают и стойки переборки.

Нагрузка и размеры длиннейших балок. В отличие от нагрузки на двойное дно противодействующие грузы на одинарное дно учитывают условно, принимая его равным 0,4 внешнего давления на тихой воде.

Тогда расчетное давление (в кПа) на одинарное дно составит

$$p = 0,6p_{\text{ст}} + p_{\text{вн}}$$

где $p_{\text{ст}}$ — по формуле (4.2); $p_{\text{вн}}$ — по формуле (7.2).

Если для судогрузного судна предусматривается плавание с полным грузом при отдельных пустых трюмах (когда $p_{\text{вн}} = 0$), то расчетное давление на деке равно полному внешнему давлению при расчетной осадке, т. е. сумме статического и инерционного давлений.

Прочность флора считается обеспеченной, если момент сопротивления (в см⁴) его поперечного сечения в ДП на уровне свободного пояска не менее

$$W_{\text{пл}} = \rho a B^2 m / 10^8 \text{ кПа} \cdot \text{см}^4$$

где ρ — расчетное давление, кПа; a — расстояние между флорами, м; B — расчетная ширина днища в рассматриваемом сечении, м; m — 11,5 — коэффициент изгибающего момента; k_0 — 0,8.

Высота флоров в ДП (в мм) принимается не менее $h = B/18$, толщина $z = 10A + 3,5 \geq 6$ мм, но не более толщины движущей обшивки. В соответствии с требуемым моментом сопротивления определяют необходимые размеры сечения свободного пояска флора в ДП. В районе опор в сечениях $0,05B$ от бортов площадь поперечного сечения (в см²) флоров, полученная из условия среза, должна быть не менее $f = 0,1B(8_1 + 7)$. Во флорах у движущей обшивки около вертикального килей и в длиннейших стрингерах предусматривают дренажные отверстия (голубинцы) для протока воды к месту ее сбора.

Толщину стенки вертикального килей (в мм) находят по формуле $k_0 = 0,05L + 6$, в толщину его свободного пояска принимают на 2 мм больше. Площадь сечения свободного пояска вертикального килей, по крайней мере, в два раза больше, чем у флора. Аналогично определяют размеры длиннейших стрингеров.

Размеры брусков килей (в мм) получают по формулам: $h = 1,5L + 100$ (высота) и $b = 0,7L + 8$ (толщина).

Конструкция соединения балок. Конструкция балок и их соединения между собой зависят от того, какие балки

(поперечные или продольные) остаются при пересечении непрерывными. В районе трюмов флоры, как правило, непрерывны от вертикального килей до бортов. При отношении сторон днищевой переборки более 1,5—1,6 флоры могут быть непрерывными по всей ширине судна. В районе МО непрерывными обычно являются продольные фундаментные балки, одновременно выполняющие функцию длиннейших стрингеров.

В соответствии с конфигурацией пересечения стенок соединяют к пояскам длиннейших балок. Поясок вертикального килей при пересечении с поясками флоров остается непрерывным. Но так как концы флоров при изгибе днища растягиваются, в местах соединения с поясками килей ширину поясков флоров часто увеличивают в два раза, чтобы уменьшить влияние возможной концентрации напряжений (см. рис. 8.1). Поясок днищевой стрингера при пересечении с поясками флоров разрезают или иногда пропускают над ними.

Вертикальный киль и движущие стрингеры одинарного дна обычно соединяют с поперечной переборкой при помощи вертикальных килей, а иногда — при помощи горизонтальных брантов, расположенных в плоскости свободных поясков. Размеры килей зависят от конструкции соединения поясков балок с поперечной переборкой.

Двойное дно. Высоту двойного дна измеряют как расстояние в ДП между горизонтальными килем и средним листом застывшего дна, т. е. она определяется высотой вертикального килей. Принятая в проекте высота двойного дна кроме местной прочности должна удовлетворять и другим требованиям.

Для выполнения работ в междудонном пространстве при застройке и ремонте судна минимально допустимой считается высота двойного дна 650—700 мм. В допустимые для необходимо предусматривать определяющую высоту для толщинных и балластных цистерн, что обеспечивается выбором соответствующей высоты вертикального килей. На лесных судах увеличение высоты двойного дна ограничено требованиями сохранения необходимой остойчивости, а на рудовозах, изобортов, увеличение высоты двойного дна является одним из способов уменьшения чрезмерной метacentрической высоты. Высотой двойного дна в некоторой степени можно регулировать высоту трюмов на судах, перевозимых генеральные (лупочные) грузы. Имеются и другие технико-экономические аспекты, влияющие на выбор высоты двойного дна при проектировании судов.

Из названных требований, предъявляемых к высоте двойного дна, определяющим является обеспечение совместности междудонных цистерн, поскольку на современных судах приходится иметь раздельные цистерны для топлива и балласта, а том числе и внутри двойного дна, что требует увеличения его высоты.

Настил второго дна образует междудонные цистермы, служит платформой для размещения грузов, энергетическими служебными и оборудованием, защищает трюмы от затопления, и грузов от аорчи. Как верхний присоединенный пояс поперечных и продольных балок настила второго дна обеспечивает их местную прочность при более экономном расходе материала, чем в одностороннем дне.

Второе дно, являясь непрерывной продольной связью корпуса (на длине около $0,9L$), вместе с другими продольными связями увеличивает общую продольную прочность судна. Его участие в моменте сопротивления жесткого пояса эквивалентного бруса в зависимости от типа и высоты двойного дна достигает 15—20 %.

Настил второго дна еще при постройке судна подвергается равномерному распределенной поперечной нагрузке от испытательного павара. Последний соответствует расстоянию по вертикали от настила второго дна до верха воздушной трубы или перемычки палубы, достигает уровня не менее чем на 1 м выше палубы переборки и находится в пределах от 2,5 до 36 м вод. ст.

В аварийной ситуации, при повреждении или разрушении части донной обшивки, нагрузка на второе дно на тихой воде пропорциональна расстоянию от настила до аварийной панели и рассматриваемому расщеплению сечения судна. В любом случае расчетное давление не должно приниматься меньше испытательного.

Толщину настила второго дна определяют расчетом жесткости заданной балки-палоски под действием случайной нагрузки по формуле (7.7), принимая $k_2 = 1,2$ для продольной системы набора донца и $k_2 = 1,0$ — при поперечной. Учет системы набора донца при определении толщины настила второго дна вполне логичен, так как в отличие от поперечной системы набора при продольной наибольшие напряжения изгиба балки-палоски направлены поперек корпуса и не суммируются с напряжениями от общего изгиба судна. Поэтому и толщина настила при продольной системе набора может быть меньше, чем при поперечной. В любом случае толщина настила (в мм) второго дна нового судна принимается не менее $\delta_{\text{нвд}} = 0,035L + 5$.

На судах, перевозящих генеральные и другие грузы, для удобства их обработки и размещения второе дно, как правило, расположено горизонтально (см. рис. 8.2). На судах с большой килеватостью, например на некоторых промисловых судах, второе дно приходится делать наклонным со словом в ДП и подниматься к борту, чтобы обеспечить перекрытие скулы, прочность флоров и возможность доступа в цистермы внутри двойного дна в районе бортов.

Настил второго дна представляет собой кологазис, сформированный из листового сталя требуемой толщиной. Листы настила

образуют пояс, ориентированный вдоль судна по тем же соображениям, что и пояс донней обшивки, настила палуб. Средний пояс, как правило, устанавливают симметрично ДП. Все цилиндрической вставки боковые пояса постепенно суживают в соответствии с уменьшением ширины корпуса, избегая пересечения пазов с продольными балками. В окрестностях судна, на длине примерно до полукора теоретических шпангоут перед переборками фор- и ахтерика, листы второго дна имеют большое изменение ширины корпуса располагают поперек, что уменьшает отходы материала при раскрое листов. При необходимости повышения прочности килевой балки средней лист настила может быть утолщенным по сравнению с остальными поясками.

В настиле второго дна предусматривают местные утолщения и подкрепления в виде пярных или килевых листов и ребер вод жмн в районе установки пиллеров, колени, фулдементов, фитингов под углами контейнеров, комингсов в районе горловин пазов для доступа в двойное дно и другие виды подкрепления.

Функции вертикального кила и донных стрингеров в конструкции двойного дна. Эти функции во многом подобны, хотя имеются и различия в условиях их работы. В § 32 были отмечены функции вертикального кила и донных стрингеров в обеспечении местной прочности донных перекрытий. Эти балки являются промежуточными опорами для флоров, если длина перекрытия не превышает примерно 1,30—1,45 стн ширины. С увеличением длины перекрытия эти риги кил в стрингерах увеличиваются в середине флора начинают работать под действием концентральной нагрузки самостоятельно как изолированные балки.

Важной функцией вертикального кила является разделение междудонного пространства по ширине судна на изолированные цистермы левое и правое бортов с целью ограничить уменьшение остойчивости судна при повреждении свободной поверхности. Поэтому вертикальный киль на большей части длины судна (0,75L) должен быть непрерывным. Пространство донные стрингера выполняют функции отбойных балок, уменьшая динамическое воздействие жидкого толчка или балласта на конструкцию при качке. С этой целью Правила Регистра СССР прямо или косвенно ограничивают расстояние между вертикальными килем и ближайшими донными стрингерами, а также между смежными стрингерами (не более 4 м при поперечной системе набора и не более 4,5 м при продольной).

Вертикальный киль и донные стрингера выполняют роль разнесенных балок, выполняющих совместную работу дополнительного числа флоров и таким образом распределяя на большую площадь донной поверхности ядро выраженные локальные

поперечные нагрузки, действующие на днище при плавлении судна во льдах, на мелководье, при посадке на грунт и сле-
плении.

Другая функция вертикального килля и движущих стрингеров — обеспечение так называемого распора для пластины днищевой обшивки и настила второго дна при поперечной системе набора днища. Распор препятствует сближению длинных сторон пластины и вызывает в ней равномерное распределение по толщине растягивающие (цикные) напряжения. При продольной системе набора днища функцию распора пластина обшивки выполняет флоры.

Вертикальный килль и движущие стрингеры (с учетом выр-
зов), как и другие продольные связи, принимают участие в об-
щем изгибе судна в составе нижнего пояса эквивалентного
бруса. Однако их суммарная доля в моменте сопротивления
корпуса на уровне дна обычных судов составляет около 3—
4 %. Бóльшее значение для общей прочности судна имеет не ве-
дущий момент килля и движущих стрингеров в момент
сопротивления корпуса, а то, что они препятствуют сближению
эффективных днищевой обшивки и настила внутреннего дна
из-за сварочных деформаций последней в виде гофры.

Выше были названы общие функции вертикального килля и
движущих стрингеров, во в ряде случаев, например в обеспе-
чении местной прочности днища, роль килля оказывается домини-
рующей. Особой функцией вертикального килля, а на больших
судах и движущих стрингеров является образование с другими
частями днища жесткой килевой балки, способной воспри-
инять реакции опорных устройств при постройке судна и спуске
его на воду, а также реакции килебалки при постановке судна
а док.

Вертикальный килль на длине 0,6L в середине корпуса, как
правило, непрерывен, а на длине 0,75L воспринимаем, и поэтому
его толщина должна быть не менее толщины водонепроницае-
мых флор. Аналогично и движущий стрингер при необходи-
мости делается по длине жестким и непрерывным. В пропеллер-
ных движущих стрингерах в районе установки поперечных пе-
реборок при любой системе набора допускают лишь небольшие
выросты диаметром не более 300—350 мм (рис. 8.8). Исклю-
чением являются и движущие стрингеры и в районе действия со-
средоточенных сил (от калесов, контейнеров и др.).

Туннельный килль. В двойном дне многих современных
судов для размещения и удобства обслуживания трубопроводов
и арматуры толщинных, балластных и других систем, идущих
в нос от МО, выгораживают специальный непроходный кор-
ридор. Чаще всего такой корридор, образованный двумя вертикаль-
ными стенками, устраивают посередине ширины корпуса сим-
метрично ДП. В этих случаях его называют туннельным киллем,

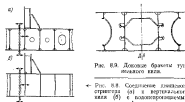


Рис. 8.8. Дюймовые килли тун-
нельного килля.

← Рис. 8.8. Соединение движущего
стрингера (а) и вертикального
килля (б) с водонепроницаемыми
флорами.

так как он выполняет все функции обычного листового вер-
тикального килля. Иногда корридор для трубопроводов судовых си-
стем размещают примерно на четверть ширины корпуса, создав
одну из его стенок с движущим стрингером. Трубопрово-
ды, идущие к корпусу от МО, прокладывают в туннеле гребного
вала.

Флоры, разрезанные корридором для трубопроводов, плохо
воспринимают пережимающие силы на его ширине из-за боль-
ших выростов. Поскольку в районе ДП пережимающие силы
во флорах минимальны, то именно здесь и устраивают туннель-
ный килль, ширина которого (в м) равна $b = 0,034L + 1,0 \leq 1,9$.
Толщину стенок туннельного килля допускают принимать на
10 % меньше толщины вертикального килля при условии обеспе-
чения непроницаемости и требуемой устойчивости. В плоскости
каждого шпангоута боковые стенки туннельного килля соеди-
няются вертикаль и клингами балками или бракетами (см.
рис. 3.6 и 3.9).

Верхняя балка туннельного килля работает на растяжение,
поэтому площадь поперечного сечения определяют на условия
прочности при растяжении силами, возникающими в верхних
човках при изгибе флора. Нижняя балка туннельного килля не
вытывает сложной кривой под действием вертикальной и осевой
сжимающей нагрузки.

С целью более равномерного обжатия килебалки и умень-
шения изгиба горизонтального килля во время докования судна
при ширине туннельного килля $b \geq 1,2$ м рекомендуется устано-
вить продольную разрезную балку и ДП или другое дополнитель-
ное подкрепление. При продольной системе набора днища кроме
установки горизонтальных ребер стенки туннельного килля между
флорами подкрепляют дюймовыми бракетами (рис. 8.9).

Поперечная система набора. Конструктивными элементами двойного дна при поперечной системе набора являются расположенные выше продольные листовые балки — вертикальный киле, днищевые стрингеры, наклонный междудоный лист, а также поперечные балки — флоры (см. рис. 8.2). Флоры устанавливаются на расстоянии одной шпации (рис. 8.10), т. е. в плоскости каждого шпангоута, и вместе с поперечными полубоковыми балками (близнами) они образуют шпангоутные рамки. Основное назначение флор — обеспечивать опоры днищевой обшивке, настилу второго дна и вместе с ними обеспечивать прочность дна. От расстояния между флорами (от шпации) зависит толщина обшивки, определяемая условиями прочности и (или) устойчивости, а следовательно, и масса перекрытия.

Для транспортных судов предпочтительно увеличение шпаций по сравнению с нормальными примерно на 10 %, поскольку это приводит к существенному снижению трудоемкости и стоимости изготовления конструкции при незначительном (не более 3—5 %) увеличении массы [6].

Флоры и двойное дно неперерывны на полуширине судна, т. е. разрезаются в ДП на вертикальном киле или на туннельном при его установке и соединены с ним. По конструкции флоры могут быть: сплошными и водонепроницаемыми (из сплошного листа стали), бракетными (из бракет и катаных балок), обсаженными (из листовой стали с боковыми вырезами). Бракетными и обсаженными флоры называют еще открытыми, так как они улучшают условия вентиляции в междудоном пространстве по сравнению со сплошными.

Сплошные флоры. При поперечной системе набора двойного дна сплошные флоры устанавливают обязательно в плоскости каждого шпангоута (через одну шпацию) в районах повышенных нагрузок, а именно: в носу судна на длине 0,25L от носового перпендикуляра, в МО, под фундаментами упорных подпятников, по концам фундаментов для котлов, под концами киля стоек переборок цистерн, под пиллерсами и в других сечениях. В районе грузных трюмов рекомендуется устанавливать сплошные флоры на каждом шпангоуте, хотя и допускается чередовать их с открытыми флорами. В последнем случае рас-



Рис. 8.10. Схема поперечной системы набора двойного дна.
1 — водонепроницаемая флора; 2 — днищевые стрингеры;
3 — вертикальный киль; 4 — поперечная флора; 5 — сплошной лист;
6 — шпангоут; 7 — 8 — шпангоуты между сплошными флорами.

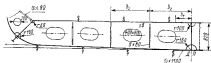


Рис. 8.11. Сплошной флор при поперечной системе набора ($b_1 \geq b-2$; $b_2 \leq 1,5$ м).

стояние между сплошными флорами должно составлять не более четырех шпаций и не более 3,6 м.

Толщина стенки сплошного флора должна удовлетворять прочности на срез в районе опор у бортов, где во время эксплуатации судна действуют наибольшие пережимающие силы от распределенной нагрузки, и в районе его пересечения с вертикальным килем, где действуют реакции кильблоков при стоянке судна в док.

Площадь поперечного сечения среднего флора $J_{фс}$ при эксплуатационной нагрузке определяют из условия прочности на срез по формуле (

жизни контейнеров на втором дне). Между вырезами сетку флора подкрепляют перекладными ребрами жесткости, срезающими как ус- по кошачку, с целью предотвратить потерю устойчивости стенки при изгибе флора. Следующие слои с вырезами увеличенных размеров составляют открытые (облегчающие) флоры.

В сплошных флорах, как и в провициаемых динцевых стратиграх, для прохода воздуха к воздушным трубам при заполнении между дождевых шахтер, а также для прохода топлива и балласта к арматурным патрубкам при осушении шахтер, делают небольшие круглые вырезы — голубины. Диаметр верхних голубин (для воздуха) — 50 мм и нижних (для протока жидкости) — 75 мм. Голубины могут быть совмещены с угловыми срезами сплошного флора для прохода старых азов (см. рис. 8.11) при условии увеличения радиуса для обеспечения плавно голубины.

Водонепроницаемые флоты. Водонепроницаемые флоты в дачном для обязательно устанавливаются в плоскости аварийных поперечных переборок. В случае смятия непроницаемого флота на одну шпангоут переборки под него устанавливается сплошной флот. Для разделения между собой пространств по длине судна на отдельные отсеки водонепроницаемые флоты могут быть установлены в необходимом количестве в между поперечными переборками в районе МО или топлив.

Нагрузка наспрощається в теор. пропорційнальна напругі на розривному напругу, діє на нормалі к його ділянці, кожна одна з розділених їм діє в пустоті. Допускаємо напруження з середнім профілем балки-полоски, масивною пластмасою в стітці незрозумілого флора, примети рамками 0,80, при опрацюванні його товщиною по формулі $s = 15,8 \sqrt{k_0/k_0} + A_0$, де $A_0 \leq 0,9$ м — відстань між ребрами жорсткості; k_0 — коефіцієнт в залежності від оцінки сторони опорного контуру пластини [см. формулу (7.7)]; $p = \rho g H$ — рівняння навантаження, кПа; H — висота вимірювання навантаження; $k_0 = 0,8$.

Фактическая нагрузка на невращающийся флор во время эксплуатации будет иметь значительно меньшую интенсивность, так как каждый литр воздуха, прошедший за вращением на «воздушных мешках» заполненной цистерны, уменьшает интенсивность нагрузки на 0,5 м вод. ст. ($\sim 4,9$ кПа) при диаметре воздушной трубы 50 мм. Прокладка толщиной невращающегося флора должна быть не менее толщиной сплошного флора и не менее минимальной толщины для деталей внутри цистерны двойного дна.

В дюнном дне высотой более 100 м непроницаемые флоры подеривают установленными вертикально, срезающим «на ус».

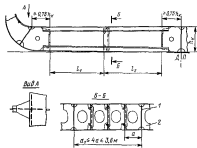


Рис. 8.12. Вращательный фазор

F — сечение фазы; F — диаметр образца; R_0 — радиус мезокристаллического ядра;
 λ_1 и λ_2 — длины волн дифракционных фаз; d — шаг решетки; a — расстояние между
плоскостями фазовых фаз.

ребрами жесткости с моментом сопротивления (в см^3), определяемым по формуле

$$F = Qh_{\text{m}}10^3/\pi h_{\text{m}}n_{\text{m}}$$

где $Q = \rho a h_k$, кН; h_k — принятая в проекте высота двойного дна, м; $n = 8$; $b_k = 1.0$.

Бракетный флоризатор. С целью улучшить доступ воздуха между сплошными флорами устанавливать бракетные флоры в районе тричов с высотой двойного дна до 1000 мм и только в тех случаях, по длине судна, где сплошные флоры могут быть заменены кмм. Бракетные флоры имеют меньшую массу, чем обшивочные и тем более сплошные флоры. Однако трудоемкость изготовления бракетных флор до 25–30% выше, чем трудоемкость изготовления сплошных флор. Поскольку воздушная способность бракетных флор значительно меньше воздушной способности сплошных, их количество между сплошными флорами ограничено. Конструкция бракетного флора показана на рис. 8.12. Протяженность каждой brackets у вертикального киле и междулонного листа составляет не менее 0,75 высоты кила, и у длинного сэрлэра —

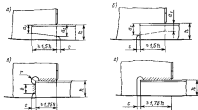


Рис. 8.13. Закрепление концов балок бракетного флора.
а) $a \geq 0,5b$; б) $a \geq 0,7b$; в) $a \geq 0,5b$; г) $a \geq 0,7b$

не менее $0,35 h_a$ %. На полуширине судна балеты толщиной, равной толщине сплошного флора, соединяются между собой нижней и верхней балками с моментом сопротивления их сечения (в см^4) не менее

$$W = p a^2 h_a [0,07 / m h_a \sigma_{\text{ст}}] \quad (8.10)$$

где p — расчетная нагрузка, кПа ; l — пролет балок между внутренними кромками бракет, м ; $m = 12$; $h_a = 0,80$.

Для нижних балок расчетная нагрузка равна внешнему давлению на вершине киля, т. е. сумме статического и волнового давлений, как для днищевой обшивки [см. формулу (7.8)]. Момент сопротивления верхних балок бракетного флора Правилами axes предусматривают изгибной (также и 1985 г.) допускался на 15 % меньше, чем у нижних балок. Новые Правила Регистра СССР увеличили расчетную нагрузку для верхних балок, установив ее соответствующей испытательному давлению.

Для уменьшения размеров сечения балок бракетного флора они могут быть перевязаны при пролете $l \leq 2,5$ м в середине должны быть перевязаны вертикальными стойками при большом пролете. Размер поперечного сечения этих стоек определяют условиями прочности (площадь сечения) и устойчивости (минимальный момент инерции) при сжатии. Промежуточные стойки являются упругими опорами для балок бракетного флора. Поэтому их момент сопротивления, полученный при полном пролете между бракетами, допустимо уменьшать лишь в два раза в случае установки промежуточных стоек. Соединение балок

* Допускается соединение нижней и верхней балок вертикальными ребрами вместо бракет.

Рис. 8.14. Схема продольной системы набора донца

1 — двойной стрингер; 2 — продольные балки; 3 — вертикальный киль; 4 — двойной флор; 5 — двойной бракет; 6 — двойная обшивка; 7 — продольные балки; 8 — обшивка; 9 — расстояние между флорами; 10 — расстояние между двойными бракетами



с бракетами может быть нахлесточным (рис. 8.13, а и б) или стыковым в одной плоскости (рис. 8.13, в и г).

На судах с поперечной системой набора длина и высотой двойного дна более 800 мм вместо бракетных флора следует устанавливать менее трудоемкие облегченные флоры с увеличенными вырезами высотой до 0,6, длиной до 1,2 и расстоянием между ними 0,5 высоты вертикального киля. Толщина облегченных флоров составляет не менее толщин сплошных в данном районе, а расстояние между подкрепляющими ребрами увеличено до 2,2 м.

Продольная система набора. Конструкция двойного дна с продольной системой набора отличается от конструкции с поперечной системой тем, что между вертикальными килем и донными стрингерами по днищевой обшивке и настилу второго дна устанавливают продольные балки на расстоянии одной шпации (рис. 8.14). По длине перекрытия количество флора сокращается в два-четыре раза. Расстояние между флорами при продольной системе набора в средней части длины судна допускается до 3,6 м при наличии вертикальных промежуточных распорок между нижней и верхней продольными балками или до 3,2 м, если они отсутствуют, и при том условии, что расстояние составляет не более четырех шпаций. В новых Правилах Регистра СССР расстояние между сплошными флорами допускается принимать до 3,75 м, но не более пяти шпаций при условии обязательной установки промежуточных вертикальных распорок. Расстояние между флорами не допускается более двух шпаций в районах 0,25 l в носу, в МКО, а также в грузовой трюмах при нагрузке гребными.

Таким образом, при продольной системе набора пластины днищевой обшивки и настила второго дна ориентированы вдоль судна. Продольное расположение пластин, как уже упоминалось, значительно увеличивает их устойчивость при сжатии усилием от общего изгиба судна и нейтрализует негативное влияние деформации обшивки из-за усадки сварных швов.

Размеры вертикального киля, донных стрингеров и флора определяют из условия местной прочности так же, как и при поперечной системе набора (см. § 32). Однако жесткость вертикального киля и стрингеров увеличивается из-за участка

продольных балок в сочетании с ними изгибе днищевой пере- крытия. Поскольку расстояние между флорами при продольной системе набора увеличено, требование прочности стенок флоров в районе опор при действии переизгибающих сил может стать определяющим. Необходимо также проверить стенки флоров на устойчивость при действии на них касательных напряжений. Минимально допустимая толщина сплошного флора увеличена на 1 мм по сравнению с толщиной флора при поперечной системе набора. Дополнительной функцией флоров при продольной системе набора является обеспечение промежуточных опор для длинных продольных балок.

Длинные продольные балки. Эти балки одновременно с поперечной нагрузкой воспринимают попеременно сжимающие и растягивающие напряжения от общего изгиба, т. е. находятся в условиях так называемого сложного изгиба. Поэтому к продольным балкам предъявляют требования прочности и устойчивости. Известно, что при использовании стали с пределом текучести не более 350 МПа длинные продольные балки, удовлетворяющие требованиям местной прочности, являются одновременно и устойчивыми.

При равных расстояниях между флорами в равномерно распределенной нагрузке продольные балки оказываются жестко заделанными на флорах. Требуемый момент сопротивления нижней балки с присоединенным пояском определяют так же, как и для нижней балки бракетного флора, по формуле (8.16), принимая ту же интенсивность касательной поперечной нагрузки и тот же коэффициент изгибающего момента $\alpha = 12$. Расчетный пролет продольных балок равен наибольшему расстоянию между флорами (в районе трюма). Коэффициент допускаемых напряжений для продольных балок донца определяют по формуле $k_2 = 0,3 + x/L$, принимая отношение x/L и предельных $0,2 \leq x/L \leq 0,4$, где x — отношение среднего сечения рассматриваемого пролета балки от миделя, м.

Момент сопротивления продольных балок, устанавливаемых по насенду второго дна, определяют аналогично. За расчетную нагрузку принимают давление, соответствующее испытательному напору до верха воздушной трубы, а коэффициент допускаемых напряжений $k_2 = 0,4 + x/L$.

Нижние и верхние днищевые продольные балки при отношении пролета к высоте поперечного сечения $l/h \leq 10$ дополнительно проверяют на прочность при срезе. Требуемая площадь поперечного сечения стальной балки (в см^2) имеет вид $f_{\text{ср}} = 10N/k_3 + 0,1k_3A$, где $N = \rho a l/2$ — переизгибающая сила, кН; ρ — расчетное давление, кПа; A — высота стенки балки, см; $k_3 = 0,76$.

Для уменьшения массы длинных продольных балок, а также в целях использования для них катаных профилей вместо по-

ставных целесообразно в середине пролета установить вертикальные распорки (стойки), поперечное сечение которых (в см^2) имеет площадь $f = 10\rho a l/h_0\sigma_0 + f_{\text{ср}}$, где ρ — расчетная нагрузка (внешняя или внутренняя со стороны груза в трюме — что больше), кПа; l — пролет подкрепленных балок, равный расстоянию между флорами, м; $A_0 = 0,5$; $f_{\text{ср}} = 0,1k_3A$. Полученный размер поперечного сечения стоек проверяют на устойчивость. Поскольку промежуточные стойки обеспечивают для нижних и верхних продольных балок только упорную опору, требуемый момент сопротивления этих балок уменьшают лишь в два раза.

Для длинных продольных балок обычных судовых судов чаще всего используют несимметричные волнообразы (ГОСТ 21937—76). Могут быть применены и более эффективные при изгибе симметричные волнообразы (ГОСТ 9235—76) при условии, что толщина их стенок не менее допустимой в двойном дле. Иногда используют для балок и плоскую сталь. При пересечении со сплошными флорами продольные балки перерезают. Для их прохода в стенке флора делают вырезы различной формы в зависимости от профиля балки и значения усилий, передаваемых на флор (рис. 8.15). Типовые вырезы для прохода профилей в пронахальных и непронахальных конструкциях предусмотрены отраслевым стандартом.

Под действием нагрузки, передаваемой продольными балками на флор, и от его собственного изгиба по краям выреза образуются зоны повышенных напряжений, где довольно часто при эксплуатации судна возникают трещины. Это следует учитывать при выборе формы и размеров вырезов в стенке флора и других разных балок в конструкции соединения с балками основного набора.

Конструкция сплошного пронахального флора показана на рис. 8.16. На обычных судах флор разрезают только на вертикальном или туннельном кле. По флору устанавливают вертикальные ребра жесткости, которые являются опорой для продольных балок и обеспечивают устойчивость стенки флора.

Более сложной является конструкция соединения продольных балок с водонепроницаемым флором, особенно в районе мид-

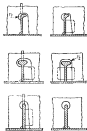


Рис. 8.15. Варианты исполнения пронахальных балок со сплошным флором.

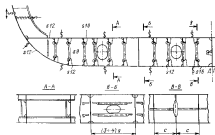


Рис. 8.16. Двойное дно с продольной системой набора.

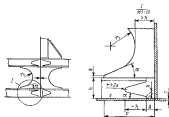


Рис. 8.17. Соединение разрезных продольных балок с вальцованными флорами.
 $c = (2.5 + 3.5)g$; $b = 30 + 15$ мм; $d = 40$ мм (ис. 60) мм; $a = 30$.

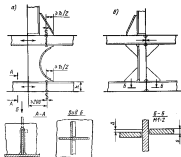


Рис. 8.18. Варианты соединений продольных балок с вальцованными флорами. а, б) — соединение продольных балок с вальцованными флорами без разреза; в — то же с разрезом.

тажных стыков. Для удобства сборки продольные балки обычно разрезают. Для уменьшения концентрации напряжений в этих случаях концы балок и свободные кройки бракут и отлачие от первых подобных конструкций делают с плавным изменением сечения (рис. 8.17). На судах длиной более 80 м новые Правила Регистра СССР рекомендуют приварку к непроицаемым флорам торцов разрезных продольных балок с обеспечением минимальной разностенности (рис. 8.18).

При использовании стали повышенной прочности для дна и палубных связей продольные балки следует пропускать через непроицаемые флоры без разреза. Для удобства сборки свободные концы продольных балок в местах установки непроицаемых флоров срезают газом на длине $l = s_{фл} + 4$ мм. После этого флоры легко навязывают предварительно сделанными прорезами на стенках продольных балок и приваривают к обшивке, а сами балки по периметру сваривают со стенкой флоров.

Монтажный стык продольных балок отстоит от непроицаемого флора под переборкой на 200—300 мм и перекрывается brackets, установленной в плоскости балок (см. рис. 8.18, а). В этих случаях в двойном дне сухогрузных судов при перевозке

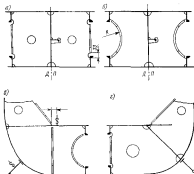


Рис. 8.19. Бракеты дна: а, б — дощиче у вертикального кля; в, г — скуловые.

обычных грузов brackets с обратной стороны флора можно не ставить.

Подкрепление продольных рамных балок. При продольной системе набора увеличивается расстояние между флорами, а потому продольные рамные балки нуждаются в подкреплении. Для обеспечения устойчивости вертикального кля при скатин изгибывания от общего изгиба, чтобы не увеличивать толщину, по высоте стенки устанавливают одно или два горизонтальных ребра жесткости, размеры поперечного сечения которых определяют также из условия устойчивости (см. рис. 8.16). Аналогичное подкрепление имеют стенки туннельного кля (см. рис. 8.9) и динцевые стрингеры. Проникаемые стрингеры по условиям технологичности рекомендуют подкреплять вертикальными ребрами, но применяют подкрепление к горизонтальным ребрам.

Дополнительно вертикальный или туннельный кля подкрепляют с каждого борта поперечными локонными bracketами, расположенными одна от другой или от флора на расстоянии не более 1,2 м по вертикальному кля с не более одной шпации по

туннельному. По ширине эти brackets имеют размер одной шпации и соединяются с ближайшими к кля парами продольных динцевых балок (см. рис. 8.9 и рис. 8.19, а и б). В результате соединения вертикального кля с ближайшими продольными балками получается жесткая, достаточно прочная клева балка, обеспечивающая жесткость кильблоков при постановке судна в док. В районе скулы крайний междосонный лист между спонсонами флорами подкрепляют скуловыми bracketами (см. рис. 8.19, в и г), установленными в плоскости шпацирующей на расстоянии одной шпации. Установка скуловых bracket обеспечивает также необходимую жесткость соединения бортов судна с динцем.

§ 35. Особенности конструкции дна наливных и специализированных судов

Габаритные размеры динцевых перекрытий. Динце наливных судов разделяется поперечными переборками по длине и продольными переборками по ширине корпуса на ряд перекрытий. Определяющим требованием к наибольшему расстоянию между поперечными переборками является исключение резонанса между перемещениями жидкого груза в танках и параметрами килевой качки судна, что достигается при длине танков не более 0,12. Аналогично ширине средних танков при малой аэроупругости резонанса колебаний жидкого груза в корпусе при бортовой качке эрринируют не более 0,5—0,6 В. Также же требования предъявляют к размерам средних трюмов нефтерудовозов.

Длина динцевых перекрытий судов для массовых грузов зависит преимущественно от вида перевозимого груза. Если основными являются грузы с повышенным погрузочным объемом (зерно, уголь с $\mu \geq 0,120 \text{ м}^3/\text{кН}$), массообразные трюмы озапакуют динцем. Если чаще предполагаются перевозить руду (например, железную руду с $\mu = 0,035 \pm 0,050 \text{ м}^3/\text{кН}$), то в целях уменьшения мореходности судна трюмы могут быть короткими (обычно нечетными), заподнившиеся рулою, и между ними длинные (пустые). Длину коротких трюмов принимают не менее половины длинных. При перевозке зерна на таких судах заподнивают все трюмы.

Длину трюмов, а следовательно, и динцевых перекрытий специализированных контейнерных судов принимают кратной длине стандартных контейнеров с учетом зазора между ними и набора переборок. На судах с горизонтальной грузообработкой поперечные переборки в грузовой части могут отсутствовать, и тогда длина динцевых перекрытий оказывается в несколько раз большей, чем на обычных сухогрузных судах. Шпация перекрытия на судах с горизонтальной грузообработкой определяется расстоянием между внутренними бортами.

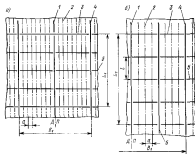


Рис. 8.20. Схемы набора днища в районе среднего танка наливных судов: а — при длине судна до 225—230 м; б — при длине судна более 225—230 м.

1 — вертикальный киль; 2 — поперечная балка; 3 — внутренний переборщик; 4 — продольная переборка; 5 — полор; 6 — продольный стрингер.

Конструктивные типы и система набора донных перекрытий. Большинство наливных судов построено с одинарным дном. Некоторые крупнотоннажные танкеры имеют двойное дно (см. рис. 3.16—3.17) с целью защиты внешней среды в случае повреждения донной обшивки от перевозимых нефти и нефтепродуктов. На нефтерудовозах в средних по ширине судна трюмах днище двойное, а в боковых — одинарное (см. рис. 3.13). Судна для перевозки массовых грузов имеют двойное дно на ширине 0,70—0,75 B между скалками цистермами.

На наливных судах длиной до 80 м для днища, как и для палубы, допускают применение поперечной системы набора вместо продольной. Днище всех специализированных судов большой длины, как правило, проектируют с продольной системой набора. Схемы набора днища танкера показаны на рис. 8.20. Наибольшее расстояние между флорами равно $l = L/200 + 3,0 \geq 3,75$ м при длине судна $L \leq 200$ м и $l = L/50 \leq 5,0$ м при большей длине. На днище перекрытия устанавливают три—пять флоров. На рудовозах и нефтерудовозах расстояние между флорами обычно равно двум шагам.

Вертикальный киль одинарного днища танкеров в зависимости от соотношения сторон перекрытия может быть обшито

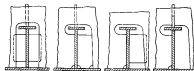


Рис. 8.21. Варианты stiffening продольных балок с флором на наливных судах.

беммой, т. е. разным высотой флоров (при длине судна до 140—150 м), или асимметрично, принашивая высоту флора в 1,7—2,0 раза. При установке донных стрингеров в плоскости разных стоек поперечных переборок их высота принимается равной высоте флоров или усиленного вертикального кила. Особой функцией вертикального кила и донных стрингеров на танкерах является образование вместе с отбойным дном, хвостовыми и рамными стойками переборок мощных вертикальных рам, помогающих бортовой обшивке вовлечь в совместную работу палубу и днище при общем изгибе судна.

Донные продольные балки. Донные балки основной набора наливных судов подвергаются действию поперечной и осевой от общего изгиба нагрузок. Висение поперечная нагрузка на днище, вызвана суммой статического и волнового давлений [см. формулу (7.5)], является расчетной в пустых при эксплуатации танках, например в балластных. В районе полностью загруженных танков расчетным может быть давление изнутри, равное разности противодавления жидкого груза и внешнего давления при положении судна на подходе волн [см. формулу (7.6)]. Размер продольных балок определяют по наибольшей нагрузке. При равенстве смежных пролетов и равной нагрузке продольные балки охватываются в условиях жесткой заделки на опорах. Момент сопротивления вычисляют по формуле (8.10), принимая $m = 12$ и $k_p = 0,2 + x/L$, где $0,2 \leq x/L \leq 0,4$; x — расстояние от середины до середины пролета балки.

Форма поперечного сечения донными продольных балок может быть различной. Поскольку определением для донных балок обычно является требование жесткой прочности, наиболее эффективны профили с развитым свободным пояском. Поэтому чаще всего применяют симметричный полособульб (см. рис. 8.15) или составной тавровый профиль (рис. 8.21). Ширину свободного пояса тавровых балок ограничивают, во-первых, требованием его устойчивости и, во-вторых, требованием мини-

нально возможной ширины выреза в стенке флюров для прохода балок.

Недостатками балок сварного таврового профиля являются высокая трудоемкость и стоимость их изготовления, особенно в случае применения полос, получаемых продольными распуском листового стали, вместо использования стандартных катанок. Целесообразна замена сварных тавров симметричными лодособудками при условии, что толщину их стенок не менее максимально допустимой для деталей внутри танков.

На крупнотоннажных танкерах длиной более 220—225 м и с минимальной высотой надводного борта, у которых определяющим требованием для поиска эквивалентного бруса становится обеспечение общей продольной прочности, выгодным может быть применение продольных балок из полосовой стали. Большая площадь их поперечного сечения при одинаковом с тавровой балкой моменте сопротивления позволяет перераспределить материал из обшивки в продольные балки, что упрощает технологию сварки листов обшивки и повышает качество сварных соединений.

Рамные балки днища танкеров. Размеры рамных днищевых балок устанавливают из условия местной прочности перекрытия, рассматривая его как систему взаимосвязанных ортогонально расположенных призматических балок. Требуемые моменты сопротивления флюров, вертикального киля и днищевых стрингеров определяют в зависимости от расчетной схемы (числа балок, граничных условий) и параметров относительной жесткости балок. Кроме прочности при изгибе флюры проверяют на прочность при срезе стенки вне района килей. Расчетное значение сжимающей силы в рассматриваемом сечении принимают из эпюры, построенной с использованием безразмерных реакций взаимодействия флюры с вертикальным килем и стрингерами, приведенных в таблицах Правил Регистра СССР.

Флюры, вертикальный киль и днищевые стрингеры на танкерах с одинарным дном делают в виде высоких составных тавровых балок. Высоту рамной балки (a см) с требуемым моментом сопротивления W_x ориентировочно можно определить по формуле $k = m_1 \sqrt{W_x/0,1a}$, где $m_1 = 1,10$ для усиленного вертикального киля и $m_1 = 1,30$ для флюра и стрингера; $k_{cr} \geq k_{min} = 0,025L + 6,5$ мм. Высоту днищевых рамных балок принимают не менее 1/7 пролета соответствующей балки, а высоту флюров в любом случае — не менее 2,5 высоты продольных балок.

Площадь поперечного сечения свободного пояса рамной балки (f , см²) можно определить, используя формулу (1.7) проф. И. Г. Бубнова $b(f + \alpha/a) \geq W_x$, где $k = a$ см; $\alpha = 0,10a_{cr}$ — площадь поперечного сечения стенки балки за вычетом ослабления ее вырезами, см²; $k \approx 4,0$ для усиленного вер-



Рис. 8.22. Подкрепление вертикального киля (а, б) и флюров (в, д) на танкере.

тикального киля и $k \approx 3,5$ для флюров. Отношение ширины симметричного свободного пояса к толщине у всех рамных балок по соображениям устойчивости равно $b/a_s \leq 100/\sqrt{a_s}$. Практически это отношение принимают равным 12—18 для пояса флюров и 14—20 для пояса вертикального киля.

Стенку рамных балок для обеспечения плоской формы изгиба подкрепляют бракетами устойчивости. По стенке флюров бракеты устанавливают с одной стороны на расстоянии одна от другой не более 3 м и обязательно в районе концов оверных килей флюров. По стенке вертикального киля посередине между флюрами бракеты устойчивости необходимо устанавливать с обеих сторон (рис. 8.22). Дополнительно стенку рамных балок подкрепляют вертикальными и (или) горизонтальными ребрами жесткости с целью обеспечения устойчивости стенок балки. Вертикальные ребра флюров устанавливают в плоскости продольных балок и эти ребра обеспечивают им опору (см. рис. 5.2 и 8.22).

Соединения днищевых балок. Конструкция соединения балок набора между собой и с концевыми опорами должна обеспечивать достаточные и передачу сосредоточенных сил и моментов. Необходимые по технологическим соображениям вырезы, разрывы, уменьшение площади и другие изменения формы концевых сечений балок должны быть минимальными, чтобы концентрация напряжений была минимальной. Продольные балки, работающие под действием лонжеронных осевых нагрузок, рекомендуется делать непрерывными даже при пересечении с поперечными поперечными переборками. На судах длиной 150 м и более это требование обязательное.

При пересечении с флюрами или килями в других специально-пронизанных судов продольные балки не разрезают. Форма выреза в стенке флюра и обычные конструкции соединения с ним продольных тавровых балок показаны на рис. 8.21. Аналогично соединяют с флюром продольные балки других профилей. Размеры и детали вырезов во флюрах приведены в описанных стандартах.

Днищевые балки танкеров, разрезанные на поперечных переборках, соединяют с ними с помощью вертикальных килей,

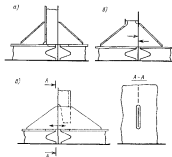


Рис. 8.23. Соединение разнородных длинных продольных балок с поперечной переборкой с помощью приставных книц (а, б) или основной плиты (в).

устанавливаемых с обеих сторон переборки (рис. 8.23). Если поперечная переборка имеет горизонтальный набор, то кница от днищевой продольной балки идет до ближайшей горизонтальной балки и соединяется с ней. Вместо двухсторонних книц рекомендуют установку в плоскости разрезаемых продольных балок одной непрерывной кницы, пропускаемой через соответствующую прорез в переборке и обвариваемой по периметру (см. рис. 8.23). Однако эти конструкции не нашли применения из-за трудностей исполнения. Попыток к таким вариантам, по крайней мере с одной стороны, приходится приваривать кница после их пропуска через переборку или не устанавливать его вовсе, увеличив размер книц.

На судах длиной более 80 м на 0,4L в середине разрезаемых днищевых продольных балок, учитывая большее растягивающее напряжение, следует приваривать торцами к поперечным переборкам, исключая недопустимую разнородность. Наличие разнородности составленных на переборке балок увеличивает вероятность появления трещины в обычных переборках. На судах длиной более 150 м, как указывалось, продольные днищевые балки требуются, не разрезая их, пропустить через предварительно сделанные в переборке отверстия до границы

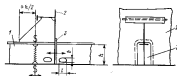


Рис. 8.24. Соединение непрерывных продольных балок (1) с поперечной переборкой (2) и задельной отверстиями алюминия (3).

сечения или блока. Вырезы в переборке заделывают непроницаемо плавящим (рис. 8.24). Монтажный стык стенки и пояска продольных балок допускается совместить на расстоянии от переборки не менее 200—300 мм при условии перекрытия монтажного шва кницей. Нижне стыковой шов пояска следует отвести от стыка стенки балки на расстояние не менее половины ее высоты или 150 мм.

Преимуществом применения продольных балок сплошного профиля является простота конструкции пересечения с непроницаемыми поперечными переборками при незначительном коэффициенте концентрации напряжений в районе монтажного стыка балок. Недостатком же балок полостного профиля является большой расход материала на обеспечение их прочности и устойчивости, что приводит к увеличению массы перекрытия на танкерах длиной менее 200—225 м.

При непрерывном проходе днищевых продольных балок через поперечную переборку необходимо исключить возможность заклинивания нефтепродуктов из танка в соседнее пустое помещение по каналам между стеной балки и обшивкой внизу или между стенкой и ее свободным концом сверху. Иначе в соседних помещениях может образоваться взрывоопасная газобрызгивная смесь.

Соединение днищевых балок рамного набора выполняется стыком как по длине самой балки, так и с расположенными в ее плоскости рамными балками примыкающих переборок, например флоров с рамными шпангоутами и рамными стойками продольных переборок, вертикального кая и днищевых стрингеров с соответствующими рамными стойками поперечных переборок. Накрывающие соединения стенок рамных балок исключаются.

Кницы в соединениях рамных балок могут быть сварными (они образуют плавный переход между балками) или пристав-

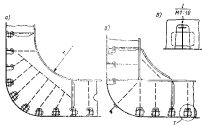


Рис. 8.25. Соединение флора и рамного настилката танкового судна с помощью книц: а — ватерной; б — приставной.

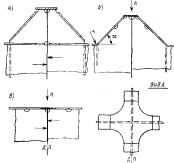


Рис. 8.26. Соединение флора с усиленным (а, б) и обыкновенным (в) вертикальным килем на танковом судне ($\alpha = 45^\circ$).

ники и обязательно с поясками (рис. 8.25). Высота книц и радиус скругления свободного пояска, если оно делается, принимаются не менее высоты меньшей из соединяемых балок. Пояски приставных книц у их концов срезают «на ус». В районе окончания книц стенок рамных балок подкрепляют бракетами устойчивости, установленными по нормали к свободному потоку балок.

Конструкция соединения флоров с усиленным и обыкновенным вертикальным килем показана на рис. 8.26. При пересечении их с поперечной переборкой на палубных судах длиной 150 м и более вертикальный киль не разрезают, что усложняет последующее обеспечение непроницаемости переборок. Конструкция этого соединения несколько упрощается, если разрезать поперечную переборку и составлять ее части на стенках вертикального кила и рамной стойки и ДП (рис. 8.27).

Двойное дно палубных судов. После ряда аварий крупнотоннажных танкеров («Торж Каймон», «Амико Кадис» и др.) с большим загрязнением нефтью водной среды появилась необходимость ее защиты. В октябре 1983 г. вступила в силу Международная конвенция 1978 г. и Протокол 1978 г. по предотвращению загрязнения с судов. С целью уменьшения разлива нефти в случае повреждения наружного днаща может быть установлено второе дно.

Для улучшения экологических условий высота двойного дна 2 м (в случае его применения) является достаточной. Двойное дно применено на танкерах типа «Победа» (см. рис. 3.17) и других судах. Наклон второго дна под углом $3-4^\circ$ к ОП делают для стекания груза и приемных затрубных грузовой и авиационной систем. Расстояние между флорами на длине грузовой танков принимают до четырех шпаций; в оконечностях оно составляет две шпации. Между флорами к вертикальному килю с обеих сторон устанавливают бракеты шириной до ближайших продольных балок.

Особенности конструкции днища судов для перевозки навалочных грузов. Все суда, перевозящие массовые грузы, и комбинированные суда имеют двойное дно только с продольной системой набора. Вместо продольных балок допускается установка облегченных днащевых стрингеров. Рекомендуется принимать расстояние между флорами при перевозке тяжелой руды не более двух шпаций. На судах для массовых грузов по ширине корпуса двойное дно ограничено скуловыми штепселями (рис. 8.28).

Расчетное давление на днище вычисляют посередине треугольника как разность внешнего давления и давления груза. Размеры днащевых связей определяют так же, как и для обычных сухогрузных судов, но с учетом размещения груза по длине судна и граничных условий рамных балок.

Вопросы для повторения

1. Какие функции выполняет алмаз на судне?
2. Укажите нагрузки, действующие на днище переборок.
3. Назовите конструктивные особенности одностороннего дна на сухогрузных судах.
4. Назовите конструктивные особенности в области применения двойного дна с заварочной и с продольной системами набора.
5. Какие требования предъявляются толщине его настила?
6. Раскажите о балках рамы набора двустороннего переборки и требования, предъявляемые к их размерам.
7. В чем различие между двумя видами настила, какие требования к нему предъявляются и как он оформляется конструктивно?
8. Какие требования должны удовлетворять размеры секционных, водонепроницаемых и фрагментных флотов?
9. В каких районах на днище судна могут устанавливаться открытые формы и как они конструктивно оформляются?
10. Назовите условия работ продольных балок основного набора и какие требования предъявляются к их размерам?
11. Как оформляются конструктивные узлы переборки продольных балок основного набора с водонепроницаемыми формами?
12. Назовите конструктивные особенности дна наливных судов.
13. Какие требования предъявляются к размерам и к конструкции соединений днища продольных балок с поперечными переборками на танкерах?

ГЛАВА 6. БОРТОВЫЕ ПЕРЕКОРЫТИЯ

§ 36. Борт сухогрузных судов

Общие положения. Воксовые стенки корпуса на всей длине любого судна называются бортами. Левый и правый борта судна соединяются на специальных концевых балках — штевелях. Борты судна, по высоте простирающиеся от крайнего междулонного листа до ВП — важные структурные части корпуса судна. Вместе с днищем они обеспечивают его непроницаемость, форму и общую жесткость. Форма поверхности бортов по длине и высоте корпуса изменяется от плоской и средней до сложной извилистой и оконечностях, образуя необходимые для непроницаемости плавные обтекаемые обводы судна. Построение теоретического чертежа позволяет наглядно представить форму бортовой поверхности. В средней части морского судна на длину до 40 %, а иногда и больше, имеют цилиндрическую вставку с одинаковым поперечным сечением на ее длине. Борты транспортных судов в этом районе обычно плоские вертикальные. На судах открытого типа с большими палубными вырезами плоские борты могут быть наклонными (с развалом).

Борты судна разбивают на перекрытия по длине — поперечными переборками, а по высоте — палубами и платформами. Размеры бортовых перекрытий по длине равны длинам, а по высоте определяются высотой трюмов и танков (табл. 9.1). Некоторые суда имеют высоту трюма до 7,0—7,5 м.

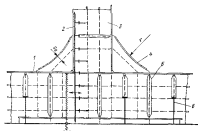


Рис. 8.27. Вариант соединения вертикального листа с верхней переборкой и рамой стоек с помощью продольных балок.

1 — вертикальный лист; 2 — ребра жесткости; 3 — рама стоек; 4 — продольная балка; 5 — балка усиления; 6 — фланг.

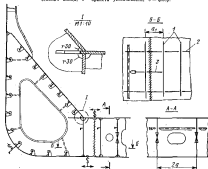


Рис. 8.28. Соединение двойного дна со скелетной частью на судне для перевозки наливных грузов.

1 — двойная структура; 2 — фланг; 3 — балка.

Таблица 91. Высота трюмов в танках суховозных судов (в м)

Судно	Тюм	Танка
Для генерального трюма	4—6,0	3,5—4,0
Универсальные	3,2—6,0	3,0—4,5
С горизонтальной грузоподъемной	3,5—6,0	3,5—6,0
Рефрижераторные	2,8—3,5	2,3—2,8

Суховозные суда традиционных типов имеют одинарные, а некоторые лесовозы, лесовозы-пакетовозы и специализированные суда — двойные бортовые перекрытия (см. рис. 3.5 и 3.9). Внутренние борта образуют типичную форму грузовых помещений, удобную для размещения грузов, и помогают в обеспечении необходимой жесткости корпуса на судах с большими палубными вырезами. Междубортные пространства создают дополнительный запас плавучести. Его также используют для размещения необходимых цистерм.

Бортовые перекрытия состоят из бортовой наружной обшивки и подкрепляющих ее балок. Балки, расположенные в вертикальных поперечных плоскостях, называют шпангоутами, а расположенные в горизонтальных плоскостях или по нормали к обшивке борта — бортовыми продольными балками и бортовыми стрингерами в зависимости от их назначения.

Расчетные нагрузки. Бортовые перекрытия постоянно подвергаются непосредственному воздействию внешней среды (моря), а также усилиям при общем изгибе судна, выполненной роль стелка заливных бруса. Суда, плавящиеся во льдах, воспринимают значительные дополнительные (лежачие) нагрузки, а швартуясь в море — большие локальные силы в зоне контакта с бортом другого судна. В носовой части скоростных судов значительные нагрузки возникают от ударов волн и развал бортов. Борта судна, будучи вместе с переборками основными опорными конструкциями для палуб, воспринимают также большую часть палубной нагрузки.

Внешняя нагрузка на конструкции борта со стороны моря равна сумме гидростатического и волнового давления [см. формулу (7.5)].

Системы набора и шпанги. Отношение сторон опорного контура бортовых перекрытий в трюмах обычно равно $l/A_{\text{тр}} \approx 3 \div 4$, а в танках — $l/A_{\text{тан}} \approx 5 \div 6$, т. е. перекрытия вытянуты вдоль судна. Основная нагрузка действует по нормали к поверхности бортовой обшивки. Известно, что в перекрытиях, работающих на изгиб, по соображениям экономии массы конструкции балки набора целесообразно устанавливать парал-

лельно короткой стороне опорного контура, т. е. для бортов — вертикально. Следовательно, исходя из условий обеспечения местной прочности бортовых перекрытий для них наиболее применима поперечная система набора. Эта система набора бортов отличается эффективной и при эксплуатации судов во льдах.

У крупнотоннажных специализированных судов, имеющих яруги на тикон воде (обычно у судов с МКО в корме), наибольшие сжимающие напряжения действуют в верхних связях эквивалентного бруса. Для обеспечения устойчивости связей ВП и бортовой обшивки в районе верхнего танка таких судов применяют продольную систему набора (рис. 9.1). Нижне верхнего танка сжимающие напряжения от общего изгиба существенно меньше, и поэтому борт имеет поперечную систему набора, как на обычных судах.

В оконечностях судна на длине примерно 0,20L от соответствующего перпендикуляра, включая район МО, расположенного в корме, бортовые перекрытия суховозных судов обычно подкрепляют по поперечной системе набора. В условиях быстро меняющейся формы обвода и шпангоута в оконечностях конструкции борта с поперечной системой более технологичны.

Шпангоуты устанавливают в плоскости флора. При продольной системе набора днища в плоскости шпангоутов, не совпадающих с флорами, размещают складные клады, а внутри дна два — складные brackets (см. рис. 8.19). Таким образом, шпангоуты являются частью поперечных замкнутых или ползамкнутых шпангоутных рам. Форма шпангоутных рам придает судну необходимые обводы, а прочность и жесткость поперечных балок, составляющих рамы, обеспечивает местную прочность соответствующих переборок и вместе с поперечными переборками — поперечную прочность корпуса.

Расстояние между шпангоутами, на которых установлены смешанные балки основного набора, называют конструктивной (матричной) шапкой. В пределах цилиндрической атаки

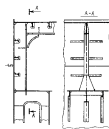


Рис. 9.1. Продольная система набора борта в верхнем танке.

для шпангоутов и в пределах вертикальных бортов для горизонтальных балок расстояние между соответствующими балками, измеренное по наружной обшивке, совпадает с размером практической шпации. В районе криволинейной поверхности борта фактическое расстояние между смежными балками, измеренное по наружной обшивке, оказывается больше конструктивной шпации. Если в Правилах Регистра СССР для конкретных балок не указано, что применять за расчетную шпацию, то при расчете момента сопротивления используется практическая шпация, значение которой в конструкции должно соответствовать отраслевому стандарту.

Размеры бортовых балок. В составе корпуса судна под действием нагрузок шпангоутные рамы работают как единая взаимосвязанная конструкция. В практических расчетах, учитывая принятые допущения, некоторую неопределенность в значении и распределении расчетных нагрузок на звенья шпангоутных рам, шпангоуты часто рассматривают как изолированные балки с предполагаемыми граничными условиями. Такой подход оправдывается и тем, что за расчетный для них, как правило, принимают изгибающий момент, действующий в пролете, который мало зависит от опорных моментов, меньше их по абсолютному значению и поэтому способствует снижению металлоемкости балок бортового набора.

Концы у концов шпангоутов увеличивают расчетное сечение в районе опор и в результате, несмотря на большие опорные изгибающие моменты, нормальные напряжения не превышают допустимых в пролете. Концы соединения шпангоутов с палубными балками сверху и днищевыми вниз воспринимают передатывающие силы и обеспечивают необходимую жесткость шпангоутных рам.

Момент сопротивления шпангоутов с присоединением пояском при поперечной системе набора бортов каютдек (и см³) по формуле (8.10), в которой ρ — интенсивность расчетной нагрузки для соответствующего шпангоута (в трюме, в танке, в деке), определяемая посередине его длины согласно формуле (7.5), а для: $m = 14,5$; 16 и 17,5 — соответственно для шпангоутов в трюме одно-, двух- и трехпалубных судов; $k_0 = 1,0$ и 0,8 соответственно для трюмных и танковых шпангоутов многопалубных судов.

При продольной системе набора размеры горизонтальных бортовых балок, соединяющихся на рамные шпангоуты, рассчитывают из условия действия опорных изгибающих моментов, и поэтому для них в формуле (8.10) принимают коэффициент момента $m = 12$, а $k_0 = 0,45 + 0,55$ в зависимости от расположения балок по высоте борта. Если угол между стенкой балки и обшивкой $\alpha > 15^\circ$, момент сопротивления, полученный по формуле (8.10), умножают на коэффициент $1/\cos \alpha$.

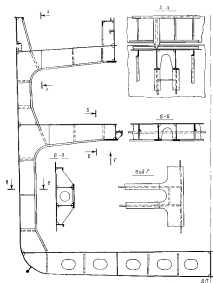


Рис. 9.2. Поперечные сечения корпуса судна по изолированной шпангоутной раме.

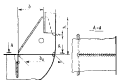


Рис. 9.3. Скуловой соединитель шпангоута с флером.

Дополнительно принимают конструктивные меры, предотвращающие завалавание балки при ее косом изгибе.

Конструкция борта. Поперечная система набора бортовых перекрытий конструктивно реализуется в виде системы обыкновенных шпангоутов, систем рамынок шпангоутов и системы распорок («струнных») бансов.

Система обыкновенных шпангоутов предусматривает подкрепление бортовой обшивки одинаковыми балками и применяется в районе трюмов сухогрузных судов без ледовых усилений. В плоскости концевых бансов, в танках посередине длинных грузовых люков необходимы усиления (рамынки) шпангоутов. В последнем случае рамные шпангоуты входят в состав одностенных (иногда стропенных) консольных рам, поддерживающих продольные комингсы грузовых люков (рис. 9.2, сеч. В—В).

Систему рамных шпангоутов применяют для подкрепления борта в районе МО в ледовых усилении (см. § 38). Система с «струнными» бансами, когда-то применявшаяся в районе трюмов и загромазжавшая их оверками для шпангоутов «холодными» бансами, в последние годы сохранялась только в районе люков судна.

Нижние комы шпангоутов соединяют с длинными балками через горизонтальный или наклонный междупольный лист при помощи скуловых книц. Высоту скуловой кницы над настилом второго дна принимают не менее 0,1 высоты трюма (рис. 9.3). В любом случае верхняя кромка скуловой кницы должна достигнуть или перекрыть сечение шпангоута, в котором наибольший момент по абсолютному значению становится равным моменту в пролете. При горизонтальном междупольном листе момент сопротивления поперечного сечения скуловой кницы с присоединенным поперечным изгибом обшивки и с учетом сварных швов (см. сеч. А—А на рис. 9.3) требуется в 2,5 раза больше, чем в пролете шпангоута. Эти требования определяют минимальный размер горизонтальной кромки скуловой кницы.

Шпангоуты из несимметричного катаного профиля соединяют со скуловой кницей, выходящей или в ее плоскости («в замок»), подобно соединению балок бракетного флора с бракетами в двойном дне (см. рис. 8.13). Шпангоуты симметричного



Рис. 9.4. Соединение скуловой кницы с наклонным междупольным листом ($\alpha = 30^\circ$).



Рис. 9.5. Соединение фиксированного листа (1) кастыла второго дна с внешним скуловым кницом (3).

профили соединяют со скуловой кницей встык со сдвигом стыковых соединений стенок и полки на расстоянии не менее 150 мм.

Конструкция соединения скуловой кницы с наклонным междупольным листом показана на рис. 9.4 и 9.5. Устойчивость скуловой кницы обеспечивается фланцем или пояском со свободной кромки. Поясок скуловой кницы увеличивается по ширине в два раза, а в носу судна, в месте соединения с настилом второго дна, — в три раза. Допустима перепайка скуловой кницы с фестонным настилом второго дна (см. рис. 9.4, 6). Скругление свободной кромки скуловой кницы и соединение ее пояском встык с фестонным настилом второго дна наиболее благоприятны для работы этого узла (см. рис. 9.5).

Верхние концы трюмных и заливочных шпангоутов соединяют с расположенными в их плоскости бансами при помощи обычных равнобоких книц. Более приемлемые бансовые соединения балок с одним или двумя допустимыми (до 25—40 мм) технологическими зазорами и с приставными кницами (рис. 9.6). Однако в районах интенсивной вибрации, ледовых нагрузках, локальных нагрузок и на судах, швартуемых в порте, технологические зазоры не допускаются.

Накробные кницы соединяют, несмотря на кажущуюся прочность конструкции, затруднительно качественно выполнить при сборке секций из-за близкого расположения к настилу палубы и к бортовой обшивке соответствующей кромки кницы. Поэтому работоспособность таких узлов ниже, чем с приставными кницами.

В случае продольной системы набора палубы шпангоутов, расположенные между рамными бансами, доводят до настила

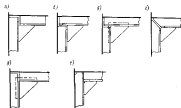


Рис. 9.6. Соединение продольной шпангоутом.

палубы и кишки соединяют с ближайшей продольной балкой (рис. 9.7). Более рациональные варианты а и в, особенно если крайняя палубная продольная балка принадлежит бортовой секции. Прямые варианты иногда в этих узлах накрывают кишки (вариант б) не обеспечивают каких-либо преимуществ [6]. Вариант г имеет «жесткую» точку и допускается лишь при толщине настила палубы не менее 20 мм и при отсутствии подпалубной шкатулки. Кишки соединяют с палубной продольной балкой кольцевым швом на ее стенке вне свободного пояса балки.

В конструкции соединения тросового и твиндечного шпангоутов на нижней палубе раньше обеспечивали непроницаемость настила. В частности, при закрытии грузовых люков деревянными лючковыми и брезентовым настилом нижних палуб предусматривался непроницаемый. Поэтому шпангоуты на нижних палубах, как правило, разрезали и присоединяли к палубному перекрытию кишками (рис. 9.8, а и в). Если же шпангоуты перекрывали

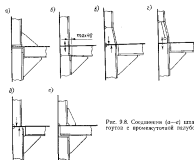


Рис. 9.8. Соединение (а-е) шпангоутов с прямоугольной палубой.

через соответствующие вырезы в настиле палубы, то эти вырезы заделывали непроницаемо.

С введением закрытия грузовых люков металлическими крышками отпала необходимость в непроницаемой заделке отверстий в палубах ниже палубы надводного борта, если они не перекрывают шкатулками. Это обстоятельство упростило конструкцию соединения шпангоутов с нижними палубами и платформами. Тросовый и нижний твиндечный шпангоуты при существенной разности в размерах сечения могут соединяться непосредственно между собой ниже или выше палубы (рис. 9.8, б и г). Возможна и другая конструкция твиндечных шпангоутов с промежуточной палубой при помощи переходной астава (рис. 9.8, д). Если опорные концы отсутствуют, размер сечения шпангоутов в твиндеке увеличивают, так как определяющими становятся опорный изгибающий момент или перерезывающая сила (рис. 9.8, е). В такой конструкции необходим полный провар соединения шпангоута с настилом палубы.

В соединении рамных шпангоутов с рамными брусом (полу-брусом) технологические зазоры не допускаются. Кишки могут быть ластовыми или сварными (рис. 9.9). Размеры катетов приваренных кишек должны быть не менее чем высота стенки меньшей из соединяемых балок. Рамные балки рекомендуется оклеивать со скруглением свободной крошки. В местах окончания илих стенки рамных балок подкрепляют ребрами, а

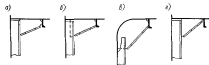


Рис. 9.9. Соединение (а-д) не соединяемых с брусом шпангоутов с палубой при продольной системе ее набора.

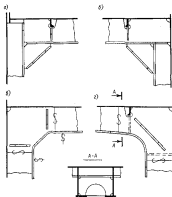


Рис. 9.9. Бесконтурное соединение разных балок: а и б — с помощью крестообразных швов; в и г — с помощью сварных швов.

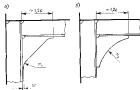


Рис. 9.10. Уменьшение концентрации напряжений скруглением свободной кромки плиты: а — в районе ее концов; б — по всей длине плиты.
 $r_0 = 0,25$ м; $r = 1,5$ м.

старенные консольные рамы — бракетами.

Минимальный размер катета кинца определяют (в см) из условия ее равнопрочности с бимсом по формуле

$$c = \pi \sqrt{W/0,1s}, \quad (9.1)$$

где π — коэффициент по Правилам [17] в зависимости от вида кинцевого соединения; W — момент сопротивления бимса, см³; s — толщина кинца, мм. При отгибе по свободной кромке фланца размер катетов кинца можно уменьшить на 15 %.

Кроме прочности необходимо обеспечить устойчивость кинца отгибом фланца или приваркой повска, что непременно требуется у кинца с катетом более 45.

Для качественной приварки кинца к балкам по ее концам необходимы притупления (срезы острых углов), равные 10—20 мм. Уменьшить концентрацию напряжений в кинцевом соединении можно скруглением свободной кромки плиты по всей ее длине или только в районе концов (рис. 9.10) при условии увеличения размера катета, полученного по формуле (9.1).

В некоторых конструктивных узлах (в рефрижераторных помещениях, в надстройках и др.) применяют бесконтурные соединения балок (рис. 9.11). Установка диагонального ребра повышает дееспособность бесконтурного соединения, однако их несущая способность и жесткость значительно ниже, чем у кинцев соединений таких же балок.

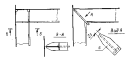


Рис. 9.11. Бесконтурное соединение балки с бимсом.

§ 37. Борт наливных судов

Характеристика бортовых перекрытий. Наливные суда имеют большую, чем сухогрузные, длину цилиндрической вставки (до 0,5 L), что допустимо при сравнительно небольшой относительной скорости ($Vr = 0,16 + 0,20$), характерной для этих судов. Бортовые перекрытия на длине цилиндрической вставки аэродинамичны. На круизных танкерах общая длина грузовой танковой составляющей 0,60—0,75 L и даже больше.

Борт наливных судов в отличие от борта сухогрузных судов дополнительно подвергается действию нагрузки изнутри — со стороны жидких грузов или балласта. Однако эту нагрузку принимают в качестве расчетной только для внутренних бортов на судах с двойными бортами. Размеры элементов конструкции наружного борта определяют, как и у сухогрузных судов, по внешней нагрузке. Кроме поперечной нагрузки бортовые пере-

крития испытывают условия в своей плоскости от общего изгиба судна.

В пределах длины грузовых танков систему набора и конструкцию перекрытий сохраняют одинаковыми. Длина бортовых перекрытий равна длине декинских. Высота бортовых перекрытий определяется высотой борта судна. Танкеры малых и средних размеров ($L < 180$ м) имеют поперечную либо продольную систему набора бортов. Поперечная система набора бортов кроме технологических преимуществ имеет эксплуатационные преимущества, так как благоприятствует стечу жидкого груза при разгрузке судна.

Наличие суда длиной более 180 м рекомендуется строить с продольной системой набора бортов. Достоинства такой конструкции борта состоит в том, что она имеет меньшую массу балок, обеспечивает устойчивость верхнего и нижнего участков бортовой обшивки, аналогична конструкции декинских и палубных перекрытий. Недостатки конструкции борта с продольной системой набора: сложность и высокая стоимость изготовления, большое количество титразмеров бортовых продольных балок, повышенная коррозия этих балок с нижней стороны.

Бортовые балки танкеров. Размеры поперечного сечения балок зависят от конструкции борта (системы набора) ввиду различия допускаемых напряжений, от расчетной нагрузки, пролетов, шпаций и граничных условий. При поперечной системе набора расстояние между флорами кратно шпации. За расчетный пролет шпангоутов принимают расстояние между бортовыми стрингерами (не более 3,5 м) или между нижними стрингером и средней скуловой кишкой. В последние годы с целью снижения трудоемкости и стоимости изготовления конструкций борта (при некотором увеличении массы) предусматривают не более двух бортовых стрингеров даже в тех конструкциях, для которых Правила Регистра СССР рекомендуют три стрингера.

Момент сопротивления шпангоутов, как и на сухогрузных судах, вычисляют по формуле (8.10), принимая $m = 11$ и $k_p = 0,7$. Учитывают наибольший износ балок набора танкеров по сравнению с износом балок сухогрузных судов. Если расстояние между поперечными переборками превышает 10 м, то в плоскости флоров и бимсов и при поперечной системе набора устанавливают рамные шпангоуты. В этом случае момент сопротивления остальных шпангоутов может быть уменьшен на 10 %.

Бортовые стрингеры служат промежуточными практически несмещающимися опорами шпангоутов. Момент сопротивления стрингеров вычисляют по той же формуле (8.10), заменив в ней шпацию на часть высоты борта, поддерживаемую рассматриваемым стрингером. Пролет стрингера принимают равным расстоянию между поперечными переборками, включая кишку. Ко-

эффициент допускаемых напряжений $k_p = 0,50$, а коэффициент момента $m = 18,4; 29; 37$ — соответственно при отсутствии распорок, при одной, двух или трех распорках.

При продольной системе набора бортов танкеров основными являются горизонтальные балки, опирающиеся на рамные шпангоуты и поперечные переборки. Момент сопротивления продольных балок вычисляют по формуле (8.10), принимая $m = 12$ и $k_p = 0,45$ для балок в верхней части борта на $0,25 D$ от палубы и в нижней части на $0,25 D$ от дна. Для продольных балок посередине высоты $k_p = 0,50$. Для уменьшения числа титразмеров балки группируют по 3, а на кранотоннажных судах даже по 5, и расчетную нагрузку определяют на уровне средней из них. Для трех верхних балок нагрузку вычисляют на уровне нижней из них, учитывая таким образом ее большую декинность вверху танка. Кроме местной прочности три верхних и три нижних продольных балки проверяют на устойчивость по формуле (5.11).

Момент сопротивления рамных шпангоутов вычисляют по формуле (8.10), принимая вместо обычной шпации расстояние между рамными шпангоутами b и $k_p = 0,50$. Дополнительно проверяют прочность стенки рамного шпангоута на срез, обеспечивая площадь поперечного сечения с учетом вырезов (в см²) не менее

$$f_{ср} = (10k_p a / \delta_c \sigma_s) + 0,1 h_{ср} k_p, \quad (9.2)$$

где $k_p = 0,65$; $\sigma_s = 0,57 \sigma_s$; $h_{ср}$ — высота сечения балки, см; δ_c — поправка на коррозию, мм. Для рамного шпангоута коэффициент момента в формуле (8.10) принят равным $m = 21; 29; 45$ или 42, а в формуле (9.2) $k = 0,33; 0,23; 0,21$ — соответственно при отсутствии распорок, при одной, двух или трех распорках по высоте борта.

Горизонтальные распорки в бортовых танках вызывают в основном работу бортовые стрингеры и шельфы продольных переборок при поперечной системе набора борта, а также рамные шпангоуты и рамные стойки — при продольной системе, что позволяет уменьшать размеры балок и, как следствие, снижать их металлоемкость. Если бортовые танки пустые, распорки подвергаются сжатию.

Размеры поперечного сечения распорок должны удовлетворять требованиям прочности на сжатие и устойчивости. Площадь поперечного сечения распорки по условиям прочности вычисляют (в см²) по формуле

$$f = (10 \delta_p a / 0,25 \sigma_s) + 0,05 b k_p, \quad (9.3)$$

где a — полусумма пролетов шпангоутов выше и ниже рассматриваемой распорки, м; b — периметр поперечного сечения распорки, см. Нижнее допускаемое напряжение при сжатии

($k_x = 0,25$) обусловлены тем, что в распорках, жестко связанных с балками, при деформации шпангоутных рам могут возникнуть неэластичные изгибы.

Минимальный момент инерции поперечного сечения распорки (в см^4) получен из условия $\sigma_x \geq 2,4 \sigma_y$ — это соответствует $\sigma_{кр} = (0,97 \div 0,98) \sigma_y$ — и определяется по формуле

$$I = 0,012 \sigma_y R^2 l_{\text{ср}} \quad (9.4)$$

где $l_{\text{ср}}$ — длина распорки, равная расстоянию между свободными поперечными рамными балками борта и продольной переборкой, м; F — площадь поперечного сечения распорки по формуле (9.3); σ_y — коопрака к моменту изгиба на коррозии.

В проекте судна размеры бортовых балок сохраняются на всей длине грузовых танков, если в соответствии с местными условиями не требуется усиления набора. Кроме расчетных предусмотрены минимально допустимые размеры рамных балок, обеспечивающие необходимую жесткость конструкции. Строительная толщина всех конструктивных элементов (стенки и поперка балок, киля, бракет, ребер) внутри грузовых танков не допускается меньше $\delta_{\text{нп}} = 0,025 L + 6,5$ мм.

Конструкция борта танкеров. Основные шпангоуты при поперечной системе набора и продольные балки, если не все, то расположенные в верхней части борта, подбирают по моменту сопротивления в соответствующем сортаменте профильной стали с учетом минимально допустимой на танкерах толщины конструктивных элементов. При необходимости балки основного набора делают составными, комбинируя профильную и листовую сталь, подобно длинным балкам. Поперка составных горизонтальных бортовых балок целесообразно смещать относительно стенки вниз, чтобы уменьшить на них остаток переозонных грузов. В стенке горизонтальных балок необходимы шпигаты, позволяющие снизить скопление воздушных пузырей и тем самым уменьшить интенсивность коррозии.

Размеры элементов сечения бортовых рамных балок определяют по требуемому моменту сопротивления аналогично водобой сечению флоров с использованием формулы проф. И. Г. Бубнова для тавровых балок (см. § 35). Свободный поперек бортовых стрингеров обычно работает на растяжение. Однако устойчивость его и эффективность бортовых стрингеров в целом должны быть обеспечены, т. е. исключено замятие балки из-за асимметрии поперка.

Верхние концы основных шпангоутов закрепляют на палубе так же, как на ВП сухогрузных (см. рис. 9.7). Нижние концы основных шпангоутов соединяют в замок, а иногда и внахлест со скрученными концами. Для удобства сборки и кройки скрученной кишки, присоединяемой к скрученному поперку, делают неболь-

шие полукруглые или овальные вырезы. Свободный поперек по концам срезают «на ус» и к поперку днищевой балки не приваривают.

Рамные шпангоуты соединяют с флорами и рамными бимсами при помощи приставных или аварных жин (см. рис. 8.5). При продольной системе набора борта скрученный попер чаще подкрепляют скрученными бракетами (не менее двух на расстоянии между флорами). В результате остаток груза не задерживается на скуле, а стекает к приямным патрубкам заливной системы.

Конструкция соединения бортовых балок основного набора с поддерживающими их рамными балками идентична конструкции соединения длинных продольных балок с флорами. Соединение пересекающихся балок может быть непосредственным или с помощью заделочных планок. В районе присоединения распорных бимсов, где действуют большие сосредоточенные силы, отверстия в стенке рамных балок (бортовых стрингеров, рамных шпангоутов) заделывают планками. Стенку рамных балок подкрепляют ребрами жесткости, а в местах сосредоточенных сил — бракетами (рис. 9.12).

Распорки выполняют составными из профильной стали и обязательно открытого поперечного сечения. Чтобы исключить возможность сосредоточенные взрывоопасной смеси газов, не допускается канальбы закрученные полосты. Форму поперечного сечения распорки и распределение материала в ней выбирают из условия обеспечения минимального момента инерции — не менее получаемого по формуле (9.4).

Конструкция соединения распорок с балками рамного набора выполняется с учетом передачи больших сосредоточенных сил. Верхний наиболее развитый поперек распорки располагают на уровне стенки бортового стрингера при поперечной и на уровне горизонтальной балки при продольной системе набора (см. рис. 9.12). В последнем случае на этом же уровне по стенке рамного шпангоута с обеих сторон устанавливают бракетки устойчивости. На уровне нижнего поперка распорки по стенке рамного шпангоута размещают двусторонние ребра жесткости или бракетки устойчивости. Для надежного присоединения торцовых

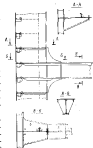


Рис. 9.12. Бракетки устойчивости рамного шпангоута в работе присоединения распорок

сечений распорки и рамным балкам в плоскости их концов обычно устанавливают фигурную бракету, а также одну или чаще две вертикальные клинги на каждом конце распорки.

Двойной борт наливных судов. Некоторые современные наливные суда по экологическим соображениям имеют двойные борты с продольной (танкеры типа «Победа») или с поперечной (танкер «Дмитрий Медведев») системой набора, расположенного в междубортном пространстве. В двойных бортах вместо рамных шпангоутов в плоскости формы устанавливают пропаяемые диафрагмы, а вместо бортовых стрингеров при поперечной системе набора — платформы. Для доступа ко всем частям двойного борта в диафрагмах и платформах кроме их концевых участков делают вырезы, расположенные длинной осью параллельно бортовой обшивке.

Суда с двойными бортами имеют и эксплуатационные преимущества, заключающиеся в снижении затрат по очистке танков от остатков груза. Внутренние борты, естественно, увеличивают массу корпуса.

§ 38. Усиление бортового набора

Ледовые усиления. Конструкция корпуса судна, плавающего во льдах, подвергается значительным статическим и динамическим нагрузкам, превышающим нагрузки в свободной ото льда воде, а также интенсивной коррозии и износу. В зависимости от района и периода эксплуатации судов предусмотрено [17] разделение ледовых усилений корпусов на шесть категорий: УЛА, УЛ, Л1, Л2, Л3 и Л4. Эти категории указывают соответствию уменьшению объема усиления.

Форму обводов корпуса устанавливают с учетом ледовой категории, назначения судна и характера взаимодействия корпуса со льдом. Суда категории УЛА имеют ледокольную форму с уступом в нижней части форштевня, ограничивающим выход судна на лед. Суда категории УЛ имеют обычно полуленточную форму обводов корпуса. На судах активного ледового плавания категорий УЛА и УЛ не допускаются бульбообразные обводы носовой оконечности. В подзоре кормовой оконечности судов категорий УЛА, УЛ и Л1 предусматривается выступ (ледовый зуб), расположенный в корме от руля, для защиты руля на заднем ходу. Форма обводов кормовой оконечности также должна обеспечивать защиту руля и винтов.

При назначении ледовых нагрузок из-за сложности определения их действительных значений строятся упрощенные физические модели взаимодействия корпуса судна со льдом. Усиление конструкций выполняют в пределах ледового пояса, охватывающего наружную поверхность корпуса, части которой

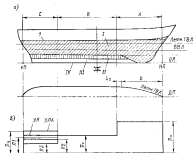


Рис. 9.13. Ледовый пояс: а — районы усиления конструкции корпуса (включая А; стрелой В; кормовой С); б — ледовая нагрузка в районах усиления.

1 — борт в продольном направлении; Л1 — выш. выше Л2; Л3 — ледовый пояс; Л4 — зона; А — ширина пояса ледового пояса; Д1, Д2, Д3 — категория усиления корпуса соответственно в носу, в корме и в середине судна.

могут подвергаться расчетному давлению льда во время эксплуатации судна (рис. 9.13).

Ледовую нагрузку в носовой области определяют с учетом массы судна, формы обводов корпуса и параметров льда (прочности и толщина льда, масса и геометрия льдин и др.). В корме и кормовом районе ее назначают для каждой категории усиления и зависимости от нагрузки в носу судна. Расчетную ледовую нагрузку на обшивку ледяного пояса и на балки набора и его арматуру определяют раздельно.

Натурные наблюдения показали, что зона контакта в момент столкновения корпуса со льдом имеет вид пятна, вытянутого вдоль судна. Это обуславливает выбор системы набора бортов. Для восприятия ледовой нагрузки целесообразно применение поперечной системы набора. В этом случае в работу вовлекается большее число балок (шпангоутов), чем при продольной системе набора бортов (рис. 9.14), и меньше расходуется материал. Однако продольная система набора не исключается; при необходимости, например на крупнотоннажных танкерах, ее приходится использовать, что связано с дополнительными затратами материала на подкрепления.

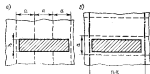


Рис. 9.14. Возможное расположение decks выкатки со льдом на палубе бортовой обшивки при усилении (а) в продольной (б) системе набора.

Поперечная система набора на судах с ледовыми усилениями конструктивно реализуется в двух вариантах. Во-первых, в виде однородной конструкции с одинаковыми шпангоутами и разрезными бортовыми стрингерами и в качестве разрезных балок. Во-вторых, в виде конструкции, усиленной рамными шпангоутами и рамными стрингерами. Формальных ограничений по выбору варианта конструкции подкрепления борта нет. Однако необходимо учитывать экологические требования. В частности, на ледовозах с одинарными бортами применение конструкции с рамными шпангоутами уменьшает полезную вместимость трюма. В то же время на судах категории УЛА система набора с рамными шпангоутами может оказаться при прочих равных условиях менее металлоемкой.

Толщину обшивки ледового пояса (δ мм) получают исходя из условия прочности балки-полоски, у которой после ее изгиба допустимы два пластических шарнира на опорах:

$$\delta = 18,4a \sqrt{p/\sigma_s + \sigma_k},$$

где a — расстояние между балками основного набора, м; p — расчетная ледовая нагрузка в данном районе, кПа; $\sigma_k = \sigma_T/2$ — износ наружной обшивки в течение срока службы судна, мм (интенсивность износа $\sigma = 0,4, 0,5$ и $0,25$ мм/год — соответственно для судов категорий УЛА, УЛ и ЛЛ).

Конструкция соединения верхнего и нижнего концов основных шпангоутов судов с ледовыми усилениями та же, что и на судах без этих усилений. Промежуточные шпангоуты, расположенные между флорами и между скуловыми бранкетами, на судах категории УЛА, УЛ, ЛЛ также должны иметь закрепление концов сечений. Нижний конец шпангоута закрепляют на междудонном листе, устанавливаемом с обратной его стороны в плоскости шпангоута ребро, перекрывающее и скуловой пояс. В конструкции закрепления промежуточных шпангоутов не-

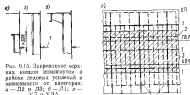


Рис. 9.15. Закрепление верхних концов промежуточных шпангоутов в районе ледовых усилений в зависимости от категории: а — Л2 и Л3; б — Л1; в — УЛ и УЛА.
1 — верхний край ледового пояса.

Рис. 9.16. Усиление борта в районе ледового пояса по системе развития шпангоутов: а — система набора; б — разрез по бранкету.
1 — бортовой стрингер; 2 — вторая палуба; 3 — ледовый пояс; 4 — разрез шпангоута.



обходимо полностью исключить или хотя бы нейтрализовать жесткие точки. На судах категорий Л2 и Л3 нижние концы промежуточных шпангоутов, пропущенные на 1 м ниже ледового пояса, закрепляют на горизонтальном разрезном ребре или бортовом стрингере.

Верхний конец промежуточных шпангоутов на судах категорий УЛА и УЛ приваривают торцом к расположенным выше ледового пояса палубе или платформе и дополнительно киней соединяют с продольным ребром, сведенным установленным для этой цели. На судах категории ЛЛ допускается только приварка торца шпангоута к пластине палубы или платформе (без установки киней), а на судах категорий Л2 и Л3 — к бортовому стрингеру, расположенному на 500 мм и более над верхней границей ледового пояса (рис. 9.15).

Расстояние между разрезными бортовыми стрингерами составляет не более 2,0 м. В конструкции с одинаковыми шпангоутами она снижает локальную ледовую нагрузку на соседние участки, приспосабливает к работе близкие незагруженные в данный момент шпангоуты, служат киневой опорой для промежуточных шпангоутов на судах категорий Л2 и Л3. Кроме того, бортовые стрингеры обеспечивают плоскую форму изгиба шпангоутов, особенно с несимметричными поясами и (или) расположенными под острыми углами к обшивке. Ввиду большой трудоемкости сборки и сварки разрезных стрингеров их за-

нивают усилениями, если позволяют условия размещения перевозимых грузов. Требуемые размеры шпангоутов в системе с разносками стрингерами таковы, что они чаще всего не могут быть подобраны из каталожных балок — их приходится делать составными.

Конструкция ледовых усилений по системе рамных шпангоутов в меньшей степени обладает недостатками системы с разносками стрингерами. Рамные шпангоуты устанавливают на расстоянии двух — четырех нормальных шпаций и обязательно в плоскости флоров. Между ними располагают основные и промежуточные шпангоуты, опирающиеся на различные рамные бортовые стрингеры, расстояние между которыми по высоте составляет не более 2,5 и (рис. 9.16).

Система с рамными шпангоутами имеет большую несущую способность, чем система обыкновенных шпангоутов. Требуемый момент сопротивления шпангоутов определяют из условия выживания в пролете фибровой текучести. Площадь поперечного сечения стенки рамных шпангоутов заходит из условия прочности на срез. Дополнительно проверяют устойчивость стенки при действии нормальных и касательных напряжений.

Бортовой стрингер по длине имеет постоянную высоту стенки, равную высоте стенки рамного шпангоута, или постепенно уменьшающуюся в пролете до значения, составляющего не менее двух значений высоты основного шпангоута. Конструкция соединения бортовых стрингеров с основными и промежуточными шпангоутами должна быть достаточно прочной, способной воспринимать расчетные ледовые нагрузки. Стенки рамных балок подкрепляют ребрами и бангетами устойчивости.

Система рамных шпангоутов в районе ледовых усилений внешне подобна конструкции набора борта в районе МО. Однако кроме общего назначения определяющие функции бортового набора в указанных районах различны. В МО рамный набор устанавливают в дополнение к основному для обеспечения необходимой жесткости перекрытия с целью исключить возможный резонанс конструкций. На судах с ледовыми усилениями рамный набор вместе с основным обеспечивает местную прочность перекрытия. Основные и промежуточные шпангоуты при определении их размеров рассматриваются как неразрезные балки с промежуточными опорами на стрингерах.

Усиление корпусов судов, швартуемых в море. Специфика эксплуатации промысловых судов обуславливает дополнительные требования к конструкции корпуса. Добывающие суда в отдаленных районах промысла вынуждены для сдачи улова швартоваться к борту рыбоперерабатывающих баз. При швартовке судов в море на волнении в результате больших нагрузок от навала одного судна на другое бортовые перекрытия, несмотря на амортизирующие устройства, часто получают зна-

чительные остаточные деформации обшивки и балок набора. Преобладают соединения балок и другие конструкции.

В зонах контакта при швартовках применяется только поперечная система набора. Чтобы обеспечить несущую способность перекрытия, увеличивают размеры балок.

§ 39. Борт специализированных судов

Особенности бортовых перекрытий. Многие специализированные суда имеют двойной борт. На судах с большим раскрывом палубы (лесовозах, пакетовозах, контейнеровозах) двойной борт в определенной степени компенсирует жесткость и прочность корпуса, ослабленную палубными вырезами. Кроме того, второй борт придает удобную прямоугольную форму грузовым помещениям, что улучшает условия размещения перевозимых грузов.

На судах с горизонтальным способом грузообработки, если поперечные переборки в грузовом помещении отсутствуют или

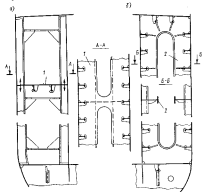


Рис. 9.17. Конструкция двойного борта судовозных судов при швартовке (а) и в поперечном (б) сечении набора.

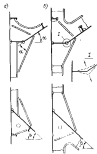


Рис. 9.18. Варианты (а и б) соединения внешней обшивки с подпалубной и внутренней обшивкой на судне для перевозки массовых грузов ($\alpha \geq 30^\circ$; $\beta \geq 45^\circ$).

имеются и в небольшом количестве, двойной борт позволяет сохранить минимально необходимый запас плавучести и тем самым обеспечивает непотопляемость судна. На судах, перевозящих навалочные грузы, особенно в северных широтах, двойной борт защищает грузы от смерзания и создает лучшие условия для их высыхания; в результате ускоряется разгрузка.

На всех судах с двойным бортом и междубортными пространствами размещают необходимые топливные, балластные и иные цистерны. На контейнеровозах, больших лесовозах и в верхней части двойного борта могут быть предусмотрены коридоры для прохода членов экипажа. Наконец, внутренний борт, подобно второму дну, обеспечивает плавучесть судна в случае повреждения наружного борта.

Конструкции двойного борта сухогрузных судов отличаются большим разнообразием. Они зависят от типа и назначения судна, способа грузовых операций, условий эксплуатации. Двойной борт предусматривают по всей высоте корпуса как частично (только в трюме либо в танках). При этом наружный борт в средней части по длине может быть вертикальным или наклонным, например на лесовозах, с развалом до $12-15^\circ$.

Внутренний борт в трюме устанавливают на двойное дно, в котором в плоскости обшивки внутреннего борта предусматривают листовые стрингер или фоновые вертикальные бракетки между флорами. Минимальная ширина двойного борта должна обеспечить проведение работ при постройке, ремонте, обслуживании. Прочность двойного борта достигается совместной работой наружного и внутреннего бортов.

Система набора наружного и внутреннего бортов может быть поперечной, продольной или комбинированной (рис. 9.17). При комбинированной системе наружный и внутренний борта одного судна имеют различные системы набора или в верхней части двойного борта используется продольная, а в нижней — поперечная система набора.

В двойных бортах рекомендуется вместо бортовых стрингеров и горизонтальных рам по внутреннему борту при поперечной системе набора и вместо рамок шпангоутов и рамных стоек по внутреннему борту при продольной системе устанавливать соответственно горизонтальные и вертикальные диафрагмы с вырезами. Для уменьшения объема возможных при навалах и столкновениях повреждений подкрепляющие ребра жесткости устанавливают на диафрагмах в плоскости, параллельной борту.

На судах с горизонтальной обработкой грузов через бортовые лючки двойной борт чаще всего устраивают в трюме до главной (второй) палубы. В танкеле корпус судна имеет одинарный борт. В плоскости рамных бинсов, устанавливаемых через две шпации, обшивку шпангоутов заменяют рамными.

Варианты соединения внешней шпангоутом одинарного борта на судах для перевозки массовых грузов показаны на рис. 9.18.

Вопросы для повторения

1. Какие нагрузки действуют на бортовые перекрытия судна?
2. Варианты и особенности конструкции борта с поперечной системой набора на сухогрузных судах.
3. Требования, определяющие размеры обшивочных шпангоутов.
4. На каких судах применяют продольную систему набора борта? Особенности ее конструкции.
5. Требования к конструкции соединений шпангоутов с дном.
6. Как соединяются шпангоуты с балками набора верхней и промежуточных палуб?
7. Какими требованиями определяются размеры балок опозного и рамного набора борта танкером?
8. Чем вызвано устройство на больших танкерах двойных бортов? Особенности их конструкции.
9. Какие дополнительные подкрепления бортов требуются на судах ледовых категорий?
10. Особенности конструкции бортовых переборок стеснительных судов.

ГЛАВА IV. ПЛУЗЫНЫЕ ПЕРЕКРЫТИЯ И ПЛАТФОРМЫ

§ 40. Палубы сухогрузных судов

Назначение и конструктивные особенности палуб. Палубы — это горизонтальные перекрытия корпуса, идущие по всей длине и ширине судна. Горизонтальные перекрытия, расположенные на части длины или ширины судна, называются платформами. В зависимости от размеров и назначения судна корпус по высоте может иметь одну или несколько палуб и платформ. Наиболее высоко расположенная, непрерывная по всей длине судна палуба называется верхней, а палубы, размещенные ниже верх-

ней, имеются накладки (вторая, третья и другие палубы, считая от ВП).

Надстройки и рубки также имеют палубы, разделяющие эти конструкции по высоте на яруса, а именно: палуба надстройки 1-го яруса, палуба надстройки 2-го яруса и т. д., считая вверх от ВП. При расположении рубки на палубе надстройки принята сквозная нумерация палуб.

Расчетной называется палуба, представляющая верхний пояс эквивалентного бруса. Ею может быть или ВП, или палуба длиной средней надстройки.

Палубой надводного борта считается непроницаемая палуба, от которой вниз до ГВЛ измеряется надводный борт. Палубой надводного борта обычно является ВП, но может быть и вторая палуба, если вниз от нее до ГВЛ обеспечиваются минимально допустимые высота надводного борта и запас плавучести.

Непроницаемая палуба, до которой доведены главные поперечные водонепроницаемые переборки деления корпуса судна на отсеки, называется палубой переборок. Палуба переборок не может быть расположена ниже палубы надводного борта.

Палубные перекрытия выполняют следующие функции. Во-первых, ВП, вторая палуба, если она является палубой надводного борта, палубы надстроек обеспечивают непроницаемость корпуса и надстроек. Все отверстия этих палуб, не имеющие постоянных закрытий или специальных ограждений, перед выходом судна в море закрывают герметично.

Во-вторых, палубы служат для размещения и разделения по высоте персональных (генеральных) грузов и колесной техники, чтобы обеспечить их сохранность при укладке, а также партиюность при доставке в разные порты назначения. Число палуб на судне является главным образом от категории перевозимых грузов, размеров и прочности упаковки грузовых мест. Судя, перевозящие лесные и массовые грузы, не имеют нижних палуб (НП), так как все необходимости в разделении этих грузов по высоте. На ВП всех судов размещают надстройки, рубки, грузовые, спасательные и другие устройства, различные палубные механизмы. На ВП некоторых судов (лесовозов, контейнеровозов) перевозят часть грузов.

В-третьих, ВП или палуба длиной средней надстройки является первым пояском эквивалентного бруса, обеспечивая с другими продольными связями общую продольную прочность и жесткость корпуса судна. Наконец, палубные перекрытия служат опорами конструкции для бортов, переборок, которые в свою очередь служат опорами для палуб.

Палубные перекрытия имеют ряд конструктивных особенностей. ВП судов прежней постройки делалась с криволинейной погонью и седловатостью. Погонь палубы необходима для ее осушения от взбрызнутой воды и осадков. Наибольшая погонь

любого поперечного сечения палубы находится в ДП и принимается равной 2% от ширины корпуса в рассматриваемом сечении. Седловатость палубы, т. е. последующий подъем ее от midships к оконечностям, улучшает мореходные качества судна: повышается запас плавучести, увеличивается развал носовых шпангоутов и судно легче выходит на волну, уменьшается заливаемость. Седловатость носовой надстройки увеличивается также площадь ее палубы.

Однако при криволинейной форме поверхности ВП возрастает трудоемкость и стоимость изготовления секций, затрудняется использование механизированных способов производства. Поэтому в последние годы криволинейная поверхность палубы, а частности по ширине судна, заменяется тремя плоскостями, из которых средняя горизонтальная на ширине грузовых люков приводится, а две боковые расположены наклонно к соответствующему борту. На некоторых судах для удобства размещения грузов на ВП погонь отсутствует. Аналогично арабическую поперечность седловатости заменяют ломаной, состоящей из трех параллельных плоских участков. Крайние участки имеют соответствующий подъем в оконечностях судна. Ряд транспортных судов с избыточным надводным бортом (наливщики, контейнеровозы и др.) совсем не имеют седловатости ВП. Ветская НП проектируют без поgonи, а часто и без седловатости, чтобы не затруднять укладку тарно-штучных грузов. Погонь бруса увеличивает также неблагоприятные моменты от действия сжимающих осей сил и соответственно размеры сечения бруса.

Палубы сухогрузных судов с вертикальной грузообработкой имеют грузовые люки — большие вырезы. По длине судна они чаще всего расположены в один ряд, посередине его ширины. Это центральные грузовые люки, ширина которых на судах достигает 0,5—0,6 В и даже больше.

При ширине грузовых люков более 12 м из-за деформаций их ограждений (кожухов) на полноте часто нарушается непроницаемость люковых закрытий. Кроме того, масса самих закрытий при большой ширине люков становится излишней. Поэтому на ряде судов длиной более 145—150 м в палубах сделаны тарные люки, расположенные в районе трюмов, кроме первого (носового), параллельно один другому и симметрично ДП. Имеются суда и с тройными люками. Ширина каждого из тарных люков чаще всего 7,0—8,0 м, что позволяет обеспечить надежность закрытий и эффективное проведение грузовых операций без горизонтальных перемещений груза в трюмах.

Длина грузовых люков универсальных сухогрузных судов достигает 14—18 м. Суда для насыпных грузов могут иметь грузовые люки практически на всей длине трюмов. Размеры гру-

зовых люков на судах открытого типа принимают такими, чтобы подлаубные карманы, т. е. расстояние по длине от выреза до поперечной переборки не превышало 2,0—2,4 м, а по ширине до борта (наружного или внутреннего, если он устанавливается) составляло не более 1,2 м.

Размеры грузовых люков характеризуют приспособляемость судна к ускорению грузовых работ в порту, стоимость которых достигает аномально и даже более от эксплуатационных затрат. Увеличение размеров грузовых люков по эксплуатационным соображениям противоречит требованиям надежности конструкции корпуса, в частности, требованиям общей прочности и безопасности плавания. Обеспечение же общей прочности и жесткости корпуса на судах открытого типа усложняет конструкцию залуб, да и корпуса в целом. Дополнительные требования к прочности и конструкции ВП предъявляются к судам для перевозки больших палубных грузов, например к лесовозам. Палубные вскрытия, в которых ардусмотрены грузовые люки, в условиях растяжения при общем изгибе судна становятся преимущественно связаны с высокой концентрацией напряжений в районе углов этих люков.

Постройка судов с горизонтальной грузообработкой вместо традиционной вертикальной или в сочетании с ней привела к сокращению времени и затрат на грузовые работы. К конструктивным особенностям судов этого типа относится устройство прочных палуб для приема тяжелых колесных транспортных средств при отсутствии или ограничении числа поперечных переборок в грузовой части судна.

Расчетные нагрузки. Открытые участки ВП испытывают нагрузку от вытесняемой на нее во время шторма забортной воды. При проектировании ВП эту нагрузку условно считают равномерно распределенной и меньшей интенсивности, определяемую (λ кПа) по формуле (7.3), где $k_0 = 1,0$ для настила и основного набора и $k_0 = 0,75$ для расчета рамных балок; расчетное гидродинамическое давление для открытых ВП $p_{\text{вн}} \geq 5$ кПа.

При перевозке на ВП штучных грузов расчетное давление по Правилам Регистра СССР определяют с учетом сил инерции, высоты укладки и расчетной удельной погрузочной массы груза. Для леса и копка расчетную высоту принимают равной 0,7 от фактической высоты укладки этих грузов на ВП, но не менее вычисленной по формуле (7.3).

Нагрузку нижних грузовых палуб определяют так же, как при перевозке грузов на ВП. В любом случае расчетную нагрузку палуб, предназначенных для перевозки грузов, принимают не менее 20 кПа. В районе жилых и служебных помещений, размещенных на ВП, НП, в надстройках и рубках, нагрузку принимают не менее $0,9p_{\text{вн}}$, где $p_{\text{вн}}$ рассчитывают по формуле (7.3).

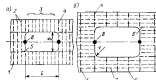


Рис. 10.1. Системы набора палубных переборок судов: а) — продольный, б) — поперечный.
1 — настил; 2 — переборка; 3 — настил; 4 — настил палубы; 5 — настил переборки; 6 — настил.

Системы набора палубных переборок. Палубы морских судов, как и другие перекрытия корпуса, состоят из непрерывного стального настила и подкрепляющих его балок основного и рамного набора. Балки набора воспринимают действующую на палубы поперечную нагрузку и передают ее на борта и переборки, обеспечивая устойчивость настила палуб и переборки в целом при сжатии их продольными усилиями от общего изгиба. В составе шпангоутных рам поперечные палубные балки (бимсы) обеспечивают вместе с поперечными переборками заданную форму и поперечную прочность корпуса.

Палубные перекрытия в средней части и заантенности от типа и размеров судна имеют поперечную или продольную систему набора (рис. 10.1). В окантовках напряжения от общего изгиба малы, поэтому здесь применяют поперечную систему набора палуб как наиболее технологичную.

На сухогрузных судах длиной 120 м и более для непрерывной части расчетной палубы, как правило, применяется продольная система набора. Если расчетной является палуба длиной средней надстройки, то продольную систему набора на указанных судах следует применять и для ВП. Суда меньшей длины могут иметь поперечную систему набора ВП. На судах с продольной системой набора ВП, как правило, НП имеют поперечную систему набора, поскольку зааряжения от общего изгиба в этом районе сравнительно небольшие.

Рамные бимсы при продольной системе набора устанавливаются в плоскости соответствующих флоров, а расстояния между ними принимают равным не менее чем четырем шпангоутам (или 3,2 м).

Палубный настил. Сплошной стальной палубный настил формируется из поперечных, составленных из листов, расположенных

симметрично и параллельно ДП. Крайние, примыкающие к борту, концы называются палубными стрингерами. Все цилиндрической астава палубные стрингеры расположены параллельно касательной к борту, примерно в районе половины длины листа стрингера. По концам корпуса судна настил палуб часто формируют из поперечно расположенных листов.

Вырезы в палубах для грузовых люков, машинной шахты и другие, имеющие прямоугольную форму, располагают большей стороной вдоль судна и обязательно выполняют со скруглением углов (для уменьшения концентрации напряжений). Грузовыми люками, машинной шахтой настил палуб разделяется на непрерывные части, идущие вдоль судна между вырезами и ближайшим бортом, и непрерывные части, расположенные между вырезами по длине судна. В обеспечения общей прочности судна из палубных связей прижимают участки только непрерывные части настила палуб и непрерывные продольные балки, расположенные по их ширине. Ослабление настила палуб машинными вырезами шириной менее 0,15 B , расположенными в районе сечения по длине судна, при расчете общей прочности не учитывают. Количество вырезов в палубах должно быть минимальным.

Толщина настила расчетной палубы в наиболее ослабленном вырезе поперечном сечении с учетом продольных палубных балок должна удовлетворять требованиям общей прочности, устойчивости, минимальной толщины. Местная прочность настила участков ВП может быть определяющей в районе подпалубных люков, для которых палуба является крышкой и где нагрузка на нее обусловлена действием жидкого груза, размещенного в цистерне.

Проверку общей прочности корпуса судна выполняют только после определения размеров всех продольных связей эквивалентного бруса. Сначала толщину настила палубы, а точнее, ее отношение к ширине при выбранной системе набора, находят из условия устойчивости (см. § 25). Скругленные вырезания в первом приближении можно принять по Правилам Регистра СССР равными допускаемым при прогибе судна. Минимально допустимая толщина (n мм) настила расчетной палубы между бортом и линией люковых вырезов равна: $n_{\text{min}} = 0,065L + 3,8$ при $L < 80$ м; $n_{\text{min}} = 0,040L + 5,0$ при $L \geq 80$ м.

Конструкция подкрепления настила палуб в районе углов балкина вырезов зависит от их расположения по длине и высоте корпуса судна, т. е. от степени напряженности продольных связей, от расстояния между вырезами, от формы углов выреза. Внешние углы крайних вырезов грузовых люков ВП скругляют по радиусу $r \geq 0,1\beta$, где β — ширина люка; β — отношение требуемого момента сопротивления поперечного сечения корпуса к фактическому.



Рис. 10.2. Размеры выреза в настиле палубы в углах грузовых люков ($a_1 = 1,25a$).



Рис. 10.3. Условные размеры вырезов в настиле палубы в углах балкина вырезов $k_1 = (0,2 + 0,3)\beta$; $k_2 = (0,35)\beta$; $l = (0,3 + 0,5)\beta$; $a_1 = (1,5 + 1,6)\beta$.

Если необходимо увеличить просвет грузового люка в углах, скругление можно выполнять по дуге заданная с отношением его радиуса $m/n = 2$ при $m \geq 0,05\beta$ или по дуге окружности радиусом $r \geq 0,07\beta$ при условии подкрепления углов вырезов сварными листами (рис. 10.2). Размеры скруглений углов вырезов в настиле ВП вне средней части (0,4L) и в настиле НП на всей длине могут быть уменьшены в два раза.

Смежные углы последовательно расположенных вырезов грузовых люков на расстоянии a от одного имеют радиус $r \geq 0,1a$ при отсутствии сварных листов и $r \geq 0,07a$, когда они имеются (см. рис. 10.2). При скруглении этих углов по дуге заданная $m \geq 0,05a$.

Потерянная площадь сечения палубы в районе изолированного выреза (группы вырезов) компенсируется утолщением листов или увеличением площади поперечного сечения продольных балок (рис. 10.3).

Балка набора палуб. После выбора системы набора каждого из палубных переборок следует выполнить конструктивную компоновку палубы: согласовать проектные шпалы переборок корпуса, уточнить положение балок основного и рамного набора. Кроме того, нужно выбрать необходимые размеры листов настила, особенно ширину, с учетом принятых шпал, допускаемого расстояния между параллельными сварными шпалами, возможно большей унификации листов. При любой системе набора рекомендуется параллельно совмещать с продольными линиями грузовых люков. На НП на длине люка продольные коммисы одновременно являются и карлингсами. Возможны конструкции и с карлингсами, поставленными отдельно от коммисов.

Все палубные балки рассчитывают на действие поперечной нагрузки с учетом их участия в общем изгибе судна. Близки при поперечной системе набора рассматривают как неразрезные балки, опирающиеся на жесткие опоры. Ввиду трудоемкости расчетов и условности ряда допущений расчет плоской шпальной рамы для практических целей обычно не выполняют. По-

добно фюзеляж и шпангоуты, бимсы рассматривают изолированно с условиями граничных условий. К тому же конструктивные особенности и разное расположение шпангоутовых рам для длины одного трюма могут привести к существенным различиям в граничных условиях балок. Непрерывные и прерывные участки палубных перекрытий сухогрузных судов, имеющих грузовые люки, часто изолированы по конструкции. Это следует учитывать в расчете местной прочности балок. Момент сопротивления поперечного сечения бимсов вычисляют (в см^2) по формуле (8.10), где полагают $m = 10$ и $k_0 = 0,70$.

Для обеспечения устойчивости расчетной палубы с поперечной системой набора, при сжатии наибольшим изгибанием от общего изгиба, регламентируют момент инерции поперечного сечения полубимса, принимая его жестко заделанным по борту и свободно опертым на ближайшем карлингсе.

В средней части однопалубных судов при прочих равных условиях бимсы и полубимсы имеют на 20% больший момент сопротивления, чем бимсы ВП двух- и балки палубных судов. Это позволяет отделить лесенки шпангоутовых рам от кручения корпуса.

Карлингсы и продольные комингсы при любой системе набора являются опорами для бимсов и полубимсов. В свою очередь, сами карлингсы имеют опоры на поперечных переборках и концевых бимсах, а в некоторых случаях опираются и на пиллерсы. Карлингсы должны быть достаточно жесткими, чтобы при сжатии палубного перекрытия выполнять роль жесткого опорного контура.

Продольные комингсы-карлингсы — балки ступенчато-переменного сечения, жестко заделанные на поперечных переборках и имеющие упругие опоры на концевых бимсах. Момент сопротивления поперечного сечения карлингса определяется по формуле, аналогичной формуле (8.10). Он зависит от размера пролета карлингса между опорами; от ширины палубы, поддерживаемой рассматриваемым карлингсом; от приведенных в Правилах Регистра СССР коэффициентов момента и допускаемых напряжений ($k_0 = 0,6$ для ВП и $k_0 = 0,7$ для НП). Момент сопротивления продольного комингса, выходящего одновременно карлингсом, увеличивается на 20% для ВП и на 10% для НП при прочих равных условиях.

Концевой люковый бимс служит промежуточной опорой карлингса, продольных балок при продольной системе набора и сам опирается на пиллерс или продольную полупереборку при установке их в ДП. Имеются суда с палубными перекрытиями и без внутренних опорных конструкций.

Момент сопротивления концевой люковой бимсы определяют (в см^2) по формуле

$$W = \rho b_1 (b_0 + l) l_0 a_1 10^3 / m k_0 \sigma_{\text{доп}}$$

где ρ — расчетная нагрузка на рассматриваемую палубу, кПа ; b_1 — ширина палубы, поддерживаемая концевым-карлингсом, опирающимся на концевой люковый бимс, м; l_0 — длина карлингса, м; l — длина грузового люка, м; b_0 — часть длины концевой бимсы между люком и бортом, м; m — коэффициент момента; $k_0 = 0,70$.

В местах установки фитингов для крепления перевозимых на палубе контейнеров вместо обычных необходимы рамные бимсы, соответствующие по прочности расчетной нагрузке. Высоту стенок всех рамных балок палубных перекрытий по увеличению больших потерь жесткости грузовых помещений следует принимать возможно меньшей, но не менее требуемой Правилами Регистра СССР.

Неразрезные балки основной набора при продольной системе рассматриваются как однопролетные, жестко заделанные на опорах (на рамных бимсах, полубимсах и переборках). Момент сопротивления палубных продольных балок с учетом податливости на коррозию определяют (в см^2) по формуле (8.10), принимая $m = 12$; $k_0 = 0,2 + x_1/L$; $0,2 \leq x_1/L \leq 0,4$, где x_1 — расстояние середины пролета балки от индла (в м) для расчетной палубы в средней части длины судна, и $k_0 = 0,6$ — в оконечностях ВП и для НП. Податливость на условия местного изгиба размеры поперечного сечения продольных балок в средней части расчетной палубы проверяют на устойчивость при сжатии их напряжениями от общего изгиба судна.

Рамные бимсы (полубимсы) при продольной системе набора палубы обеспечивают продольным балкам жесткие промежуточные опоры, устойчивость палубного перекрытия при действии в его плоскости напряжений от общего изгиба, жесткость шпангоутовых рам, сопротивление локальным нагрузкам. Изгибающий момент и момент сопротивления рамных бимсов определяют по тем же формулам, которые используют для обычных бимсов. В этом случае шпангоут заменяют на расстояние между рамными бимсами, принимают $m = 10$; $k_0 = 0,70$ и соответствующее значение ω . Кроме прочности рамных бимсов (полубимсов) на изгиб требуется обеспечить прочность стенок на действие порезывающей силы $N = \rho a_1 l / 2k$, где $k = 0,685$ учитывает ослабление стенок вырезом. Площадь поперечного сечения стенок рамных бимсов определяют (в см^2) по формуле

$$I_{\text{ст}} = 7,3 \rho a_1 l / k_0 + 0,1 b_0 k_0$$

где a_1 — расстояние между рамными бимсами, м; l — пролет рамного бимса, м; $k_0 = 0,60$; b_0 — высота стенок рамного бимса, см.

Для обеспечения устойчивости палубного перекрытия в целом требуется, чтобы рамные бимсы (полубимсы) обладали необходимой жесткостью, т. е. моментом инерции поперечного се-

чения, гарантирующие плоскую форму на изгибе. Стенки рамных балок палубных перекрытий в зависимости от их высоты и толщины подкрепляют вертикальными ребрами жесткости и планками устойчивости.

§ 41. Конструкция палубных перекрытий сухогрузных судов

Поперечная система набора. Конструкция палуб с поперечной системой набора состоит из балок основного набора (бимсов и полуимсов) и продольных рамных балок (карлингсов, комингсов-карлингсов), на которые опираются бимсы и полуимсы.

Опорными конструкциями для палубных перекрытий в целом, кроме бортов и переборок, являются концевые люковые бимсы, шпалеры, колодки, продольные и поперечные полупереборки, консольные шпалерные рамы в различных сочетаниях. Палубы с грузовой люками чаще всего имеют концевые люковые бимсы с промежуточной опорой в ДП на шпалере или на стойке продольной полупереборки. При большой длине грузовой люка в качестве промежуточной опоры продольных комингсов-карлингсов могут быть установлены консольные шпалерные рамы или поперечные полупереборки.

Палубы с поперечной системой набора наиболее прочны и технологичны по конструкции, так как имеют минимальное количество углов пересечения балок и содержат малое число продольных связей (только карлингсы) и конструктивными и технологическими концентраторами при пересечении с поперечными переборками. Набор палубы в меньшей степени нагружает верхнее пространство грузовых помещений, чем при продольной системе набора.

Конструкция перекрытий с поперечной системой набора, как отмечалось в гл. 3, имеет два существенных недостатка: 1) низкие эластичные напряжения, не обеспечивающие устойчивости пластича настила ВП с обычной толщиной на судах длиной более 120—130 м; 2) уменьшенную эффективность палубы в общем изгибе судна вследствие деформации настила, обусловленной поперечной усадкой сварных швов, присоединяющих бимсы к настилу. Указанные недостатки ограничивают область применения поперечной системы набора палуб. Однако в некоторых случаях эта система набора палуб необходима: на однопалубных судах, швартующихся в море; на судах с ледовыми усиленими в границах ледового пояса.

Бимсы и полуимсы палуб с поперечной системой набора изготовляют из профильной стали (обычно несимметричного полосоублаба). Если пролеты бимсов равны или близки по размеру, то при пересечении с карлингсом они не разрезаются. Для бимсов ВП, работающих под действием сжимающей на ее

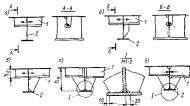


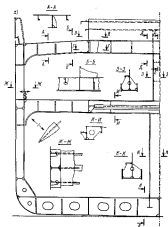
Рис. 10.4. Варианты (а и б) соединения бимсов (1) с карлингсом (2).

открытую часть воды, для обеспечения опоры достаточно непосредственно соединить стенки бимсов со стеной карлингса (рис. 10.4, а). Чтобы предотвратить потерю устойчивости, уменьшить воздействие касательных и приведенных напряжений, в Правилах Регистра СССР предусмотрен специальный параметр, определяющий необходимость подкрепления с этой целью стенок карлингса. Обычно стенку карлингса подкрепляют вертикальным ребром, а через 3—4 шпалеры — бракетой (рис. 10.4, б и в).

Вырез в стенке карлингса для прохода бимсов, как и в стенке других рамных балок (особенно в районах переходного нагружения балок, интенсивной вибрации), делают со скруглением в зоне свободного попуска бимсов. Это позволяет уменьшить вероятность появления трещин усталостного характера. Если пролеты бимсов и размеры их сечений существенно различаются, то для записовки массы бимсы могут быть разрезаны на карлингсе высотой $h_k > 2,2h_b$ и соединены с ним при помощи дуэтованных янги (рис. 10.4, г). При увеличенных нагрузках, например на грузовые палубы, или при высоте карлингса $h_k \leq 2,2h_b$ разрезные бимсы приваривают к карлингсу не только снизу, но и торцовыми сечениями (рис. 10.4, б).

Полубимсы располагаются в районе больших палубных вырезов и кроме нижней опоры на бортовых перекрытиях имеют опору на продольном комингсе, который одновременно является и карлингсом. Торцовым сечением полубимсы приваривают к стенке продольного комингса. Бракета трапециевидной или прямоугольной формы соединяет полубимсы со свободным пояском и нижней частью стенки комингса (см. рис. 8.2).

Подпалубная часть продольного комингса, совпадающего с карлингсом, при пересечении с концевым бимсом ВП не раз-



режется. При пересечении с концевым балом НП продольный комингс-карлинг может быть разрезан. Сплошные пояски продольного комингса, концевого балка и карлинг в углах грузовых люков соединяются с помощью расположенной в их плоскости фигурной brackets (рис. 10.5).

Варианты соединения карлингов с поперечной переборкой показаны на рис. 10.6. В опорном сечении карлингов создаются большие нагрузки, поэтому стенку карлингов подкрепляют ребрами жесткости, в стойку переборки в его плоскости крепят не только клинцы, но и торцовым сечением. Если карлинг разрезается на переборке, то разрываемость его должна быть минимальной, а пояски должны быть срезаны «на ус». На судах длиной более 180 м карлинг при пересечении с переборкой сохраняет непрерывность. После его установки отверстие в пере-

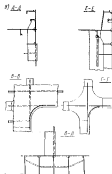


Рис. 10.5. Поперечное сечение карлингов судна по конструктивному варианту (а) и конструктивные разрезы (б).

борки заделывают непропилаемыми планками (см. рис. 10.6, б). Допустима конструкция с разрезом на переборке только поясков карлингов, которые после заделки стенки в проеме переборки стыкуются с ней (см. рис. 10.6, в). Чтобы устранить появление трещин в обшивке переборки, целесообразно на уровне свободного пояска поставить с двух сторон карлингов горизонтальные ребра жесткости или клинцы до ближайших стоек переборки.

Продольная система набора. Основными балками при продольной системе набора палубы являются продольные, обычно катаные, балки полосуобойного профиля. Иногда в качестве палубных балок используют полосу или другие катаные профили, удовлетворяющие требованиям устойчивости. Палубные продольные балки опираются на равные бимсы, полубимсы (рис. 10.7), поперечные переборки. Палубные перекрытия имеют те же опорные конструкции, что и при поперечной системе набора.

Конструктивную непрерывность палубных продольных балок в средней части обеспечивают на длине не менее 0,6L. При пересечении с равными бимсами и полубимсами продольные балки не разрезают. На судах длиной $L \leq 60$ м конструктивную непрерывность разрезных на поперечных переборках продольных балок обеспечивают клинцами, поставленными с обеих сторон переборки в плоскости балки. Сами балки по торцам имеют плавную обшивку (рис. 10.8, а). По требованиям новых Правил Регистра СССР подобная конструкция применяется на судах длиной до 180 м.

На судах длиной $L \leq 120$ м, если продольные балки разрезаются на переборках, предусматривается приварка их торцов к поперечной переборке (рис. 10.8, б). В этих случаях рекомендуется также установка одной непрерывной клинцы, приваренной и соответствующую прорезь в листе переборки (рис. 10.8, в).

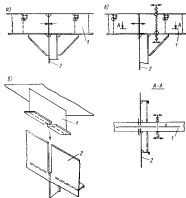


Рис. 10.6. Варианты (а—в) соединения карлингса (1) с поперечной переборкой (2).

В результате уменьшаются разностенность балок и концентрация напряжений.

На судах длиной $L > 120$ м предусматривают непрерывные палубные продольные балки при пересечении с переборками. Непосредственно продольные балки стыкуют вне плоскости переборки и рамных бимсов (рис. 10.8, г). Монтажный стык продольных балок отстоит от переборки на расстоянии не менее 200—300 мм.

Размеры и форма вырезов в стенках рамных балок для прохода балок основного набора не должны вызывать повышенной концентрации напряжений. Высота этих вырезов допускается не более 0,4—0,6 высоты рамных бимсов. В районе опор рамных балок (бимсов, волубимсов и др.) на длине полуторной высоты балки вырезы для прохода основного набора рекомендуются закрывать планками, чтобы обеспечить восприятие перерезывающих сил. По этой же причине при перевозке тяжелых

палубных грузов иногда необходимо углоцеpping стенки рамных балок в районе опор.

Конструкция соединения рамного бимса и карлингса зависит от соотношения значений их высоты, условий нагружения, работы и ориентации балок.

Как правило, непрерывной при пересечении остается поддерживающая,

а следовательно, и более высокая балка. Обычно поддерживающей балкой является карлингс, при пересечении с которым рамные бимсы, подобно простым, проходят либо непрерывно, либо разрезаются на стенке карлингса. Возможны конструкции палубы, например на судах с горизонтальной грузообработкой, в которых поддерживающей балкой будет рамный бимс.

Косольные бимсы, служащие опорными конструкциями палубного набора длинных трюмов, находятся в тяжелых условиях работы. Конструктивно их выполняют в виде спаренных (иногда стоечных) шпиговутных полурам переменного сечения (см.

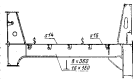


Рис. 10.7. Соединение палубных балок при продольной системе набора.

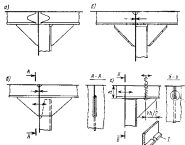


Рис. 10.8. Варианты (а—д) соединения палубных продольных балок с поперечной переборкой.

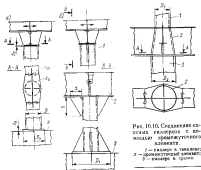


Рис. 10.10. Соединение элементов палубы с помощью промежуточного элемента.

1 — палубы в танке;
2 — промежуточный элемент;
3 — палубы в трюме.

Рис. 10.9. Соединение палубы (1) с элементами (2) в трюме (3): а — при работе только на сжатие; б — при работе на сжатие и на растяжение.

Мн = 1,4; $d_1 = d + 4$ мм; Dm = D + 4 мм.

рис. 9.2). Наиболее нагруженными элементами консольной рамы оказываются кницы, соединяющие консольные бимсы и рамные шпангоуты. Так, на одном из судов типа «Пудя» с люком длиной 23,2 м из-за потери устойчивости таких книц консольные бимсы перестали выполнять свои функции опорной конструкции и произошел разрыв продольного коммеса-картинга изюры палубы⁴.

Несущую способность консольных бимсов можно повысить, если применить утолщенную боковую кницу. Радиус скругления ее свободной кромки должен быть не менее высоты стенки бимса к опорному сечению. Стенки и кницы консольного бимса и рамного шпангоута в районе их соединения необходимо подкрепить ребрами. При пересечении с пояском рамного шпангоута пояска консольного бимса остается непрерывным до бортовой обшивки и в случае присоединения приставной кницы или палубы переходит в пояска рамного шпангоута по свободной кромке парной кницы.

⁴ См.: Газаров М. Н., Брюер А. С., Завалько М. Н. Прогнозирование эксплуатационных повреждений судов. М.: Транспорт, 1986. С. 93.

Палуберы. Традиционными опорными конструкциями палубных перекрытий, уменьшающими массу палубного набора, являются палуберы. Это полые стойки круглого или различного составного сечения в зависимости от места установки. Они подвергаются не только сжатию, но и растяжению (при перевозке в трюме тяжелых грузов и криволинейного перекрытия). Однако расчетным условием является работа палуберов на сжатии. Следовательно, необходимо обеспечить их устойчивость и прочность на сжатие. Нагрузка на палуберы определяется количеством груза на площади палубы, поддерживаемой длиной палубером.

Палуберы в танках и трюмах располагают, как правило, по одной вертикальной оси и устанавливают под пересечением балок. Рамные балки в местах установки палуберов поддерживают кницы (рис. 10.9). Если палуберы подвергаются растяжению, следует более надежно соединить их с опорными палубными и днищевыми конструкциями при помощи книц, брагет, крестовин и т. п. В случае передачи боковых нагрузок (более 245 кН) во избежание жестких толчков в соединении с рамными балками рекомендуется палуберы соединять с набором при помощи промежуточного элемента (рис. 10.10).

С развитием средств интритивной механизации обработки грузов (в частности, при использовании автопогрузчиков) палуберы, установленные по углам грузовых люков, стали мешать маневрированию и сдерживать ускорение грузовых работ. Поэтому число их сократили до двух; палуберы установили под поперечными коммисами грузовых люков в ДП (см. рис. 10.5) и усилии консольные бимсы посередине продольных коммисов.

§ 42. Палуба наливных судов

Общие требования к палубе танкеров. Все наливные суда независимо от размеров имеют только одну палубу, опирающуюся на бортовые перекрытия, поперечные и продольные переборки. По ширине судна палуба танкера, как и днище, разделяется продольными переборками на 2—3, а иногда даже на 4 перекрытия. По длине судна главными и отбойными поперечными переборками палуба разбивается на перекрытия по числу отсеков, включая люковые по концам судна. Танкеры небольших размеров (длиной до 70—75 м) могут иметь ступенчатую по ширине корпус палубы, когда ее средняя часть на полуширине корпуса приподнимается над боковыми на высоту около 1,2—1,5 м, образуя по длине танков так называемый трюк (нижний) — палубную надстройку, являющуюся расширительной нитью для перевозимого жидкого груза.

Палуба наливных судов по большей своей части ограничивает отсеки (танки), предназначенные для перевозки жидких

грузов, балласта, топлива. Во время качки судна перевозимая в танках жидкость действует на все конструкции, ограничивающие отсек. Расчетное давление груза на эти конструкции определяют в зависимости от размеров отсека, степени его заполнения и сил инерции при качке. Для палубы, ограничивающей отсек длиной $l \leq 0,15L$ и шириной $b \leq 0,75B$, давление груза (α в Па) вычисляют при полной его загрузке по формуле

$$p_r = \rho g (1 + \alpha_r/g) (0,5\psi + 0,25\phi), \quad (10.1)$$

где α_r — расчетное ускорение, m/s^2 ; ψ и ϕ — расчетные углы соответственно дифферента и крена, рад. Нагрузку отсеков большей длины или ширины, а также когда отсеки частично заполнены, необходимо рассчитывать по специальной методике. Приближенно расчетная нагрузка в указанных случаях оценивается согласно приведенным в Правилах Регистра СССР специальным формулам. Расчетное давление на палубу наливных судов принимают равным не менее 25 кПа. Вертикальные составляющие нагрузки со стороны перевозимого жидкого груза используют для определения размеров элементов конструкции палубных перекрытий из условия местной прочности.

Палубы наливных судов длиной $L \geq 80$ м в районе грузовых танков имеют подкрепление палубы только по продольной системе набора. Расположение палубных балок основного и рамного набора аналогично и согласовано с расположением длинечных балок.

Продольная система набора палубы, как и динца, обеспечивает устойчивость настила при сжатии его напряжениями от общего изгиба, а также исключает негативное влияние (до 15 %) деформаций настила (из-за поперечной усадки сварных швов в случае применения поперечной системы набора) на общую прочность.

Палубные продольные балки, установленные и приваренные к настилу, вовлекаются в общий изгиб судна и при условии их непрерывности по своим сечением акцелюются в эквивалентный брус. Непрерывность палубных балок на длине грузовых танков, но не менее чем на $0,6L$, конструктивно обеспечивается подобно непрерывности динцевых балок.

Продольные балки имеют армирующие опоры на рамных бимсах, установленных в плоскости флоров, т. е. на расстоянии 2,8—5,0 м. При меньшем пролете каталых продольных балок толщина их стенки может оказаться меньше минимально допустимой для элементов конструкции в пределах грузовых танков.

На наливных судах длиной до 80 м для подкрепления палубы, как и динца, вместо продольной допускается применение поперечной системы набора. Опорами для балок основного набора (бимсов) кроме бортовых перекрытий являются продоль-

ные переборки: одна в ДП либо две боковые. При необходимости могут быть установлены и промежуточные опоры в виде карлингсов. Постановка отбойного листа не обязательна.

Слошной непроницаемый стальной настил, сформированный из продольно ориентированных поясков и подкрепленных балками набора, устанавливают на всей ширине и длине корпуса наливного судна. По технологическим соображениям воглубь палубы теперь делают не криволинейной, а соответствующей ломаной линией, состоящей из трех прямоугольных участков. Сложность палубы на танкерах с избыточным надводным бортом часто отсутствует или предусматривается ниже стандартной и тоже по ломаной линии.

В палубе наливных судов отсутствуют за ненадобностью большие разрезы. Для доступа в танки в палубе делают смещенные по длине судна небольшие люки, обычно овальной формы, огражденные комингсом с непроницаемым закрытием.

Пояска настила палубы размещают параллельно ДП, соединяя к средине, установленному симметрично ДП. Ширину поясков выбирают с учетом шага продольного набора, расположении продольных переборок, требующих к расстоянию между ближайшими параллельными сварными швами к необходимости унификации размеров листов.

Размеры палубных связей. Толщина настила палубы наливных судов, как и ВП сухогрузных, принимается наибольшей из условия обеспечения общей прочности (требуемого момента сопротивления поперечного сечения корпуса на уровне палубы), устойчивости и минимально допустимых толщин. На танкере толщину настила палубы дополнительно проверяют на местную прочность при действии нагрузки, определяемой по формуле (10.1).

Минимальную строительную толщину находят по формуле $t_{min} = 0,04L + 3$ мм. При выбранной толщине проверяют устойчивость палубных настила с учетом зазора, принимаемая сжимающие напряжения не менее допустимых Правилами Регистра СССР. Обеспечение общей прочности проверяют по окончании определения размеров всех связей, включаемых в эквивалентный брус.

Момент сопротивления палубных продольных балок вычисляют из условия местной прочности по формуле (8.10), применяя $\mu = 12$; $\lambda_2 = 0,45$; нагрузку находят по формуле (10.1), а момент инерции — из условия устойчивости (см. § 25). Целесообразно продольные балки подбирать из каталогов профилей (несимметричных или симметричных полостеблов, полостеблов стальной т. п.), обеспечивая толщину стенки не менее минимально допустимой в пределах грузовых танков ($t_{min} = 0,025L + 6,5$ мм).

Момент сопротивления рамных бимсов в центральных танках при установке в ДП отбойного листа вычисляют (в см⁴)

по формуле

$$W = \rho_0 B_1 L_1 \alpha_1 l^3 / (6k_0 \sigma_k),$$

где α_1 — расстояние между рамными бимсами, м; B_1 и L_1 — ширина и длина танка (отсека), м; $m = 0,6$ при четырех бимсах или менее из длины отсека; $k_0 = 0,50$.

Необходимый момент сопротивления рамных бимсов получен расчетом на местную прочность палубного перекрытия с учетом соотношения жесткостей рамного бимса и отбойного листа в ДП. Размеры рамных бимсов, выходящие из условия прочности палубного перекрытия, гарантируют его жесткость и устойчивость.

Для рамных бимсов бортовых танков момент сопротивления определяют (в см⁴) по формуле

$$W = \rho_0 B^2 \alpha_2 l^3 / (6k_0 \sigma_k),$$

полученной из условия местной прочности бимса как тавровой, жестко заделанной на опорах балки ($m = 12$), при $k_0 = 0,50$. Длину бимса в бортовых танках принимают равной расстоянию между свободными поясами рамного шпангоута и рамной стойки продольной переборки. Площадь поперечного сечения стенки рамных бимсов, получаемых из условия местной прочности, проверяют дополнительно на срез, а чтобы исключить потерю устойчивости, стенку в плоскости продольных балок подкрепляют ребрами жесткости.

Конструкция палубы танкеров. Наиболее распространенным типом палубы танкера является симметрично ДП. Типовой конструкцией палубы является палубное перекрытие центральных танков. В ДП устанавливают в виде высокой тавровой балки отбойный лист, ограничивающий воздействие жидкого груза на продольные переборки при качке судна. Одновременно отбойный лист служит опорой для трехсторонних рамных бимсов, установленных на длине танка. В составе продольной вертикальной рамы в ДП, включающей вертикальный киль и рамные стойки поперечных переборок, отбойный лист вместе с продольными переборками опирается на палубу в общей нагнб корпусе судна. Наконец, отбойная рамная балка обеспечивает с рамными бимсами устойчивость палубного перекрытия при сжатии его напряженными обшивкой рамного бимса. Устойчивость его стенки обеспечивают вертикальными ребрами жесткости на малых танкерах или более эффективными продольными ребрами жесткости на средних и больших танкерах (рис. 10.11).

В плоскости флюров и рамных шпангоутов палуба имеет рамные бимсы, обеспечивающие опоры для продольных балок, мест-



Рис. 10.12 Балки рамного набора палубного перекрытия танкера.
1 — отбойный лист; 2 — рамный бимс; 3 — шпангоут

Рис. 10.11 Конструкция с подкреплением отбойного листа вертикальными (а) и горизонтальными (б) ребрами.

ную прочность и устойчивость перекрытий палубы. Рамные бимсы разрезают из продольных переборок и отбойного листа.

На палубе танкеров длиной более 200 м в бортовых и центральных танках посередине пролета рамных бимсов устанавливают обычно рамы или по высоте калангисы (рис. 10.12). Основное назначение калангисов, как и длинных стрингеров в их плоскости, — заделывать концы рамных стоек на поперечных переборках и дополнительно обеспечивать плоскую форму каба рамных бимсов.

Для уменьшения концентрации напряжений предпочтительно плавное (скругленное) соединение рамных бимсов, шпангоутов и рамных стоек с непрерывным конском по свободным краям балок (см. рис. 3.16). Допускается как более технологичное соединение рамных балок в системе шпангоутовых рам при помощи арматурных книц требуемых размеров с пересечком свободных поясов балок по катетам книц. Свободная кромка книц может быть призматической или, что лучше, криволинейной (см. рис. 3.17).

Палубные продольные балки устанавливают в вертикальной плоскости соответствующих длинных продольных балок. На судах длиной $L \geq 150$ м продольные балки при пересечении с поперечными переборками не разрезают, т. е. сохраняются их физические непрерывности. Одно из конструктивных решений этого условия показано на рис. 10.8, г. Возможны и другие варианты конструкции этого узла. На палубных судах длиной менее 150 м палубные продольные балки на поперечных переборках могут быть разрезаны, если обеспечена их конструктивная непрерывность, подобно палубным балкам сухогрузных судов (см. рис. 10.8, а, б и в). При пересечении со стеной рамных бимсов, с поперечной отбойной переборкой палубные продольные балки не разрезают. Как и в деке, соединение палубных балок с поперечными рамным набором может быть в зависимости от формы поперечного сечения непосредственным или с

помощью соединительных элементов — плавков, ребер жесткости (см. рис. 3.16 и 10.12). Вертикальные ребра жесткости рамных бимсов являются не только опорой для палубных балок, но одновременно повышают устойчивость стенок бимсов. Возможные варианты конструкции пересечения и соединения палубных балок предусмотрены в отраслевых стандартах и альбомах типовых конструкций.

§ 43. Палубы специализированных судов

В последние годы в отечественном флоте стала широко использоваться новые типы специализированных судов: суда с горизонтальной погрузкой, контейнеровозы, лихтеровозы, железнодорожные паромы, суда для перевозки массовых грузов и др. Каждый тип специализированного судна имеет характерные архитектурно-конструктивные особенности. Эти суда различаются конструкцией основных перекрытий корпуса и в наибольшей степени — конструкцией палубных перекрытий, которая зависит от назначения судна, способа проведения грузовых операций, от вида и количества палубных грузов.

Суда открытого типа. На судах с традиционной вертикальной грузообработкой время проведения грузовых операций сокращается за счет устранения штачки, т. е. горизонтального перемещения грузов в трюмах и танках, укрупнения грузовых мест. Размеры грузовых люков таких судов значительно увеличены, а подпалубные карлики уменьшены. Суда, на которых груз опускается в трюм сразу на свое место, без последующего горизонтального перемещения, называют открытыми.

Для таких судов характерны большие грузовые люки. Ширина люков достигает 0,7—0,8В. В результате возрастает масса закрытых центральных люков и затрудняется обеспечение их перемещаемости. Поэтому многие суда открытого типа имеют варпные, а некоторые даже тройные люки по ширине корпуса (см. рис. 3.1 и 3.2).

Для обеспечения общей прочности судна оставшиеся у борта части настила утолщают до размеров, применяемых по условиям технологии и сварки, а при необходимости увеличивают площадь сечения палубы за счет уширения корпуса на уровне ВП (применяют наклонные, с развалом, борты). Частично уменьшение площади сечения ВП из-за широких грузовых люков компенсируется установкой палубных продольных балок и в ряде случаев неформальными продольными косынками. В подпалубной их части предусматривают вырезы на длине между люками для быстрого удаления попавшей туда воды.

Суда открытого типа обычно бывают двупалубными, но в зависимости от размеров могут быть одно- и даже трехпалубными. Система набора ВП, как и димца, продольная. Для обеспе-

щения необходимой жесткости корпуса при действии крутящих и изгибающих в горизонтальной плоскости моментов часто устанавливают внутренние борты в трюмах или даже по всей высоте корпуса (см. рис. 3.2). Двойные борты усиливают крутильную жесткость корпуса примерно на 30%.

К судам открытого типа относятся лесовозы и лесовозы-пакетовозы (см. рис. 3.9). Специфические свойства лесных грузов и условия их перевозки определяют конструктивные особенности этих судов. Лесовозы — однопалубные суда с односторонними или двойными бортами, имеющие центральные люки больших размеров. Для полного использования грузоподъемности судна около одной трети лесного груза размещают на палубе. В зимнее время при небольшой высоте укладки леса не должно превышать одной трети ширины корпуса и препятствовать обзору и управлению судном с кормового мостика. Обычно, если обеспечена устойчивость судна, наибольшая высота лесного каравана на палубе составляет около 6 м.

Для перевозки леса на палубе требуется соответствующая прочность палубных балок и люковых пришек. Определяя нагрузку на палубу лесовоза, ее статическую часть принимают равной 0,7 высоты укладки леса (и м). Минимальная расчетная нагрузка составляет 20 кПа.

Суда с горизонтальной грузообработкой. Дальнейшее сокращение времени и затрат на грузовые работы по сравнению с судами открытого типа получено за счет постройки судов с горизонтальным способом приема и снятия грузов через кормовую, носовую или бортовые платформы (вырезы). Такие суда могут иметь и люки для традиционной вертикальной грузообработки стесняющих грузов. В зависимости от размеров суда с горизонтальной грузообработкой имеют одну, две или три прочные палубы, из которых вторая (главная) используется для проема тяжелых колесных транспортных средств (трейлеров с грузом). Высота танков 4—6 м. Для перевозки автомобилей применяют стационарные или водные платформы.

Грузовой район судна обычно не имеет поперечных переборок. Палубные перекрытия опираются только на борта судна при ширине его до 20 м или имеют пронизывающую опору в ДП на мощном карлике с паллерсами при большей ширине. Конструкцию палуб, толщину настила и размеры балок набора определяют из условия местной прочности. Система набора палубных перекрытий — продольная.

Наибольшие местные нагрузки на палубные перекрытия создают различные погрузчики с грузом, тягачи, трейлеры или шасси с контейнерами. Расчетные нагрузки определяют исходя из спецификационных характеристик транспортных средств, которыми являются: статическая нагрузка на ось Q_0 , кН; число колес на оси n ; число колес, образующих группу n , размеры отпечатка

а, в; площадь отпечатка A_0 — кв. Рассматривают два вида нагрузки: 1) нагрузка при движении транспортного средства по грузовой палубе во время погрузки — выгрузки в порт; 2) нагрузка от перевозимых транспортных средств при качке судна в море.

В расчетную нагрузку для участка палубного настила принимают удельное давление (в кПа) на отпечаток колеса или группы колес

$$p = k_0 p_0 \quad (10.2)$$

где k_0 — коэффициент динамичности; p_0 — статическое удельное давление на отпечаток колеса или группы колес (в кПа), определяемое по формуле $p_0 = (n/n_0)(Q_0/A_0)$.

Расчетная нагрузка на балки залубного набора $Q = pcd$, где p — удельное давление, определяемое по формуле (10.2); c и d — параметры, характеризующие протяженность нагрузки, м.

Полученные расчетные нагрузки дают возможность определить по Правилам Регистра СССР толщину настила грузовых палуб и требуемые моменты сопротивления палубных балок с учетом коррозии. При отсутствии необходимых данных относительно толщины настила палубы из обычной стали можно получить по формуле $\delta/a = 3,85 \sqrt{Q}$, где a — ширина, м.

Конструкция ВП судна с горизонтальной грузообработкой показана на рис. 3.8. Аналогичную конструкцию имеет и вторая (газовая) палуба. Промежуточные опоры у палубных переборок при ширине судна до 20 м обычно отсутствуют. Несущими балками являются разные бимсы, установленные через две шпации и воспринимающие нагрузку непосредственно или через палубные продольные балки. Карлингсы, разрезанные на бимсах, сохраняют плоскую форму катба разных бимсов и отчасти являются в совместный шаг смежных с нагруженной балки.

Контейнеровозы. Контейнеры перевозят как специализированные суда, так и почти все сухогрузные суда, частично приспособленные для этого. Контейнеровозы — это суда, специально приспособленные для перевозки только контейнеров. Они имеют избыточный надводный борт, большое раскрытие палуб (до 0,85В), двойные борта и жесткую конструкцию трюмов.

На контейнеровозах чаще всего проектируют парные или тройные грузовые люки (при ширине корпуса более 27 м) и центральные (при меньшей ширине). Характерной особенностью палубы являются межлоковые настилы продольные переборки (карлингсы) таврового или коробчатого сечения, служащие опорой для секций люковых закрытий. Продольные карлингсы, как правило, устанавливают в плоскости продольных палубных балок и внутренних бортов.

Ввиду большого раскрытия палубы другие продольные связи (настил ВП, шпрингек) имеют большую толщину даже при незначительной степени позиционной прочности и продольной системе набора. Конструкция и размеры палубных связей сохраняются одинаковыми на всей длине контейнерных трюмов.

Люковые закрытия обеспечивают водонепроницаемость трюмов и выдерживают нагрузку от расположенных на них в 2—3 яруса палубных контейнеров. Расчетная масса грузового контейнера типа 1С длиной 6,1 м составляет 11—18 т. Расчетную нагрузку на крышки люковых закрытий в средней части судна при условии равномерного распределения принимают равной не менее 18—20 кПа. Причем учитывают не только нормальные, но и касательные напряжения в стенках балок, подкрепляющих крышки. Люковые крышки усиленно подкрепляют в местах расположения угловых флангов контейнеров.

Верхняя часть борта, включающая оставшийся настил палубы, верхние пояса наружного и внутреннего бортов и палатформу, представляет жесткую при кручении продольную балку коробчатого сечения (см. рис. 3.5). Ширина поперечных межлоковых палубных переборок над поперечными переборками не должна быть менее $\delta = 1,5L + 1000$ мм. Если верхняя часть поперечной переборки устроена в виде коробчатой балки, ширина переборки может быть уменьшена.

Суда для перевозки массовых грузов (СМГ). Почти все массовые грузы (руда, уголь, гранит, асбест, зерно, цемент и др.) не теряют своих свойств при размещении их в трюме по всей его высоте. Поэтому все специализированные суда для перевозки массовых грузов однопалубные. К тому же отсутствие нижних палуб улучшает условия проведения грузовых работ грейферами и машинами мултрюмной механизации.

Палубу СМГ с центральными грузовыми люками шириной около 0,5В подкрепляют балками по продольной системе набора. Расстояние между рамными бимсами (полубимсами) равно четверти ширины. Основной тип СМГ имеет поалубные полубимсы лютеров, иногда используемые и для размещения дополнительного количества зерна (см. рис. 3.11). Наклонные стенки поалубных лютеров, расположенные под углом не менее 30° к ОП, ограждают перекачивание груза во время качки судна. Обшивка борта и наклонных стенок в пределах поалубных лютеров имеет продольную систему набора. Иногда допускается поперечная система набора. Настил палубы между люками по длине судна рекомендуется дополнительно подкреплять разрезными поперечными балками в плоскости шпация.

Размеры сечений продольных балок внутри лютера, включая палубные, определяют из условия жесткой прочности, считая их жестко заданными на поперечных рамках и приняв на-

грузку соответствующей испытательному напору, а $\lambda_2 = 0,45$. Дополнительно проверяют устойчивость балок, считая их свободно опертыми.

§ 44. Платформы

Назначение платформ. Платформы обычно устанавливают в МО. Они служат для размещения вспомогательного оборудования, постов управления, устройства служебных помещений. В трюмах сухогрузных судов, в частности, в рефрижераторных, платформы, подобно настилам палубам, позволяют разложить груз по высоте с учетом его партияности, доставки в различные порты и, главное, с учетом обеспечения его сохранности. На средних и крупных судах платформы устанавливают в фор- и актернике под нижней палубой на расстоянии по вертикали не более 2,5 м. Они являются опорой конструкции для вертикального набора бортов в районе низов, участвуют в обеспечении необходимой жесткости корпуса в оконечностях. В фор- и актернике платформы, расположенные внутри соответствующей цистерны, выполняют также обойные функции или раздельные, если являются крышей цистерны.

В двойных бортах перфорированные (с отверстиями площадью 10—30 %) или затронутые платформы обеспечивают эффективные промечуточные опоры шпангоутам, что особенно необходимо на судах с ледовыми усилениями высоких категорий (УЛА, УЛ) и на ледоколах.

Нагрузка на платформы и требования к их конструкции. Расчетная нагрузка определяется с учетом функций, выполняемых конкретной платформой. Грузовые платформы загружают подобно НП. Платформы, ограничивающие цистерны, подвергаются действию сил напора жидкого груза (топлива, балласта) при качке судна. Размеры элементов конструкции определяют из условия местной прочности. Толщина настила обойных платформ составляет 6—8 мм.

Ледовые платформы на ледоколах и судах с ледовыми усилениями нагружаются в их плоскости со стороны бортовых перекрытий. Толщина настила платформ и сечения балок на этих судах дополнительно проверяют на устойчивость.

По конструкции платформы бывают обычно стационарными, но грузовые платформы могут быть и съёмными (откидывающимися), например при перевозке автомобилей. Как правило, платформы имеют поперечную систему набора.

Требования для цистерн

1. Назначение и конструктивные особенности палубных перекрытий сухогрузных судов.

2. Перечислите требования, которым должен удовлетворять настил палуб.

3. Какими должны быть размеры палубных балок основного и рамного набора сухогрузных судов?

4. Расскажите о конструкции палубных перекрытий сухогрузных судов с поперечной системой набора.

5. Какие особенности имеют конструкции палуб сухогрузных судов с продольной системой набора?

6. Особенности конструкций палубных перекрытий, применяемых на военных судах.

7. Требования, которым обусловлены размеры балок палубного набора на танкерах.

8. Назовите материалы и покажите конструкцию соединения обойных балок с балками и с поперечной переборкой.

9. Какими конструктивными решениями обеспечивается общая продольная прочность на судах с большим расходом палубы?

10. Расскажите о конструкции палуб судов с горизонтальной грузоподъемной.

11. Назначение платформ. Где они устанавливаются и каковы требования определяющие размеры их балок набора?

ГЛАВА 12. ПЕРЕБОРКИ

§ 45. Обзор характеристика переборок

Определение и классификация переборок. Соединяющие штуррежные переборки, разделяющие пространство основного корпуса, надстроек и рубок на отдельные отсеки и состоящие из обшивки и подкрепляющих ее балок, называют переборками. Переборками нередко называют также передние и задние стенки надстроек и все внешние стенки, образующие рубку.

Переборки классифицируют по ряду признаков. По месту расположения на судне — переборки основного корпуса, находящиеся ниже ВП; переборки надстроек и рубок, размещенные выше ВП. В свою очередь, переборки основного корпуса разделяются на трюмные, установленные ниже самой НП, и междупалубные (танкажные).

По назначению различают непроходимые, раздельные, противопожарные и обойные (пропиезные) переборки. Воду-, нефте- и газонепроницаемые переборки могут быть аварийными и переборками цистерн. Аварийные переборки препятствуют распространению на судно забортной воды из отсеков, получивших повреждения наружной обшивки, обеспечивают непотопляемость и остойчивость судна при затоплении одного или нескольких отсеков. Аварийные переборки размещают от донца до верхней или до второй палубы, которая соответственно называется палубой переборок. Переборки цистерн ограничивают судовые цистерны, предназначенные для размещения жидкостей (топливные, балластные, дитанки и др.). В отличие от аварийных переборки цистерн работают все время пока си-

стерым заполнены жидким грузом, топливом или балластом. Непроницаемые переборки плавных судов также относятся к переборкам шкестри.

Непроницаемые переборки, будучи достаточно жесткими в своей плоскости, являются опорами для перекрытий основного корпуса судна (двигательных, бортовых и палубных). Такие переборки называют еще главными, или основными. Противопожарными являются как непроницаемые стальные, так и специальные переборки с определенной степенью огнестойкости. Отбойные переборки устанавливают внутри больших цистерн и танков с целью уменьшения при качке динамического воздействия масс жидкого груза на конструкцию, ограничивающую цистерну.

По конструкции переборки могут быть плоскими, гофрированными, цилиндрическими, сферическими, ломаными, комбинированными. Плоские переборки имеют наибольшее распространение.

По ориентации различают поперечные (нормальные к ДП и ОП), продольные (параллельные ДП), наклонные (по отношению к ОП) и диагональные (под углом к ДП) переборки. Поперечные переборки обеспечивают поперечную прочность (примерно на 90 %) и форму поперечных сечений корпуса, повышают его эффективность при общем продольном изгибе и кручении.

Размещение переборок на судне. Правила Регистра СССР [17] устанавливают минимальное количество водонепроницаемых переборок в зависимости от длины судна и положения МКО. Форпаксовая, или тарамля, переборка отделяет форпик от основного корпуса в носу судна. Длина форпика находится в пределах $0,06L \leq l_f \leq 0,08L$ м на грузовых и в пределах $0,05L \leq l_f \leq 0,06L + 3,0$ м на пассажирских судах. Минимальная длина форпика устанавливается с учетом возможной глубины повреждения конструкции при аварийном ударе судна носом о препятствие. Наибольшая длина форпика предусматривает аварийные осадку и дифферент судна в допустимых пределах.

Переборка актерпика устанавливается в нос от кормового перпендикула на расстоянии $0,04-0,06L$ в зависимости от конструкции кормы и полноты ее сечений. В месте расположения этой переборки необходимо обеспечить свободный доступ к саленку носовой части дейдаунной трубы, закрепляемой на актерпиковой переборке.

Обязательными являются переборки, отделяющие МКО от остальных отсеков. Оставшаяся часть корпуса используется для грузовых помещений (рис. 11.1). Дополнительные переборки требуются на каждые 20 м увеличения длины сухогрузного судна. Между смежными поперечными переборками допускается расстояние до 30 м. Фактическая длина трюмчов уменьшается от 9 до 32 м и даже более, но не должна превышать предельной



Рис. 11.1. Главные поперечные переборки сухогрузного судна: актерпиковая (1); тарамля (2); переборки МКО (3); форпиковая (4).

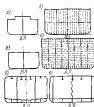


Рис. 11.2. Варианты (а-г) расположения продольных переборок на плавных судах.

длины отсека, при затоплении которого аварийная ватерлиния достигает предельной линии погружения.

Нефтеплавные суда кроме поперечных имеют одну переборку в ДП (при длине до 90—95 м) или две переборки симметрично ДП (при длине более 80 м). На крупнотоннажных судах длиной более 300 м иногда предусматривают три продольные переборки (рис. 11.2). Расстановка переборок на плавных судах должна удовлетворять следующим требованиям: позволять одновременно перевозить до трех-четырёх сортов жидких грузов; обеспечивать непотопляемость, аварийную остойчивость и защиту внешней среды судна в поврежденном состоянии; ограничивать динамические нагрузки на переборки и палубу при затоплении танков; обеспечивать местную и поперечную прочность корпуса (рис. 11.3).



Рис. 11.3. Расстановка переборок на танкере.
1 — актерпик; 2 — кормовые отсеки; 3 — МКО; 4 — кормовый бункер; 5 — носовые отсеки; 6 — грузовые танки; 7 — балластные танки; 8 — носовой кофферт; 9 — тарамля; 10 — форпик.

Размещение многосортных грузов на малых судах с одной продольной переборкой может вызвать трудности. Требуется жесткость для наливных судов с грузом обеспечивается при длине танков до 0,20λ, в средней части и до 0,1λ в оконечностях даже при отсутствии продольных переборок, поскольку предельная длина затопления немого больше. В балластном состоянии длина танков, допуская из условия непотопляемости, увеличивается.

Сокращение количества переборок уменьшает массу конструкции корпуса, переборочной арматуры, грузовой и защитной систем, снижает строительную стоимость судна. Однако увеличение размеров грузовых танков вызывает повышенное динамическое давление жидкого груза на конструкцию, которое в условиях резонанса в несколько раз превышает статическое давление. Поэтому размеры танков ограничивают. Длина грузового танка в средней части допускается до 0,1λ при отсутствии переборок; до 0,15λ при одной и до 0,2λ при двух и больших числе продольных переборок. Если длина среднего танка более 0,1λ (или 15 м), поперечные его устанавливают отбойную поперечную переборку, позволяющую уменьшать давление при раскачивании груза и исключать резонанс.

Общая длина грузовых танков составляет 0,60—0,74λ. Чтобы предотвратить возможное проникновение в соседние помещения легко воспламеняющихся фракций жидкого груза, в носу и корме грузовые танки ограничены амбразурами коффердамов длиной 0,9—1,2 м. В корме роль коффердама выполняет насосное отделение, расположенное перед МКО.

Ширину средних танков при двух продольных переборках принимают из условия размещения в них тяжелых жидких грузов, однако не более 0,6B. Продольные переборки производят в районе грузовых танков, а также через коффердамы и дилтанк в носу судна и в МКО в корме. Это позволяет выделить топливные танки в районе МКО, уменьшить вибрацию оконечностей. Комбинированные суда, например нефтерудовозы, также имеют по две продольные переборки на расстоянии 0,4—0,6B одна от другой.

Нагрузка на переборки. В составе корпуса судна переборки подвергаются нагрузкам как в своей плоскости, так и по нормали к своей поверхности. В плоскости поперечных переборок действуют эксплуатационные нагрузки, передаваемые длинными, бортовыми и палубными резервуарами. В своей плоскости поперечные переборки испытывают действие реакций килевых при постановке судна в док. В плоскости продольных переборок действуют торсионные и касательные напряжения, вызванные обшивкой корпуса судна.

Расчетной для водонепроницаемых поперечных переборок сухогрузных судов является аварийная нагрузка (p , кПа), дейст-

вующая при затоплении отсека (трюма) и определяемая по формуле

$$p = \rho g z_0, \quad (11.1)$$

где z_0 — расстояние точки приложения нагрузки для рассматриваемой связи от палубы переборок, м. Нагрузка на аварийные переборки — случайная, поэтому напряжения в пластинах обшивки на опорном контуре допускаются до предела текучести.

Расчетное давление на переборки цистерн, ограничивающих полностью заполненные дилтанки, грузовые танки, в точках с координатами x_0 , y_0 и z_0 находят (ρ кПа) по формуле

$$p_x = \rho g [(1 + a_0/g) z_0 + (x_0 + l_0/2) \phi + 0,5 (y_0 + b_0/2) \theta], \quad (11.2)$$

где a_0 — расчетное ускорение при качке на волнении, определяемое по формулам Правил Регистра СССР, m/s^2 ; z_0 — расстояние рассматриваемой связи от палубы, ограничивающей отсек, м; x_0 и y_0 — расстояние той же связи соответственно от поперечной и продольной вертикальной плоскостей, проходящих через ЦТ объема отсека в положении равновесия, м; l_0 и b_0 — длина и ширина танка (отсека), м; $\phi = 0,156 - 42 \cdot 10^{-4} z_0$; $\theta = 0,510 - 1,0 \cdot 10^{-3}$ — расчетные углы килевой и бортовой качки судна неограниченного района плавания, рад.

Определяя проекции ускорения ЦТ судна, его абсциссу (x м) от киля можно принять равной абсциссе ЦВ, которая приближенно составляет $x_0 = (20c_0 - 13,5) L \cdot 10^{-4}$.

В любом случае расчетное давление (ρ кПа) на переборки цистерн принимается не менее $p_{\text{расч}} = \rho g (z_0 + 2,5)$. Расчетное давление (ρ кПа) на переборки балластных и топливных цистерн $p_0 = \rho g (z_0 + \Delta z)$, где Δz — высота воздушной трубки над крышей цистерны, м.

Общие требования к переборкам. Аварийные переборки сухогрузных судов по конструкции чаще всего плоские, но могут быть и кофированными с вертикально расположенными гофрами. По высоте корпуса они разрезаются на палубы, участвующие в общей килевой судна. Расстояние между поперечными переборками в целях повышения эффективности использования трюмов следует выбирать критичными размерам, наиболее опасным при перевозке грузовых мест. При этом необходимо учитывать размеры зазоров между грузовыми мостками и высотой стенки балок набора переборок. Естественно, что расстояние между поперечными и между продольными переборками критично принятой стандартной шпации соответственно поперечного и продольного набора.

Обшивку плоских неперфорированных переборок собирают из горизонтальных досок, что позволяет принимать их толщину в соответствии с нагрузкой и избегать увеличения массы. В целях унификации листов ширину досок и большинство случаев вы-

барабит одинаковой. Высота нижнего пояса аварийных переборок над вторым дном требуется не менее 900 мм.

Для обеспечения местной прочности, а в ряде случаев и устойчивости обшивку переборок подкрепляют вертикальными или горизонтальными балками. Балки набора непроницаемых переборок соединяют по концам с соответствующими балками опирающимися на них перекрытий корпуса.

§ 46. Плоские непроницаемые переборки

Системы набора переборок. Перекрытия переборок имеют прямоугольную форму и средней части и трапециевидную — в оконечностях. Для подкрепления обшивки плоских переборок применяют две основные системы набора, каждая из которых применяется в виде двух конструктивных вариантов. Простая (однородная) система состоит из параллельных балок одного направления: вертикальных, называемых стойками, или горизонтальных, называемых ребрами (рис. 11.4). Сложная система включает балки двух взаимно перпендикулярных направлений, а именно: основные и перпендикулярные к ним рамные балки. Конструктивные варианты сложной системы набора различаются ориентацией основных балок, которые могут быть установлены вертикально или горизонтально. Перпендикулярно к ним, т. е. соответственно горизонтально и вертикально, устанавливают рамные балки (см. рис. 11.2, б и г). Ориентация балок основного набора зависит от соотношения сторон переборки и условий ее работы в составе корпуса судна. Возможно подкрепление одной переборки, состоящее из конструктивных вариантов одной или даже двух систем набора. Определенными признаками для выбора системы набора переборок при действии поперечной нагрузки являются отношение сторон опорного контура и значение переборок, а также наличие существующих сжимающих напряжений в ее плоскости.

Аварийные переборки обычных сухогрузных судов подкрепляют только вертикальными балками. Такое расположение балок на аварийных переборках по сравнению с горизонтальными экономит массу набора,

обуславливает меньшую потерю полезной вместимости трюмов, уменьшает коррозию набора, способствует очистке переборки от сыпучих грузов.

Простая система набора с горизонтальными расположением балок используется в конструкции форпиковой переборки (см. рис. 11.4). В этом случае горизонтальные балки устанавливают в нижней части для по всей высоте переборки.

Сочетание конструктивных вариантов простой системы набора применяют на аварийных переборках судов с ледовыми усилениями категорий УЛД, УЛ и ЛД. Для обеспечения устойчивости обшивки таких судов со участки аварийной не менее 1,2 м, примыкающие к борту, подкрепляют балками, расположенными по нормали к борту. Подобен комбинированная система может быть использована и на форпиковой переборке, когда под нижней палубой набор горизонтальный, а выше ее — вертикальный.

Варианты сложной системы набора применяют для подкрепления лопатки переборки палубы. Будучи расположенными внутри шпангоута, балки основного и рамного набора практически не вызывают потери их вместимости.

Балки, расположенные в двух направлениях, хорошо «переплетаются» с балками опирающимися на переборку перекрытий, что повышает жесткость переборки. Однако такая конструкция набора переборок оказывается сложной и трудоемкой в изготовлении, т. е. менее технологичной, чем простейшая система набора из балок одного направления.

Сложную систему набора переборок с вертикальными расположением основных балок и горизонтальными рамными (шпальфами) применяют в дилтанках, на поперечных и продольных переборках малых судов длиной до 180 м при поперечной системе набора борта. Горизонтально расположенные основные балки и рамные стойки обычно используют на поперечных переборках танкеров с продольной системой набора борта и продольных переборок. На палубных судах балки набора переборок устанавливают внутри бортовых и балластных танков, в которых обычно не перевозится сырая нефть, а центральные танки частично освобождаются от набора, что позволяет улучшить условия их мойки и зачистки.

Расстояние между стойками или между горизонтальными балками форпиковой переборки, учитывая ее особую роль в обеспечении безопасности судна в случае повреждения конструкции форпика, не допускается более 600 мм. Там же ограничивается расстояние между балками на примыкающих к борту участках поперечных переборок у судов активного ледового плавания. Расстояние между балками основного набора всех остальных плоских водонепроницаемых переборок принимается до 900 мм.

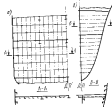


Рис. 11.4. Простая система набора переборок. Аварийная (а) и форпиковая (б) переборка.

Практическую шпацию набора переборок согласовывают для стоек со шпанной продольных балок при продольной системе набора динца и ВП, а для горизонтальных — со шпанной продольных балок при продольной системе набора бортов.

Толщина обшивки переборок. Под действием поперечной нагрузки обшивка непроницаемых переборок между балками набора изгибается по параболической поверхности. Толщину такой обшивки определяют из условия прочности балки-полоски единичной ширины, жестко заделанной на своих опорах наду симметричной конструкции и нагрузки. В Правилах Регистра СССР нормируют напряжение изгиба в середине пролета балки-полоски. Толщину обшивки (в мм) с учетом добавки на коррозию определяют по формуле

$$s = 15,8t \sqrt{\rho_d / \sigma_n} + s_k, \quad (11.3)$$

где ρ_d — расчетная нагрузка на уровне нижней кромки рассматриваемого пояса, вычисляемая по формулам (11.1) или (11.2), кПа; $A_k = 0,50 + 0,90$ — коэффициент допускаемых напряжений после износа в зависимости от типа переборки ($A_k = 0,85; 0,80; 0,60$ и $0,70$ — соответственно для аварийных переборок; для переборок грузовых танков; для формиковой переборки и при перевозке массовых грузов).

Вследствие повышенной коррозии толщину нижних поясов переборок по сравнению с расчетной увеличивают на 1 мм в трюмах и танках, на 2,5 мм — в котельном отделении. Толщина верхнего пояса продольных переборок танкеров должна быть не менее толщины нижнего пояса.

Минимальная строительная толщина (в мм), применяющаяся для обшивки аварийных переборок сухогрузных судов, $s_{min} = 5a + 2,5$ (нижний пояс на 1 мм больше), а переборок грузовых танков военных судов: $s_{min} = 0,025L + 6,5$ при $80 \leq L \leq 200$ м; $s_{min} = 0,035L + 5,5$ при $L < 80$ м.

Толщину обшивки непроницаемых переборок не принимают больше толщины соответствующих по высоте поясов бортовой обшивки с учетом возможных различий в шпангах и материале. Толщина листов обшивки полупереборок составляет не менее 7 мм в трюмах и 6 мм в танках, а толщина листов обшивки отбойных переборок равна толщине переборок штепеля.

Балка набора переборок. При винтовом закреплении концов стоек и горизонтальных ребер за расчетный принимают изгибающий момент в пролете. Опорныегибающие моменты и перерезывающие силы воспринимаются увеличенным за счет хвостовым поперечным сечением балок так, что нормальные напряжения не превышают напряжений в пролете. В случае бесконечного закрепления концов стоек или горизонтальных ребер при пересечении со стеной рамных стоек переборок ште-

стер за расчетный принимают изгибающий момент в опорном сечении и, следовательно, размер балок увеличивается.

Момент сопротивления балок основного набора — стоек и горизонтальных ребер — определяют (в см⁴) по формуле

$$W = 10^8 \rho d^3 / m k_s \sigma_n, \quad (11.4)$$

где ρ — расчетное давление в середине пролета стойки или на уровне рассматриваемой горизонтальной балки, кПа; I — расчетный пролет балок, м; m — коэффициент изгибающего момента, равный 21 при винтовом закреплении, 13 при обварке и 10 при обварке «ка» с концов балок основного набора; $A_k = 0,85; 0,80$ и $0,75$ — соответственно для стоек водонепроницаемых переборок, для стоек переборок грузовых танков и для горизонтальных балок продольных переборок танкеров. Горизонтальные балки продольных переборок в пределах 0,15D от палубы и динца проверяют дополнительно на устойчивость (см. § 25). Поперечное сечение стоек, устанавливаемых под карлингсами, подобно шпалерам, также проверяют на устойчивость.

Момент сопротивления балок рамного набора переборок (рамных стоек и горизонтальных рам — шельфов) вычисляют по аналогичной формуле, применяя по Правилам Регистра СССР [17] соответствующие исходные параметры. На аварийных переборках односторонних судов момент сопротивления обычных и рамных стоек увеличивают на 20 %. Размеры балок основного и рамного набора отбойных переборок принимают такими же, как для соответствующих балок аварийных переборок.

На форпиковой переборке, учитывая подпор воды при ходе судна с повреждением носом, момент сопротивления сечения балок основного набора увеличивают на 30 %, а рамных стоек — на 20 %.

Момент сопротивления рамных стоек и шельфов продольных переборок танкеров принимают не менее 90 % от такового для рамных шпангоутов и бортовых стрингеров соответственно. Одновременно для рамных балок концевых и продольных переборок военных судов кроме момента сопротивления принимают и площадь поперечного сечения стенки, учитывая ее работу на срез. Высота профиля рамных балок составляет не менее 0,1L из водонепроницаемых и не менее 0,125L на переборках штепеля. Если рамная стойка предусмотрена в ДП, высота стенки шельфов поперечных переборок в грузовых танках может быть уменьшена до 0,1L. Толщина стенки рамных балок соответственно равна толщине листов переборки у середины пролета стоек или на уровне шельфа.

Конструкция набора переборок сухогрузных судов. В качестве балок основного набора предпочтительно использовать катаные профили. Однако между ограничительными числами катаных



Рис. 11.5. Ключное закрепление концов стоек переборок на палубе и днище при поперечной (а) и продольной (б) системах набора.

1 — конструкция переборки; 2 — стойки; 3 — клинья; 4 — шпильки; 5 — оловянный флюс; 6 — горизонтальный флюс; 7 — шпильки; 8 — шпильки; 9 — шпильки.

меров в стандартах производится изготовлять из верфи составные изогнутые балки обычно таврового сечения. Все балки переборок корпуса судна, независимо от используемой системы их набора, имеют ключное закрепление своих концов. Исключение из этого требования — непосредственная обварка торцов стоек аварийных переборок в верхнем тыльнике яхты палубы надводного борта. Как и в других переборках, в конструкции переборок яхты являются не только соединительными деталями. Они воспринимают передающиеся силы и увеличивают изгибающие моменты в опорных сеченных балках.

Размеры клиньев определяются из условия равнопрочности с закрепляемой балкой по формуле (9.1). Дополнительно требуется, чтобы высота нижних клиньев была не менее $1/12$ у стоек аварийных переборок и не менее $1/7$ у стоек переборок шхеры, где l — пролет соответствующих стоек, м. Указанная высота клиньев перекрывает сечения, в которых изгибающие моменты по абсолютному значению больше моментов в пролете стоек, принятых в качестве расчетных.

Второй катет клиньев принимается таким, чтобы верхнюю кромку приварить к ближайшему бамсу, а нижнюю довести до ближайшего флора при поперечной системе набора палубы и днища (рис. 11.5). При продольной системе набора палубы и днища стойки переборок и их концы устанавливаются в плоскости продольных балок. Верхние концы восстанавливают конструктивную непрерывность разрезанных на переборке валунов продольных балок. Катеты клиньев определяют в зависимости от момента сопротивления этих балок. На промежуточных палубах стойки переборок обычно разрезают, так как изменяются размеры их поперечного сечения и, кроме того, вторую палубу при переборках с переборкой чаще делают непрерывной. Варианты соединения концов стоек с промежуточными палубами показаны на рис. 11.6, а—г.

В верхнем тыльнике, яхты палубы переборок, стойки могут соединяться со второй палубой и без клиньев. В таких случаях технологические зазоры исключаются и стойки своими торцами непосредственно приваривают к катету второй палубы. Если высота тыльника шхеры с высотой трюма в НП раз-

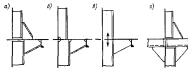


Рис. 11.6. Варианты (а—г) соединения стоек переборок с промежуточными палубами.

резна на поперечной переборке, то возможно и целая унификация применения одинаковых по размерам сечений стоек и даже их разрезанных на палубе (см. рис. 11.6). Стойки переборок шхеры и опорных сеченных обязательно имеют ключное соединение.

Особенности конструкции переборок яхт имеют судна. Продольные переборки при переборках с поперечными сохраняют непрерывность. Монтажные стыки продольных переборок отстоят от поперечных на расстоянии не менее 200–300 мм. На крупнотоннажных танкерах поперечные переборки иногда разрезают и в ДП, стыковочные затем на стыке разной стойки. В таких случаях технологически удобно обеспечить требуемую непрерывность вертикального клада и обшивки листа.

Плоские переборки яхт имеют судна подкрепляют балками всегда двух направлений. Танкеры длиной до 180 м на продольных переборках в качестве основных балок имеют стойки с промежуточными опорами на горизонтальных рамах балок — шельфах, если система набора бортовых переборок поперечная. В этих случаях и конструкция поперечных переборок аналогичная. Она состоит из стоек и одного-двух шельфов по высоте переборки (см. рис. 11.2). Шельфы переборок, расположенные на уровне бортовых стрингеров и соединенные между собой клинцами, образуют жесткие горизонтальные рамы.

Верхний и нижний пояса продольных переборок в своей плоскости подвергаются действию наибольших нормальных напряжений при общем крене судна. Чтобы кроме местной прочности обшивки обеспечить ее устойчивость, на верхнем поясе продольных переборок с поперечной системой набора иногда между стойками устанавливают горизонтальные разрезные ребра или дополнительно увеличивают толщину обшивки.

На танкерах длиной более 180 м переборки бортов и продольных переборок вытнуты вдоль судна. С целью экономии массы набора параллельно короткой стороне, т. е. вертикально, устанавливают по борту рамы шпангоутов, а по продольным переборкам — рамы стоек в плоскости флоров и рамных

бимсов. Между рамными стойками, как и между рамными шпангоутами, размещают продольные балки, идущие параллельно короткой стороне части перекрытия, ограниченной этими стойками.

Продольные балки продольных переборок располагают на одном уровне с соответствующими бортовыми балками. В районе нижнего и верхнего поясов на высоте 0,1D от дна и от палубы они цельными и неразрезными проходят через поперечную переборку.

На судах длиной менее 180 м верхние и нижние продольные балки продольных переборок могут быть разрезаны при условии установки непрерывных бракет, проходящих через специально сделанную в поперечной переборке щель. Концы продольных балок в районе 0,1D от палубы и от дна срезают плавно, чтобы свести до минимума концентрацию напряжений. Остальные продольные балки по высоте переборок при любой длине судна могут быть разрезаны на концевых переборках прямыми сечениями.

Пролет горизонтальных балок по поперечным переборкам не следует принимать более 4,2—4,5 м, так как в противном случае исключается возможность подбора их среди катаных профилей. На крупнотоннажных танкерах шириной более 34—36 м на поперечных переборках предусматривают кроме средней в ДП еще и боковые рамные стойки (см. рис. 11.2, е). Для закрепления их концов по дну и палубе устанавливают динцевые страттеры и карлингсы, которые, естественно, учитываются в работе соответствующих перекрытий палубных судов.

Стенки рамных стоек переборок в зависимости от высоты поперечного сечения подкрепляют с одной стороны стенка горизонтальными или вертикальными ребрами жесткости. Дополнительно стенки рамных стоек подкрепляют бракетами (кницами) устойчивости в районе наибольших сосредоточенных сил, например, на уровне распорок (стойки продольных переборок); на концах книп, соединяющих рамные стойки с динцевыми и палубными рамными балками. Аналогично подкрепляют и шельфы переборок.

Туннель гребного вала. При среднем или промежуточном расположении МКО гребной вал в районе кормовых трюмов ограждают водонепроницаемым туннелем. Ось туннеля от оси вала (от ДП) смещена, чтобы обеспечить место для прохода, обслуживания и ремонта линки вала. Крышу туннеля в районе сузозручных трюмов делают сводчатой, так как она более эффективна в случае аварийного затопления трюма. За счет арочного эффекта сводчатая крыша под нагрузкой создает податливые опоры для верхних концов стоек туннеля. Если туннель проходит через палубу, ограниченную на уровне его высоты залубой или платформой, то крыша его плоская. Нагрузка на

конструкцию туннеля может быть либо внешней в случае затопления кормового трюма, либо внутренней при затоплении самого туннеля в случае повреждения диджудного сальника. Стенки и крышу туннеля подкрепляют изнутри в плоскости основных шпангоутов корпуса судна поперечными рамами, состоящими из стоек и краевых или наклонных бимсов. Нижние концы стоек должны крепиться кницами к настилу второго дна.

Толщину обшивки вертикальных стенок туннеля определяют так же, как и для аварийных переборок по формуле (11.3). Толщина настила сводчатой крыши туннеля может быть на 10 % меньше. Момент сопротивления поперечного сечения стоек туннеля (в см^3) вычисляют по формуле (11.4), принимая $m = 12$, $k_y = 0.75$. Для туннелей, проходящих через палубы, толщина обшивки и размер сечения стоек соответственно увеличиваются. Профиль, полученный для стоек, подкрепляет и сводчатую часть туннеля. Бимсы горизонтальной крыши туннеля определяют в соответствии с требованиями к основному набору НП.

§ 47. Гофрированные и легкие переборки

Прочные гофрированные переборки. При условии равнопрочности в использовании специализированного оборудования для гофрировки листов гофрированные переборки по сравнению с плоскими на 12—14 % легче и на 14—16 % менее трудоемки. Такие переборки широко применяются на палубных судах, где в наибольшей степени проявляется эффективность их конструкции. Однако с увеличением размеров судна возрастает минимально допустимая толщина деталей конструкции внутри танков, поэтому уже при длине более 168—170 м масса гофрированных переборок равна или больше массы плоских переборок. Тем не менее гофрированные переборки иногда применяют и на танкерах больших размеров ради эксплуатационных преимуществ (например, продольная переборка в ДП на танкерах типа «Победа» и др.).

Гофрированными могут быть и аварийные переборки универсальных сузозручных судов, лесовозов, судов для массовых грузов и др. В отличие от переборок палубных судов аварийные гофрированные переборки не имеют рамных балок — шельфов, что позволяет сократить потери полезной вместимости трюмов. Гофры аварийных переборок ориентированы только вертикально. Продольные переборки танкеров, как правило, выполняются с горизонтально расположенными гофрами, а поперечные могут иметь или вертикальные, или горизонтальные гофры. Для переборок корпуса судов применяют гофры трапециевидного, волнистого или коробчатого поперечного сечения.

Толщину трапециевидных и коробчатых гофров вычисляют по формуле (11.3), как и для плоских переборок, принимая за расстояние между балками ширину грани гофра. Толщину волнистого гофра определяют по специальной формуле [17].

Подобно основному набору плоских переборок, гофры имеют промежуточные опоры на рамных стойках при горизонтальном расположении и на шельфах — при вертикальном. Размеры указанных рамных балок при прочих равных условиях оказываются большими, чем у плоских переборок, из-за меньшей площади сечения гофрированного присоединенного пояса (15—20 толщин) по сравнению с плоским.

Под действием поперечной нагрузки отдельные гофры в составе переборок, кроме присоединенных продольной кромкой к опорному контуру, работают на изгиб как изолированные балки основного набора плоских переборок. Поэтому требуемый момент сопротивления поперечного сечения гофров определяют по той же формуле (11.4), что и для соответственно ориентированной балки основного набора плоских переборок, подставляя вместо ширины неразмеченную ширину гофра, равную двум шагам. Коэффициент момента принимают таким же, как для балки без квив, а именно: $m = 13$ для неразмеченных гофров и $m = 10$ для разрезанных на рамных балках.

В процессе изгиба гофром оба пояса имеют одинаковые напряжения, т. е. материал используется более рационально, чем при изгибе стоек или ребер волнистых переборок. Поэтому в случае равных моментов сопротивления на единицу ширины (высоты) переборки гофрированная переборка оказывается легче плоской. Наибольшую экономию массы можно получить, применяя толщину гофрированных переборок минимально допустимый при условии выполнения требуемых отношений d/s для трапециевидных и R/s для волнистых гофров. Остальные элементы сечения определяют с учетом рекомендаций, приведенных в Правилах Регистра СССР.

Конструкция гофрированных переборок. Гофрированные аварийные переборки устанавливают непосредственно на палубу второго дна и сваривают по периметру. Для нейтрализации жестких точек в плоскости граней, не совпадающих с плоскостью флора, но параллельных ей, устанавливают поперечные ребра. При продольной системе набора дна эти ребра делают разрезными (рис. 11.7). Под карагангом на гофрированной переборке необходимы местные подкрепления или рамная стойка на всю высоту переборки.

На судах, перевозящих взрывчатые грузы, гофрированные переборки могут состоять из прямоугольных гофров со стороны, равной ширине продольных балок. При перевозке тяжелых массовых грузов гофрированные переборки устанавливают между диншевой и палубой опорными конструкциями. Последние

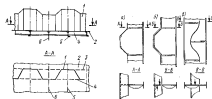


Рис. 11.7. Соединение гофрированной переборки с палубой второго дна.
1 — гофрированная переборка; 2 — палуба второго дна; 3 — флор; 4 — поперечная балка переборки

Рис. 11.8. Варианты (а—е) соединения рамных балок с обшивкой гофрированной переборки.

необходимы для уменьшения напряжений в диншевых и палубных продольных рамных балках, а также для обеспечения жесткости корпуса при большом раскрытии палубы этих судов.

Конструкция соединения рамных стоек с обшивкой гофрированных переборок наливных судов зависит от длины гофров, из которых формируется переборка. К гофрам из листов полной длины рамные стойки продольных переборок приваривают со стороны бортовых танков стенок, обрезанной по форме гофров (рис. 11.8, а). Гофры, изготовленные из коротких листов ввиду отсутствия специализированного оборудования, стыкуются на каждой рамной стойке с неизбежностью при этом разнотенностью (рис. 11.8, б и в). Аналогично на шельфах стыкуются вертикальные гофры и в случае изменения толщины обшивки по высоте переборки.

Рамные балки гофрированных переборок, как и другие рамные балки, при отношении высоты стенки к ее толщине $A/s > 60$ подкрепляют ребрами жесткости и бракетами для обеспечения их устойчивости при изгибе и сдвиге. С целью устранения жесткой точки стороны бракет устойчивости, присоединяемых к гофрированному поясу, заканчиваются на специально установленном ребре (палубе) по форме гофра.

На танкерах поперечные переборки с вертикальными гофрами соединяют с диншевой обшивкой и палубой палубы непосредственно. Выведение промежуточных танковых балок в плоскость поперечных переборок при соединении с диншей нецелесообразно. Для технологичности конструкции соединения диншевой и палубных продольных балок с гофрированной перебор-

кой совершенно необходима кратность неразвернутой ширины гофра и шага балок (обычно $d = 2a$).

Продольные балки рекомендуются соединять с серединой граней трапециевидных гофров или с вершинами волнистых гофров, так как в этих случаях конструкция более доступна при сборке и не совпадает с вертикальными швами, соединяющими отдельные гофры в полотно переборки. На переборках для уменьшения концентрации напряжений продольные балки могут быть разрезаны с плавным окончанием концевых сечений. На танкерах длиной более 150 м требуется непрерывность продольных балок при пересечении с поперечными переборками. В этих случаях технологичной будет гребенчатая конструкция их соединения, когда переборку с приваренными к ней киндами и сделанными под ними прорезами впаивают на стенку продольных балок со срезами и в этом месте свободными покимами.

Верхние и нижние кинды кинд, соединяющих соответственно днищевые и палубные продольные балки с переборкой, крепятся к специально установленным во впадинах гофров горизонтальным пазам или к полосе, чтобы исключить местные точки во указанных концах кинд.

Для удобства сборки и необходимой жесткости соединения вертикально гофрированных поперечных переборок с бортами судна следует вводить плоские участки, примыкающие к борту. Чтобы проще согласовать контур переборки с обводами корпуса в районе скулы, целесообразно ширину плоских участков на танкерах с односторонним дном принимать не меньше ширины проециции скуловых поясов на ОП. Плоский участок переборки можно включить в состав бортовой секции, особенно при продольной системе набора борта, что уменьшит объем работы в процессе сборки и сварки секций на стапелном мосте.

Поперечные переборки с горизонтальными гофраем, как и продольные гофрированные переборки, имеют внизу и сверху плоские участки. Высота этих участков предусматривается такой, какая необходима для размещения опорных конструкций днищевых и палубных продольных балок.

С бортовой обшивкой горизонтальные гофры поперечной переборки соединяются непосредственно. При продольной системе набора борта в опорных конструкциях балок следует исключить жесткие точки у концов кинд установкой вертикальных планок, подобно соединению днищевых продольных балок с вертикальными гофраем.

Пересечение гофрированных переборок между собой выполняют различными способами — в зависимости от ориентации гофров и требований к непрерывности переборок. Непрерывные продольные переборки соединяют с поперечными, имеющими горизонтальные гофры, либо непосредственно со смещением

вертикальных граней гофров на $1/4$ их ширины, чтобы исключить труднодоступные места, либо через тавровые балки, стенки которых разрезаны по форме гофров и приварены к продольной переборке с обеих сторон. Продольные переборки, разрезаемые на поперечных переборках, стыкуются на стенке двутавровой вертикальной балки, введенной в состав поперечной гофрированной переборки.

Поперечная переборка с вертикальными трапециевидными гофраем соединяется с продольной либо непосредственно, будучи разрезанной на всю высоту по форме гофров продольной переборки, либо путем включения в состав поперечной переборки с любой формой гофров плоского участка, на котором стыкуются продольные переборки.

В любом случае верхний и нижний поясы продольных гофрированных переборок на высоте 0,10 от палубы и от дна делают плоскими с горизонтальными ребрами и обязательно непрерывными при пересечении с поперечными переборками. Плоские участки продольных гофрированных переборок необходимы для вовлечения палубы и дна в более эффективную работу при общем изгибе судна, для восприятия вертикальных нагрузок со стороны дна и палубы, для упрочнения конструкции пересечения с поперечными переборками в зонах повышенных напряжений.

Легкие переборки и выгородки. К легким относятся все промежуточные переборки основного корпуса, надстроек и рубок. Эти переборки, как и прочие, могут частично воспринимать поперечную нагрузку, например, отбойные в цистернах и полупереборки в ДП сухогрузных трюмов, и одновременно в своей плоскости — нагрузку от поддерживаемых ими конструкций.

Отбойные переборки делают только плоскими с круглыми, овальными или прямоугольными со скруглением углов вырезами общей площадью около 10 % от площади переборок. Небольшие балки набора могут быть прерваны на вырезах. По контуру вырезов между балками основного набора и переборками к ним устанавливают дополнительные ребра жесткости. Момент сопротивления балок основного и рамного набора отбойных переборок может быть уменьшен до 50 % по сравнению с требуемым для соответствующих балок неперерываемых переборок. Отбойные переборки (или отбойные листы) предусматривают в днтинках, толщинных цистернах при ширине более 9 м и в цистернах лайков. При длине этих цистерн более 9 м посередине устанавливают поперечные отбойные переборки или листы.

Диаметральные полупереборки обычно предусматривают в грузовых помещениях сузов, перевозящих массовые грузы, с целью их разделения по ширине трюмов. Одновременно они являются опорными конструкциями для палубных и днищевых

перекрестий. По длине полупереборки проходит от поперечного комматеса грузового люка до ближайшей поперечной переборки. При переезде вышущих грузов в ДП на длине грузового люка устанавливают съемные переборки (шпифинг-борасы), препятствующие пересыпанию грузов при качке судна.

Поперечные полупереборки у каждого борта размещают посередине трюмов предельной длиной и в надстройках для обеспечения промежуточной опоры карангсам и необходимой жесткости корпуса и надстроек. Многочисленные лапши, в основном принимаемые, переборки (выгородки) устанавливают в надстройках и рубках, обеспечивая выгораживание необходимых служебных и других помещений. По конструкции эти легкие переборки делают плоскими со стойками или из штампованных гофрированных листов.

Вопросы для повторения

1. Назовите критерии, по которым классифицируют переборки на судне.
2. Какие требования предъявляют к размещению переборок на сухогрузах и наливных судах?
3. Расположите по нагрузкам действующим на переборки.
4. Схарактеризуйте конструктивно плоские гофрированные переборки.
5. В чем состоит особенность конструкции набора переборок сухогрузных и наливных судов?
6. Какие требования предъявляют к конструкции траверза грузового люка?
7. Схарактеризуйте конструкцию гофрированных переборок.
8. В чем состоит особенность конструкции легких переборок и выгородок?

ГЛАВА 12. НАДСТРОЙКИ, РУБКИ, ОГРАЖДЕНИЯ

§ 45. Надстройки

Определение и назначение надстроек. В общем случае к надстройкам относят все замкнутые надпалубные сооружения, предназначенные для размещения различных помещений (служебных, жилых, пищевых, машинных, общественных и др.). Собственно надстройкой называют надпалубное одно- или многопустое, закрытое палубой сооружение, ширина которого в каждом сечении равна ширине корпуса в данном месте. К надстройкам относят и те сооружения, боковые стенки которых отстоят от ближайшего из бортов на расстоянии не более 0,01 ширины корпуса судна.

По длине судна надстройки могут простираться либо на части, либо на всей длине (так называемая сплошная надстройка). Современные суда обычно имеют раздельные по длине надстройки. Носовую надстройку называют баковой, или просто баком, кормовую — ютовой, или югом, а расположен-

ную в средней части по длине судна — средней. Среднюю надстройку в зависимости от ее длины, а следовательно, от степени участия в общем изгибе корпуса судна считают короткой или длинной.

Короткая надстройка имеет длину (в м) не более

$$L_1 = 3(0,5B_1 + h)W_0/W_0 \quad (12.1)$$

где B_1 — ширина палубы надстройки за вычетом ширины большого выреза, если он имеется (например, машинной шахты), м; h — высота первого яруса надстройки, м; W_0 и W_1 — фактический и допускаемый (при $\eta = 1$) моменты сопротивления эквивалентного бруса на уровне расчетной палубы. Средняя надстройка, не являющаяся короткой, считается длинной, участвующей в той или иной степени в общем изгибе вместе с остальным корпусом судна, а ее палубы — расчетной. Каждый концевой участок надстройки принимают равным $L_1 = 0,5L_1$, где L_1 определяется по формуле (12.1).

По концам надстройки ограждены переборками, или поперечными стенками. Передние переборки средней и кормовой надстроек называются носовыми, или фронтальными. Они испытывают удары волн в изгонную погоду и поэтому должны быть достаточно прочными. Фронтальные переборки могут быть плоскими, цилиндрическими или полуболельцевой формы выключностью в нос судна. Задние концевые переборки надстроек называют кормовыми. В последние годы наметилась тенденция упрощения внешних очертаний надстроек и рубок с целью рационального использования их объема и повышения технологичности конструкции.

В зависимости от назначения и архитектурно-конструктивного типа судна количество надстроек на судне и их протяженность могут быть различными. Все суда, за редкими исключениями, имеют носовую надстройку, длина которой принимается не менее 0,07 L . При длине более 0,25—0,30 L бак называют удлиненным. Разную (многоярусную) надстройку устанавливают, как правило, над МКО. Внутри надстройки над МКО расположены машинная шахта, завершающаяся световым люком, дымоход, заключенный в верхней части в трубу, а также служебные помещения.

Для большей утилизации грузовых помещений и повышения эффективности грузовых работ МКО на многих современных судах смещают в корму или в промежуточное (на 3/4 L) положение. Иногда, например на ляхтерюзов «Алексей Косыгин», развитая надстройка смещена в нос судна, хотя МКО предусмотрено в корме.

Кроме образования необходимых на судне помещений и создания условий по управлению судном, надстройки в закры-

том состоянии обеспечивают дополнительный запас пластичности, учитываемый при определении высоты надводного борта, а по окончании надстройки за счет развала бортов улучшает устойчивость судна на волну.

Требования к конструктивным элементам надстроек. Нагрузка на надстройки определяется массой конструктивных расположенных выше ярусов, массой рубок и размещенного в них или на них оборудования, приборов, устройств и пр. Все надстройки, как и сам корпус, подвергаются вибрации, обусловленной slamming, работой механизмов, гребных валов. Для них средние надстройки и рубки, прочно соединенные с корпусом, появляются в общий изгиб судна и нагружаются соответствующими напряжениями в продольных связях.

Требования к размерам конструктивных элементов надстроек зависят от района их расположения по длине судна и от протяженности. Толщину бортовой обшивки и стального настила палубы бака, короткой средней надстройки и юта определяют (в мм) по формуле

$$s = (mL + n) \alpha, \quad (12.2)$$

где $m = 0,040 + 0,045$ и $n = 4,0$ для бортовой обшивки; $m = 0,03$ и $n = 3,5$ для настила палубы; $\alpha = 1,0$ при $d/D \geq 0,8$ и $\alpha = d/D + 0,2$ при $0,65 \leq d/D < 0,8$. Полученные по формуле (12.2) значения толщины не изменяют по длине указанных надстроек.

Толщину настила палубы и обшивки борта длиной средней надстройки определяют дифференцировано с учетом изменения эффективности ее поперечных сечений по длине. Ввиду постепенного увеличения в общий изгиб длинные средние надстройки имеют в своей средней части большую, чем в концевых участках, толщину листов настила палубы и бортовой обшивки. Исключением является нижний пояс бортовой обшивки шириной не менее $b/2$ и толщиной на концевых участках не менее чем в средней части.

Если относительная длина надстройки $c = L/(0,5b_2 + b) \geq 4,5$, то в средней ее части толщину бортовой обшивки определяют по формуле (7.7), а толщину настила палубы полагают в этом случае расчетной и находят из условия обеспечения общей прочности судна. Настил палубы длиной средней надстройки проверяют на устойчивость и толщину его принимают не менее минимально допустимой.

Толщину настила палубы и обшивки борта концевых участков длиной надстройки вычисляют по формуле (12.2). Толщина настила ВП судна в пределах длиной надстройки может постепенно уменьшаться от ее концов к середине по сравнению с толщиной ВП судна без длиной надстройки.

По концам надстроек ввиду резкого изменения поперечного сечения появляется концентрация напряжений, которая вызывает трещины в продольных связях корпуса вследствие усталости материала в условиях знакопеременной нагрузки при общем изгибе судна. Для уменьшения концентрации нормальных напряжений необходимо исключить резкие обрывы надстройки. С этой целью вписывая боковые стенки по концам надстройки вылазывают за ее пределы и плавно по кривой сходят на нет. Нижний пояс бортовой обшивки протягивают по ширесрезу на длину (в м)

$$d_1 \geq 0,2(0,5b_2 + b)(W_d/W_0)^2 \leq 1,5b.$$

В этой формуле обозначения те же, что и в формуле (12.1). Свободную кромку вылазующих бортовых поясов надстройки обрезают по окружности радиусом $R \approx 1,5b$ или по дуге дельты (второй стоец противоположен). Подкрепляющая свободную кромку полоса отстоит от нее на 50 мм и образуете по концам «паз уса».

Нижний пояс бортовой обшивки надстройки в районе ее окончания, а также застрек и палубный стрингер корпуса судна утолщают на длину, показанной штриховкой на рис. 12.1. Утолщение указанных листов может составлять 30–35 %. Выступающие за концы средней надстройки пояса бортовой обшивки подкрепляют в плоскости каждого шпангоута стойками. Эти пояса соединяют с фальшбортом подвижно. Аналогично подкрепляют корпус судна по концам удлиненных носовой и кормовой надстроек.

Размеры балок бортовой и палубной набора бака, юта и средних надстроек определяют требованиями местной прочности аналогично размерам соответствующих балок верхнего ватиска основного корпуса. Продольные палубные балки дополнительно проверяют по моменту инерции их поперечного сечения на условия устойчивости.

Расчетное давление (в кПа) на концевые переборки надстроек и рубок от выталкивающейся на палубу воды

$$p = 9,8 \eta c_2 (b_2 - z_1), \quad (12.3)$$

где η , c_2 , b — коэффициенты по Правилам Регистра СССР в зависимости от длины и ширины судна, яруса надстройки, положения переборки (носовая или кормовая); $z_0 = f(L)$; z_1 — вер-



Рис. 12.1. Подкрепление корпуса судна в районе окончания надстройки ($d_1 = 0,5b$).

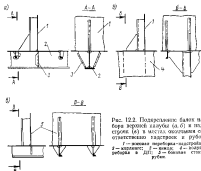


Рис. 122. Подкрепление балок набора верхней палубы (а, б) и надстройки (в) в местах опирания соответствующих надстроек и рубок. 1 — жесткая переборка-надстройка; 2 — клипс; 3 — жесткая переборка в ДП; 4 — боковые стойки рубки

тихальное расстояние от летней ГВЛ до середины ширины рассчитываемого дала или середины пролета стойки переборки, м. В любом случае на судах длиной от 50 до 250 м расчетное плавание (а и б) принимается не менее $p_{\text{пл}} = 25 + 0,1 L$ для незащищенной носовой переборки первого яруса и не менее $0,5 p_{\text{пл}}$ для всех остальных носовых переборок.

Толщину стоек обычных концевых переборок бака, средней надстройки и лют определяют (в мм) по формуле

$$s = 14,72 \sqrt{p/c_{\text{ст}}}$$

где p — расчетная нагрузка по формуле (12.3). Толщину обшивки борта и концевых переборок надстроек принимают не менее $s_{\text{обш}} = 0,01 L + 5$ мм для нижнего яруса и на 1 мм меньше для верхних ярусов, но не менее 5 мм.

Обшивку концевых переборок подкрепляют стойками с моментом сопротивления (в см²) $W = 35 p r^2 / c_{\text{ст}}$, который требуется на условия местной прочности. Кроме обычных устанавливают и рваные стойки. С ними совмещаются карлингсы палубы надстройки.

У надстройки I-го яруса концы стоек боковых стенок, а также всех носовых и защищаемых от удара волн кормовых переборок приваривают к палубе торцовым сечением. Если концы

стоек закрепляются клипсами, момент сопротивления стоек можно уменьшить на 30 %.

Носовые и кормовые концевые переборки надстроек на верхней палубе обычно совмещаются с поперечными переборками корпуса судна. Если же концевые переборки или боковые стенки надстроек и рубок не совмещены с поперечными и продольными переборками корпуса судна, то в местах их опирания с целью устранения жестких точек палубные балки рамного и осевого набора подкрепляют клипсами или бракетами, установленными в плоскости соответствующих стенок надстроек и рубок (рис. 12.2). Кроме того, в тыльнике под каждой переборкой надстройки следует предусмотреть частичную переборку (полупереборку) или, в крайнем случае, усиленные рваные шпангоуты.

§ 49. Рубки

Определение и назначение рубок. Одно- или многоярусные сооружения, расположенные на НП или на палубе надстройки и имеющие меньшую ширину, чем надстройки, называют рубками. Рубки (рудевая, штурманская, радио и др.), подобно надстройкам, предназначены для различных служебных и иных помещений, размещения в них и на них постов управления судном, многоступенчатого оборудования, приборов, устройств, приводных механизмов. В зависимости от назначения, архитектурного типа и размеров судна количество, расположение, размеры и форма рубок значительно различаются. Короткие рубки имеют длину не более $l = 3(b_1 + c_1) W_0 / W_d$, где b_1 — ширина непрерывного участка палубы рубки между ее боковыми стенками, м; c_1 — ширина бортового свеса палубы рубки, м; W_0 и W_d — см. обозначения к формуле (12.1). Рубки, расположенные на расчетной палубе в средней части по длине судна и не являющиеся короткими, называют длинными. Они участвуют в общем крене судна. Участки по концам рубок длиной $l_k = 0,5l$ считают концевыми, изгибаемыми, как и у надстроек, в их общую длину.

Материал рубок. Рубки, как и надстройки, изготовляют из грузовых стальных. Причем нижний пояс обшивки боковых стенок рубок, расположенных в средней части судна, выполняют из стали категории не ниже требуемой и с эквивалентом текучести не ниже принятого для расчетной палубы, в которой устанавливаются рубки. На пассажирских и научно-исследовательских судах, имеющих длинные и многоярусные надстройки и рубки, для уменьшения их массы с целью понижения ЦТ корпуса и обеспечения необходимой остойчивости иногда для рубок применяют алюминиевые сплавы. Однако шпаты МКО, палубы жилых и служебных помещений, расположенных над МО и грузовым танком, выполняют только из стали.

Проектирование длинных рубок из легких сплавов, т. е. участвующих в общем изгибе, практически идеализовано. Если же такие рубки необходимо предусмотреть для размещения в них требуемых помещаемых, то по длине эти рубки разделяют расширяющимися (скользящими) соединениями.

Расширительные соединения. Длинные рубки из жестких сплавов, а также и из стали расширительными соединениями разбиваются на короткие участки, способные изменять взаимное положение при общей деформации корпуса судна. Это уменьшает степень участия рубок в общем продольном изгибе корпуса, а следовательно, и их массу за счет снижения толщины застила палуб. Однако если продольные стенки рубок располагаются над продольными переборками или килевыми, расширительные (продольные) соединения не допускаются.

Расширительные соединения при их устройстве размещают по всему поперечному сечению (по пазу и в боковых стенках) рубки или рубок, если они установлены в несколько ярусов. Такие соединения предназначены расширять и сжимать поперечных проходах и вне углов боковых вырезов в верхней пазу. Конструкция расширительных соединений при условии непроницаемости должна обеспечивать необходимое перемещение кожаных сеток смежных участков рубки при общем нагibe корпуса судна.

Размеры связей и конструкция рубок. Толщину листов обшивки носовых, кормовых и боковых переборок (стенки) вычисляют в зависимости от расчетной нагрузки, шпация базиса, предела текучести материала. Минимальная толщина настила палубы рубок равна 5 мм и может быть уменьшена до 4 мм на судах длиной менее 50 м. Требования к набору палубы рубок и концевых переборок также же, как и для настилов. Стойки боковых переборок (стенки) нижнего яруса рубок по концам крепятся кинжальными (рис. 12.3). При установке рамных шангунтов или поперечных полупереборок на расстоянии до 8 м стойки к палубам допускается приваривать без киян (см. рис. 12.2, в). Концы стоек наружных стенок рубок второго и выше расположенных ярусов могут быть срезаны «на ус» при установке рамных шангунтов или частичных переборок и плоскости подобных конструкций первого яруса рубки.

Боковые стенки длинных рубок соединяются с концевыми переборками, расположенными в средней части длины судна, по радиусу до 1,4 м. При расположении концевых переборок рубки вне пределов средней части длины судна радиус скругления боковых стенок может быть уменьшен вдвое. Если невозможно скругление углов соединения боковых стенок рубок с концевыми переборками, допускается конструкция с боковыми килками высотой до 1/3х в плоскости киллагросов или конструкция



Рис. 12.3. Короткое замыкание: команда стелл бокового стелла короткого (а) и длин-

1-БОРИСОВ СТЕПАН, 2-
ОДЦ, 3-ЕВСТАФИ ВАСИЛЬЕВ, 4-
ИВАНОВ ИВАНОВ



Рис. 124. Варикозы (а и б) подвздошных вен после палубы на морском судне.

1 — боковая стена рубки; 2 — внутренняя переборка; 3 — хвост; 4 — кормовая; 5 — удлиненный лист настил вагона; 6 — еще боковая стена рубки; 7 — перегородка переборки и надстройки; 8 — раскладываемый в рубке; 9 — раскладываемый в вагоне.

по срезов углов рубин вертикальной плоскостью под углом 30° к ДП и при обязательной установке угловатых ластов палубного настила под этими углами (рис. 12.4). В варианте а под концевой переборкой рубки находится **разный бимс**, а в варианте б — **обычный бимс** при условии, что в плоскости соседнего шпангоута поперечная переборка расположена под рубкой, а рамные стойки — в самой рубке.

Как и в надстройках, углы всех прямоугольных вырезов в боковых стенках рубок делают скругленными. Вырезы в боковых стенках высотой более 0,7 высоты длинной рубки подкрепляют сверху и снизу утолщенными сварными листами в районе средней части длины судна и той же длиной выреза — в остальных районах (рис. 12.6). В средней части судна по концам длинных рубок на участке, равном высоте рубки, как правило, прямоугольные вырезы не допускаются. В боковых стенках коротких рубок, независимо от их положения по длине судна, утолщенные листы тех же размеров (см. рис. 12.5, 6) устанавливают только снизу боковых прямоугольных вырезов.

Вырезы в палубах и платформах над МО ограждают прочные машинными шхематом, состоящими из обшивки, подкрепленной стойками. Вырезы в расчетной палубе для машинной плиты имеют скругленные углы, а сама палуба — подкрепления и компенсацию этих вырезов. Толщина обшивки машинной плиты выше открытой ВП увеличивают на 15%, а момент сопротивления стоек — на 50%, по сравнению с требуемыми для рубки на том же уровне. Если часть машинной шхемы, расположенная ниже палубы переборок, в расчетах неоптимальности не учитывалась, то толщину обшивки шхемы в межпалубных



Рис. 12.6. Подкрепление балок вырезов в бортах сечением длинных рубок: а — сверху; б — снизу выреза.

тигальное, а для их палуб — поперечное расположение гофров; для продольных стенок и палуб длинных надстроек и рубок — средней части длины судна — горизонтальное (продольное) расположение гофров, а вне средней части — вертикальное.

Стенки с горизонтальным расположением гофров подкрепляют вертикальными ряжными стойками. Аналогично палубы с продольными гофрами подкрепляют ряжными брусками, а с поперечными гофрами — карангасами и (или) продольными переборками.

Стенки надстроек и рубок из алюминиевых сплавов соединяют со сталью палубой клеевой на клею. Их крепят к стальному коныгелю высотой 200—300 мм, приваренному к палубе. Конструкции из термически неупругих алюминиевых сплавов толщиной до 12 мм, с пределом текучести до 210 МПа, за исключением наружных стенок длинных рубок, соединяют сваркой со стальными конструкциями (кроме шпренгеля) при помощи биметаллических вставок из стального коныгеля (рис. 12.6, а). Аналогично соединяют стойки из легкого сплава со стальной палубой (рис. 12.6, б). Соединение в одном сечении клеевого соединения обшивки и сварного соединения стоек при помощи биметаллической вставки не допускается.



Рис. 12.6. Соединение надстроек из алюминиевого сплава с бортами биметаллических вставок со стальным корпусом: 1 — надстройка из алюминиевого сплава; 2 — биметаллическая вставка; 3 — стальная палуба; 4 — обшивка палубы ВД, $b \geq 100$ мм.

помещенных принимают равной 6 мм, а толщину коныгелю — 7 мм. Высота коныгелю над соответствующей палубой составляет 230—450 мм. Момент сопротивления стоек машинной шахты принимают на 30 % меньше, чем для соответствующих по высоте стоек поперечных сварных переборок.

Наружные стенки и внутренние переборки надстроек, рубок и шахт МО, а также палубы надстроек и рубок можно изготавливать из гофрированных листов с открытыми или закрытыми гофрами трапециевидной или полукруглой формы. Для стенок коротких надстроек, рубок и шахт МО предпочтительнее вертикальное, а для их палуб — поперечное расположение гофров; для продольных стенок и палуб длинных надстроек и рубок — средней части длины судна — горизонтальное (продольное) расположение гофров, а вне средней части — вертикальное.

Назначение фальшборта. Фальшборт представляет листовую конструкцию высотой не менее 1 м, установленную обычно в плоскости шпренгеля и предназначенную для ограждения открытых участков ВП и палубы надстроек с целью предотвратить падение людей и палубных грузов за борт (рис. 12.7).

Фальшборт подвергается поперечной нагрузке поперемно со внешней и внутренней стороны: с внешней стороны — это удары волн при качке или силы от возможного контакта с корпусом другого судна при швартовке в море; с внутренней — давление воды, возникающей на палубу при шторме, а также возможные удары палубным грузом, скользящим при качке с мест крепления, удары во время грузоперевозочных операций. Как продольная конструктивная связь, влияющая на длину судна между надстройками, фальшборт стойками исполняется в общей настиб корпуса. Степень его участия в общем изгибе зависит от конструкции соединения с корпусом и с надстройками.

Существует три типа соединения фальшборта с корпусом судна:

1. Наиболее часто применяется конструкция с подвесом его над бортом и образованием сплошного шпангоута (шпренгеля) между нижней кромкой обшивки фальшборта и шпренгелем. Фальшборт крепится к палубе палубы стойками (рис. 12.8), а по концам имеет подкосные соединения с припалубной кромкой мостовых листов бортовой обшивки соответствующих надстроек, чтобы уменьшить его участие в общем изгибе судна. Высота шпангоута шпангоута обычно 10 % от высоты фальшборта, но не менее 120 мм. Шпангаты предусматривают с целью быстрого удаления за борт воды, попавшей на палубу при шторме.

Для эффективного уменьшения степени участия фальшборта в общем изгибе кроме концевых соединений еще и промежуточные скользящие соединения по его длине. Однако с увеличением количества подвижных соединений снижается способность фальшборта выполнять свои основные функции по восприятию поперечных нагрузок.

2. На лосовых и других судах, перевозящих палубные грузы, а также швартованных в море, увеличиваются поперечные нагрузки на фальшборт. Поэтому для обеспечения его прочности обшивку в районе стоек приваривают к шпренгелю на длине от 100 до 200 мм, образуя перемины. Вместо одного непрерывного шпангоута получают серию значительно увеличенных шпангоутов, разделенных перемины. Устройство промежуточных подвижных соединений в этих случаях не допускается. Перемины существенно повышают местную прочность фальшборта.

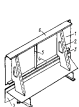


Рис. 12.7. Конструкция фальшборта.

1 — лист; 2 — контрфорс (сварной); 3 — шпаловый шпигул; 4 и 5 — ребра жесткости; 6 — планшета; 7 — шпигул.

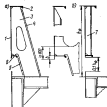


Рис. 12.8. Крепление фальшборта к настилу палубы стойками.

1 — лист фальшборта; 2 — планшета; 3 — контрфорс; 4 и 5 — планки контрфорса; 6 — планка нижней части фальшборта; 7 — промежуточные стойки; 8 — настил фальшборта.

При швартовке в море трудно избежать навалом добывающих судов на борт плавбазы или другого судна. Вероятность повреждения фальшборта таких судов уменьшается при установке его с навалом 6—15° или на некотором отступлении от шпрингера к ДП — не менее 120 мм. В соединении стоек фальшборта с настилом палубы рекомендуется вводить в виде слабого звена промежуточный сварной шов уменьшенного сечения или податливый элемент (рис. 12.9), которые при экстремальных нагрузках позволяют исключить опасные повреждения конструкции палубы.

3. На судах длиной до 80 м возможно непрерывное сварное соединение фальшборта с шпрингером надстройки при условии, что напряжения от общего изгиба и планшета составляют не более 60 МПа. На судах длиной более 80 м в средней части допускается однократное клепаное соединение фальшборта с шпрингером корпуса. Если фальшборт покрывается в общий шпигул, его следует рассматривать как эффективную продольную связь аксиального бруса и предъявлять к нему соответствующие требования.

Стойки фальшборта устанавливают в плоскости бимсоа на расстоянии до 1,2—1,8 м в зависимости от назначения судна. В носу при значительном развале бортов стойки фальшборта часто устанавливают на каждом шпигуле. Вверху их приваривают к планшете, а внешней кромкой — к листу фальшборта, не менее чем на половину его высоты. Нижние кромки стоек

приваривают к настилу палубы только в пределах его подкрепления связи бимсом или жонкой. Если необходимо, торцы шпигулов в плоскости стоек фальшборта приваривают к настилу палубы. Концы поясков по свободной кромке стоек, как правило, срезают «на ус».

На судах длиной более 60 м толщина листа фальшборта равна $s = 0,025L + 4,0 \leq 8,5$ мм, а толщина стоек на 1 мм больше. Ширину нижней части стойки, измеренную по сварному шву, принимают не менее $b = (0,65L + 190) \sqrt{s} \leq 360$ мм, где a — расстояние между стойками, n — в мостах установки швартовых клязов, фундаментов под крановые плавки, опирающихся на фальшборт стеньгелей (для крепления леса на палубе), а также у подвижных соединений предусматриваются усиленные стойки с приварной пояской к планшете и настилу палубы при условии его подкрепления. Вместо фальшборта открытые участки палубы могут быть ограждены деерным устройством.

Все отверстия для доступа к ВП в машинно-котельные шахты имеют комингсом высотой 380, 450 или 600 мм в зависимости от типа закрытия и района по длине судна. Высота прочных комингсов садных, световых и асбестовых люков составляет не менее 600 мм в средней части и 450 мм в оконечностях. При необходимости место установки комингсов и они сами подкрепляют.

Роль ограждений грузовых люков открытой ВП выполняют поперечные и продольные комингсы, высота которых над настилом палубы требуется не менее 600 мм.

Вопросы для повторения

1. Какая конструкция называется надстройкой? Где располагаются надстройки по длине судна?
2. Охарактеризуйте конструктивно боковые стенки и козырьки переборки надстройки.
3. Какие конструктивные подкрепления предусматривают в мостах оконечностей длиной средней надстройки?
4. Назовите конструктивные особенности рубок.
5. Какая конструкция называется фальшбортом? Укажите нагрузку, действующую на фальшборт.
6. Расскажите о типах соединения фальшборта с корпусом.



Рис. 12.9. Податливый элемент в соединении стоек фальшборта с палубой.

§ 51. Носовая оконечность

Протяженность и особенности работы носовой оконечности. Формально к носовой оконечности относится часть корпуса, расположенная в нос от средней части и составляющая 0,3 длины судна для длинных и 0,20L от форштевня для бортовых и кадуковых перекрытий. Конечно, такое разделение условно, так как нет разкой границы в конструкции корпуса. Носовая оконечность корпуса состоит из форника и промежуточного района, конструкции которых проектируют с учетом особых условий их работы.

В носовой части корпуса, особенно между сетевыми 0,10—0,25L, действуют большие ударные нагрузки (селемнг) при плавании судна в балласте за волнением с малыми осадками (менее 0,04L). Селемнг зависит также от скорости судна, интенсивности волнения, высоты и формы обводов носовых шпалгоутов, распределения груза и массы корпуса и др. Скоростные суда кроме движущего селемнга испытывают ударные волновые нагрузки в носу и в развал бортов (выеминг). При плавании во льдах бортовые и движущие перекрытия подвергаются значительным ледовым нагрузкам.

В результате действия отнесенных нагрузок конструкции корпуса в носовой оконечности многих судов получают повреждения. На сухогрузных судах количество повреждений конструкций в носу достигает 60—65 % от общего числа поврежденных корпусов. Наиболее повреждаемы от селемнга выемные суда, так как они имеют относительно малую скорость и большую осадку носом в балласте.

Многие ледовые повреждения конструкций вызваны более интенсивной эксплуатацией судов в экстремальных условиях продленной навигации. При постоянной вибрации оконечностей судна и высокой температуре точной поперечности конструкции могут быть различные конструктивные и технологические дефекты. Кроме остаточных деформаций обшивки, продольных балок основного набора часто терпят устойчивость и испытывают смятие нижних кромок движущие рамные балки (флоры, движущие стрингеры, вертикальный кил).

Требования к прочности и конструкции носовой оконечности. Повреждения конструкций (в частности, при плавании в ледовых условиях) свидетельствуют об относительной слабости и несоответствии прочности движущих конструкций в носовой оконечности вооруженным требованиям круглогодичной эксплуатации. В связи с этим Правила постройки судов корректируются с учетом перспектив эксплуатации. Как уже отмечалось (см.

§ 38), необходимо усиление конструкции корпуса судов, плавающих во льдах.

Определяя объем подкреплений динца на действие гидродинамической нагрузки, наиболее важным параметром считают осадку носом. На судах неограниченного района плавания с минимально возможной осадкой носом менее 0,04L в балласте необходимыми дополнительными подкреплениями корпуса в носовой части для восприятия селемнга. С уменьшением, например, минимальной осадки до 0,02L потребовалось бы увеличить толщину движущей обшивки на 20 % и момент сопротивления балок на 40 %. Поэтому осадка судна носом менее 0,025L не допускается. На судах с осадкой 0,04L и более вероятность появления смятия очень мала и дополнительные подкрепления не требуются, если судно не предназначено для плавания во льдах.

Нагрузки волновые эксплуатационные и от грузов, действующие на конструкции носовой оконечности корпуса, определяют с учетом сил инерции при качке на волнении и скорости судна по тем же формулам, что и для средней части. Дополнительно вычисляют экстремальные значения гидродинамического давления в случае удара волн в динце и развала бортов носовой оконечности.

В районе форника применяют одностороннее дно с поперечной системой набора и установкой между флорами в ДП бразет с носками по верхней кромке. Если форник используется как штевня, то в ДП устанавливают отбойную переборку. По высоте на расстоянии не более 2 м распределяют бортовые стрингеры, перевязанные распорками («сплостими») бинсами, или перфорированные платформы с площадью вырезов не более 10 % общей площади (рис. 13.1).

Бортовые перекрытия в форнике вместо поперечной могут иметь продольную систему набора с расстоянием между рамными шпалгоутами не более 2,4 м.

В переходном районе по длине судна — от форниковой переборки до сетевых 0,3L от носового перпендикуляра — продольная система набора, при условии ее применения в средней части корпуса, постепенно переходит в поперечную. Расположенные симметрично ДП движущие продольные балки попарно, начиная от ближайшей к борту, образуются на определенном флоре (рис. 13.2). Одновременно может заканчиваться не более 1/3 продольных балок.

Конструкция динца в переходном районе характеризуется: усилением шпалгоутов, прилегающих к горизонтальному килу, лодью; ограничением ширины балок основного набора (не более 0,7 м), уменьшением расстояния в два раза между основными ледяными стрингерами и установкой между ними полустрингеров; подкреплением стенок флоры, стрингера и рабона

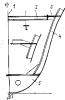


Рис. 13.1. Поперечное сечение флоры (а). Деталь соединения бортовых балок (б).

1 — обшивка; 2 — ригельный балок; 3 — бортовой стрингер; 4 — шпангоут; 5 — флор.

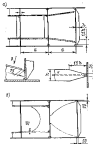


Рис. 13.2. Варианты (а и б) закрепления концов продольных балок в местах их сочленения.

называют, другими особенностями. Количество вырезов в рамных балках должно быть минимальным. Сплошные флоры устанавливаются на каждом шпангоуте при поперечной и на каждом иотроне — при продольной системе набора.

На танкерах в нос от грузовых танков применяется продольная или поперечная система набора перекрытий корпуса с минимальной высотой флоры $h = 7L + 100$ мм. Расстояние между флорами при продольной системе набора составляет не более 2,8 м. Продолжением каждой второй диншевой продольной балки является диншевой стрингер с пояском по свободной кромке.

На сухогрузных судах, МО которых расположено в корме или в промежуточном районе, по соображениям удифференцирования необходимы дополнительные секции балластных цистерм в носовой оконечности, в том числе за счет увеличения высоты двойного дна в пределах носового трюма. Высота двойного дна изменяется постепенно, со склоном настила второго дна на поперечной переборке и сплошном флоре или чаще с уступом. В районе уступа внутреннее дно с меньшей высотой переступ-

ляется в нос на 2—3 шпангоута и заканчивается горизонтальными настилами, установленными у бортов судна, но стенками вертикального кила и диншевым стрингером. По бортам судна в носовом трюме на уровне стрингеров флоры устанавливают разрезные на шпангоутах, равные им по высоте бортовые стрингеры.

Требования к толщине наружной обшивки в области действия ударных и ледовых нагрузок основаны на предположении «допускаемого повреждения», т. е. на нормировании остаточных деформаций. Ввиду того, что диншевые обшивки на построенных судах имеют большие остаточные деформации, в Правилах Регистра СССР возмозжны требования к ее толщине при расчете с учетом ударной нагрузки. В любом случае толщина диншевой обшивки в носовой оконечности допускается (в мм) не менее $\delta_{min} = 1,2 \sqrt{L}$ при $L < 200$ м.

Для балок испытанию набора рассчитывают упругий момент сжатывания и площадь поперечного сечения. Причем момент сжатывания существенно зависит от конструкции закрепления балок и их непрерывности в опорных сечениях.

Значения толщин стенок диншевых рамных связей (флоров, вертикального кила, стрингеров) при действии экстремальных нагрузок в носу принимают на основании расчета перекрытий по предельному состоянию.

Прочность динши в носу определяется прочностью флоров и в первую очередь прочностью на срез их опорных сечений. Устойчивость флоров обеспечивается основными и дополнительными диншевыми стрингерами. Они же разносят нагрузку и привлекают к совместной работе ближайшие флоры в районе действия ударных или ледовых нагрузок, имеющих выраженный локальный характер.

§ 52. Кормовая оконечность

Особенности кормовой оконечности. По форме обвода и назначению кормовая оконечность полностью отличается от носовой, что учитывается при разработке ее конструкции. Во-первых, корма служат носителем винторулевого комплекса и средств управления им. Многие современные транспортные суда имеют энергетическую установку, размещенную в корме. В ряде случаев корма служит местом приема или снятия грузов при горизонтальном способе грузообработки. Корма многих добывающих судов используется для производственных целей. На ней предусматривается устройство дана и других приспособлений. Во-вторых, специализация судов, увеличение их размера, мощности энергетических установок, скорости обуславливают дополнительные требования к обеспечению эффективной работы винторулевого комплекса, выбору типа и геомет-

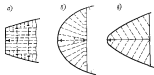


Рис. 13.3. Схемы набора кормовой оконечности: а — с трапецией; б — с криволинейной; в — с продольной кромкой.

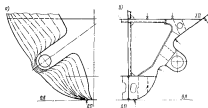


Рис. 13.4. Конструирование секционных приспособлений для боковых гребных валов: а — система образования приспособлений; б — один из вариантов с выкружкой.

при обшивке кормы. Многообразие функций кормовой оконечности предопределяет большие различия в условиях работы, в форме ее обводов, в конструкции.

Кроме собственной вибрации кормован оконечность поддается наборкам, обусловленной работой движительного комплекса. При кормовом расположении МКО интенсивность вибрации возрастает. В кормовой оконечности, подверженной различным видам вибрации, частота собственных колебаний конструкции кормы может быть близка или даже совпадать с частотой возмущающих периодических сил от работы гребных винтов, энергетической установки. В этих условиях часто появляются повреждения конструкции в виде трещин в наружной обшивке, в балках набора корпуса, в переборках, а также в актерштевне, кронштейнах боковых гребных валов.

Требования к конструкции кормы. Для уменьшения собственной вибрации и исключения резонанса кормовая оконечность должна иметь достаточную жесткость в вертикальной и горизонтальной плоскости, что может быть обеспечено установкой дополнительных переборок, выделеров, раскосов или платформ. В актерштевне одна флора устанавливается от другой на расстоянии не более 0,6 м. На односторонних судях флоры возмущаются над дейдвудной трубой не менее чем на 0,8 м. Вырезы во флоре для прохода дейдвудной трубы и ниже ее подкрепляют поперечинами или ребрами жесткости.

В зависимости от конструкции кормы борта корпуса в актерштевне имеют поперечную либо продольную систему набора. На судах с криволинейной кормой предусматривают по нормали к криволинейной поверхности наружной обшивки поперечные шпангоуты (рис. 13.3, б). При трапециевидной корме кроме обычных шпангоутов по бортам в актерштевне для подкрепления транца устанавливают параллельно ДП стойки-шпангоуты (рис. 13.3, в). На дейдвудках в носовой и кормовой оконечностях предпочти-

тельно диагональная система подкрепления, когда параллельные шпангоутные полурамы размещают примерно по нормали к бортовой обшивке в районе КВЛ и над односторонним углом к ДП (рис. 13.3, в).

На двух- и трехваловых судах боковые гребные валы поддерживаются отдельно установленными кронштейнами или специальными приспособлениями. В последнем случае шпангоуты имеют выкружки в районе прохода боковых гребных валов и тем больше, чем ближе они располагаются к ступице гребного винта (рис. 13.4). Наружная обшивка окластьвает внешние выступы шпангоутов, образуя вместе с ними специальные приспособления гребного вала.

В связи с большой интенсивностью вибрации для конструкции кормовой оконечности характерно требование [17] по определению толщины наружной обшивки и размеров поддерживающих ее балок набора. Размеры конструктивных элементов вычисляют применительно к стали с пределом текучести $\sigma_t = 235$ МПа, независимо от предела текучести фактически используемой в конструкции стали.

Подкрепление корпуса в МО. В районе МО имеется много источников периодических возмущающих усилий. Это главные энергетические установки торпедного типа, различные вспомогательные механизмы и др. Периодические силы вызывают вибрацию конструкций, ограничивающих МО, служат причиной их повреждения. В результате вибрации появляются трещины в конструкциях корпуса, нарушается работа механизмов, наблюдаются обрывы болтов, разрывного крепежа и т. п. Вероятность возникновения повреждений зависит также от жесткости

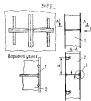


Рис. 13.5. Система рамных шпангоутов в МО.
1 — рамный шпангоут; 2 — бортовой стрингер.

Повышению жесткости днища способствует увеличение его высоты. Однако при этом не следует уменьшать высоту двойного дна в нос и в корму от двигателя. В случае повышенной высоты двойного дна, например для размещения картера двигателя или гребного вала, необходимо обеспечить надежную конструктивную перемычку участков днища, имеющих разную высоту. Для этого днищевые стрингеры, дополнительно устанавливаемые под фундаментными балками, целесообразно продолжать за переборку МО на 3—4 шпанды и закрепить на сплошных флорах. На концевых поперечных переборках МО в плоскости таких стрингеров следует закрепить рамные стойки.

Повышение частоты собственных колебаний конструкций в районе МО до требуемого уровня обеспечивается не только увеличением жесткости днищевой переборки, но и усилением набора бортовых переборок за счет применения системы рамных шпангоутов (рис. 13.5). Рамные шпангоуты устанавливаются в плоскости флоров практически на расстоянии не более четырех шпандов и соединяются с ними при помощи книц. При продольной системе набора днища в МО расстояние между флорами составляет не более двух шпандов. В плоскости рамных шпангоутов на НП размещают рамные бимсы. Высота стенок рамных бимсов равна не менее чем половине высоты стенок шпангоута. Рамные шпангоуты и бимсы соединяют без технологических зазоров; торцы шпангоута скрепляют с кастоду палубы, а торцы бимса — к шпангоуту.

Бортовые стрингеры в МО проходят до всей его длины от носовой до кормовой переборки. С другой стороны этих переборок, если стрингеры не продолжают, в плоскости стрингеров на длине двух-трех шпандов устанавливают brackets с по-

стоянием уменьшением их сечения. Если на поперечной переборке имеются шпанды или с обратной ее стороны устанавливают платформу, бортовые стрингеры совмещаются с ними. Шпангоуты и стойки переборок в районе пересечения с бортовыми стрингерами дополнительно закрепляют накладными планками. При определении размера обыкновенных шпангоутов, расположенных между рамными, бортовые стрингеры в МО не считаются промежуточной опорой.

§ 53. Конструкция штепелей

Назначение штепелей. В оконечностях корпуса любого судна для соединения наружной обшивки донного и правого бортов в ДП устанавливают специальные конструкции: в носу — форштевень, в корме — ахтерштевень. Штепели необходимы также для восприятия ударных нагрузок при встрече с плавающими предметами, льдами, при столкновении с причалами, другими судами и т. д. Ахтерштевень одно- и трехконтных судов служит кормовой опорой гребного вала, руля, защищает гребной вал от ударов, если корма не является открытой.

В нижней части на донце нескольких шпандов штепели соединяются с флорами и стыкуются с горизонтальным килем. В ДП на высоте флоров штепели подкрепляются вертикальными бракетами. По высоте корпуса бортовые стрингеры, палубы, платформы также соединяются со штепелями. Таким образом, штепели являются органическим элементом конструкции соответствующей оконечности.

Форма и конструкция штепелей. Форма штепелей соответствует обводам корпуса и зависит от типа и назначения судна. В носу обычных судов форштевень делают наклонным вперед на 15—30° к вертикали, чтобы в случае аварийного столкновения повреждение было меньшим и только в заднюю часть корпуса. Наклонный нос вместе с развалом шпангоутов улучшает мореходные качества, увеличивает площадь палуб, при откате якоря он меньше касается обшивки. В нижней части форштевня предусматривают плавные обводы. У лодок делают форштевень со скосом над КВЛ для наполнения на якорное поле и разрушения его массой жесткой обшивки.

В последние годы на обычных судах распространение получили бульбовый нос, позволяющий меньшего (до 0,2 уз) увеличить скорость или соответственно уменьшить мощность.

По способу изготовления штепели могут быть сварными, литыми и деревянными. По конструкции сечения их разделяют на брусковые (прямоугольного или круглого сечения), листовые и арочные (простые и сложные) — рис. 13.6. Собственно форштевень для удобства сборки соединяют с параллельными



Рис. 13.6. Конструкция фор-мачтеи: а, б, в — брусчатка; г — листовая; д — арочный секционный.



Рис. 13.7. Брусчатый формачень круглого сечения.

сну листами бортовой обшивки, с которыми уже стыкуются пояса наружной обшивки.

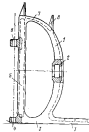
Конструкция брусчатого формачень круглого сечения показана на рис. 13.7. Для обеспечения прочности в конструкцию формачень введены в ДП вертикальные ребра с поясом в ряд поперечных ребер на расстоянии один от других не более 1 м ниже ГВЛ и не более 1,5 м выше ГВЛ. Положения поперечных ребер согласовывается с бортовыми стрингерами и платформами. Стрингеры левого и правого бортов соединяются между собой горизонтальной бракетой — брейтбуком.

Чтобы уменьшить объем повреждений в случае столкновения с другим судном, брусчатый формачень в верхней части корпуса заменяют листовым. Листовой формачень также может иметь вертикальное ребро и обязательно поперечные бракетки, перекрывающие стыковые соединения формачень с поясами наружной обшивки. По длине бракетки доводятся до ближайших шпангоутов и привариваются к ним.

В кормовой оконечности наружная обшивка и набор корпуса заканчиваются на ахтерштевне. Вследствие разнообразия обводов кормовой оконечности, типов рулей и выполняемых функций ахтерштевни имеют различную сложную форму и конструкцию. На одноосновных судах с обыкновенным рулем ахтерштевень представляет собой замкнутую раму (рис. 13.8).

Передняя (позадняя) часть ахтерштевня, называемая старпостом, служит концевой опорой гробного вала. На ней закрепляют кормовой конец дейдвудной трубы, через которую проходит гробной вал в ахтерштевень. На старпосте соединяется также нижняя часть бортовой обшивки. Кормовая часть ахтерштевня

Рис. 13.8. Листокарый ахтерштевень.
1 — старпост; 2 — обшив; 3 — носовая; 4 — шпангоут; 5 — палуба; 6 — ахт; 7 — рама.



(бузверст) служит для подвешивания на петлах руля. Дополнительно руль имеет опору на кормовом выступе (штанге) нижней горизонтальной части, называемой лодкой, простирающейся также в нос от старпоста, где она соединяется с горизонтальным килем и не менее чем с тремя флорами. Половина горизонтальных сил, приходящих на руль при его переносе, передается в виде горизонтальной силы на носовую ахтерштевень. Поэтому она должна быть достаточно прочной и при горизонтальном ее изгибе. Верхняя часть рамы ахтерштевня называется дугой. Она служит для присоединения к наружной обшивке корпуса. С целью более надежного соединения с корпусом внутри его проходит верхняя часть руераста, которая приваривается к специальному трапециевидному флору по всей его высоте. На судах длиной более 90 м подобный вертикальный выступ (post) имеет в старпосте для соединения с дополнительным трапециевидным флором.

Чтобы дейдвудную трубу закрепить в старпосте, а тем на уровне линии гробного вала делают утолщение (яблоко) со сквозным отверстием для выхода вала. Гробной вал размещают внутри рамы (и окле) ахтерштевня с определенными минимально допустимыми зазорами между его частями и винтом.

Для повышения эффективности винторулевого комплекса ряд судов имеет в корме альтернативную насадку в виде профилированной кольцевой обшивки с горизонтальной осью по линии вала. Верхняя часть обшивки закреплена в кормовом задворе корпуса, а нижняя — на подложке ахтерштевня (рис. 13.9, а и б). Внутри насадку или в корпус от нее размещают гробной вал. Установка насадки повышает киле вала, создает дополнительный упор, улучшает прочностные качества судна и т. п. В результате скорость судна может увеличиться на 0,3—0,4 уз при эквивалентной толщине.

Многие современные суда имеют так называемую открытую корму и лодкообразный руль, закрепленный на специальном кронштейне (рис. 13.10). У ахтерштевня этих судов нет руераста и задней части подложки (если отсутствует касак). Эф-

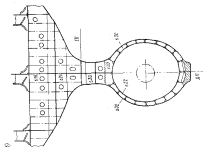


Рис. 13.9. Конструкция открытого внутреннего переборочного набора для полубалкирного судна с несоединенной верхней частью палубы. а — продольная и поперечная секции, б — плановый вид

13.9



Рис. 13.10. Конструкция открытого внутреннего переборочного набора для полубалкирного судна. 1 — продольная секция, 2 — поперечная секция, 3 — плановый вид, 4 — продольная секция, 5 — поперечная секция, 6 — плановый вид, 7 — продольная секция, 8 — поперечная секция, 9 — плановый вид

фестивность внутреннего комплекса у судов с открытой кормой также повышается. Наиболее простую конструкцию алтертейны имеют дуговые суда, но для поддержки их боковых трюбных залов необходимо предусматривать специальные кронштейны, жестко присоединяемые к корпусу.

Вопросы для повторения

1. Каким образом действует на корпус сальность?
2. Назовите особенности конструкции носовой оконечности.
3. Какие факторы оказывают влияние на конструкцию кормовой оконечности?
4. Назовите и опишите особенности конструкции фортековой и алтертейны.

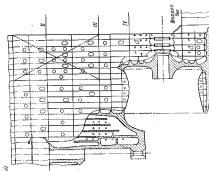
ГЛАВА 14. СУДОВЫЕ ФУНДАМЕНТЫ

§ 54. Общие требования к фундаментам

Назначение и классификация фундаментов. Судовыми фундаментами называют специальные листовые, балочные или иные конструкции различных форм и размеров, прочно соединенные с корпусом судна, предназначенные для опоры и закрепления главных и вспомогательных механизмов, устройств, приборов и т. п.

В зависимости от назначения судна количество фундаментов составляет от нескольких десятков до многих сотен различной номенклатуры. Проектирование и изготовление судовых фундаментов — весьма трудоемкий процесс, связанный с большими трудовыми и энергетическими затратами.

Кроме надежного крепления различных объектов (прежде всего главных механизмов к корпусу судна в любых эксплуатационных условиях) фундаменты выполняют еще ряд функций. Они распределяют действующую на них нагрузку при необхо-



дмости на возможно большую часть связей перекрытия; обеспечивая определенное положение в пространстве и облегчая условия монтажа, обслуживания, ремонта поддерживаемых механизмов.

Судовые фундаменты классифицируют по нескольким признакам. По назначению: фундаменты под главные механизмы (дизели, дизель-генераторы, турбины, турбогенераторы, паровые машины и др.); под парогенераторы (котлы); под вспомогательные механизмы (насосы, компрессоры и т. п.); под судовые устройства и др. По месту расположения: устанавливаемые на нижней горизонтальной поверхности; устанавливаемые на вертикальную поверхность (бортов, переборок); подвешиваемые под палубами, платформами.

По конструктивному исполнению опорных поверхностей фундаменты под вспомогательные механизмы разделяются на пять типов:

- 1) фундаменты-стоны с разнотой ширинной поверхностью в виде плиты;
- 2) фундаменты-балки, представляющие собой замкнутые рамы с опорными поверхностями в виде полос;
- 3) фундаменты-подкрепления в виде разнотой конструкций утолщенных балок и листов;
- 4) фундаменты-балки, состоящие из двух продольных вертикальных и двух поперечных листов, приваренных нижними кройками к настилу второго дека;
- 5) фундаменты-кронштейны, устанавливаемые на вертикальные судовые конструкции.

Конструкция фундаментов под главные механизмы, парогенераторы индивидуальна, поскольку зависит от типа, размеров и формы самой установки, от характера и композиции действующих сил, а также от конструкции корпуса в районе ее расположения.

Требования к фундаментам. На фундаменты в зависимости от назначения действуют многообразные различающиеся по характеру нагрузки: масса закрепленных механизмов и устройств; силы инерции, обусловленные качкой судна и движением неуравновешенных движущихся частей механизмов; гирокопический момент, упор гребного вала, разрывные усилия в тросах, якорных цепях и др. В зависимости от закрепляемого объекта, места его расположения, рабочего состояния, условий плавания образуются комплексы действующих нагрузок на конкретный фундамент. В общем случае совокупное действие нагрузок (относительно опорной поверхности) сводится к двум расчетным силам (вертикальной и горизонтальной) и опрокидывающему моменту в поперечной плоскости. Расчетные определения экстремальных значений указанных сил представляет большие трудности. Поэтому минимальные размеры связей фун-

даментов под главные, вспомогательные, промышленные, грузовые механизмы и устройства регламентируются на основе опыта эксплуатации подобных установок [17].

Фундамент должен иметь прочную и жесткую конструкцию, обеспечивающую надежное крепление машины (механизма) или устройства к связям перекрытия корпуса и передачу на них всех усилий, возникающих при эксплуатации судна. Жесткость конструкции фундаментов и соответствующих перекрытий необходимо предусмотреть такой, чтобы исключить появление резонансной вибрации фундаментов в целом и их элементов при всех режимах работы механизмов.

Фундаменты, несмотря на специфичность закрепляемых ими механизмов, устройства должны иметь простейшую технологичную конструкцию, в которой используются стандартные и унифицированные конструктивные элементы.

Конструкция фундаментов должна предусматривать возможность доступа к любому месту опорной поверхности, для чего в фундаментных балках делают соответствующие вырезы.

Рекомендации к проектированию. Накопленный опыт постройки и эксплуатации конструкций фундаментов позволяет сформулировать рекомендации к проектированию с учетом требований технологичности. Для малых по размеру конструкций фундаментов материал, как правило, не заказывается, а более рационально используется материал, идущий на основные корпусные конструкции. При необходимости заказа материала специально для фундаментов его типоразмеры согласовывают с размерами листового и профильного стали, идущей на изделия судового машиностроения, что позволяет легче выполнять транспортную норму по поставке стали.

Для снижения трудоемкости изготовления следует исключить криповидные соединения, обеспечивать удобство сборки и сварки, до минимума сокращать затраты ручного труда (широко использовать различные приспособления, механизацию и автоматизацию при изготовлении деталей фундаментов). Механизация работ при изготовлении судовых фундаментов существенно снижает затраты на их изготовление, сокращает ручные операции. Детали фундаментов, скомплектованные по чертежам, со склада доставляются на участок сборки, которую целесообразно осуществлять на стенде. Для простоты сборки в удобном положении часто используют крановые тали.

Задачи механизации решаются комплексно с задачами типизации и унификации конструкций фундаментов, что позволяет окончательно устанавливать и сваривать фундаменты в цехах сварочной сборки, а не на стенде. Соблюдение простоты и конструкции обеспечивает высокое качество, надежность, быстрое переоборудование производства при изготовлении новых моделей.

§ 55. Конструкции фундаментов под главные механизмы в котлах

Общие положения по конструированию фундаментов. Фундаменты как опорные фиксирующие конструкции определяются не только типом, массой, размерами, динамическими поддерживаемых механизмов и устройств, но и местом расположения на судне. Поэтому конструкции конкретного фундамента и конструкции перекрытия или его части в местах установки согласовываются по расположению балок, подкрепляющих бракет, необходимым вырезам и др.

Опорные элементы фундаментов выполняются из горизонтальных иногда наклонных в продольном направлении утепленных листов (полос, досок) или в виде плиты. Между опорами конструкциями фундаментов и главными механизмов вводятся промежуточные технологические элементы, компенсирующие подкладки. Фундаментные продольные и поперечные (или шпалы ориентации) вертикально или наклонно установленные балки и плоскости сплотивающихся днищевых (палубных) балок воспринимают действующие нагрузки и, рассредоточивая, передают их на базовое перекрытие.

Для обеспечения вибрационной прочности в проекте предусматривают необходимые усиления конструкции. В основных конструкциях перекрытий и фундаментов, расположенных в районах интенсивной вибрации (в МО, оконечностях и др.), недопустимы конструктивные и технологические дефекты.

В конструкции фундаментов не должно быть труднодоступных мест для выполнения сборки, сварки, очистки, окраски и осмотра во время эксплуатации. С этой целью и для уменьшения массы делают вырезы высотой до 40 % высоты фундаментных балок.

Применение модульно-агрегатных методов сборки механизмов на общей жесткой раме позволяет не только увеличить общую жесткость системы, но и значительно сократить трудоемкость и сроки монтажных работ в период достройки.

Фундаменты под главные механизмы. Главные механизмы устанавливают на фундаменты, состоящие из двух продольных стенок и усиленных горизонтальных поперечек (рис. 14.1), а двигатели большой мощности и среднеоборотные — на фундаменты из четырех стенок, расположенных попарно с общим опорным усиленным листом с каждой стороны двигателя, или непосредственно на усиленный настил второго дна (рис. 14.2).

Выбор типа и конструкции фундамента производится с учетом конструкции рамы главного механизма, положения оси коленчатого вала двигателя относительно оси валопровода. Вырезы в поперечных бракетах четырехстеночного фундамента не допускаются. Ширина бракет и дни, подкрепляющих фунда-

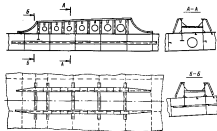


Рис. 14.1. Конструкция фундамента под главный механизм.

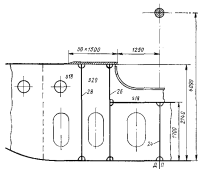


Рис. 14.2. Усиленный фундамент под стационарный двигатель.

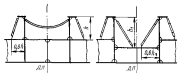


Рис. 14.3. Минимальные зазоры брашн указанного фундамента.

ментные балки, принимается не менее 60 % их высоты (рис. 14.3). Концы поясов у краев и брашн срезают под углом, так как эти поясы к стенкам и опорным листам фундаментных блочков, а также к заставке перекрытия, как правило, не приваривают. Однако для фундаментов среднеоборотных двигателей рекомендуется конструкция со сплошной фестоной полосой по свободной кромке опорного листа (рис. 14.4).

Монтаж главных двигателей выполняют с особой тщательностью, обеспечивая их базирование (расположение) и центровку с высокой точностью. Двигатели массой до 160 т транспортируют на судно и устанавливают на фундамент в собранном виде. Крупногабаритные двигатели массой до 800 т и более транспортируют и собирают на судне в МО блоками. Базовой конструкцией при сборке служат фундаментная рама. С целью сокращения сроков монтажа механизмов на стеле в последние годы широко применяют агрегатирование, т. е. сборку вне судна крупных монтажных единиц из стандартного и унифицированного оборудования. Собранные в цехе на фун-

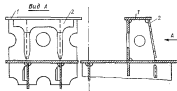


Рис. 14.4. Поддержание фундаментной балки (1) брашнами с фестонной полосой (2).

даментной раме функциональные агрегаты устанавливаются и закрепляются на соответствующем фундаменте.

Фундаменты под водорубные котлы треугольного типа выполняют в виде широко расставленных продольных опор лафетного типа длиной, необходимой для установки на них двух или трех опор котла. Каждый фундаментный опора состоит из двух продольных вертикальных или наклонных листов, соединенных с днищем стрингерами, перевязанных поперечными бракетами или диафрагмами в плоскости усеченных блочков набора днища, и на верхних горизонтальных усеченных листах для крепления к ним котельных опор.

Толщина продольных опорных листов и поперечных бракет на 20 % больше толщины в районе котельного помещения, а толщина горизонтальных листов на 30 % больше толщины вертикальных листов.

При установке парогенераторов (котлов) для компенсации погрешностей монтажа между фундаментом и опорной предусматривается продольная часть с технологическим припуском. Ввиду тепловых деформаций в креплении парогенераторов кроме поджимной устанавливают несколько скользящих опор с ограничительными планками или другими приспособлениями от осреживания.

Фундаменты под турбоагрегаты и гребные электродвигатели.

Их выполняют в виде опор, состоящих из взаимно перевязанных продольных и поперечных вертикальных листов и брашет, соединенных с соответствующими стрингерами и флорами. Если возможно совместить продольные листы фундаментов с опорными стрингерами, в днище перевернуть МО устанавливают дополнительные стрингеры или полустрингеры. Толщина продольных и поперечных листов опор на 30 % больше соответствующей толщины стрингеров и флоров. По верхней кромке продольных и поперечных листов опор фундамента электродвигателей и турбодвигателей агрегатов устанавливают горизонтальные толстые или сварной горизонтальный лист для крепления к нему опор механизмов. Толщина этих толстых или листов на 40 % больше толщины вертикальных листов, чтобы быть достаточно жесткой для закрепления главных установок непосредственно или с помощью фундаментной рамы.

Вопросы для повторения

1. По какому принципу проектируют фундаменты?
2. Каковы требования предъявляют к фундаментам?
3. Расскажите о нагрузках, действующих на фундаменты.
4. Особенности конструкции фундаментов под главные механизмы, валы и вспомогательные механизмы.

§ 56. Характеристика расчетных нагрузок
и норм местной прочности

Под *местной прочностью* понимается способность перекрытий или конструктивных элементов судового корпуса воспринимать действие нагрузок без повреждений.

Расчет местной прочности по Нормам прочности обязательно выполняется для судов, не регламентируемых Правилами Регистра СССР. Размеры связей для таких судов выбирают расчетным путем. В расчетах местной прочности одки перекрытия рассматривают изолированно от других, а их взаимодействие учитывают приближенно, задавая определенные условия заделки балок перекрытия. Для расчета пластины, стержней, рам и перекрытий следует использовать стандартные методы строительной механики, основанные на гипотезах «плоских сечений» и «прямых нормалей» [13]. При этом расчетная схема должна достаточно правильно отражать принцип работы конструкции.

Как и при общем изгибе, в расчетах местной прочности учитывают нагрузки трех типов: от воздействия внешней среды (море); от воздействия груза и механизмов; особые — испытательные и оцениваемые аварийные. Нагрузки классифицируют по следующим признакам:

продолжительность действия (длительные нагрузки — время их действия сопоставимо или более времени одного рейса; критическое — время их действия существенно меньше времени одного рейса);

направление во времени (постоянные нагрузки — не изменяются или мало изменяются во времени; переменные — значительные изменения действия происходят во времени);

воздействие на конструкцию (статические нагрузки — время их изменения в 2,5 и более раз превышает период первого тона свободных колебаний конструкции; динамические — время изменения нагрузок сопоставимо или меньше периода первого тона свободных упругих колебаний конструкции).

Постоянные нагрузки от воздействия внешней среды, а также ялких грузов называют *гидростатическими*, переменные — *волновыми*, или *гидродинамическими*.

Прочность корпуса и отдельных его конструкций определяется напряжениями и деформациями, вызываемыми системой внешних нагрузок, поэтому при выборе критерия прочности необходимо установить, какие напряжения и деформации могут вызвать нарушение прочности конструкций корпуса. Опыт эксплуатации судов свидетельствует о том, что за опасные со-

стояния можно принять нарушения целостности (трещины) и искажение формы (остаточные деформации).

При нормировании местной прочности по напряжениям учитывается характер распределения напряжений в конструкции. По этому признаку различают: *распределенные напряжения*, действующие в значительной части объема или площади поперечного сечения конструкции, которые могут в случае превышения или опасного значения привести к разрушению или недопустимой деформации всей конструкции; *локальные напряжения*, действующие лишь в незначительной части объема или площади поперечного сечения, приводящие в случае превышения или опасного значения только к местным деформациям, не сопровождающимся разрушениями или значительными деформациями всей конструкции. Уровни допустимых напряжений в первом случае ниже, чем во втором.

Нормы местной прочности сформулированы в виде допускаемых напряжений при расчете в упругой области

$$\sigma_s = \sigma_s^0 \sigma_s; \quad \tau_s = \tau_s^0 \tau_s,$$

где σ_s и τ_s — допускаемые напряжения соответственно для расчетных нормальных и касательных напряжений в конструкции; $\sigma_s^0 = k_s \sigma_s$ — нормативный предел текучести, МПа; $k_s = 1/(1 + 0,16(\sigma_s/235 - 1)^{1/2})$; σ_s — предел текучести стали, МПа; $\tau_s^0 = 0,57\sigma_s$ — нормативный предел текучести по касательным напряжениям.

Требования к устойчивости конструкций и их элементов в условиях сжатия сформулированы в виде коэффициентов запаса устойчивости $k = \sigma_{cr}/\sigma$, где σ_{cr} — критическое напряжение, определяемое с учетом отклонения от закона Гука; σ — действующие напряжения сжатия.

В сечении связей, рассчитываемых в упругой стадии, где одновременно действуют нормальные σ и касательные τ напряжения, эффект их суммирования может быть оценен по «приведенным» нормальным напряжениям $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$.

При нормировании допускаемых напряжений [13] учтены: степень ответственности конструкций; опасность последствий нарушения их целостности или деформирования; волнота и точность учета факторов, оказывающих влияние на оценку прочности (степень достоверности при определении расчетных нагрузок, обоснованность и точность методов расчета, знания о прочности способа и условий постройки, опыт эксплуатации аналогичных конструкций и т. п.).

Расчеты местной прочности подразделяются на следующие этапы: определение значения и характера распределения расчетных нагрузок; вычисление расчетных напряжений (при расчете в упругой стадии) или предельных нагрузок (при расчете по

продольным нагрузкам) конструкций; сопоставление расчетных напряжений с допускаемыми напряжениями.

Расчеты местной прочности выполняются для состояния конструкций с учетом износа к середине срока службы. При проверке прочности нового корпуса по строительным размерам связей толщина элементов конструкций должна быть предварительно уменьшена на величину Δs — запас на износ для толщины проектируемого срока службы. Определяя строительную толщину связей нового корпуса, к значениям толщин, полученным в результате расчета, следует добавить Δs .

Моменты сопротивления и моменты инерции балок основного и рамного набора высчитают с учетом присоединенного пояска, толщина которого равна толщине обшивки или пистала. Ширину присоединенного пояска балок основного набора принимают равной меньшему из значений: $b_a = l/6$ или $b_a = 0.5(b_1 + b_2)$, где l — пролет рассматриваемой балки набора между ее опорами или точками пересечений нейтральных осей; b_1 и b_2 — расстояния рассматриваемой балки набора от ближайших балок того же направления, расположенных по обе стороны от нее.

Ширину присоединенного пояска рамных балок находят по формуле $b_a = kb$, где k — коэффициент, определяемый в зависимости от условий заделки балки и от числа балок другого направления; $k = 0.5(b_1 + b_2)$.

Расчетные формулы нагрузок, действующих на судовые перекрытия, в расчетах местной прочности необходимо брать из Норм прочности [13].

Ниже приведена методика расчета местной прочности перекрытий в средней части судна на нагрузку, действующую со стороны моря (см. гл. 7). Коэффициенты допускаемых напряжений приведены в соответствии с Нормами прочности.

§ 57. Прочность длинных перекрытий

Расчетная нагрузка. При назначении размеров конструкций длинных перекрытий с учетом обеспечения их местной прочности необходимо учитывать следующие поперечные нагрузки:

- результирующее от гидростатического давления воды и противодействия груза на вершине и на подошве волны;
- от реакций зильблоков при постановке судна в док с стельного устройства при спуске на воду;
- от гидродинамического давления воды в случае удара носом о воду (для перекрытий в носовой оконечности);
- от периодических усилий, передаваемых гребным винтом на корпус судна (в кормовой оконечности) и главным двигателем на корпус судна (для длинных перекрытий в МО);
- от давления воды при испытании отсека и др. (см. гл. 8).

Расчет пластин и набора длинных перекрытий. Расчет пластин днища и пистала второго дна производится в предположении их жесткой заделки на опорном контуре. В качестве расчетных принимают нормальные напряжения от изгиба пластин посередине длинной стороны опорного контура. Напряжения определяют по формулам (2.6) или (2.8) в сравнении с допускаемыми напряжениями. Коэффициенты допускаемых напряжений в средней части судна соответственно при продольной и поперечной системах набора принимают равными $k_x = 1.1$ и $k_y = 0.8$ (для длины).

Расчет прочности набора. Расчет местной прочности вертикального кила, длинных стрингеров и фалоргов осуществляется из условия изгиба в составе перекрытия. Балки главного направления (фалоры) и поперечные связи (длинные стрингеры и вертикальный киль) работают совместно, т. е. изгиб балок одного направления оказывает влияние на изгиб балок другого направления.

Длинные перекрытия можно считать жестко заделанными на поперечных и продольных переборках, упруго заделанными или свободно опертыми на бортах. Расчетная нагрузка на длинное перекрытие считается равномерно распределенной по его площади в пределах рассматриваемого отсека и вычисляется из условия положения судна на вершине и подошве волны с учетом противодействия груза со стороны отсека. В качестве расчетной нагрузки принимают по Нормам прочности большую из двух нагрузок:

для положения судна на вершине волны

$$p_a = p_{ex} + p_{wi} \quad (15.1)$$

для положения судна на подошве волны

$$p_a = p_{ex\max} - (p_{ex} + p_{wi}), \quad (15.2)$$

где $p_{ex\max}$ — наибольшее из возможных значений противодействия груза со стороны отсека, кПа; $p_{ex} = \rho g d$ — статическое давление, кПа [см. формулу (4.2)]; p_w — давление, обусловленное перемещениями корпуса судна относительно профиля волны, для связей, расположенных ниже расчетной калерной, кПа;

$$p_w = p_{w0}(1 - 3.5z_2/L), \quad (15.3)$$

где p_{w0} — расчетное давление на уровне расчетной заделки, кПа [см. формулу (7.1)]; z_2 — расстояние рассматриваемой связи от расчетной заделки, м; для длины $z_2 = d$.

На малых судах противодействие груза без учета качки можно определить по формуле

$$p_g = \rho g(z_1 + 2.5), \quad (15.4)$$



Рис. 15.1. Расчетная схема балок рамного набора двоякого набора (прямой набор)

l — продольный шаг; b — ширина; s — шаг; z_1 и z_2 — расстояния от верха и низа до центра тяжести

где ρ_1 — плотность груза, т/м³; z_1 — расстояние рассматриваемой связи от верха палубы, м; на уровне дна $z_2 = D$.

Полную нагрузку на балку главного направления (флор) (рис. 15.1) находят (в кН) по формуле

$$Q = \rho l a, \quad (15.5)$$

где ρ — расчетное давление на перекрытие, вычисляемое на верхние волны по формуле $\rho = \rho_{\text{в}} + \rho_{\text{г}} - \rho_{\text{д}}$, а на подошвы волны — по формуле (15.2), кПа; l — длина флора, м; a — расстояние между флорами, м. Вертикальный киль и стрингеры нагружают реакциями от флоров.

После определения моментов инерции и моментов сопротивления поперечных сечений вертикального килля и стрингеров в состав сечения засчитывают также и площадь сечений продольных балок основного набора по наружной обшивке дна и настила второго дна, расположенные на ширине присоединенного пояска при продольной системе набора дна. Моменты сопротивления поперечного сечения балок перекрытия относительно дна и настила второго дна вычисляют по табл. 1.1.

На военных судах, имеющих одностороннее дно, флоры и вертикальный киль в среднем также рассчитывают в составе перекрытия с учетом их взаимного влияния. При этом полную нагрузку на флор определяют по формуле (15.5), где l — ширина среднего танка, м. Расчет в бортовом танке осуществляют в составе шпангоутной рамы.

После определения реакций взаимодействия в узлах пересечения балок для каждой балки находят изгибающие моменты в опорных сечениях и в пролете, переизгибающие силы в опорных сечениях, затем вычисляют нормальные напряжения по формуле (1.3) и касательные — по формуле (1.5) и сравнивают их с допускаемыми. Коэффициенты допускаемых напряжений принимают равными: $k_2 \leq 0,4$ и $k_3 \leq 0,6$ — для вертикального килля в середине пролета у локсов дна и у настила второго дна; $k_2 = k_3 \leq 0,9$ — в опорных сечениях вертикального килля; $k_2 = k_3 = 0,8$ — в опорных сечениях флоров.

Продольные балки основного набора дна и настила второго дна представляют собой неразрезные балки, опирающиеся

на равноотстоящие флоры, имеющие значительно большую жесткость. В силу симметрии пролетов и нагрузки балки основного набора рассчитывают как однопролетные балки, жестко заделанные на флорах и нагруженные равномерно распределенной нагрузкой (рис. 15.2). Полную нагрузку на балку определяют по формуле (15.5), где расчетное давление ρ (в кПа) вычисляют: для балок дна — по формуле (15.1) или (15.2); для балок двойного дна — по формуле (8.2). Находят максимальный изгибающий момент $M_{\text{из}} = Ql/12$ в пересечении с флором $N = Q/2$ в опорных сечениях. В качестве расчетных напряжений принимают наибольшие нормальные напряжения в опорных сечениях, определенные по формуле (1.3). Проверку прочности на срез выполняют для относительно тонких балок с отношением длины балки к высоте менее 12. Допускаемые напряжения определяют коэффициентами, равными $k_2 = k_3 \leq 0,6$ и $k_0 = k_1 \leq 0,7$ соответственно для балок дна и настила второго дна.

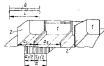


Рис. 15.2. Расчетная схема балки основного набора дна

1 — флор; 2 — стрингер; q — расчетная равномерно распределенная нагрузка; z_1 и z_2 — дна, м

§ 58. Прочность бортовых перекрытий

Бортовые перекрытия подвержены как действию гидростатического напора по уровню ватерлинии, так и действию различных дополнительных нагрузок на волнении. Эти дополнительные нагрузки связаны с повышением напора за счет прохождения волны, с бортовой качкой и ударами, которые могут действовать при ударе волн в верхнюю часть борта. Кроме того, на бортовое перекрытие действуют локальные нагрузки (см. гла. 9).

Прочность связей бортового перекрытия проверяется на действие нагрузки со стороны моря. Для расчета связей, расположенных ниже расчетной ватерлинии, используют формулы (15.1) и (15.3), а для связей, расположенных выше расчетной ватерлинии, нагрузку определяют по формуле

$$p_w = k_w (\rho_w - \rho g z_1), \quad (15.6)$$

где $k_w = 1,0$ — для надводного борта; ρ_w — см. формулу (7.1); z_1 — расстояние связи от расчетной ватерлинии.

При расчете шпангоутов, имеющих по высоте промежуточные жесткие опоры, палубы, платформы, изменение нагрузки

по высоте борта в пределах пролета шпангоута можно не учитывать. Среднее значение расчетного давления должно приниматься по формуле (15.1) для середины пролета шпангоута.

Прочность бортового набора судов, не имеющих двойных бортов и перевозящих жидкие и сыпучие грузы, дополнительно проверяют на действие асимметричного внутреннего давления груза при качке судна на волнении.

Расчет пластин бортовых перекрытий выполняют аналитическим расчетом пластины днища, только в формулах для нагрузки q будет означать естественный напор жидкости от расчетной глубины. Коэффициенты допускаемых напряжений $k_y = 1,1$ и $k_z = 0,9$ — соответственно при продольной и поперечной системе набора.

Расчет набора бортового перекрытия сухогрузных судов. Прочность обычной конструкции, состоящей из оливолиновых равностоящих шпангоутов, может быть проверена расчетом шпангоутной рамы. На анализ работы таких рам установлено, что наиболее неблагоприятной для шпангоута является комбинация нагрузки, при которой балка не нагружена, а шпангоут нагружен наибольшей расчетной нагрузкой (рис. 15.3) [7].

Наибольшие моменты, возникающие в узле пересечения шпангоута с флором, зависят от соотношения жесткости и нагрузки этих балок, а также от условий работы флора в составе дикдевого перекрытия. Вследствие того, что флоры обычно имеют относительно большую жесткость, шпангоут в узле пересечения можно считать жестко заделанным. Поэтому при расчете шпангоутов в составе рамы допустимо упростить решение, т. е. бортовую и палубную ветви рассматривать отдельно от днища и полагать нижние концы шпангоутов жестко заделанными в местах пересечения их с нейтральной осью флора.

Для упрощения расчетов шпангоут можно рассматривать как неразрезную многоспорную балку, жестко заделанную у флора и жестко опертую на палубу (рис. 15.4). Степенную несимметричность шпангоутов рассматривают по теореме трех моментов с учетом разной жесткости (J_1 и J_2) трюмного и твиндекного шпангоутов.

Если высота второго дка достигает борта, то длину трюмного шпангоута можно принимать с учетом скуловой кницы, соединяющей нижний конец шпангоута и настил второго дка.

За расчетные принимают нормальные напряжения в середине пролета и касательные — в опорных сечениях шпангоута. Коэффициенты допускаемых напряжений для трюмного и твиндекного шпангоутов $k_y = 2, k_z = 0,9$. Нормальные напряжения для сечений в середине пролета вычисляют по формуле (1.3), а касательные напряжения в опорных сечениях — по формуле (1.5).

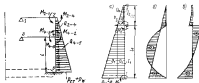


Рис. 15.3. Расчетная схема конструкции рамы шпангоутного судна.

1—2—коэффициенты; M_1 —поперечный момент; Q —поперечная нагрузка; L —длина трюмного шпангоута.

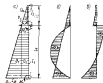


Рис. 15.4. Упрощенная схема расчета бортового набора сухогрузного судна: а—распределение нагрузки Q на шпангоут; б—жесткая заделка концов; в—жесткая опора; г—жесткая опора.

Расчет набора бортовых перекрытий наливных судов. При поперечной системе набора бортов тинкером обшиваемые шпангоуты рассматривают как неразрезные балки, упруго заделанные у палубы и днища и жестко опертые на бортовых стрингерах.

За расчетную длину нижнего пролета принимают расстояние между нижними бортовыми стрингерами в средней высоте скуловой кницы. Длина средних пролетов равна расстоянию между стрингерами — не более 3,5 м. Расстояние между стрингерами практически одинаково, поэтому в силу симметрии конструкции расчетный момент для среднего пролета можно определять как для изолированной балки, у которой концы жестко заделаны, а нагрузка воздействует по трапеции (рис. 15.5).

Для определения расчетного наибольшего момента рассматривают пролет шпангоута между первым и вторым стрингерами, считая от ОП. Полная нагрузка на шпангоут

$$Q_0 = (p_1 + p_{1+1}) a l_m / 2,$$

где p_1 и p_{1+1} — расчетное давление воды на шпангоут соответственно на уровне нижней и верхней опор, вычисляемое по формуле (15.1); a — расстояние между шпангоутами, м; l_m — длина рассматриваемого расчетного пролета, м.

Рамные шпангоуты при поперечной системе набора рассматривают в составе перекрытия, образованного стрингерами и рамными шпангоутами, а перекашивающего распорками (если они есть) с перекрытием продольной переборки. Палубы и кофленные переборки и дачки являются в этом случае жесткими



Рис. 15.5. Шпангоут казенного судна: а — распределение нагрузок; б — упрощенная расчетная схема.



опорами для бортовых перекрытий. При продольной системе набора равные шпангоуты рассчитывают в составе шпангоутной рамы бортового танка (флор — рамный шпангоут — рамный бимс — рамная стойка продольной переборки).

Продольные балки осевого набора при продольной системе набора рассчитывают как изолированные балки, жестко заделанные по концам (на рамных шпангоутах), нагруженные равномерно распределенной нагрузкой. Полюсов нагрузку на балку определяют по формуле (15.5), нормальные напряжения — по формуле (1.3), касательные напряжения — по формуле (1.5). Расчетные значения напряжений в балках сравнивают с допускаемыми. Коэффициенты допускаемых напряжений принимают равными: $k_2 = k_3 = 0,7$ — для обшивочных и рамных шпангоутов; $k_2 = k_3 = 0,7$ — для стрингеров и продольных балок осевого набора.

Прочность расворков проверяют на действие сжимающих усилий, определяемых (в кН) по формуле $P = \rho \Delta p$, где ρ — расчетное давление на расворку, кПа [см. формулу (15.1)]; Δ — расстояние между рамными шпангоутами (или между расворками по длине танка), м; b — полуширина пролета рамных шпангоутов, арматуры сверху и снизу и рассматриваемой расворки, м. Сжимающие напряжения в расворке (в кПа) $\sigma_{сж} = P/F$, где F — площадь поперечного сечения расворки, м². Эти напряжения сравнивают с критическими напряжениями, определяемыми по формуле (1.11). Устойчивость будет обеспечена, если $\sigma_{сж} < \sigma_{кр}$.

§ 59. Прочность поперечных и продольных переборок

Прочность судовых поперечных и продольных переборок рассчитывают на действие статических и динамических нагрузок. Основные расчетные нагрузки включают:

статическое давление жидкости при испытании переборок на непроницаемость, при аварийном затоплении отсеков или перебоев в отсеке жидких грузов;

нормальное давление жидких и твердых грузов при качке;

усилия от килевых балок при постановке в док;

усилия, передаваемые днищами, бортами и палубными перекрытиями, для которых переборки служат опорными конструкциями;

усилия в продольных переборках от общего продольного изгиба.

Ниже рассмотрены методы расчета переборок на действие нагрузок, соответствующих давлению при аварийном затоплении отсека до задубы переборки.

Расчетное давление для конструкций водонепроницаемых переборок определяют по формуле (11.1). Пластины переборок считают жестко заделанными по осевой симметрии и нагруженными равномерно распределенным давлением. При определении расчетного давления принимают z — отстояние нижней крошки пластины от задубы переборки, м. При отношении меньшей стороны пластины к ее толщине менее 60—70 ($b/s < 60-70$) пластину рассчитывают как абсолютно жесткую без учета ценных напряжений. Из-за большого отношения сторон ($b/s > 2,0$) пластину можно считать гнувшейся по цилиндрической поверхности и расчет изгибающих моментов и напряжений выполнять, как для балки-полосы [см. § 9]. Нормальные напряжения определяют по формуле (3.4).

При отношении $b/s > 70-80$ пластины переборок рассчитывают как пластины линейной жесткости с учетом ценных напряжений, возникающих при изгибе, используя формулы (2.8).

Если наибольшие суммарные напряжения в опорных сечениях пластин превышают предел текучести материала обшивки переборки, то напряжения посередине пролета пластины определяют как средние арифметические из значений, вычисленных при $x = 1,0$ (жесткая заделка) и $x = 0$ (свободная опора).

Прочность пластин переборок на действие аварийной нагрузки нормируется коэффициентом запаса до предельного состояния.

Расчет прочности набора переборок. Расчет стоек переборок сводится к расчету одноплоскостных (однопалубное судно) или неразрезных многоплоскостных уступо заделанных по концам балок, нагруженных по треугольнику или трапеции. За расчетные пролеты стоек переборок принимают половину их длины вместе с днищами по концам.

Следует всегда стремиться обеспечить условия закрепления концов стоек (особенно нижних), близкими к жесткой заделке. Это объясняется тем, что при увеличении стойки заделка

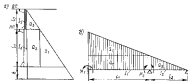


Рис. 15.3. Стойка поперечной переборки самопогрузочного судна: а — расчетная нагрузка Q ; б — сосредоточенная расчетная сила

уменьшается прогибный момент, являющийся расчетным для профиля стойки. Изгибающий момент в заданном месте должно воспринимать сечение, усиленное кницей.

Расчетная схема стоек многослойного судна аналогична таковой для шпангоута (рис. 15.6). Стойку рассчитывают по теореме трех моментов.

В практических расчетах стойки принимают свободно опертыми у палубы и жестко заделанными у днища (жесткая заделка должна обеспечиваться конструктивным оформлением узла). При наличии трех шельфов на различных судах стойку иногда полагают однопролетной балкой, жестко заделанной на шельфах и нагруженной по трем пролетам. За расчетный пролет принимают расстояние между первым и вторым шельфом, считая от днища.

Горизонтальные балки основного набора рассматривают как изогнутые однопролетные балки, жестко заделанные на равных стойках и нагруженные равномерно распределенной нагрузкой. Полную нагрузку считают по формуле (15.5), где принимают: p — расчетное давление на балку, кПа [см. формулу (11.3)]; l — длина балки, м; a — расстояние между балками, м.

Раскрыв статическую неопределенность балок, определяя изгибающие моменты и максимальную пересекающую силу, находят напряжения по формулам (1.3), (1.5) и сравнивают их с допускаемыми. Коэффициент допускаемых напряжений для балок основного набора переборок равен $k_s = 0,80$ для переборок грузовых танков наливных судов и трюмов для водонепроницаемых.

Рамный набор переборок (шельфы, доковую стойку и рамные стойки) считают в составе переборки с учетом взаимного влияния. Коэффициенты допускаемых напряжений равны: $k_s = k_s \leq 0,75$ — для горизонтальных рам и рамных стоек на переборках грузовых танков и трюмов водонепроницаемых.

§ 60. Прочность палубных переборок

Нагрузка на палубы. Кроме усилий от общего продольного изгиба на палубные переборки действуют поперечные нагрузки, вызываемые их местным изгибом.

Прочность ВП суховозных судов проверяется при действии расчетных нагрузок, обусловленных заливанием при качке судна на волнении, а также давлением перекошенных грузов.

Давление на палубу, возникающее вследствие заливания ее при качке на волнении, определяется (в кПа) по формуле (15.6), где $k_2 = k_2 \cdot k_3$, $k_2 = 0,70$ и $k_3 = 1,0$ при определении расчетного давления соответственно для равного набора или переборки и назола и для балок основного набора; $k_4 = 1,1$ для мидельного сечения. В любом случае для района выше расчетной ватерлинии давление (в кПа) не должно приниматься менее $p_{\text{min}} = 0,03L + 3,5$.

Прочность промежуточных палуб рассчитывают на нагрузку от давления груза. Прочность палубного переборки судов, перевозящих жидкие грузы, дополнительно проверяют на действие неравномерного внутреннего давления груза при качке на волнении.

Ниже приведена методика расчета прочности палубных переборок на нагрузку от воды, заливающейся на палубу при качке на волнении. Расчет прочности пластин ВП на нагрузку, обусловленную заливанием воды, не производится.

Расчет прочности набора палубы суховозных судов. Палубное переборки, куда входят бимсы и килберты, рассчитывают как систему взаимно пересекающихся балок. Расчетные схемы балок и условия заделки их концов зависят от конструкции палубного переборки и от жесткости пересекающихся балок. На рис. 15.7 показаны конструктивные схемы палубных переборок с односторонним и парным люками.

Важным. При одностороннем люке и пиллерсах, стоящих по его углам, концевой люковой бимс можно рассматривать как многослойную балку с жесткими опорами по бортам и на

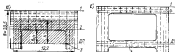


Рис. 15.7. Схемы палубных переборок самопогрузочных судов с односторонним (а) и парным (б) люками.
1 — борт; 2 — килберт; 3 — килберт; 4 — продольная переборка; 5 — поперечная переборка. Размеры — в метрах.



Рис. 15.8. Расчетная схема бруса.



Рис. 15.9. Расчетная схема концевой люковой балки.

паллерсах (рис. 15.8), нагруженную равномерно распределенной нагрузкой. Если в ДП стоит паллерсы или изолированная балка, то концевой люковой брус будет служить податливой опорой для карлингса. Такой брус можно считать изолированной балкой, жестко заделанной в ДП и упруго заделанной (при наличии рамных шпангоутов) или свободно опирающейся на бортах, нагруженной реакцией от карлингса (рис. 15.9).

В случае применения поперечной системы набора бруса в виде выреза рассчитывают как изолированную многопролетную балку, упруго заделанную на бортах и жестко опирающую на карлингс, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой. Нагрузки на брус определяют (в кН) по формулам

$$Q_1 = p a l; \quad Q_2 = p a l_2$$

где a — ширина поперечного набора, м; l — пролет бруса, м; p — расчетное давление на палубу по формуле (15.6), кПа.

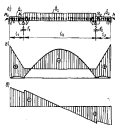
Полубруса рассчитывают как однопролетную балку, свободно опирающую (рис. 15.10, а), жестко (рис. 15.10, б) или упруго заделанную (рис. 15.10, в) на борт — в зависимости от жесткости шпангоута — и свободно опирающую на карлингс, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой. Нагрузки на полубрус определяют по формуле (15.6).

Карлингс. Если по углам люка предусмотрены паллерсы, то карлингс рассматривают в виде многопролетной балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой. Эта балка жестко заделана на поперечных переборках и жестко опирается на паллерсы. Если в ДП предусмотрены полупереборки или паллерсы, карлингс рассматривают как многопролетную балку, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой, жестко заделанную на поперечных переборках и свободно опирающую на



Рис. 15.10. Расчетная схема полубруса: а — жесткость шпангоута меньше жесткости полубруса; б — жесткость шпангоута больше жесткости полубруса; в — жесткость шпангоута и полубруса примерно равны.

Рис. 15.11. Расчетная схема карлингса: а — распределенная нагрузка; б — жёсткая податливая опора; в — жёсткая упругоуправляемая опора.



податливые опоры — концевые люковые брус (рис. 15.11).

В тех случаях, когда люки парные и тройные, концы карлингса устанавливают в междупролетных продольных переборках (см. рис. 15.7, б) и рассматривают его как изолированную однопролетную балку, жестко заделанную на поперечных переборках.

Для раскрытия статической неопределенности многопролетных балок пользуются теоремой трех моментов при жестких опорах и теоремой пяти моментов при податливых промежуточных опорах.

В расчетах геометрических элементов поперечных сечений балок ширину присоединенного пояска всех балок (кроме карлингса и концевой люковой балки в районе люка) принимают равной 1/6 пролета. Для карлингса и концевой люковой балки в районе выреза ширину присоединенного пояска палубы составляет 1/12 пролета.

Продольные балки основного набора палубы рассматривают как изолированные однопролетные балки, жестко заделанные на рамных брусках, нагруженные равномерно распределенной нагрузкой. Полную нагрузку на балку определяют по формуле (15.6), где p — расчетное давление на палубу по формуле (15.6), кПа; a — ширина продольного набора, м; l — пролет балки (расстояние между брусками), м.

Ниже приведена методика расчета карлингса и концевой люковой балки с учетом их взаимного влияния.

Карлингс жестко заделан на поперечных переборках, а люковые люковые балки служат податливыми опорами (см. рис. 15.11). Нагрузки на карлингс $Q_1 = Q_2 = p a b$, $Q_3 = p a b$, где b — ширина люковой балки, податливой опоры, м (см. рис. 15.7, в). На симметричные конструкции к нагрузке опираются, что $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q_5 = Q_6 = Q_7 = Q_8 = Q_9 = Q_{10}$, поэтому вместо системы уравнений можно составить только две и, решив систему уравнений, определить все неизвестные. Составим уравнения

неравномерности утраты жесткости на опорах Φ и Γ :

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= -M_1 j_1 / 3EI - M_1 j_2 / 6EI + Q_1 l_1^2 / 24EI + j_1 j_2 l_1 / 6EI \\ M_1 j_1 / 6EI + M_1 j_2 / 6EI - Q_1 l_1^2 / 24EI + j_1 j_2 l_1 / 6EI &= \\ &= -M_1 j_2 / 3EI - M_1 j_1 / 6EI + Q_1 l_1^2 / 24EI. \end{aligned} \right\}$$

где j_1 и j_2 — моменты инерции шпангоута и косого бруса. Податливость (прогибы) угрутой опоры

$$j_1 = A_1 R_1 = A_1 (Q_1 + Q_2) / 2 + (M_1 - M_2) / l_1,$$

где A_1 — коэффициент податливости угрутой опоры (равен от единичной силы, м/Н). Для определения коэффициента податливости рассмотрим концевой жесткий брус. Расстояние между концевыми брусами равно l_1 (рис. 15.9; индекс R указывает единичную силу $P = 1$). Используя таблицу типовых статических прогибов балок [20, т. 1], запишем выражение прогиба под действием единичной силы при $x = 0$:

$$w_1 = A_1 = \frac{x^3}{12EI_1} \left(1 + \frac{3b - a}{1} - \frac{ab}{l^2} \right).$$

Прогибка угрутой опоры $j_1 = j_2$. Решив систему, находят M_1 , M_2 и максимальные поперечные моменты от продольной нагрузки:

$$\begin{aligned} \text{в пролете } 0-1 \quad M_{1\text{max}} &= -0,325 Q_1 l_1; \\ \text{в пролете } 1-2 \quad M_{2\text{max}} &= -0,325 Q_2 l_2. \end{aligned}$$

Также определяют реакции

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= (M_1 - M_2) / l_1 - Q_1 / 2 \\ R_{12} &= (M_2 - M_1) / l_2 + Q_2 / 2, \quad R_{21} = -Q_2 / 2. \end{aligned} \right\}$$

Затем строят эпюры изгибающих моментов и поперечных сил (см. рис. 15.11, б и в), находят максимальные поперечные и изгибающие напряжения и сравнивают их с допустимыми.

Эпюры реакции R_1 рассчитывают максимальные моменты в опорах в пролетах косых брусков концевых бруса и максимальную поперечную силу, используя таблицу статических поперечных балок, затем находят максимальные поперечные напряжения по формуле (1.3), максимальные изгибающие — по формуле (1.5) и сравнивают их с допустимыми. Коэффициенты допустимых напряжений принимают равными: $k_\sigma = k_\tau = 0,75$ для бимсов $k_\sigma = k_\tau \leq 0,6$ для продольного набора ВП. Силу корабля в опорном сечении допустимыми напряжениями по продольным напряжениям [12], $k_\sigma \leq 0,45$.

Пиллером. Пиллером рассчитывают на устойчивость. Порядок расчета аналогичен расчету распорок (см. § 58). Нагрузки на пиллеры

$$P = p\delta + \sum (p_i j_i b_i),$$

где p — расчетное давление на вышележащую палубу, которое определяется по формуле (15.6) или (16.1), кПа ; l — расстояние, измеренное вдоль катангонов между серединами их пролетов, м; b — средняя ширина палубы пиллера, поддерживаемой пиллером, включая грузовой люк и рассматриваемом рабо-

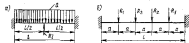


Рис. 15.12 Расчетные схемы балок рамного набора палубы среднего танка: а — бимсы; б — отбойные листы

не, м; $\sum (p_i j_i b_i)$ — сумма нагрузок от расположенных выше пиллерсов, которые могут передаваться на данный пиллерс, кН .

Расчет прочности набора палубы наклонных судов. Прочность бимсов и отбойного листа в среднем танке рассчитывают в составе перекрытия с учетом взаимного влияния. Перекрытие принимают жестко защемленным на продольных и поперечных переборках, нагруженным равномерно распределенной нагрузкой. Методика расчета перекрытия с небольшим числом балок главного направления и одной поперечной связью рассмотрена в гл. 1. На рис. 15.12, а и б приведены расчетные схемы бимса и отбойного листа при расчете прочности перекрытия среднего танка с четырьмя бимсами. Полную нагрузку на бимс определяют по формуле (15.5), где p — расчетное давление на палубу [см. формулу (15.6)], кПа ; a — расстояние между бимсами, м; l — пролет бимса (расстояние между продольными переборками), м. Бимсы в бортовых танках рассматривают в составе шпангоутной рамы.

Расчетная схема и метод расчета продольных балок основного набора палубы наклонных судов аналогичны расчетной схеме и методам расчета балок основного набора палубы сухогрузных судов.

Зная расчетные схемы перекрытия и балок, с помощью таблиц [20, т. 1] следует определять элементы изгиба M , N , моменты сопротивления $W_{\text{изг}}$ и $W_{\text{пол}}$, нормальные и касательные напряжения, а полученные значения сравнивать с допустимыми. Коэффициенты допустимых напряжений равны: $k_\sigma = k_\tau \leq 0,6$ — для продольного набора; $k_\sigma = k_\tau = 0,75$ — для поперечного набора.

§ 61. Примеры определения нагрузки на перекрытия корпуса сухогрузного и наклонного судов

Расчет балок и перекрытий с небольшим числом балок главного направления и одной поперечной связью подробно рассмотрен в гл. 1. Поэтому не представляет особого труда выполнять расчеты по классической схеме методики. Необходимо только рассчитать нагрузку на перекрытия. Ниже приведем

примеры определения эксплуатационной нагрузки, действующей со стороны моря на перекрытия сухогрузного судна и танкера.

Пример 1. Определить нагрузку для всех переборок сухогрузного судна по следующим данным: $L = 144,6$ м, $B = 22,2$ м, $d = 9,87$ м, $D = 13,4$ м, плотность воды $\rho = 1,025$ т/м³, $g = 9,81$ м/с².

Расчетные статические нагрузки [см. формулу (4.2)]

$$P_{ст} = \rho g d = 1,025 \cdot 9,81 \cdot 9,87 = 91,2 \text{ кПа},$$

где d — отстояние борта от переборки от расчетной высоты; $K = d$ — на уровне деки.

Расчетное давление, обусловленное перекачкой груза судна стандартного профиля волн:

на уровне расчетной высоты [см. формулу (7.1)] при высоте волны A

$$P_{вн} = c_{вн} \rho g A / 2 = 1,15 \cdot 1,025 \cdot 9,81 \cdot 4,4 = 50,9 \text{ кПа};$$

$$A = c_{вн} [16,75 - (3 - 0,01L)^{0,75}] = 1 [16,75 - (3 - 1,445)^{0,75}] = 4,6 \text{ м},$$

где $c_{вн} \geq 1,15$ (см. гл. 7); коэффициент $c_{вн} = 1,15$; $c_{вн} = 1,0$ — для судов аналогичного назначения;

для свай, расположенных ниже расчетной высоты [см. формулу (15.3)],

$$P_{вн} = P_{вн} (1 - 5,5 z_d / L) = 50,9 (1 - 5,5 \cdot 9,87 / 144,6) = 33,3 \text{ кПа},$$

где z_d — отстояние рассматриваемой сваи от расчетной высоты, м; $z_d = d$ на уровне деки;

для свай, расположенных ниже расчетной высоты [см. формулу (15.6)],

$$P_{вн} = k_{вн} (P_{вн} - \rho g d),$$

причем $k_{вн} = 1,0$ для бортов; $k_{вн} = 1,1$ для балок основного набора ВП и вспомогательных; $k_{вн} = 0,77$ для балок рамного набора ВП и вспомогательных; d — отстояние рассматриваемой сваи от расчетной высоты, м; $z_d = (D - d) = 4,33$ м на уровне ВП. Поскольку для бортов у ВП, для балок основного и рамного набора ВП получим соответственно:

$$P_{вн} = 1,9 (50,9 - 1,025 \cdot 9,81 \cdot 4,33) = 7,36 \text{ кПа};$$

$$P_{вн} = 1,1 P_{вн} = 1,1 \cdot 7,36 = 8,1 \text{ кПа};$$

$$P_{вн} = 0,77 P_{вн} = 0,77 \cdot 7,36 = 5,67 \text{ кПа}.$$

Максимальное расчетное давление $P_{вн} \leq 0,03L + 3,5 = 7,64$ кПа.

Нагрузка на деки для судов с двойным дном [см. формулу (8.2)]:

для флоры, стрингеров и вертикального штея

$$P = P_{ст} + P_{вн} - P_t = 91,2 + 33,3 - 20 = 104,5 \text{ кПа};$$

для балок основного набора в палубе

$$P = P_t + P_{вн} = 91,2 + 33,3 = 124,5 \text{ кПа},$$

где P_t — противоударная грузы; при отсутствии данных о грузе можно принять $P_t = 20$ кПа. Распределение нагрузки по секциям нагрузки показано на рис. 15.13.

Пример 2. Определить нагрузку для всех переборок танкерного судна по следующим данным: $L = 190$ м, $D = 12,3$ м, $B = 22,4$ м, $d = 9,4$ м, $\rho = 1,025$ т/м³, плотность груза $\rho_1 = 1,0$ т/м³.

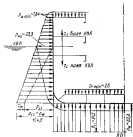


Рис. 15.13. Распределение нагрузки по поперечному сечению сухогрузного судна (ординаты в кПа; суммарная нагрузка на днище показана).

— статическая нагрузка; — суммарная нагрузка.

Ниже приведены только те формулы, которые отличаются от формул, использованных в примере 1:

$$P_{ст} = 1,025 \cdot 9,81 \cdot 9,4 = 94,5 \text{ кПа};$$

$$A = 1,0 [16,75 - (3 - 1,445)^{0,75}] = 2,2 \text{ м};$$

$$P_{вн} = 1,025 \cdot 9,81 \cdot 4,6 \cdot 1,15 = 53,2 \text{ кПа}.$$

Нагрузки для свай, расположенных ниже расчетной высоты ($z_d = d$), $P_{вн} = 53,2 (1 - 5,5 \cdot 9,4 / 190) = 35,0$ кПа.

Нагрузки для свай, расположенных ниже расчетной высоты ($z_d = D - d = 2,9$ м), для бортов у ВП, для балок основного и рамного набора ВП соответственно равны:

$$P_{вн} = 1 (53,2 - 1,025 \cdot 9,81 \cdot 2,9) = 24 \text{ кПа};$$

$$P_{вн} = 1,1 (53,2 - 1,025 \cdot 9,81 \cdot 2,9) = 26,4 \text{ кПа};$$

$$P_{вн} = 0,77 (53,2 - 1,025 \cdot 9,81 \cdot 2,9) = 18,5 \text{ кПа}.$$

Нагрузки на деки для танкерных судов на корпусе волн определяют, исходя из условия, что грузовой такт протей [см. формулу (15.1)]

$$P = P_{ст} + P_{вн} = 94,5 + 35,0 = 131,5 \text{ кПа}.$$

Нагрузки на деки танкерных судов для танкерных судов на корпусе волн определяется при условии, что танкерные танки [см. формулу (15.2)],

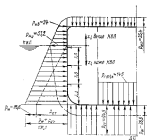


Рис. 15.14. Распределение нагрузки по поперечному сечению корпуса (определяем нагрузку в кПа; горизонтальная нагрузка по длине не показана).
— основная нагрузка; —— статическая нагрузка; — суммарная нагрузка.

Противодавление турбо без учета кавитации определяем по формуле (15.4), причем $d_0 = D$

$$P_0 = 9,8(z_1 + 2,5) = 1,98(12,3 + 2,5) = 145 \text{ кПа};$$

$$p = 145 = (34,5 - 36,5) = 87,2 \text{ кПа}.$$

Распределение нагрузки по сечению корпуса показано на рис. 15.14.

По известным распределениям нагрузки можно найти давление для любой точки корпуса.

§ 82. Понятие об общей и местной вибрации корпуса

Вибрация — это различные установившиеся или неустойчивые колебания корпуса или отдельных его конструкций. Как и любое колебание, вибрация характеризуется амплитудой и частотой. **Амплитуда** — максимальное отклонение от положения равновесия. **Частота** — число колебаний в единицу времени, измеряется в герцах (Гц).

Колебания корпуса и его отдельных элементов могут быть свободными и вынужденными. **Свободные колебания** — это колебания, которые совершает тело, выведенное из равновесия и предоставленное самому себе. Свободные колебания вызываются возмущающими нагрузками ударного характера (ударная волна взрыва, удары судна о волну во время шторма и т. д.).

Рис. 15.15. Формы колебаний корпуса: а — двукратного поперечного изгибающего первого тона; б — трехкратного поперечного изгибающего второго тона; в — четырехкратного поперечного изгибающего третьего тона; г — двукратного крутильного.



Независимо от отклонения, которое сообщается корпусу в начальный момент, совокупность порождаемых им колебаний всегда можно разложить на простейшие колебательные движения, каждое из которых отличается своим периодом, скоростью и специфической формой. Эти простейшие свободные колебания системы называются **модами**. В случае свободных колебаний начальное возмущение системы уже в начальный момент движения распадается на отдельные главные колебания, которые протекают затем по отдельности по своим или критическим законам, определяемым устройством системы. Количество различных главных свободных колебаний системы равно числу ее степеней свободы, т. е. числу тех линейно независимых переменных, которыми может быть определено положение всех ее масс в любой момент времени. В состав корпуса судна входит бесконечное количество элементарных масс, поэтому число разных главных свободных колебаний судна также бесконечно велико. Форма колебаний — это форма изгиба, соответствующая данной частоте (рис. 15.15). Она зависит от тона колебаний и зависит при расчете вибрации.

Формы деформации корпуса различаются в основном числом узлов, т. е. числом сечений, которые при деформации остаются неподвижными. Расположение этих узлов по длине корпуса, а также форма колебаний еще и в каждом частном случае обусловлены распределением моментов инерции сечений и масс корпуса по длине. В зависимости от количества узлов колебания называются **одноузловыми** (первого тона), **двухузловыми** (второго тона), **трехузловыми** (третьего тона) и т. д. (см. рис. 15.15). Наибольшим периодом, т. е. наименьшей частотой, обладает колебание первого тона, каждое главное колебание последующего тона имеет меньший период, т. е. большую частоту, чем колебания предыдущего тона; поэтому главные колебания корпуса являются также колебаниями первой (основной), второй частоты и т. д.

Расчет свободных колебаний судового корпуса позволяет найти частоту и форму главных свободных колебаний. Эта информация необходима для последующего расчета вынужденной вибрации судового корпуса. Чтобы избежать резонансных колебаний, необходимо знать частоту свободных колебаний.

Резонанс — явление, которое характеризуется тем, что частота возмущающей силы совпадает с одной из собственных

значений частоты конструкции. Явление резонанса характеризуется резким увеличением амплитуды.

Корпус судна представляет бесопорную балку переменного сечения с непропорционально распределенной по длине массой. В соответствии с этим можно выделить основные виды вибрации судового корпуса, непосредственно связанные с характером возмущающего сила:

поперечные вертикальные колебания корпуса, совершаемые параллельно ДП, — эти колебания вызываются возмущающими силами, действующими в вертикальном направлении;

поперечные горизонтальные колебания, совершаемые в горизонтальной плоскости, параллельной плоскости вращения, — эти колебания вызываются горизонтальными силами;

продольные колебания, при которых судовой корпус испытывает лишь осевые деформации: каждое поперечное сечение корпуса после перегибания остается параллельным своему первоначальному положению. Продольные колебания вызываются воздействием на корпус пульсирующей составляющей упора винтов;

крутильные колебания, при которых один сечения судового корпуса закручиваются относительно других, вращаясь в своей плоскости, — эти колебания возбуждаются крутящими моментами.

Для реального судна каждый указанный выше вид колебаний практически не существует в чистом виде. Обязательно присутствуют одновременно несколько основных видов колебаний. Однако степень связи между различными видами колебаний неодинакова. Наиболее сильно взаимосвязаны поперечные горизонтальные и крутильные колебания. Связь между вертикальными и горизонтальными колебаниями весьма слабая, поэтому вертикальные поперечные колебания судового корпуса рассчитывают, как правило, независимо от других видов колебаний.

Вибрация корпуса может быть вызвана периодическими усилиями от работающих на судне неуравновешенных механизмов и винтов, а также ударами волн во время шторма. При действии периодических сил, возникающих при работе гребных винтов или неуравновешенных судовых машин и механизмов, возникает вынужденная или так называемая ходовая вибрация судна. Винты передают на корпус периодические усилия непосредственно через лопастной валопровод. Кроме того, при работе гребных винтов возникает пульсирующее поле гидродинамического давления, действующего на обшивку корпуса. Наибольшего значения эти виды давления достигают в районе расположения гребных винтов на участке длиной, примерно равной диаметру винта.

Возмущающие силы первого порядка с частотой, равной частоте вращения гребного вала, создают ходовую вибрацию пер-

вого порядка. Помимо вибрации первого порядка наблюдается еще так называемая лопастная (или лопастная) вибрация 2-го порядка с частотой $\omega = 2n$, где n — частота вращения вала; 2 — число лопастей гребного винта. Лопастная частота обусловлена преимущественно пульсирующим давлением, которое передается на корпус через валу.

Периодические усилия вызывают колебания корпуса судна как балки, а также колебания его конструкций, элементов. Колебания корпуса судна в целом являются общей вибрацией судна, а колебания отдельных его конструкций — местной вибрацией. Как правило, общая вибрация всегда сопровождается местной. При общей вибрации корпус судна производит смещение оверных контуров судовых переборок, пластин, балок, что и вызывает их местную вибрацию. Местная вибрация в отдельных случаях может оказать заметное влияние на параметры общей вибрации корпуса. Такое влияние наблюдается при условии, если частота свободных колебаний корпуса или балки близка к частоте свободных колебаний конструкций. Заметное влияние на общую вибрацию могут оказывать лишь конструкции, обладающие значительной массой (например, судовые переборки, пластинки и т. д.).

Ходовая вибрация судна отрицательно влияет на его эксплуатационные качества: создаются дополнительные помехи в работе отдельных судовых механизмов и приборов; в местах усиленной вибрации возникают усталостные разрушения связей корпуса судна и отдельных деталей механизмов; вибрация препятствует на зрелые команды и послуживает, снижает их работоспособность. Поэтому общая и местная вибрация обязательно нормируется по частоте и амплитуде, а местная вибрация еще и по допускаемым напряжениям [15].

С целью уменьшения вибрации корпуса от работы гребных винтов при проектировании предусматривают конструктивные меры по снижению вибрации:

покрытие участка днища в районе гребных винтов резиной; поддув воздуха к днищу корпуса над гребными винтами с целью создания воздушной пленки, которая играет роль демпфера между сплошной жидкой средой и обшивкой корпуса; устройство в корпусе судна над гребными винтами специальных ниш. Открытые ниши уменьшают пульсирующее давление (чтобы уменьшить сопротивление воды, винты закрывают листом обшивки с отверстиями);

используют различного рода виброгасители. Особенно эффективны они при гашении вибрации отдельных механизмов, работающих в строго определенном частотном режиме. Для гашения общей вибрации виброгасители не применяют.

Отрицательные последствия ходовой вибрации можно избежать или хотя бы уменьшить лишь путем уменьшения ее пара-

метров (перемещений, скоростей и ускорений). Для этого необходимо прежде всего располагать методами расчета холдовой вибрации.

До сих пор в расчетах общей вибрации судовой корпус моделировался неприматической балкой. Во многих случаях использование такой модели в расчетах вибрации приводит к результатам, достаточно близким к экспериментальным данным. Однако для некоторых классов судов (комбинированных, дизель-судов, супертанкеров) использование балочной модели может привести к недопустимым погрешностям. При расчетах вибрации таких судов используют пространственную стержневую модель, а в последние годы с целью уточнения расчетов по вибрации судовой корпуса все чаще прибегают к использованию метода конечных элементов (МКЭ).

Для расчета вибрации необходимо знать кривые распределения по длине судна моментов инерции относительно вертикальной и горизонтальной осей и кривые распределения масс. Особые трудности в расчетах вибрации возникают при определении присоединенных масс воды. Судно совершает колебания в жидкости; колебания судовых конструкций возбуждают частицы жидкости, окружающей судно. Жидкость оказывает на конструкцию силовое воздействие, т. е. в свою очередь влияет на ее колебания. Поэтому расчеты вибрации корпуса необходимо выполнять с учетом массы присоединившейся воды.

Для определения собственной частоты колебаний корпуса судна на ранних стадиях проектирования пользуются приближенными формулами [15].

§ 63. Использование ЭВМ при проектировании конструкций корпуса

С появлением ЭВМ ряд проблем строительной механики корабля получил полное разрешение. Изменился состав расчетных методов. При ручном счете основным критерием выбора метода служил трудоемкость расчета, при машинном счете более предпочтительны методы, обладающие большей универсальностью, т. е. позволяющий получить решение для более широкого класса задач.

В начале 50-х годов расчет конструкций с десятком неизвестными казался весьма трудоемким процессом и усилия инженера-исследователя тратились в основном на ведение тех или иных упрощений с целью сокращения числа неизвестных. При использовании ЭВМ число неизвестных достигает нескольких сотен и даже тысяч.

Современный этап в судостроении характеризуется быстрым ростом размеров судов, усложнением условий их эксплуатации, внедрением высокопрочных сталей, поэтому становится необходимым развитие уточненных и высокопроизводительных методов

расчета и проектирования судовых конструкций с использованием ЭВМ. В настоящее время численные методы с применением ЭВМ заняли прочное место в инженерных расчетах. Применение ЭВМ позволяет освободить инженерные кадры от утомительной работы, связанной с выполнением стандартных расчетов.

Основной эффект от внедрения ЭВМ в практику проектирования — повышение технико-экономических показателей проекта на основе использования системного подхода, многовариантной оптимизации принимаемых решений и более глубокого проникновения в сущность процессов, характерных для данного сооружения.

Выбор метода расчета определяет алгоритм. От рациональности полученного алгоритма зависит точность расчета, расход машинного времени, степень сложности программы.

Численным методом расчета судовых конструкций много, но исключительно широкое применение в расчетах прочности судовых конструкций получил метод конечных элементов (МКЭ). В значительной мере это объясняется наличием машинных программ, обладающих высокой степенью автоматизации трудоемких операций составления и решения систем алгебраических уравнений [16].

МКЭ дает возможность вполне учесть геометрические формы и реальные условия работы конструкций, распределение в пространстве и изменении во времени внешних нагрузок, граничные условия, температурные факторы, а также физические свойства материалов конструкций. Данный метод основан на мысленном представлении сложного тела в виде совокупности отдельных конечных элементов, взаимодействующих в конечном числе узловых точек. В этих точках прикладываются некоторые фиктивные усилия взаимодействия, характеризующие действие распределенных внутренних напряжений, приложенных вдоль реальных границ стыковки смежных элементов.

Если такая идеализация исходного упругого тела (конструкции) возможна, то проблема сводится к расчету упругой системы с конечным числом степеней свободы. Замена исходной конструкции совокупностью дискретных (раздельных) элементов позаранеем равенство исходной конструкции и ее дискретной модели. Для некоторых конструкций можно получить дискретную модель, точно описывающую поведение самой конструкции. Это характерно для конструкций, которые уже состоят из элементов с дискретным их соединением. Например, фермы, рамы, стержневые перекрытия (рис. 15, 16, а).

Если элементы реальной конструкции имеют вдоль своей границы непрерывные связи со смежными элементами, то при построении дискретной модели необходимо делать некоторые



Рис. 15.16. Схемы идеализации конструкции: а — формы; б — элементы.

стига произвольного очертания может быть представлена в виде совокупности прямоугольных и треугольных конечных элементов (рис. 15.16, б). Уменьшение размеров сторон конечного элемента и связанное с этим увеличение числа узлов приводит к повышению точности расчета. Использование очень малых по размеру конечных элементов иногда обуславливает резкое возрастание ошибок округления и, как следствие этого, увеличивает общую погрешность расчета.

В соответствии с идеализацией, приводящей к некоторой конструкции из совокупности конечных элементов, взаимосвязанных лишь в узловых точках, требуется, чтобы напряженное состояние в каждом из элементов однозначно определялось через значения узловых перемещений (узловых усилий).

Система взаимосвязанных в узловых точках конечных элементов статически неопределима. При раскрытии статической неопределимости используют метод перемещений или метод сил. В случае применения метода перемещений за основные неизвестные принимают перемещения узловых точек (линейные и угловые). Для определения этих неизвестных составляют необходимое число уравнений равновесия узловых точек. Узловые усилия взаимодействия между смежными конечными элементами выражают через неизвестные перемещения. При использовании метода сил за основные неизвестные принимают узловые усилия взаимодействия между элементами в узловых точках. Для их определения составляют уравнения совместности перемещений в узловых точках. В обоих вариантах получают систему алгебраических уравнений, с помощью которых определяют неизвестные.

Однако емкость оперативной памяти ЭВМ ограничена и часто в силу этого расчет больших пространственных конструкций становится затруднительным. Поэтому большие пространственные конструкции рассчитывают на суперэлементы (СЭ). СЭ повторяют форму и размеры некоторых частей реальных конструкций (узлов, соединительных наборов, частей шпангоутных рам, перекастов, бортов и т. п.)^{*}.

* См.: Местное В. А., Харламов Н. Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. Л., Судостроение, 1974. С. 320—331.

Рис. 15.17. Соединение в конструкции суперэлементов (СЭ) с узлами: жесткого (Ж), второго (В) и третьего (ТТТ). Обозначения: (Ж) — жесткий узел, (В) — второй узел, (ТТТ) — третий узел.



В СЭ объединяются несколько базисных конечных элементов, материал которых имеет разные характеристики. Это элементы с различными закреплениями, нагружениями и внешними силами, с большими числами внутренних и внешних степеней свободы.

При сборке конструкции из СЭ последние соединяются, как и МКЭ, в узловых точках, называемых суперузлами (СУ)^{*} (рис. 15.17).

С помощью метода суперэлементов (МСЭ) по сравнению с МКЭ могут быть решены более сложные и трудоемкие задачи при значительно меньших затратах машинного времени. МСЭ применяют для расчета узлов особой сложности. Расчетная схема задается не для всей конструкции сразу, а в несколько этапов. Например, при расчете грузовой части танкера строят сначала сначала простейшие плоские и балочные элементы конструкции, из них последовательно собирают пространственные узлы, блоки и, наконец, полную конструкцию [20, т. 2]. Повторяющиеся части конструкции, представляемые типовым описанием, в процессе расчета могут использоваться многократно. Это позволяет сократить время на подготовку исходных данных и выполнение расчета. Если требуется внести местные изменения или заменить часть конструкции, то нет необходимости пересчитывать всю задачу — достаточно внести коррекцию только в описание данной конструкции.

В настоящее время с помощью ЭВМ по стандартным программам выполняют расчеты общей и местной прочности, общей и местной жесткости, расчеты прочности при постановке судна в док и др.

Вопросы для повторения

1. В каких случаях применяется расчет местной прочности?
2. Перечислите нагрузки, действующие на днищевые переборки.
3. Назовите метод расчета балки реального и идеального набора дощатого набора.
4. Охарактеризуйте нагрузку, действующую на бортовое переборное, и методы расчета набора на нагрузку, действующую со стороны моря.
5. Назовите нагрузки, действующие на переборки, и объясните метод расчета балки основного и рамного набора на изгибающую нагрузку.
6. Перечислите нагрузки, действующие на полубатис переборки переборки и промежуточные шпангоуты.
7. Объясните метод расчета балки основного и рамного набора на изгибающую нагрузку.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Сравнение данных о профилей стали

Таблица 1. Сталь гравитационная, Полюсобраз асимметричный для спускаемого во ГОСТ 21857-78

Наименование профиля	Размеры, мм					Исходный профиль				Профиль в поперечнике	
	Размеры, мм					Г, см	А, мм	L _г , см	R _г , см	L _г , мм	R _г , мм
	A	B	C	D	E						
5	10	16	4,0	2,5	2,66	2,66	3,35	6,05	3,13	44*	9*
6	10	19	5,0	3,5	4,38	4,38	3,36	14,00	3,74	87*	15*
7	10	21	5,0	3,5	5,07	5,07	3,36	23,00	4,40	117*	33*
8	10	22	5,0	4,0	5,84	5,84	4,38	38,08	5,07	205*	35*



Сопоставление профилей: В — исходный профиль, А — исходный профиль, D — исходный профиль, E — исходный профиль, F — исходный профиль, G — исходный профиль, H — исходный профиль, I — исходный профиль, J — исходный профиль, K — исходный профиль, L — исходный профиль, M — исходный профиль, N — исходный профиль, O — исходный профиль, P — исходный профиль, Q — исходный профиль, R — исходный профиль, S — исходный профиль, T — исходный профиль, U — исходный профиль, V — исходный профиль, W — исходный профиль, X — исходный профиль, Y — исходный профиль, Z — исходный профиль.

9	90	24	6,5	4,0	7,03	7,03	5,52	55,60	5,05	295*	33*
10	100	26	6,0	5,0	8,68	8,68	6,78	88,45	6,29	434*	45*
12	120	30	6,0	6,0	11,13	11,13	8,75	157,36	7,58	787*	68*
14a	140	38	7,0	6,0	14,06	14,06	11,05	271,51	8,80	1274*	101*
14b	140	38	9,0	6,0	16,85	16,85	13,23	304,11	8,88	1388*	112*
16a	160	56	8,0	7,0	17,94	17,94	14,28	452,07	9,00	2250*	147*
16b	160	56	10,0	7,0	21,11	21,11	16,00	531,10	9,75	2434*	140*
18a	180	61	9,0	7,0	22,18	22,18	17,41	715,55	11,13	3589*	165*
18b	180	62	11,0	7,0	25,78	25,78	20,04	825,78	10,83	3932*	169*
20a	200	44	10,0	8,0	27,36	27,36	21,67	1085,40	12,55	4733*	218*
20b	200	46	12,0	8,0	31,36	31,36	24,60	1256,10	12,06	5110*	223*
22a	220	49	11,0	8,5	32,82	32,82	25,75	1376,90	13,53	5560*	245*
22b	220	50	13,0	8,5	37,29	37,29	29,20	1777,30	13,20	6030*	272*
24a	240	52	12,0	9,0	38,75	38,75	30,42	2217,00	14,71	8720*	424*
24b	240	54	14,0	9,0	43,55	43,55	34,18	2378,80	14,41	9250*	456*

Примечания: 1. Номер профиля соответствует номеру из таблицы 1, см. 2. Масса 1 м профиля приведена в килограммах (распределение по длине стали, по ГОСТ 21857-78).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышнев Н. Д. Конструкция корпуса морских судов. Л.: Судостроение, 1981. 552 с.
2. Бойцов Г. В., Палай О. М. Прочность и конструкция корпуса судов конвекции. Л.: Судостроение, 1979. 360 с.
3. Бронников А. В. Морские транспортные суда. Л.: Судостроение, 1984. 222 с.
4. Бронников А. В., Глазман М. К., Колесников В. В. Основы выбора конструкции корпуса судов. Л.: Судостроение, 1974. 152 с.
5. Бондаренко А. Я. Стандартизация в судостроении. Л.: Судостроение, 1978. 122 с.
6. Глазман М. К. Технологичность конструкций корпуса морских судов. Л.: Судостроение, 1984. 290 с.
7. Коротких Н. Н., Пестов В. А., Савице Н. Д. Строительная механика корпусов и теории упрочения. Л.: Судостроение, 1968. Т. 1. 424 с.
8. Коротких Н. Н., Ростоцкий Д. М., Савице Н. Д. Прочность корабля. Л.: Судостроение, 1974. 432 с.
9. Машинный А. М. Индекс и коррозия при нормировании прочности корпусов судов/Прочность и защита от коррозии корпусов морских судов/Тр. ин-та ДИИИ им. Флота. Л.: Транспорт, 1984. С. 3—8.
10. Он же. Новые правила постройки судов Регистра СССР/Тех. докт. на проектир. и стр-ю кораблей. Л.: Судостроение, 1984. С. 1—10.
11. Он же. Прочность морских транспортных судов. Л.: Судостроение, 1976. 312 с.
12. Он же. Требования к структуре и содержанию правил постройки судов Регистра СССР (морских)/Прочность корпусов и остовов судов/Тр. ин-та ДИИИ им. Флота. 1979. Вып. 246. С. 3—10.
13. Морские суда. Конструкция и оборудование (Брошюры). Л.: 1985.
14. Оценка технологического обеспечения корпусов морских судов/А. М. Машинный, А. М. Бондаренко, А. С. Бронников, А. Ю. Петухова. Л.: Судостроение, 1982. 156 с. (Качество и надежность).
15. Пестов В. А. Численные методы расчета судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1977. 288 с.
16. Пестов В. А., Колесников В. С., Ростоцкий Д. М. Выборка корабля. Л.: Судостроение, 1983. 248 с.
17. Правила классификации и постройки морских судов/Регистр СССР. Л.: Транспорт, Ленингр. отд., 1986. 928 с.
18. Проблемы прочности судов: системный подход к расчету и проектированию корпусов авиационных судов. В. С. Чувакисов. Л.: Судостроение, 1975. 268 с.
19. Рустом М. Е. Проектирование конструкций корпусов морских судов. В 2 ч. Л.: Судостроение, 1979—1977. Ч. 1—2.

20. Сравнительно-строительная механика корабля. В 2 т. Г. В. Бойцов, О. М. Палай, В. А. Пестов, В. С. Чувакисов. Л.: Судостроение, 1982. Т. 1—2.
21. Сравнительно-строительная механика корабля. В 2 т. Д. И. ред. Ю. А. Шанинского. Л.: Судостроение, 1968.
22. Сравнительно-строительная механика корабля и теории упрочения. В 2 т. А. А. Курдюмов, А. З. Лосский, Р. А. Новиков, В. В. Колесников. Л.: Судостроение, 1984. Т. 1. 418 с.
23. Судовые фундаменты/А. Л. Восток, М. К. Глазман, В. А. Голубев, А. К. Сорокин. Л.: Судостроение, 1968. 280 с.

ПРЕДМЕТНО-ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоматизация 271, 272
Автоматизация 271, 272
Вектор 56
Вектор 6, 77
Вектор-функция 42
Вектор 76, 213
— обобщенный 218
— разный 213, 221, 228
— координат 216
— координатный 223
— координатный 265
Вектор 187
— корпус судна 187
— координатный 37
— координатный 58
— координатный 58
Вектор 272
Вектор 185, 189, 176, 189
Вектор 18
Вектор 304
— корпус судна 303
— координатный 303
Вектор 304, действующий на судно 84
Вектор 93, 98
Вектор 150, 162
Вектор 112
Вектор 182, 189
Вектор 76
— обобщенный 152, 158
— координатный 152, 161
Вектор 113
Вектор 6
— координатный 6
— координатный 7
— координатный 46
Вектор 76, 155, 216
Вектор 138
- Вектор 78
— координатный 138
— координатный 78, 138
— координатный 146
— координатный 159
— координатный 159
— координатный 164
— координатный 179
Классификация судов (Регистр СССР) 116
Классификация кораблей 235
Класс 78, 138, 139, 162
Классификация судов 216, 218
Класс 267
Классификация судов 267
Классификация судов 36, 51
Классификация судов 202
Классификация судов 202
Классификация судов 78, 132
Классификация судов 150
— класс 15, 16, 18
— координатный 150
Классификация судов 110
Классификация судов 110
— класс 15, 16, 18
— координатный 110
Классификация судов 110
Классификация судов 78, 132
Классификация судов 77, 142
Классификация судов 213
— координатный 213
Классификация судов 284
Классификация судов 32, 76
Классификация судов 76, 209
Классификация судов 236
Классификация судов 262
Классификация судов 30, 77

Посуды: 217, 218	Тяжелый трюмной ящик 249
Потопы 159	Тяжелый ящик 164
Поперек 15	Фальшборт 78, 264
— продольный 15, 17	Филор 78, 166
— свободный 16, 17	— фальшивый 169
Применение палубы 14, 21	— волнопроникающей 168
Прочность балки 7, 284	— обшивочный 168
Прочность корпуса судна 161	— оверштаг 166
— мачты 262	— оловяной 271
— обшивки 161	— трамвайный 271
Профиль 19	Ферритовый 271
— килевой 19	Фундамент судовой 276
— оверштаг 19	Шпала машинная 253, 269
Рамы 29	Шпаль перекладины 79, 241
Система набора перекрытий 70, 166, 218	Шпарты 78, 147
Сквозной ящик 150	Шпарты-борты 68, 262
Сквозной ящик 147	Шпарты 78, 148
Средняя 24	— обшивочный 162
— бортовой 78, 188, 204	— транзитный 204
— донной 78, 199	— разный 166, 264
— килевой 214	Шпарты 82, 149
Теория трех моментов 24	Шпарты 260, 261
Устойчивость судовых конструкций 120	Шпарты нагрузка 31, 51
	Шпарты нагрузка 37, 51
	Шпарты нагрузка брус 107

ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора	3
Основное обозначение	5
Раздел 1. ОСНОВНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИКИ МОРСКИХ СУДОВ	6
Глава 1. Наил и устойчивость стержней-балок и стержневых систем	6
1. Наил стержневых стержневых балок	6
2. Подбор поперечного сечения балок	14
3. Основные требования, предъявляемые к профилю балки набора	19
4. Наил стержневых стержневых балок и рам	20
5. Расчет стержневых перекрытий	32
6. Устойчивость стержней	36
Глава 2. Наил и устойчивость пластин	39
7. Пластинки в составе судовой конструкции, их размеры и характер закрепления на корпусе судна	39
8. Классификация пластин	41
9. Расчет обшивочных пластин	42
10. Расчет пластин килевой конструкции	48
11. Устойчивость пластин	51
Раздел II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА МОРСКИХ СУДОВ	55
Глава 3. Основные моменты в конструкции корпуса	56
12. Общие сведения об архитектурно-конструктивных типах судов	56
13. Основные архитектурно-конструктивные типы судов	58
14. Судовые перекрытия — структурные части корпуса судна	70
15. Система набора перекрытий. Шпарты	79
Глава 4. Общий наил и общая продольная прочность судна	84
16. Расчеты силы, вызывающей общий наил судна	84
17. Наил судна на талый лед	86
18. Наил судна на талый лед	93
19. Наил судна на талый лед	97
20. Расчеты и общий продольный прочность судна	104
21. Расчет общей прочности	107
22. Силы, действующие на корпус при движении судна в волне и при спуске с продольного ската	113

Глава 5. Технологический надзор и нормирование прочности судовых конструкций	116
§ 23. Примеры классификации и надзора морских судов	116
§ 24. Нормирование общей прочности корпуса судна в Правилах Регистра СССР	118
§ 25. Требования к размерам элементов конструкции корпуса	123
Глава 6. Технологичность корпусных конструкций и материалов	130
§ 26. Общие положения и критерии технологичности	130
§ 27. Технологичность деталей, узлов и общей конструкции	134
§ 28. Требования к судостроительным материалам	136
§ 29. Выбор материала для судовых конструкций	138
Глава 7. Наружная обшивка	142
§ 30. Требования к наружной обшивке	142
§ 31. Конструкция наружной обшивки	146
Глава 8. Дюймовые перекрытия	151
§ 32. Общие характеристики дюймовых перекрытий судов	151
§ 33. Конструктивные типы дюймовых перекрытий судов	158
§ 34. Конструкции дюймовых перекрытий судов	166
§ 35. Особенности конструкции дюймовых перекрытий судов	177
Глава 9. Бортные перекрытия	187
§ 36. Борт судовых перекрытий	187
§ 37. Борт малых судов	197
§ 38. Усиление бортного набора	202
§ 39. Бере специализированных судов	207
Глава 10. Палубные перекрытия и палубы	209
§ 40. Палубы судовых перекрытий	209
§ 41. Конструкция палубных перекрытий судовых перекрытий	218
§ 42. Палубы малых судов	225
§ 43. Палубы специализированных судов	230
§ 44. Палубы	234
Глава 11. Переборки	238
§ 45. Общие характеристики переборок	238
§ 46. Плоские переборки	240
§ 47. Гофрированные и листовые переборки	247
Глава 12. Надстройки, рубки, ограждения	252
§ 48. Надстройки	252
§ 49. Рубки	257
§ 50. Ограждения	263
Глава 13. Освоенность и чистота корпуса судна	264
§ 51. Чистота освоенности	264
§ 52. Корпусная освоенность	267
§ 53. Конструкция чистоты	271

Глава 14. Судовые фундаменты	275
§ 54. Общие требования к фундаментам	275
§ 55. Конструкция фундаментов под главные машины и котлы	278
Глава 15. Расчет местной прочности основных переборок корпуса судна	282
§ 56. Характеристика различных нагрузок и норм местной прочности	282
§ 57. Прочность дюймовых переборок	284
§ 58. Прочность бортных переборок	287
§ 59. Прочность переборок и продольных переборок	290
§ 60. Прочность палубных переборок	293
§ 61. Примеры определения нагрузки на переборки корпуса судов	297
§ 62. Критерии об общей и местной прочности переборок	300
§ 63. Нормативные СБМ при проектировании конструкций переборок	304
Приложение	306
Список литературы	314
Предметно-тематический указатель	315

Учебное издание

Баллер Валентин Иванович
Юнгвинд Надежда Юльевна

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СУДОВОГО КОРПУСА И
ОСНОВЫ ПРОЧНОСТИ СЕДОВ**

Учебник для судостроительных техникумов

Загл. редакцией **Д. В. Павлова**
Редактор **А. Н. Крутова**
Перевод художника **А. М. Васильченко**
Художественный редактор **Э. А. Буркина**
Технический редактор **Е. А. Покляева, Г. В. Павлова**
Корректоры **А. Г. Крутович, А. Н. Олейник**

ЗВ № 1189

Согласно каталогу 2013/86. Подписано в печать 23.11.88. М-56765. Формат 60х90/16. Бумага типографическая № 1. Гарнитура литературная. Печать машинная. Уд. бл. А. 202. Зак. арт.-изд. 260. Уч.-изд. л. 21,4. Тираж 200 экз. Изд. № 4243-87. Заказ № 30. Цена 70 к.
Издательство «Судостроительное», (8386) Ленинград, го. Гатчина, 3.
Сопровождение к каталогу Ленинградской выставки № 2 всеобщего значения в рамках Турецкого Восточного Азиатского Лигианского объединения «Техническая выставка экз. Экспозиция Советов в Союзно-Иранском при Тифлисском объединении выставки СССР по делам промышленности, географии и культуры торговли. 1988. Ленинград. Комбинатский комплекс, 28 в Ленинградской типографии № 4 Союза Трудового Восточного Азиатского Лигианского объединения «Техническая выставка экз. Экспозиция Советов» (Союзно-Иранское при Тифлисском объединении выставки СССР по делам промышленности, географии и культуры торговли. 1988. Ленинград. Комбинатский комплекс экз. 15).