

Краткий конспект лекций по дисциплине

Конструкция корпуса судов

ВВЕДЕНИЕ

Знания конструкций корпуса судна и принципов их проектирования являются основными для инженера-кораблестроителя. Конечно, необходимые знания зависят от места работы инженера. Так, заводской инженер (мастер, строитель, технолог) должен более детально разбираться в вопросах технологии постройки, знать особенности материалов. Инженер-конструктор должен иметь навыки проектирования и конструирования. Инженер-исследователь обязан уметь анализировать существующие конструкции и их работу в разных эксплуатационных условиях (на основе знаний, в первую очередь, строительной механики корабля), уметь обобщать результаты анализа, а самое главное – стремиться творчески мыслить и изобретать.

Следует отметить, что в настоящее время в отечественном судостроении наблюдается постепенное изменение организации и технологии проектирования судов. Раньше проектирование и постройка судов разделялись как «во времени» (сначала полный рабочий проект, а затем постройка), так и «в пространстве» (проектирование – в ЦКБ, постройка – на заводах). В полной мере такой подход возможен только при серийной постройке судов и отлаженной системе централизованного планирования и управления.

При такой системе организации работ конструкторские и технологические бюро заводов занимаются адаптацией рабочей документации, созданной в ЦКБ, к особенностям собственного производства. Инженерам приходится выполнять много «рутинной» работы по правке чертежей и техпроцессов, что зачастую сопровождается ошибками. При этом заводские специалисты, находясь в зависимом положении, вынуждены согласовывать с ЦКБ любую мелочь, практически легко решаемую на основе опыта мастеров [1]. В результате у мастеров возникает соблазн выполнять работы, не дожидаясь окончательной полной рабочей документации, что может привести к потере качества или браку. Однако в настоящее время все понимают, что так быть не должно, поэтому ситуация меняется.

В современном быстро меняющемся мире при жесткой конкуренции судостроительные предприятия создают или расширяют собственные инженерные центры, которые могут самостоятельно разрабатывать технические и рабочие проекты судов, технологические процессы, сразу учитывающие конкретные особенности завода. В результате снижается объём документации, ускоряется её согласование, уменьшаются сроки и стоимость проектных работ. Более того, имеется возможность начинать работы, связанные с постройкой судна, параллельно с проектными работами. Это позволяет заводу быть более конкурентоспособным и независимым в освоении новой продукции.

В этих условиях требования к современному инженеру-кораблестроителю повышаются. Он должен иметь навыки творческого мышления, знания стандартов и правил проектирования и постройки судов независимо от места работы – в цеху, в конструкторском либо технологическом отделе, в научно-исследовательской организации.

Проектирование конструкций корпуса судна производится на этапе, когда техническое задание и проектные проработки предопределили класс и архитектурно-конструктивный тип судна, его главные размерения и форму обводов, общее расположение и эксплуатационные характеристики. При таких достаточно чётких ограничениях проектирование конструкций облегчается тем, что уменьшается количество основных критериев проектирования и вариантов возможных конструкций. В большинстве случаев определяющими являются критерии, связанные с прочностью конструкций.

Существуют два основных метода проектирования корпуса судна: расчётный и

по правилам классификационных обществ.

Проектирование большинства конструкций гражданских судов можно выполнить, основываясь только на правилах классификационных обществ (в России – Правила РМРС [13]) – соблюдения этих правил обычно достаточно для однозначного определения размеров конструкций.

Расчётный метод, основанный на применении методов строительной механики корабля, позволяет создавать более рациональные и совершенные, иногда нестандартные конструкции. Однако при любом методе проектирования судно должно соответствовать Правилам Регистра, поэтому спроектированные расчётным методом судовые конструкции следует проверять на их соответствие Правилам. Может оказаться, что спроектированная конструкция не удовлетворяет некоторым требованиям Правил. В этом случае РМРС может допустить применение конструкции, если расчёты убедительно покажут её достаточную надёжность и безопасность.

1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ И ПРАВИЛА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСА МОРСКОГО СУДНА

1.1. Принципы нормирования прочности в правилах Морского Регистра Судоходства

Прочность конструкций судна является комплексным понятием, включающим, в первую очередь, способность их сопротивляться усталостным разрушениям (трещинам) от переменных нагрузок и разрушениям от экстремальных нагрузок (разрывам, пластическим деформациям и потерям устойчивости связей с нарушением их формы). Поэтому Правила Регистра устанавливают нормативные требования к корпусу судна, исходя из двух основных критериев: **усталостной и предельной прочности**.

Основными причинами усталостных трещин являются:

- концентрация напряжений, особенно растягивающих (первопричиной которой являются недостаточно качественно спроектированные узлы, имеющие резкие изменения сечений – жёсткие точки);
- недостаточная пластичность и вязкость, а также дефекты материала;
- остаточные сварочные напряжения, дефекты сварных швов и другие технологические дефекты.

Сложность учёта усталости при нормировании прочности, а также проектировании конструкций состоит в том, что она зависит:

- от трудно предсказуемых эксплуатационных нагрузок (особенно вибрационных и ударных);
- качества проектирования мелких узлов (а это уже во многом зависит от опыта конструктора, т.к. регламентировать в Правилах все разнообразие возможных конструктивных решений практически невозможно и не имеет смысла);

— качества материала и технологии изготовления (эти особенности сложно учесть проектанту и невозможно в полном объёме отразить в Правилах).

Учёт предельной прочности при проектировании конструкций представляет собой ещё более сложную проблему. Во-первых, существует большое разнообразие экстремальных внешних сил, как хорошо определённых (например, статическое давление воды на переборку при затоплении отсека), так и тех, которые не могут быть учтены при проектировании в полной мере (например, удары при столкновениях, взрывы, волновые нагрузки в районе ураганов исключительной силы, волны-убийцы).

Во-вторых, при экстремальных нагрузках происходит нелинейное поведение конструкций, которое трудно смоделировать (в частности, упруго-пластические деформации, потеря устойчивости и т.п., сильно зависящие к тому же от динамики нагружения, наличия трещин и других факторов). Ещё труднее представить соответствующие нормативные требования в виде обобщённых формул, имеющих чёткий физический смысл. По этой причине некоторые классификационные общества в комплексе с нормативными правилами ввели в практику проектирования использование специальных программных комплексов, позволяющих моделировать нелинейное поведение конструкций с применением метода конечных элементов.

Всё многообразие условий эксплуатации судовых конструкций сосредоточено в Правилах Регистра в виде простых формул, которые представляют ограничения на параметры связей (толщин, характеристик сечений балок и т.п.) в виде функции от условных внешних сил (расчётных нагрузок) и условных безопасных внутренних сил (допускаемых напряжений, определяемых как часть предела текучести материала).

Может возникнуть вопрос: как же можно полагаться на Правила и быть уверенным в надёжности спроектированных конструкций, если они основаны на применении условных нагрузок (меньших, чем реально возможные экстремальные нагрузки), не моделируют особенности реального, нелинейного поведения конструкций и т.п.? Прежде чем ответить на этот вопрос, напомним, что «абсолютную гарантию может дать только страховой полис»*.

Требования Правил Регистра получены на основе многолетнего опыта эксплуатации судов, а также многочисленных экспериментальных исследований, проводимых научно-исследовательскими организациями.

Раньше это обобщение опыта было оформлено в Правилах классификационных обществ в виде табличных данных и формул, которые определяли зависимость размеров связей, в основном, от главных размерений судна. Такой подход позволял очень легко определять размеры конструкций судов, но эти конструкции не отличались большим разнообразием. По мере развития новых типов судов становилась всё более очевидной необходимость придания зависимостям Правил явного физического смысла.

В современных Правилах Регистра размеры конструкций назначаются в соответствии с требованиями, которые явно связаны с условиями их эксплуатации:

1) местной изгибной прочности (на расчётные нагрузки, которые рассмотрены в подразделе 1.5);

2) местной сдвиговой прочности (для рамных связей);

3) общей прочности корпуса (определяемой из расчёта эквивалентного бруса, рассмотренного в разделе 7);

4) устойчивости связей от сжимающих усилий (см. подраздел 1.8);

5) достаточного запаса на коррозионный износ;

6) надёжности при воздействии различных ненормируемых нагрузок (ударов о плавающие предметы, падения груза, посадки на мель и т.п.), опыта эксплуатации и постройки судов (критерий минимальных толщин).

1.2. Выбор шпации. Размещение переборок и размеры грузовых люков

Шпацией называется расстояние между балками основного набора. Правилами Регистра определяется так называемая нормальная шпация a_0 , м:

$$a_0 = 0,002L + 0,48.$$

Фактическую шпацию следует принимать таким образом, чтобы она отличалась от нормальной не более чем на 25 %. Шпация не должна быть больше 1 м. В форпике и ахтерпике шпация не должна превышать 0,6 м, а в носовой части (до $0,2L$ от носового перпендикуляра) – 0,7 м (1.1.3).

Оптимальная шпация, при которой обеспечивается небольшой вес конструкции и минимум затрат на её изготовление, обычно превышает a_0 примерно на 10 %. Желательно округлять шпацию до сотен миллиметров.

При выборе шпации следует учитывать размеры трюмов и других помещений, в пределах которых шпация не меняется.

Расстояние между поперечными рамными элементами набора, как правило, кратно шпации. При смешанной или продольной системе набора корпуса судна расстояние между флорами и бимсами обычно составляет: для сухогрузных (и аналогичных им по условиям эксплуатации) судов три-четыре, для навалочников – две, а для танкеров – четыре шпации.

При выборе шпации некоторых судов следует учитывать эксплуатационные особенности, например, особенности размещения и размеры контейнеров, трейлеров и др.

Процесс согласования шпации и кратных ей размеров (например, длины трюмов, контейнеров и др.) может происходить несколькими приближениями, поэтому возможно обращение к этому разделу не один раз, в том числе после выбора систем набора перекрытий.

Расстояние между поперечными переборками, длина грузового люка, расстояние от поперечного комингса до поперечной переборки, а для контейнеровозов также и длина контейнеров с учётом интервалов между их торцами, **должны быть кратны расстоянию между флорами и бимсами.**

Наименьшее число водонепроницаемых поперечных переборок грузового судна можно определить по табл. 1.1 (2.7.1.3). Расстояние между соседними водонепроницаемыми переборками не должно превышать 30 м.

Длина ахтерпика составляет обычно $(0,04...0,07)L$ в зависимости от типа кормы, размеров и назначения судна и многих других параметров.

Переборка форпика должна отстоять от носового перпендикуляра в пределах: от $0,05L$ до $0,05L + 3$ м – для пассажирских судов (1.1.6.1-); $(0,05L...0,08)L$ – для грузовых судов (1.1.6.2-).

Таблица 1.1

Наименьшее число поперечных переборок

Длина судна L , м	Общее число переборок при положении МО	
	в средней части судна	в корме
менее 65	4	3
65...85	4	4
85...105	5	5
105...125	6	6
125...145	7	6
145...165	8	7
165...185	9	8
более 185	по согласованию с Регистром	

Длина машинного отделения составляет обычно $(0,15...0,20)L$ и колеблется в пределах 15...30 м.

Длина трюмов универсальных транспортных судов, приспособленных для перевозки контейнеров, должна быть кратна длине контейнеров с учётом интервалов между их торцами. Размеры наиболее употребляемых контейнеров приведены в приложении 6. Расстояние между торцами контейнеров – 0,3 м, а разделённых поперечными переборками – 1,0...1,5 м. Расстояние между боковыми стенками – 0,25 м.

Универсальные суда для перевозки навалочных грузов с чередующейся загрузкой трюмов имеют отношение длин короткого и длинного трюмов в пределах 0,5...0,7.

Современные контейнеровозы для раскрепления контейнеров в трюме и ускорения процесса грузообработки оборудуются блоками ячеистых конструкций, которые устанавливаются поперек трюмов и представляют собой двойные проницаемые переборки с закрепленными на них вертикальными направляющими для контейнеров. Ячеистые конструкции разделяют пространство грузовых трюмов на отдельные грузовые ячейки (рис. 1.1). Длина каждой грузовой ячейки кратна длине 40-футового (40') контейнера. Расстояния между торцами контейнера и ячеистой конструкцией – 0,2...0,3 м, между боковыми стенками контейнеров – 0,04...0,07 м, а между боковыми стенками контейнеров и двойным бортом – 0,3 м. Габаритные размеры ячеистых конструкций по длине судна составляют от двух до четырех шпаций [18].

Большинство танкеров (кроме малых нефтепродуктовозов и газовозов) имеют продольные переборки. Обычно танкера длиной менее 200...250 м имеют одну продольную переборку в ДП, а более крупные – 2 переборки симметрично ДП.

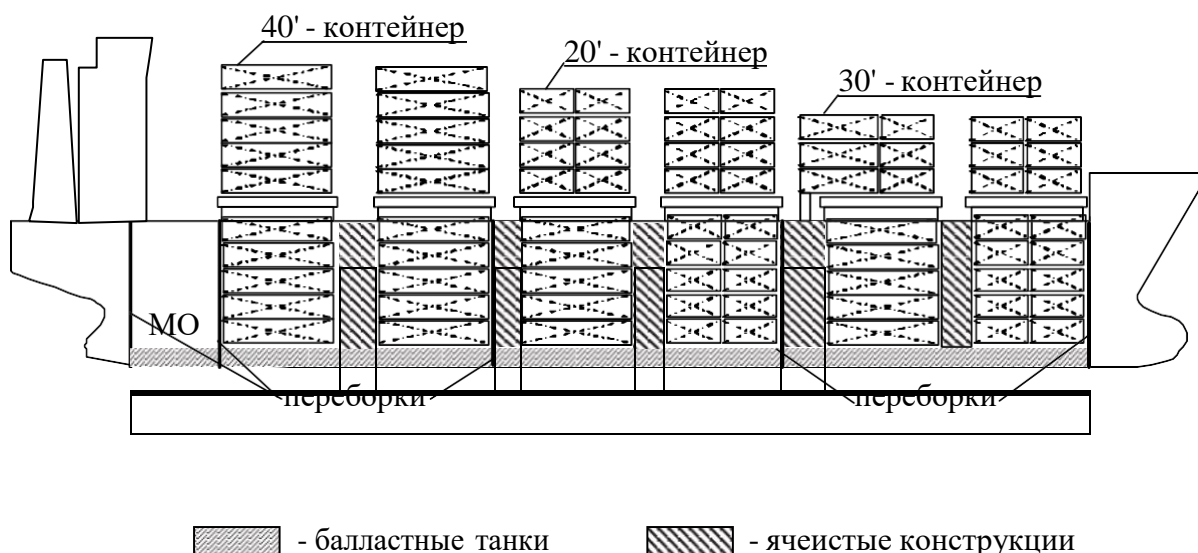


Рис. 1.1. Типовое сечение фидерного ячеистого контейнеровоза

Для танкеров следует учитывать требования МАРПОЛ 73/78, в частности, требования к устройству двойных бортов:

- танкера дедвейтом $DW \geq 5000$ т должны иметь двойные борта шириной не менее $b = 0,5 + DW/20\ 000$ (м) или 2 м (в зависимости от того, что меньше), кроме этого, ширина двойного борта должна быть не менее 1 м;

- танкера дедвейтом $DW < 5000$ т должны иметь двойные борта шириной не менее $b = 0,4 + 2,4 \cdot DW/20\ 000$ (м) и не менее 0,76 м. Если объем каждого грузового танка не превышает 700 м^3 , в этом случае допускается использование одинарных бортов.

Кроме того, по требованиям МАРПОЛ 73/78 длина любого грузового танка не должна превышать 10 м или одной из следующих величин, в зависимости от того, что больше:

- при отсутствии продольных переборок $(0,5 \cdot b/B + 0,1)L$, но не более $0,2L$;
- при одной продольной переборке в ДП $(0,25 \cdot b/B + 0,15)$;
- при двух продольных переборках $0,2L$.

Грузовое пространство танкеров отделено от МО и форпика коффер дамами (короткими пустыми отсеками длиной обычно в одну шпацию).

Типичное расположение танков приведено на рис. 1.2.

Ширина грузовых люков на всех типах судов обычно не превышает 13 м, а длина – 18 м. На судах длиной более 160 м и шириной более 17 м рекомендуется делать парные люки, а при ширине более 30 м – тройные люки. Ширина каждого парного (тройного) люка обычно равна 7...8 м.

Размеры грузовых люков следует принимать с учетом размеров шпации продольного и поперечного набора, а для контейнеровоза – с учетом размеров контейнеров.

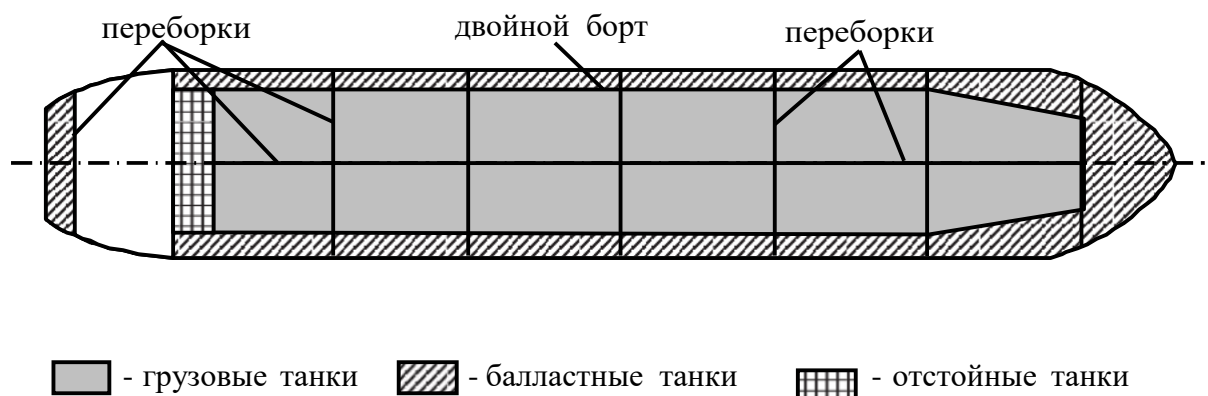


Рис. 1.2. Типичное расположение переборок танкера

Приведенные рекомендации по размерам трюмов и люков для выполнения курсового или дипломного проекта могут быть недостаточными. В этом случае рекомендуем ознакомиться со специальной литературой [3; 4; 6; 7; 8; 14; 15; 18].

В заключение этого этапа курсового проекта следует выполнить предварительные эскизы (схемы) общего расположения основных конструктивных элементов судна:

- 1) продольный разрез с размеченными шпациями поперечного набора, положением переборок, с указанием размеров трюмов и люков;
- 2) поперечное сечение в средней части с размеченными шпациями продольного набора и расположения комингсов грузовых люков.

1.3. Выбор систем набора перекрытий корпуса

При выборе системы набора перекрытия в первую очередь рассматривают 2 основных вопроса:

- 1) В какой степени перекрытие воспринимает поперечное давление?
- 2) В какой степени и каким образом перекрытие работает при общем изгибе корпуса судна?

Суда длиной менее 80 м имеют относительно небольшие напряжения от общего изгиба корпуса и обычно их связи испытывают преимущественно изгиб от местных усилий по нормали к плоскости перекрытия. В этом случае ориентация балок набора зависит от соотношения сторон перекрытия. При этом обеспечивается наименьшая масса перекрытия. Так как обычно перекрытия корпуса вытянуты по длине, то и система набора напрашивается поперечная. Она более выгодна и с технологической точки зрения.

Этим же основным принципом независимо от длины судна следует руководствоваться при выборе системы набора поперечных переборок, перекрытий в оконечностях судна, в коротких надстройках. Так же это касается нижних палуб и бортов – перекрытий, расположенных в районе нейтральной оси эквивалентного бруса, где невелики нормальные напряжения от общего продольного изгиба корпуса.

С увеличением длины судна растут напряжения от общего продольного изгиба корпуса, особенно на удалении от нейтральной оси: в верхней палубе и днище. Они опасны, в первую очередь, тем, что могут привести к потере устойчивости сжатых, наиболее гибких элементов – настила палубы или обшивки днища. Балки набора повышают их устойчивость, однако выбор ориентации балок (вдоль сжимающей нагрузки или поперёк) имеет большое значение, а именно: напряжение, при котором теряет устойчивость прямоугольная пластина, подкреплённая с четырёх сторон балками, примерно в четыре раза выше, если сжатие происходит вдоль пластины в отличие от поперечного сжатия.

Для судов длиной более 100...120 м применение поперечной системы набора для днища, а тем более для верхней палубы, нежелательно ввиду сложности обеспечения их устойчивости при общем изгибе судна. Продольная же система набора этих перекрытий позволяет легко обеспечить их устойчивость при сжимающих напряжениях вплоть до предела текучести материала.

Бортовые перекрытия характерны тем, что несут большую поперечную нагрузку, особенно на судах ледового плавания и судах, часто швартующихся в море в условиях волнения (промысловые, спасательные, буксиры). Нагрузки же от общего продольного изгиба на них влияют в меньшей степени, чем на палубу и днище, ввиду их близости к нейтральной оси эквивалентного бруса корпуса. Поэтому продольная система набора бортов встречается редко, в основном на крупнотоннажных судах.

Тем не менее на судах открытого типа большие напряжения от общего продольного изгиба наблюдаются в верхней части борта, где палуба ослаблена широкими вырезами. В этом случае часто применяется комбинированная система набора борта, когда в верхней части добавляются продольные балки.

1.4. Выбор материала корпусных конструкций

В качестве основного материала корпуса морских судов используется сталь. Для надстроек и рубок допускается применение алюминиевых сплавов.

При выборе стальных листов и профилей для изготовления конструкций следует учитывать множество факторов. Среди них отметим: степень ответственности связи (исходя из последствий их возможного разрушения для безопасности судна); характер напряжённого состояния элемента конструкции; низкие температуры эксплуатации – конструкций судов ледового плавания, рефрижераторов, газозовов и т.п. (так как при низких температурах возможны хрупкие разрушения); прочностные и пластические свойства стали (предел текучести, предел прочности, относительное удлинение); коррозионную стойкость; стоимость стального проката.

Корпусную сталь можно подразделять по категориям (определяемым Правилами Регистра и МАКО), виду проката (листовой, профильный), толщинам и габаритным размерам.

В обозначении категории стали используется буква (А, В, D, Е или F), определяющая стойкость к хрупким разрушениям и «нормируемое качество» по мере возрастания. Кроме буквы в обозначении сталей повышенной прочности присутствует число (32, 36 или 40), определяющее верхний предел текучести стали R_{eH} , кгс/мм².

Гарантированный (нормативный) предел текучести стали при растяжении σ_n , МПа, определяется в виде

$$\sigma_n = 235/\eta,$$

где η – коэффициент использования механических свойств стали, который определяется по формуле

$$\eta = \frac{235}{R_{eH}} \left(1 + 0,16 \left| \left(\frac{R_{eH}}{235} - 1 \right)^{1,5} \right| \right). \quad (1.1)$$

В первом приближении при выборе стали корпуса судна можно ориентироваться на табл. 1.2.

Уточнять этот выбор следует в процессе проектирования конкретного элемента конструкции корпуса с учётом группы связи (табл. 1.3 (1.2.3.7-)), её толщины и расчётной температуры – в соответствии с рис. 1.3 (1.2.3.1).

Таблица 1.2

Выбор материала корпуса в первом приближении

Длина судна L , м	Категории стали	Верхний пре- дел текучести R_{eH} , МПа	Нормативный предел текуче- сти σ_n , МПа
Менее 120	A, B, D, E	235	235
100...160	A32, D32, E32, F32	315	301
140...200	A36, D36, E36, F36	355	326
Более 200	A40, D40, E40, F40	390	345

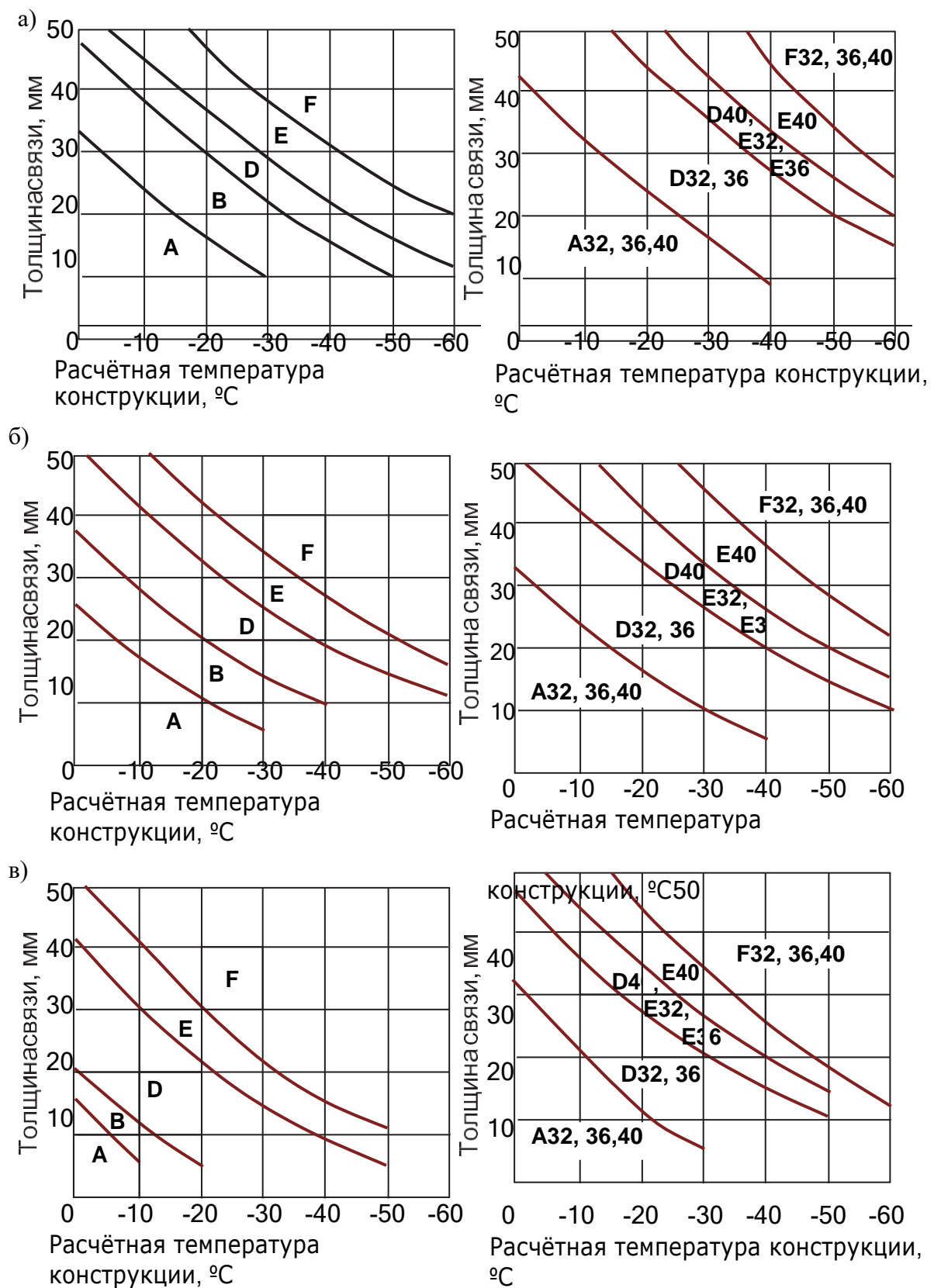


Рис. 1.3. Выбор категории стали: а – для группы связей I;
б – для группы связей II; в – для группы связей III

Таблица 1.3

Группы связей*

Связи корпуса	Группа связи	
	в средней части	в оконечностях
Ширстрек, палубный стрингер, непрерывные продольные комингсы, листы в углах грузовых люков, окончания продольных стенок надстроек, скуловой пояс	III	II
Листы в углах бортовых вырезов, обшивка и сварной набор в районе I ледовых усиления ледоколов и судов категорий Arc7, Arc6, Arc5	II	II
Прочие непрерывные пояса расчётной палубы, подпалубных цистерн, верхние пояса продольных переборок, пояса обшивки днища и настила второго дна, обшивка надстроек и рубок первого яруса, продольные балки верхней части корпуса, прерывистые продольные комингсы расчётной палубы	II	I
Остальные связи	I	I

Расчётная температура конструкции T_P определяется минимальной температурой окружающей её среды (1.2.3.2 – 1.2.3.6-). Так, для наружных конструкций выше ватерлинии эта температура принимается равной минимальной температуре окружающего воздуха T_A . Для наружных конструкций подводной части принимается $T_P = 0$.

Если с разных сторон связи находятся разные среды, то температуру можно усреднить:

- при контакте с наружным воздухом и воздухом внутри закрытых танков, надстроек, рубок и т.п. $T_P = 0,7 T_A$;
- при контакте с наружной водой и воздухом в трюме $T_P = 0,4 T_A$.

С учетом категории ледовых усиления (приложение 5) температуру T_A можно принять равной (1.2.3.3-):

- 40 °C – для судов ледовых категорий от Arc5 до Arc9 и ледоколов категорий от Icebreaker7 до Icebreaker 9;
- 30 °C – для судов ледовой категории Arc4 и ледоколов категории Icebreaker 6;
- 10 °C – для судов ледовой категории Ice2 и Ice3;
- 0 °C – для судов категории Ice1 и без ледовых усиления.

Для конструкций со сложным напряжённым состоянием и высоким уровнем концентрации напряжений, а также подверженных динамическим нагрузкам (например, от ударов при швартовках судна в море), сталь категории А не допускается (рекомендуются категории D или E).

1.5. Определение расчётных нагрузок

Размеры большинства конструкций корпуса судна определяются действующими на них внешними нагрузками. Нагрузки условно делятся на общие (определяющие изгиб корпуса судна в целом) и местные (вызывающие напряжение и деформацию отдельных конструкций).

На первом этапе проектирования конструкции корпуса рассчитываются на местные нагрузки. Общие нагрузки учитываются на следующем этапе – при расчёте эквивалентного бруса судна. В этом подразделе приведены основные указания по расчёту местных нагрузок (1.3).

Обычно на ту или иную связь корпуса в разных условиях эксплуатации судна действуют разные по характеру нагрузки, часто одновременно. При проектировании связей следует учитывать все возможные сочетания внешних усилий. За расчётную нагрузку принимается наибольшая из всех возможных. Конечно, это не означает, что требуется выполнять подробные расчёты всевозможных нагрузок – в большинстве случаев достаточно простых рассуждений для определения наиболее опасного внешнего воздействия.

Например, на обшивку борта танкера может действовать давление со стороны моря и давление жидкости в бортовом танке. Однако очевидно, что второй вид нагрузки всегда уравнивается противодавлением снаружи. Поэтому расчётным давлением будет давление со стороны моря при пустом бортовом танке.

Суда, эксплуатирующиеся в морях с замерзающими районами и в арктических широтах, а также ледоколы должны выдерживать довольно опасные и трудно прогнозируемые ударные нагрузки ото льда. Поэтому конструкция и размеры связей борта таких судов определяются именно этими нагрузками. Их определение в упрощённом виде рассмотрено в подразделе 3.5.

Точками приложения расчётной нагрузки, если специально не указано, следует считать:

- в вертикальной пластине – нижнюю кромку;
- в балке – середину пролёта;
- на участке перекрытия – центр площади давления.

1.5.1. Нагрузки со стороны моря

Давление со стороны заборной воды определяется по формулам (1.3.2):

- для точек поверхности судна выше ГВЛ

$$p = p_w; \quad (1.2)$$

- ниже ГВЛ

$$p = p_w + p_{st} = p_w + 10z, \quad (1.3)$$

где p_w – волновое давление, кПа; p_{st} – гидростатическое давление, кПа; z – отстояние расчётной точки от ГВЛ, м.

Волновое давление определяется по формулам:

- для точек выше ГВЛ

$$p_w = p_{wo} - 7,5 a_x z; \quad (1.4)$$

- ниже ГВЛ

$$p_w = p_{wo} - 1,5 c_w z/d, \quad (1.5)$$

где

$$p_{wo} = 5 c_w a_v a_x \geq 3 c_w;$$

$$a_x = 0,267 \text{ (для средней части судна);}$$

$$a_v = 0,8 v_o (0,001 L + 0,4) / \sqrt{L} + 1,5;$$

c_w – волновой коэффициент, вычисляемый по формулам:

- при $L \leq 90$ м $c_w = 0,0856L\varphi_r;$
- при $90 < L < 300$ м $c_w = (10,75 - (3 - 0,01L)^{3/2}) \varphi_r;$
- при $300 \leq L \leq 350$ м $c_w = 10,75.$

(1.6)

Коэффициент φ_r зависит от класса судна по району плавания (приложение 4):

- для судов неограниченного района плавания и класса R1 $\varphi_r = 1;$
- для класса R2 $\varphi_r = 1,25 - 0,0025L \leq 1;$
- для класса R2-RSN $\varphi_r = 1 - 0,002L;$
- для класса R2-RSN(4,5) $\varphi_r = 0,94 - 0,0019L;$
- для класса R3-RSN $\varphi_r = 0,86 - 0,0018L;$
- для класса R3 $\varphi_r = 0,75 - 0,0018L.$

(1.7)

1.5.2. Ускорения судна при качке

Расчётные ускорения в продольном, поперечном горизонтальном и вертикальном направлениях при качке судна определяются по формулам (1.3.3)

$$\begin{aligned} a_x &= \sqrt{a_{cx}^2 + a_{kx}^2 + 0,4a_{\delta x}^2}, \\ a_y &= \sqrt{a_{cy}^2 + a_{ky}^2 + 0,4a_{\delta y}^2}, \\ a_z &= \sqrt{a_{cz}^2 + a_{kz}^2 + 0,4a_{\delta z}^2}, \end{aligned} \quad (1.8)$$

где

$$\begin{aligned} a_{cx} &= 0,1(100/L)^{1/3} g \varphi_r; & a_{cy} &= 2a_{cx} & a_{cz} &= 2a_{cx}; \\ a_{kx} &= (2\pi/T_k)^2 \psi_z; & a_{ky} &= 0; & a_{kz} &= (2\pi/T_k)^2 \psi_x; \\ a_{\delta x} &= 0; & a_{\delta y} &= (2\pi/T_\delta)^2 \theta_z; & a_{\delta z} &= (2\pi/T_\delta)^2 \theta_y; \end{aligned}$$

где φ_r определяется по формулам (1.7); T_k и T_δ – соответственно периоды килевой и бортовой качки, определяемые по формулам

$$T_k = \frac{0,8\sqrt{L}}{1 + (0,0004L + 0,16)v_0/\sqrt{L}}; \quad T_\delta = cB/\sqrt{h}, \quad (1.9)$$

здесь c – коэффициент, определяемый по прототипу судна (в первом приближении $c = 0,8$); h – метацентрическая высота для наиболее неблагоприятных условий эксплуатации (если нет более точных данных, для судна в грузу можно принять $h = 0,07B$), м. Для наливного судна в балласте T_δ в первом приближении можно определить по формуле $T_\delta = 3 \sqrt{B}$.

3

Расчетные углы дифферента ψ и крена θ , рад, определяются по формулам

$$\psi = 0,23\varphi/(1 + 0,01L); \quad \theta = 0,6\varphi_r/(1 + 0,005L). \quad (1.10)$$

В формулы (1.10) при $L \leq 40$ м следует подставлять $L = 40$ м.

Координаты x_0 , y_0 и z_0 определяют отстояние рассматриваемой точки от центра тяжести судна (соответственно по длине, ширине и высоте), м. В курсовом проекте z_0 можно приближённо определить по формуле $z_0 = |z_{\text{п}} - D/1,91|$, где $z_{\text{п}}$ – отстояние рассматриваемой точки от ВП. Для района миделя можно принять $x_0 = 0$.

Коэффициент φ зависит от класса судна по району плавания:

- для судов неограниченного района плавания $\varphi = 1$;
- для класса R1 $\varphi = 1,1 - 0,0023L \leq 1$;
- для класса R2 $\varphi = 1 - 0,0025L$;
- для класса R2-RSN $\varphi = 0,94 - 0,0026L$;
- для класса R2-RSN(4,5) $\varphi = 0,71 - 0,0022L$;
- для класса R3-RSN $\varphi = 0,71 - 0,0022L$;
- для класса R3 $\varphi = 0,60 - 0,002L$.

(1.11)

Ускорение a_z , м/с², для района миделя можно определить по болеепростой формуле:

$$a_z = 0,9g / \sqrt[3]{L}. \quad (1.12)$$

В этой формуле при $L < 80$ м следует подставлять $L = 80$ м.

1.5.3. Давления от груза и балласта

Давление, кПа, от штучного груза на грузовые палубы, платформы и двойное дно определяется по формуле (1.3.4.1)

$$p_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} gh(1 + a_z / g) \geq 20, \quad (1.13)$$

где h – расчетная высота укладки груза, м; ρ_{Γ} – плотность груза, т/м³ (приложение 6); a_z – ускорение, определяемое по формулам (1.8) – (1.11) или (1.12).

Давление на конструкции отсеков и цистерн, полностью заполненных жидким грузом, балластом или топливом, определяется как большее из расчётов по следующим формулам (1.3.4.2-):

$$\begin{aligned} p_{\Gamma} &= \rho_{\Gamma} gz(1 + a_z / g), \\ p_{\Gamma} &= \rho_{\Gamma} g(z + b\theta), & p_{\Gamma} &= \rho_{\Gamma} g(z + l\psi), \\ p_{\Gamma} &= 0,75\rho g(z + \Delta z), & p_{\Gamma} &= \rho_{\Gamma} gz + p_{\text{к}}, \end{aligned} \quad (1.14)$$

где p_{Γ} – плотность груза, балласта или топлива, т/м³; z – отстояние рассматриваемой связи от палубы (крыши цистерны), измеренное в ДП, м;

θ и ψ – углы крена и дифферента, определяемые по формуле (1.10), рад;

Δz – высота воздушной трубы над палубой (крышей цистерны), м, принимается не менее 1,5 м для балластных цистерн сухогрузов и не менее 2,5 м для танков наливных судов и цистерн топлива; l и b – соответственно длина и ширина отсека, м; p_{κ} – давление, на которое отрегулирован предохранительный клапан (если он установлен), но не менее 15 кПа для балластных цистерн сухогрузов и не менее 25 кПа для танков наливных судов и цистерн топлива.

Расчетное давление, кПа, от навалочного груза определяется по формуле (1.3.4.3)

$$p_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} g z (1 + a_z / g) k_{\Gamma} \geq 20, \quad (1.15)$$

где z – отстояние рассматриваемой связи от уровня свободной поверхности груза, м; k_{Γ} – коэффициент, равный

$$k_{\Gamma} = \sin^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 (45^\circ - 0,5 \varphi_{\text{вт}}) + \cos^2 \alpha \quad \text{или} \quad k_{\Gamma} = \cos \alpha$$

в зависимости от того, что больше; здесь α – угол наклона стенки к ОП, град; $\varphi_{\text{вт}}$ – угол внутреннего трения навалочного груза, град.

Давление на второе дно определяется по формуле (1.15) при $k_{\Gamma} = 1$.

1.6. Определение толщины листовых элементов корпуса

Толщина настила или обшивки s , мм, загруженных поперечной нагрузкой, должна быть не менее (1.6.4.4)

$$s = m a k \sqrt{\frac{P}{k_{\sigma} \sigma_n}} + \Delta s, \quad (1.16)$$

где m , k_{σ} – коэффициенты изгибающего момента и допускаемых напряжений, определяемые в зависимости от вида и расположения листа в соответствующих разделах; $k = 1,2 - 0,5a/b$, но не более 1; здесь a и b – соответственно меньший и больший размеры сторон пластины, м.

Пластиной считается часть листа, ограниченная с четырёх сторон приваренными к нему связями (рис. 1.4).

Запас толщины на коррозию Δs , мм (1.1.5-), определяется по формуле

$$\Delta s = u (T - 12); \quad (1.17)$$

где T – планируемый срок службы (если он не установлен, то следует принимать $T = 24$ г); u – средний износ связи за год, мм/г (табл. 1.4).

В табл. 1.4 группа I соответствует сухогрузным судам и аналогичным им по условиям эксплуатации, а группа II – наливным, навалочным, комбинированным судам и аналогичным им по условиям эксплуатации.

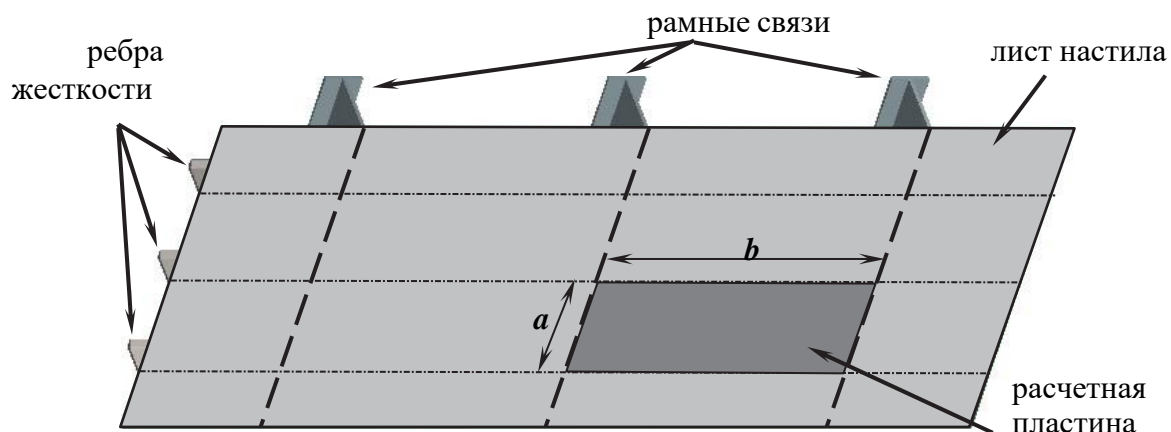


Рис. 1.4. Пример пластины

Среднегодовое уменьшение толщины судовых конструкций

Таблица 1.4

Элемент конструкции корпуса	и, мм/Г по группам судов	
	I	II
<i>l</i>	2	3
НАСТИЛ ПАЛУБ И ПЛАТФОРМ		
Верхняя палуба (в числителе – для наливных судов)	0,1	0,2/0,15
Нижняя палуба	0,11	-
Палуба в жилых и производственных помещениях	0,14	0,14
БОРТОВАЯ ОБШИВКА		
Одинарный борт:		
надводный	0,1	0,13
в районе переменных ватерлиний	0,17	0,19
ниже района переменных ватерлиний	0,14	0,16
При двойном борте (внутренний объём не служит для заполнения):		
надводный	0,1	0,1
в районе переменных ватерлиний	0,17	0,17
ниже района переменных ватерлиний	0,14	0,14
При двойном борте (внутренний объём заполняется топливом / балластом):		
надводный	0,19/0,21	0,19/0,21
в районе переменных ватерлиний	0,18/0,21	0,18/0,21
ниже района переменных ватерлиний	0,17/0,18	0,17/0,18

Продолжение табл. 1.4

<i>I</i>	2	3
ДНИЩЕВАЯ ОБШИВКА		
В районе балластных отсеков	0,2	0,2
В топливных цистернах (одинарное дно / двойноедно)	0,17/0,15	0,17/0,15
В районе грузовых танков	-	0,17
В остальных случаях, включая скулу	0,14	0,14
НАСТИЛ ВТОРОГО ДНА И НИЖНИХ ЦИСТЕРН		
В районе топливных цистерн	0,12	0,17
В районе балластных отсеков	0,15	0,2
В районе МО / КО	0,2/0,3	0,2/0,3
Междудонный лист	0,2	0,22
Если грузовые операции выполняются грейферами	0,3	0,3
Наклонные стенки скуловых цистерн и под попе- речными переборками:		
нижний пояс	0,25	0,3
остальные пояся	0,12	0,17
ОБШИВКА ПЕРЕБОРОК И ВНУТРЕННИХ БОРТОВ		
Непроницаемая переборка между грузовыми отсеками:		
верхний пояс (для наливного / навалочного груза)	0,1	0,2/0,13
нижний пояс	0,13	0,18
остальные пояся (для наливного / навалочного груза)	0,12	0,13/0,18
Переборка между грузовым и балластным отсеками:		
верхний пояс	0,13	0,3
средние пояся	0,15	0,25
нижний пояс	0,16	0,2
Подпалубные цистерны	0,12	0,2
НАБОР ПАЛУБ И ПЛАТФОРМ (основной / рамный набор)		
Для сухогрузов и наливных судов	0,12	0,25/0,2
Для навалочников	-	0,15/0,13
Для комбинированных судов	-	0,18/0,15
В топливных цистернах	0,15/0,19	0,17/0,19
В балластных отсеках	0,18/0,21	0,2/0,21
Комингсы грузовых люков	0,1	0,12
НАБОР БОРТОВ И ПЕРЕБОРОК		
Для сухогрузов и наливных судов	0,1	0,2
Для навалочников	-	0,13
Для комбинированных судов	-	0,15

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
В топливных цистернах	0,18	0,18
В балластных отсеках	0,21	0,21
НАБОР ДНИЩА И ВТОРОГО ДНА		
При контакте с балластом или наливным грузом	0,2	0,2
В топливных цистернах	0,15	0,15
В остальных случаях (кроме районов под котлами)	0,14	0,14
ОБШИВКА И НАБОР НАДСТРОЕК, РУБОК И ФАЛЬШБОРТА	0,1	0,1

1.7. Подбор профиля балок набора

Набор корпуса судна состоит из балок. Балки, расстояние между которыми равно одной шпации, образуют основной набор. Эти балки являются основными опорами для обшивки (настилов) и обычно имеют катаный профиль (за исключением основного набора крупнотоннажных судов).

Изгибные напряжения в балках пропорциональны l^2 (l – пролёт, расстояние между опорами балки). Поэтому при большом пролёте балок основного набора их приходится делать слишком мощными и тяжёлыми. Для облегчения этих балок (а значит, и всего перекрытия) устраивают промежуточные опоры в виде жёстких, так называемых рамных балок набора. Балки рамного набора обычно имеют тавровый сварной профиль.

Балки изгибаются совместно с прилегающей частью обшивки (настила), называемой **присоединённым пояском**, условная ширина которого $a_{пп}$ определяется по Правилам Регистра (1.6.3.3) и (1.6.3.4) части II. Если учесть, что эта ширина не очень существенно влияет на момент сопротивления профиля, то можно использовать следующие упрощённые рекомендации. Для балок однородного набора можно принять $a_{пп}$ равной шпации. Для основного набора, подкреплённого рамными балками, $a_{пп}$ следует принимать равной одной шестой от пролёта основных балок. Для рамных балок, если их менее 3 и они расположены редко, можно принять $a_{пп} = l/6$. В остальных случаях для рамных балок $a_{пп} = l/8$. Для рамных балок, подкрепляющих гофрированную обшивку, $a_{пп}$ принимается равной 15 толщинам гофров коробчатого профиля или 20 толщинам волнистых гофров.

При подборе балки набора по критерию прочности на местные нагрузки следует вначале определить требуемый Правилами Регистра момент сопротивления профиля W' , см³, а для высоких коротких (обычно рамных) балок – ещё и площадь сечения стенки f_c' , см², без учёта износа (1.6.4.1 – 1.6.4.3-):

$$W' = \frac{Ql}{mk_{\sigma}\sigma_n} 10^3; \quad (1.18)$$

$$f'_c = \frac{10N_{\max}}{k_{\tau}\tau_n}; \quad (1.19)$$

где $Q = pal$ – поперечная нагрузка, кН; $N_{\max} = nral$ – наибольшая перерезывающая сила, кН; $m, n, k_{\sigma}, k_{\tau}$ – соответственно коэффициенты изгибающего момента, перерезывающих сил и допускаемых напряжений, определяемые отдельно для конкретных видов балок; $\tau_n = 0,57\sigma_n$ – нормативный предел текучести по касательным напряжениям, МПа.

Выбор балки катаного профиля производится по сортаментам (приложение 7) таким образом, чтобы момент сопротивления её профиля был не меньше требуемого с учётом поправки на коррозионный износ ω_K (1.1.5.3-):

$$W \geq W'\omega_K; \quad (1.20)$$

$$\omega_K = 1 + \alpha_K \Delta s; \quad \alpha_K = 0,07 + 6,7 \frac{W'}{W} \leq 0,25;$$

где Δs – запас толщины на коррозию, мм, вычисляемый по формуле (1.17).

Подбор сварного профиля рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

1) Задается толщина стенки s_c . Она должна быть не менее величины s_{\min} (так называемой минимальной толщины), определяемой Правилами для конкретных конструкций. Рекомендуется, чтобы s_c не превышала толщины подкрепляемой обшивки (настила).

2) Определяется высота стенки по формуле (s_c здесь подставляется в сантиметрах):

$$h = 1,16 \sqrt{W'/s_c}.$$

3) Проверяется условие, по которому площадь сечения стенки за вычетом вырезов должна быть не менее f'_c , вычисленной по формуле (1.19):

$$f_c^* = (h - h_b) s_c \geq f'_c,$$

где h_b – высота выреза, см. Если это условие не выполняется, увеличьте s_c .

4) Вычисляется площадь сечения полки f_{Π}

$$f_{\Pi} = W \left| h - f_c \right| k, \quad (1.21)$$

где $f_c = h s_c$ – площадь сечения стенки, см²; $k = 4,5$.

5) Уточняется параметр k по формуле

$$k = \frac{12 f_{\Pi\Pi} + 6 f_c}{4 f_{\Pi\Pi} - 2 f_{\Pi} + f_c},$$

где $f_{\text{пл}} = a_{\text{пл}} s$ – площадь сечения присоединённого пояса, см^2 ; здесь s – толщина обшивки (настила), см .

6) Уточняется площадь сечения полки по формуле (1.21).

7) Выбираются размеры полки. Полка должна быть толще стенки не менее чем на 2...3 мм, но не более чем в три раза. Ширина полки, см ,

$$b_{\text{п}} = f_{\text{п}} / s_{\text{п}} \quad b_{\text{п}} \leq 400 \cdot s_{\text{п}} / \sqrt{R_{eH}}; \quad b_{\text{п}} \geq 5s_{\text{п}},$$

где $s_{\text{п}}$ – толщина полки, см .

8) Вычисляется фактический момент сопротивления профиля

$$W_{\text{ф}} = h(f_{\text{п}} + f_{\text{с}} / k)$$

и проверяется условие $W_{\text{ф}} \geq W'$. Если оно не выполняется, увеличьте высоту стенки или размеры полки.

9) К толщинам стенки и полки далее следует добавить запас на коррозию Δs .

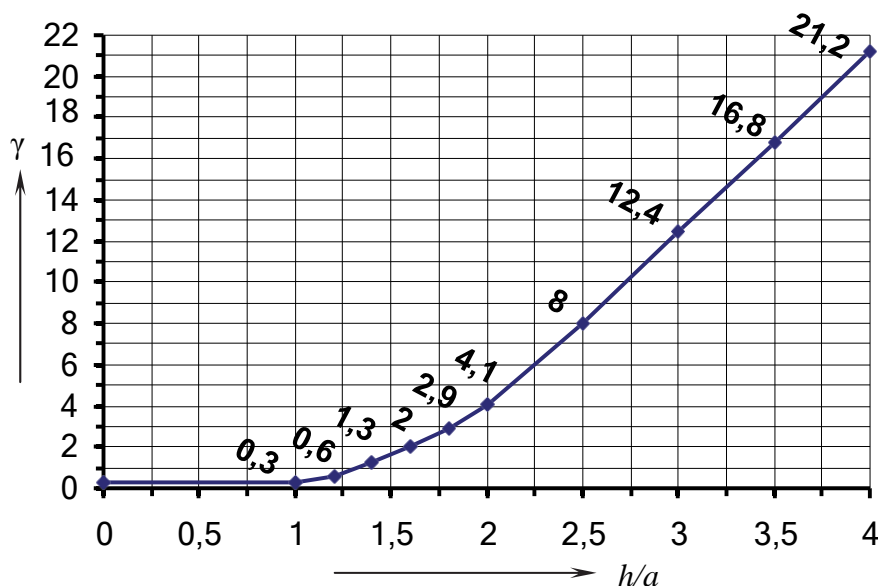


Рис. 1.5. Определение коэффициента γ

Рёбра жёсткости по стенкам рамного набора подбираются по моменту инерции профиля i , см^4 (1.6.5.6):

а) для рёбер жёсткости, перпендикулярных к пояску рамной балки,

$$i \geq \gamma a s_c^3 / 1000,$$

где γ – коэффициент, определяемый по графику на рис. 1.5; a – расстояние между рёбрами, м ; s_c – толщина стенки рамной балки, мм ;

б) для рёбер жёсткости вдоль рамной балки

$$i \geq 0,01 \sigma_n l^2 (f + 10as) \zeta$$

где l – пролёт ребра жёсткости, м; f – площадь профиля ребра, см².

Толщина ребра жёсткости должна быть не менее $0,8s_c$.

1.8. Стенки рамных балок: подкрепление и вырезы

Рамные балки, имеющие отношение высоты к толщине стенки $h/s_c > 60$, должны быть подкреплены ребрами жёсткости и кницами (1.7.3.2-).

Наиболее высокие балки, имеющие $h/s_c \geq 160$ $\sqrt{\eta}$, подкрепляются кницами и ребрами жёсткости вдоль балки (рис. 1.6, а). При $h/s_c < 160$ подкрепление $\sqrt{\eta}$ может выполняться поперечными ребрами жёсткости (рис. 1.6, б).

Расстояние между ребрами жёсткости $a \leq 90s_c$ $\sqrt{\eta}$, а в районах опор (ближе $1,5h$ от опор) $a \leq 60s_c$ $\sqrt{\eta}$.

Расстояние между кницами, подкрепляющими рамную балку, не должно превышать 3,0 м или $15b_n$ (b_n – ширина пояса). Кницы устанавливаются у скруглений рамной балки, а также у распорок, упирающихся в рамную балку. Толщина книц должна быть не менее толщины стенки рамной балки. Кницы должны доводиться до полки. Если ширина полки превышает 300 мм, кницы должны привариваться к ней. Ширина подкрепляющих книц должна быть не менее половины высоты. Ширина пояса или фланца кницы должна быть не менее l/s (l – длина свободной кромки кницы).

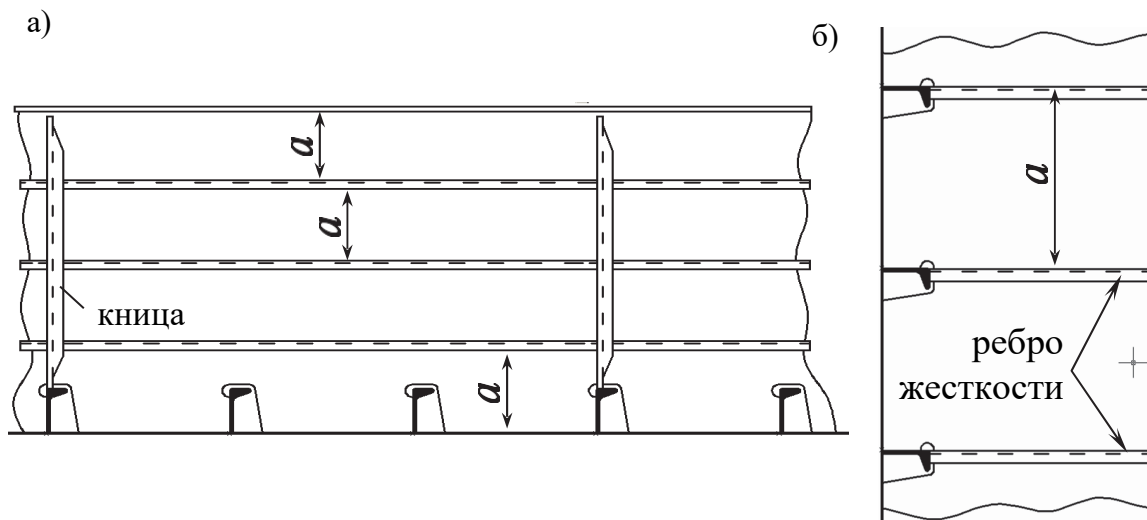


Рис. 1.6. Подкрепление стенки рамных балок

В стенках балок рамного набора допускаются вырезы для облегчения конструкции, прохода балок и т.п. Суммарная высота вырезов в одном сечении не должна превышать половины высоты балки.

Расстояние от кромок любых вырезов до кромок вырезов для проходных балок основного набора должно быть не менее высоты последних. Облегчающие вырезы должны располагаться от книц рамной балки не ближе половины её высоты.

1.9. Кницы

В соединении балок основного набора катеты книц c , см, определяются по формуле (1.7.2.2-)

$$c = 5 \sqrt{W / s} ,$$

где W – момент сопротивления сечения меньшей из закрепляемых балок, см³; s – толщина кницы, мм.

Толщина кницы принимается равной толщине стенки закрепляемой балки. Она может быть уменьшена на 1 мм, если толщина стенки больше 7 мм; на 2 мм, если толщина стенки больше 12 мм. Высота кницы (рис. 1.7) $h \geq 0,7c$.

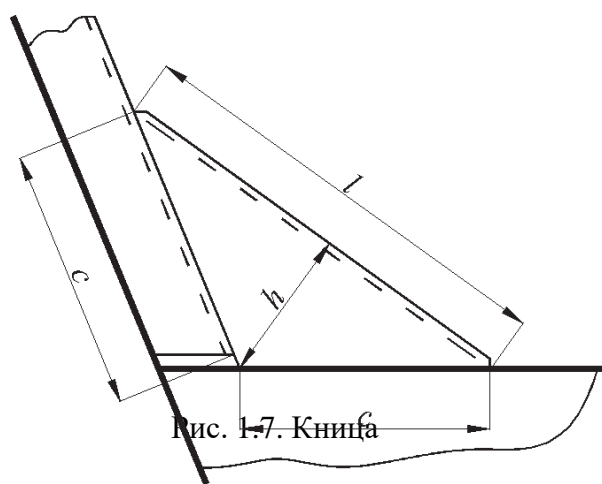
При длине свободной кромки кницы $l > 45s$ она должна иметь пояс (фланец). Толщина пояса не должна быть меньше толщины кницы. Ширина фланца должна быть не менее 50 мм, ширина пояса – не менее 75 мм. Ширина фланца (полуширина пояса) должна быть не более $200s / \sqrt{R_{eH}}$.

При соединении балок кницами их торцы часто оставляют свободными, с технологическим зазором (рис. 1.8, а), который не должен превышать 40 мм или 0,25с (в зависимости от того, что меньше).

В районах интенсивной вибрации и сосредоточенных нагрузок (ледовых, от швартовок, слеминга и др.), кничные соединения выполняются при минимальных размерах участков обшивки (настила), не подкрепленных набором (рис. 1.8, б).

Размеры книц могут быть уменьшены (1.7.2.2):

- на 10 %, если балки привариваются одна к другой или к обшивке (настилу);
- на 15 % – при наличии фланца или пояса;
- на 25 %, если балки привариваются одна к другой, а кницы имеют пояс.



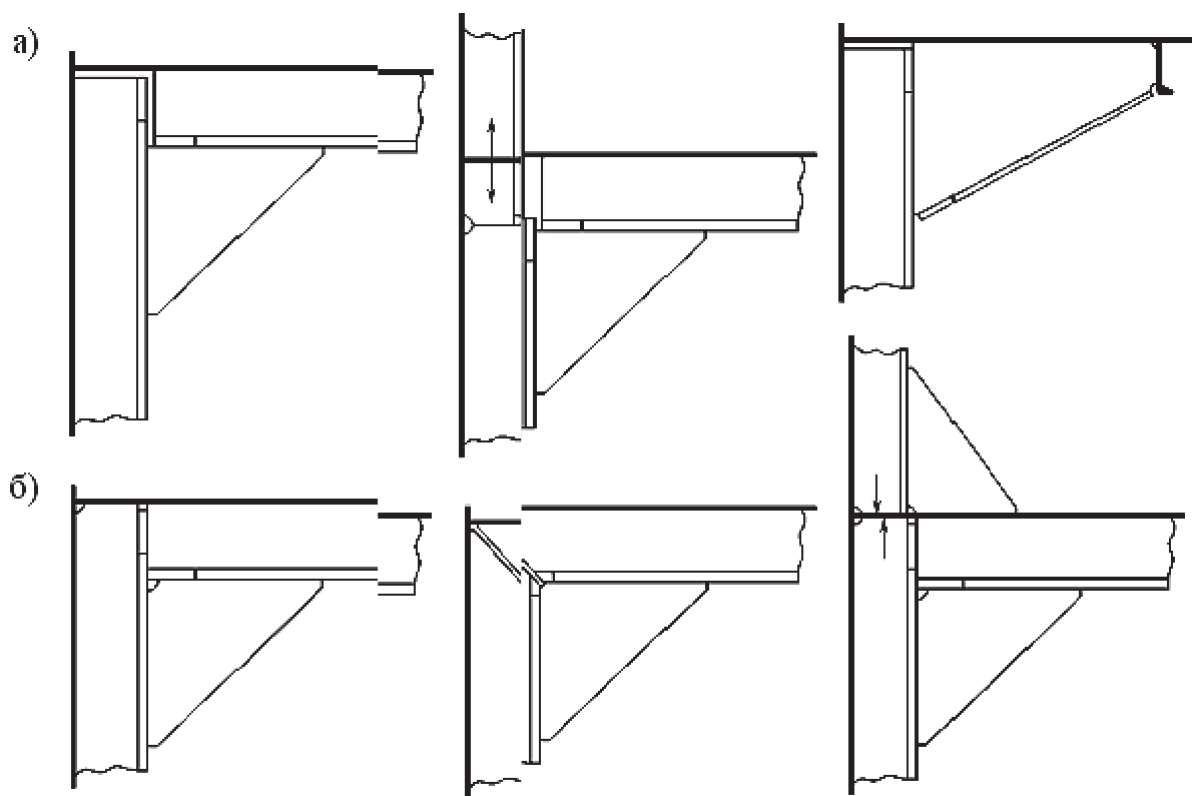


Рис. 1.8. Кничные соединения балок основного набора

Соединения балок рамного набора рекомендуется выполнять скругленными кницами. Кницы должны иметь по свободной кромке поясок, который рекомендуется делать плавным переходом в пояски рамных балок. Катеты или радиусы скругления книц, соединяющих балки рамного набора, должны быть не менее высоты стенок рамной балки (1.7.2.3-).

Зазоры в
соединениях
рамных балок не
допускаются

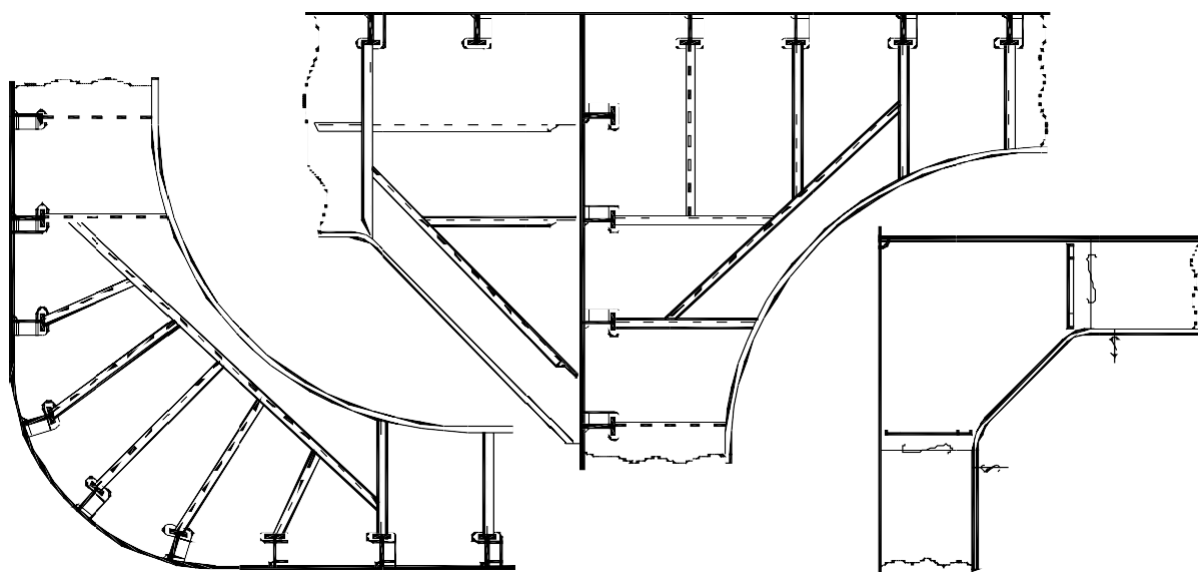


Рис. 1.9. Кничные соединения балок рамного набора

Если расстояние между концами кницы превышает $160s\sqrt{\eta}$, то параллельно линии, соединяющей концы кницы, на расстоянии a ($a \leq 1/4h$; $a \leq 35s$) должно быть установлено ребро жёсткости (рис. 1.9).

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЯЗЕЙ ДНИЩА

Для обеспечения безопасности грузовых (кроме наливных) и пассажирских судов длиной более 50 м Правилами Регистра предусматривается устройство в их корпусе двойного дна от форпика до ахтерпика. Кроме того, двойное дно в этом районе обязательно для судов ледового плавания категорий Arc5 и выше.

Танкеры могут иметь одинарное днище. Однако МАРПОЛ 73/78 для нефтяных танкеров требует наличия междудонных танков изолированного балласта минимальной высотой $B/15$ или 2 метра в зависимости от того, что меньше (но не менее 1 м при дедвейте судна более 5000 т и не менее 0,76 м при меньшем дедвейте).

Наливные и открытые суда длиной 80 м и более должны иметь продольную систему набора днища. Днище навалочных, нефтенавалочных и накатных судов должно быть двойным и иметь продольную систему набора.

2.1. Одинарное днище

Так как современными Правилами и международными требованиями одинарное днище допускается фактически только для небольших судов, система набора днища «направляется» поперечная.

В этом случае набор днища состоит из флоров, неразрезного вертикального кия (среднего кильсона) и разрезных на флорах кильсонов (расстояние между которыми не должно превышать 2,2 м).

Все балки должны иметь полки. Полки флоров и кильсонов свариваются между собой встык (рис. 2.1). Флоры могут иметь полки в виде отогнутых фланцев, – кроме районов МО и ахтерпика, а при длине судна более 30 м – также на протяжении $0,25L$ от носового перпендикуляра (2.3.2.3).

Толщина обшивки днища в средней части определяется по формуле (1.16) при $m = 15,8$; $k_{\sigma} = 0,634 - 0,00283L$.

Расчётное давление на обшивку днища вычисляется по формуле (1.3).

Толщина обшивки не должна быть менее (2.2.4.8):

$$- \text{при } L < 30 \text{ м} \quad s_{\min} = 3,1 + 0,12L;$$

$$- \text{при } L \geq 30 \text{ м} \quad s_{\min} = 5,5 + 0,04L.$$

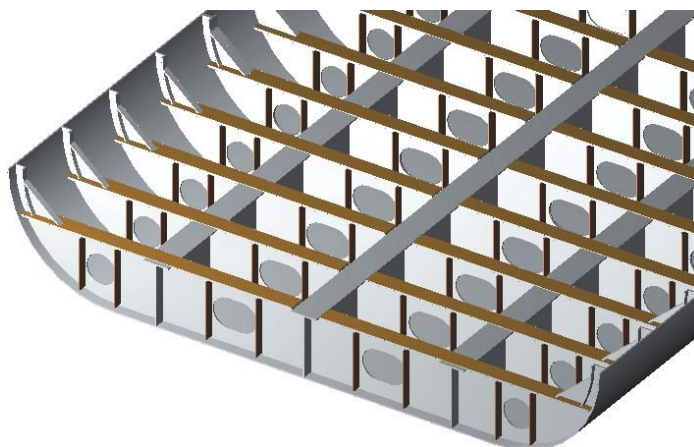


Рис. 2.1. Одинарное днище

Горизонтальный киль или шпунтовые пояся (примыкающие к брусковому килю) должны быть толще обшивки на 2 мм. Ширина горизонтального кия (либо двух шпунтовых поясов) должна быть не менее $0,8 + 0,005L$, м (2.2.4.4).

Толщина скулового пояса должна быть не менее толщины обшивки днища.

Толщина стенок флоров и кильсонов, мм, должна быть не менее $5,3 + 0,04L$. Минимальная толщина стенки вертикального кия равна $6,8 + 0,04L$, но не более толщины горизонтального кия (2.3.4.3).

Высота флоров в ДП должна быть не менее $0,055B_1$ (B_1 – ширина трюма). Сечение флоров подбирается в соответствии с указаниями подраздела 1.7 как для балок сварного профиля с учётом формул (1.18) и (1.19) при $m = 13$; $k_\sigma = 0,6$; $l = B_1$; p – такое же, как для обшивки днища, но не менее 35 кПа; $N_{\max} = 0,4pal$; $k_\tau = 0,6$ (2.3.4.1).

Момент сопротивления вертикального кия должен быть больше момента сопротивления флора в ДП не менее чем в 1,6 раза, а его высота – не менее высоты флора в ДП.

Момент сопротивления кильсона должен быть не менее момента сопротивления флора в ДП. Высота кильсона равна высоте флора в месте их соединения.

Флоры могут иметь вырезы высотой не более половины высоты флора и с центром посередине высоты флора. Расстояние между вырезами должно быть не менее высоты флора.

При наличии вырезов стенка флора должна быть подкреплена вертикальными рёбрами жёсткости, расстояние между которыми должно быть не более 90 толщин флора (см. рис. 2.1). Сечение рёбер подбирается по моменту инерции в соответствии с указаниями подраздела 1.7. Нижние концы рёбер срезаются «на ус» (рис. 2.2).

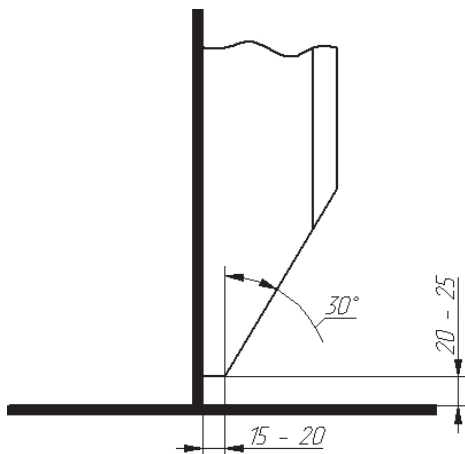


Рис. 2.2. Обрезка ребра жёсткости «на ус»

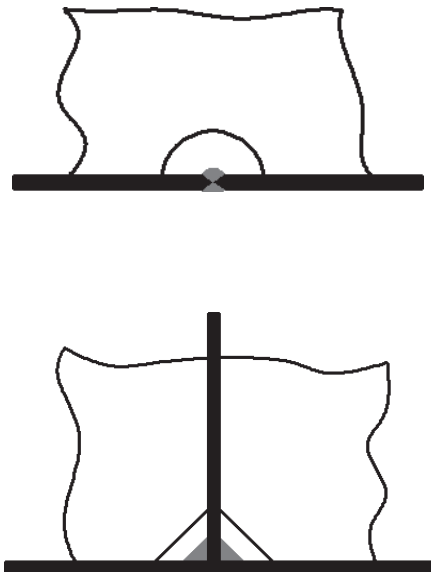


Рис. 2.3. Примеры голубницы технологических вырезов

В нижней части стенок стрингеров и флоров должны быть голубницы для протока воды. Необходимо также предусмотреть вырезы для прохода сварных швов радиусом 20...30 мм (рис. 2.3).

2.2. Двойное днище

Конструкция двойного дна включает обшивку днища (в том числе горизонтальный киль и скуловые пояса), настил второго дна (в том числе крайний междудонный лист) и элементы набора (вертикальный киль, днищевые стрингеры, флоры и др.).

Высота двойного дна h , м, у киля должна быть не менее 0,65 м, а также

$$h \geq \frac{L - 40}{570} + 0,04B + 3,5 \frac{d}{L} \quad (2.1)$$

На судах арктического плавания категорий Arc8 и Arc9 высота двойного дна должна быть не менее

$$h = \varphi(0,009L + 0,8),$$

где $\varphi = 0,8$ для судов категории Arc8 и $\varphi = 0,9$ для судов категории Arc9.

Вертикальный киль является непроницаемым. Вместо него может быть применён тоннельный киль, состоящий из двух непроницаемых стенок по обе стороны от ДП. Его ширина не должна превышать 1,9 м (2.4.2.3). Обшивка и настил второго дна внутри тоннельного киля подкрепляется бракетами или поперечными балками с кницами с интервалом в 1 шпацию.

2.2.1. Конструкция двойного дна при поперечной системе набора

В этом случае набор днища состоит из флоров, неразрезного вертикального киля и днищевых стрингеров (расстояние между которыми не должно превышать 4,2 м) (2.4.2.4). На судах арктического плавания категорий Arc8 и Arc9 расстояние между днищевыми стрингерами не должно превышать 3 м (3.10.2.7).

Флоры устанавливаются через одну шпацию. Для облегчения конструкции сплошные флоры чередуются с открытыми (бракетными или облегченными), при этом расстояние между сплошными флорами не должно превышать 5 шпаций или 3,6 м (в зависимости от того, что меньше). На судах категорий Arc8 и Arc9 расстояние между сплошными флорами не должно превышать 2 шпаций. Конструкция флоров приведена на рис. 2.4 (2.4.2.5).

Цистерны двойного дна по длине разделяются непроницаемыми флорами. Не допускаются вырезы и в вертикальном киле. В остальных случаях для облегчения и устройства лазов в стрингерах, флорах и бракетах рекомендуется делать вырезы.

При высоте флоров $h > 0,9$ м по их стенкам ставятся вертикальные рёбра жёсткости, расстояние между которыми должно быть: для непроницаемых флоров – не более 0,9 м; для сплошных флоров – не более 1,5 м; для облегченных флоров – не более 2,2 м (2.4.2.6).

Применение облегченных и бракетных флоров не допускается в районах с повышенными местными нагрузками (2.4.2.5):

- в носовой оконечности (на длине $0,25L$);
- в МО и КО;
- в трюмах, в которых перевозятся тяжеловесные грузы, руда;
- в трюмах навалочных судов, разгружаемых грейферами.

Кроме этого, сплошные флоры должны стоять в местах действия сосредоточенных нагрузок (под пиллерами, направляющими стойками контейнеров, фундаментами, концами книц поперечных переборок и т.п.).

Бракетные флоры не рекомендуются при высоте двойного дна более 1 м и не допускаются на судах арктического плавания категорий Arc8, Arc9 и на ледоколах.

Расстояние от кромки выреза флора или стрингера до обшивки днища или настила второго дна должно быть не менее $1/8$ от длины выреза, а также не менее: $0,25h$ – для стрингеров и сплошных флоров; $0,2h$ – для облегченных флоров.

Длина выреза в облегченном флоре должна быть не более $1,2h$ и не более 0,7 от ширины пластины флора. Отстояние вырезов в сплошных

флорах от стрингеров должно быть не менее $0,5h$ (для облегченных флоров соответственно не менее $0,25h$).

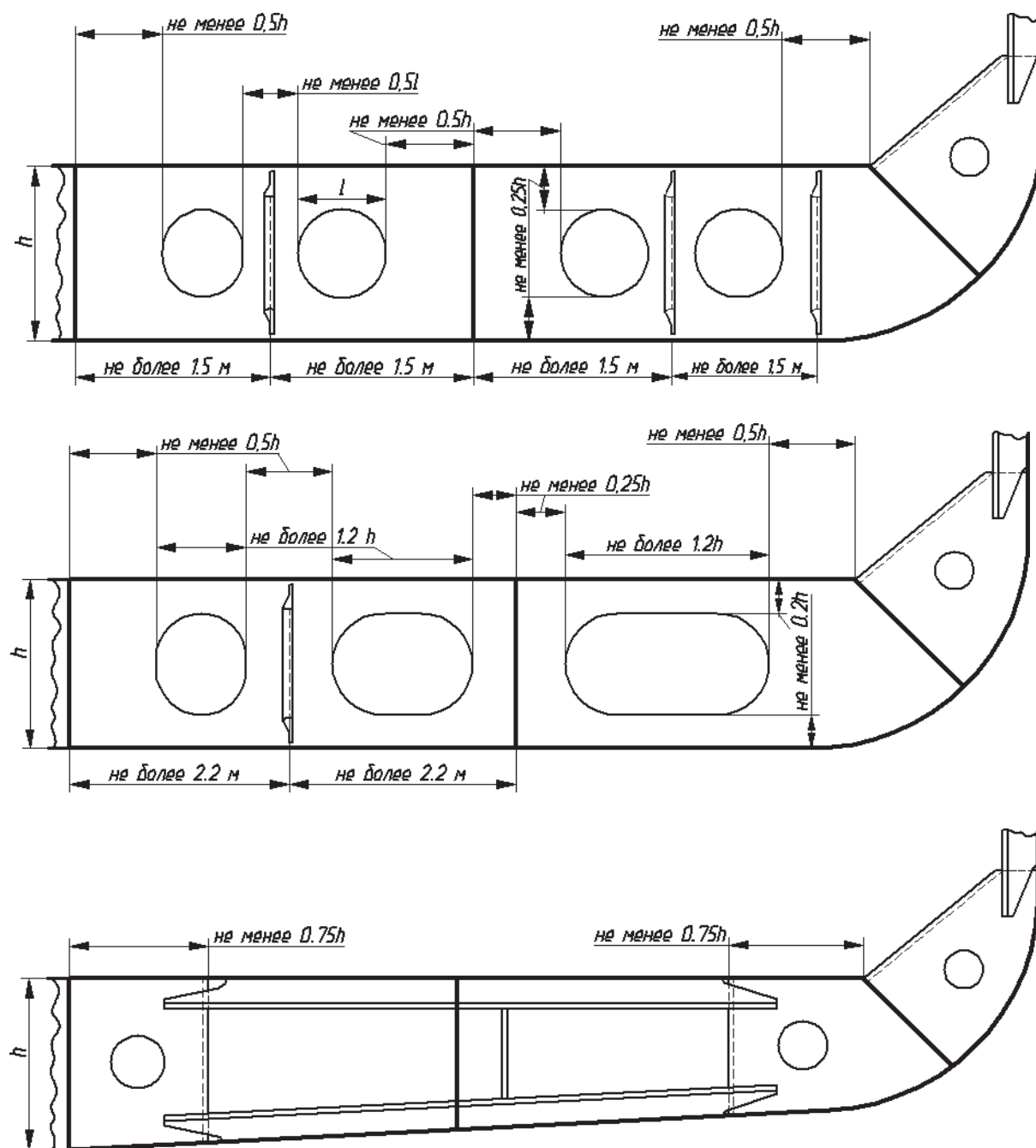


Рис. 2.4. Конструкция флоров: а – сплошной; б – облегчённый; в – бракетный

Расстояние между вырезами должно быть не менее: половины длины большего из вырезов – для стрингеров и сплошных флоров; $0,5h$ – для облегченных флоров (2.4.2.7).

Вырезы не допускаются:

- на участках, примыкающих к переборкам;
- под пиллерсами;
- в районах окончания книц фундаментов главных механизмов.

В бракетах допускаются вырезы диаметром не более $1/3$ от меньшего размера бракеты.

2.2.2. Конструкция двойного дна при продольной системе набора

В этом случае набор днища состоит из неразрезного вертикального (или тоннельного) кия, днищевых стрингеров, сплошных флоров и продольных балок основного набора по обшивке днища и под настилом 2 дна (рис. 2.5 и 2.6).

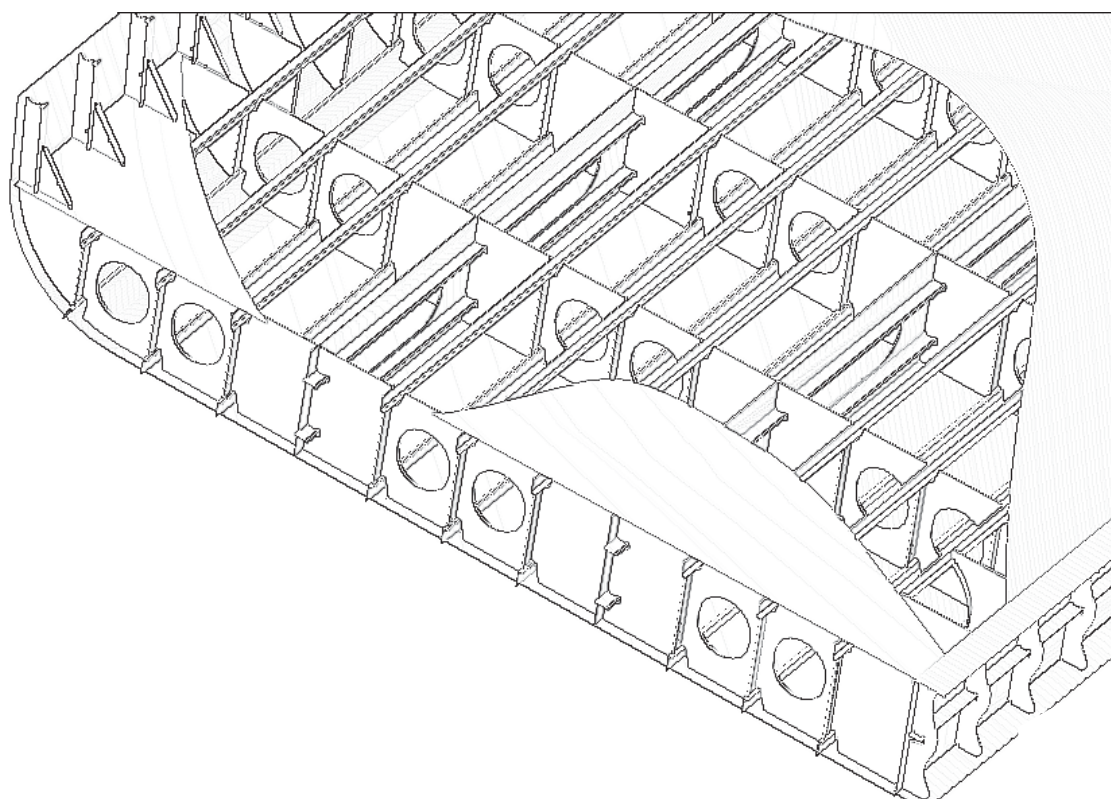


Рис. 2.5. Двойное дно с продольной системой набора

Расстояние между стрингерами не должно превышать 5 м (2.4.2.4).

Вместо продольных балок днища и второго дна могут быть применены облегченные стрингеры, отличающиеся от основных стрингеров вырезами больших размеров (рис. 2.7). Такая разновидность продольной системы набора, называемая стрингерной или русской, получила наиболее широкое распространение на судах для навалочных грузов.

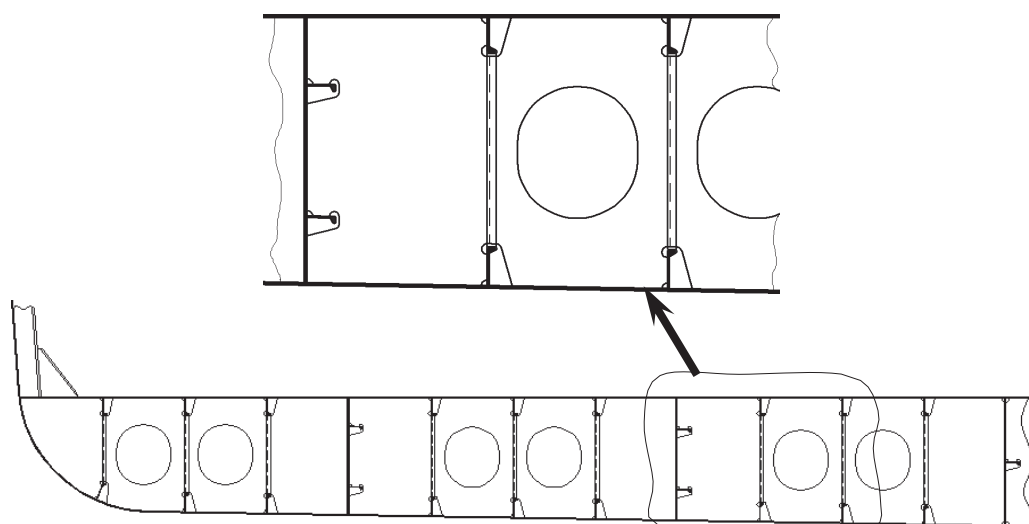
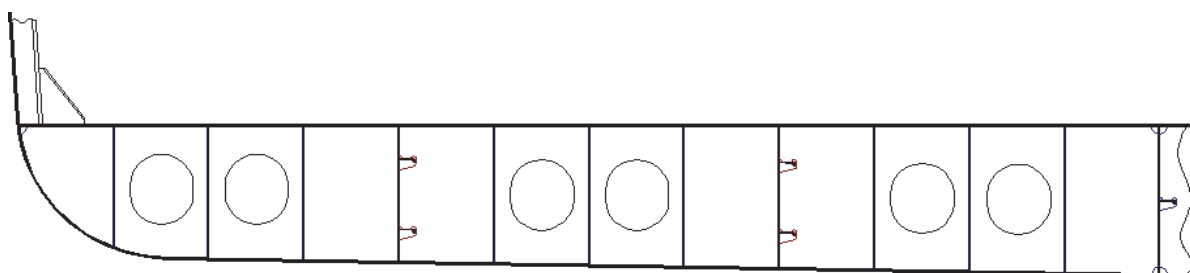
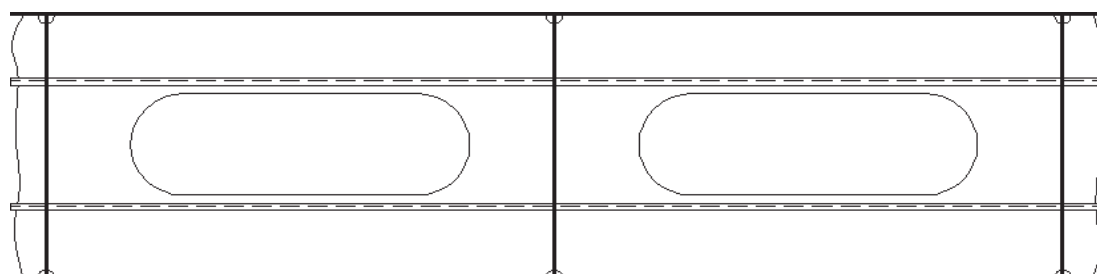


Рис. 2.6. Сплошной флор днища с продольной системой набора

а)



б)



в)

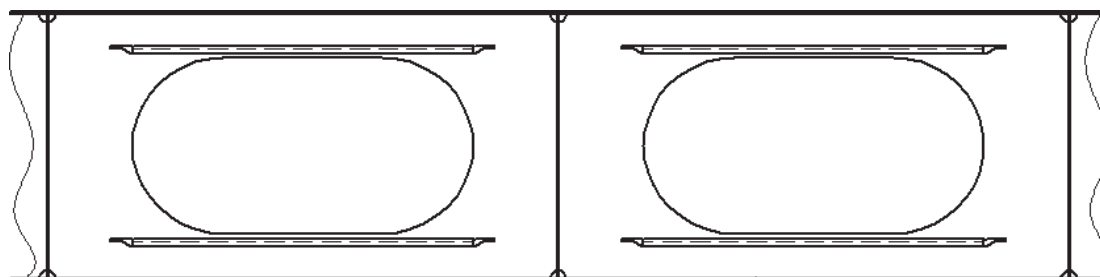


Рис. 2.7. Стрингерная система набора:
а – флор; б – стрингер; в – облегченный стрингер

Расстояние между сплошными флорами не должно превышать 5 шпаций или 3,6 м в зависимости от того, что меньше. При стрингерной системе набора это расстояние может быть увеличено, но не более чем в два раза. Обычно расстояние между сплошными флорами составляет 3...4 шпации (2.4.2.5).

Расстояние между сплошными флорами не должно превышать двух шпаций в районах с повышенными местными нагрузками:

- в носовой оконечности (на длине $0,25L$);
- в МО и КО;
- в трюмах, в которых перевозятся тяжеловесные грузы, руда;
- в трюмах навалочных судов, разгружаемых грейферами;
- на судах арктического плавания категорий Arc8 и Arc9.

Между сплошными флорами по сторонам вертикального или тоннельного кия ставятся brackets (называемые доковыми), доведенные до ближайших продольных балок днища и второго дна (рис. 2.8). Расстояние между этими brackets не должно превышать 1,2 м (обычно одна шпация поперечного набора).

При поперечной системе набора борта от основных шпангоутов между флорами устанавливаются скуловые brackets, подкрепляющие крайний междудонный лист и доведённые до ближайших продольных балок днища и второго дна и приваренные к ним (см. рис. 2.8). Обычно доковая и скуловая brackets располагаются в одной плоскости.

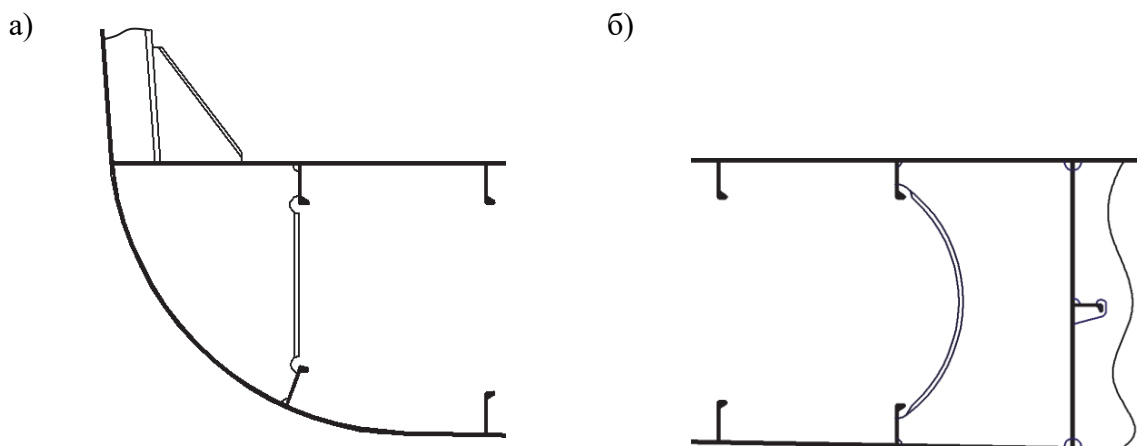


Рис. 2.8. Brackets между флорами: а – скуловая; б – доковая

Сплошные флоры либо brackets обязательны в местах действия сосредоточенных нагрузок (под пиллерсами, направляющими стойками контейнеров, фундаментами, концами книц поперечных переборок и т.п.).

По стенке флоров должны быть установлены вертикальные рёбра жёсткости, соединяющие продольные балки днища и второго дна.

Расстояние h_0 от кромки выреза флора или стрингера до обшивки днища или настила второго дна должно быть не менее $1/8$ от длины выреза, а также не менее: $0,25h$ – для стрингеров и сплошных флоров; $0,15h$ – для облегченных стрингеров (2.4.2.7). Если в облегченном стрингере

$h_0 > 25s \sqrt{\eta}$, мм, то у кромки выреза должно быть подкрепление, обычно в виде горизонтального ребра жёсткости (η определяется по формуле (1.1)).

Длина выреза в облегченном стрингере должна быть не более $1,2h$ и не более $0,7$ от длины пластины. Расстояние между вырезами должно быть не менее: половины длины большего из вырезов – для стрингеров и сплошных флоров; $0,5h$ – для облегченных стрингеров (2.4.2.7).

Вырезы не допускаются:

- на участках, примыкающих к переборкам;
- под пиллерсами;
- в районах окончания книц фундаментов главных механизмов.

В бракетах допускаются вырезы диаметром не более $1/3$ от меньшего размера бракеты.

2.2.3. Размеры сечений связей двойного дна

Размеры связей днища должны быть определены с учётом расчётных давлений, определяемых в подразделе 1.5.

Различные связи двойного дна воспринимают различные сочетания нагрузок. Следует учитывать все возможные при эксплуатации судна случаи их нагружения. За расчётное давление принимается наибольшее из всех возможных.

За расчётную нагрузку на обшивку и рёбра жёсткости днища обычно принимается нагрузка со стороны моря при пустых цистернах второго дна. Расчётным давлением на настил и рёбра жёсткости 2 дна может быть давление от груза при пустых цистернах 2 дна или давление в заполненных цистернах второго дна при пустом трюме.

Расчётной нагрузкой на непроницаемые стенки флоров, стрингеров и кили является давление в заполненных цистернах второго дна.

Толщина обшивки днища в средней части определяется по формуле (1.16) при $m = 15,8$; $k_\sigma = 0,634 - 0,00283L$ – при поперечной системе набора днища; $k_\sigma = 0,6$ – при продольной системе набора.

Толщина обшивки должна быть не менее (2.2.4.8)

$$s_{\min} = (5,5 + 0,04L) \sqrt{\eta},$$

где коэффициент η определяется по формуле (1.1).

Требования к размерам горизонтального кили и скулового пояса такие же, как при одинарном днище (см. подраздел 2.1).

Толщина настила второго дна, включая крайний междудонный лист, определяется по формуле (1.16) при $m = 15,8$; $k_{\sigma} = 0,8$ (2.4.4.4-). Кроме того, эта толщина должна быть не менее 5,5 мм, а также не менее:

$$\begin{aligned} - \text{при } L < 80 \text{ м} \quad s_{\min} &= (3,8 + 0,05L) \sqrt{\eta}; \\ - \text{при } L \geq 80 \text{ м} \quad s_{\min} &= (5 + 0,035L) \sqrt{\eta}. \end{aligned}$$

В последней формуле при $L > 260$ м следует подставлять $L = 260$ м.

В МО, а также в трюмах при отсутствии деревянного настила минимальная толщина должна быть увеличена на 2 мм, а если грузовые операции выполняются грейферами – на 4 мм.

Толщина сплошных флоров определяется по правилу (2.4.4.3)

$$s \geq \lambda \alpha k_1 k_2 \sqrt{\eta} + \Delta s,$$

где $\lambda = 0,12L - 1,1$, но не более 6,5 при поперечной системе набора; $\lambda = 0,023L + 5,8$ при продольной системе набора; α – расстояние между рёбрами жёсткости, м, но не более высоты двойного дна; k_1 и k_2 – коэффициенты, определяемые по табл. 2.1 и 2.2; η – определяется по формуле (1.1); Δs – определяется по формуле (1.17).

Таблица 2.1

Определение коэффициента k_1

Система набора	Расстояние между сплошными флорами в шпациях				
	1	2	3	4	5
поперечная	1	1,15	1,20	1,25	1,30
продольная	-	1,25	1,45	1,65	1,85

Таблица 2.2

Определение коэффициента k_2

Система набора	Число стрингеров на один борт			
	0	1	2	3 и более
поперечная	1	0,97	0,93	0,88
продольная	1	0,93	0,86	0,80

Толщина флоров в носовой части, в МО, а также в трюмах судов, разгружаемых грейферами, должна быть не менее:

$$\begin{aligned} - \text{при поперечной системе набора} \quad s_{\min} &= 0,035L + 5; \\ - \text{при продольной системе набора} \quad s_{\min} &= 0,035L + 6. \end{aligned}$$

Толщина вертикального кия определяется из условия (2.4.4.2)

$$s \geq \lambda h \frac{h}{h_{\text{факт}}} \sqrt{\eta} + \Delta s,$$

где $\lambda = 0,03L + 8,3$, но не более 11,2; h и $h_{\text{факт}}$ – высота второго дна, соответственно требуемая по формуле (2.1) и фактически принятая; η определяется по формуле (1.1); Δs определяется по формуле (1.17). Кроме того, вертикальный киль должен быть толще флоров как минимум на 1 мм. Толщину стенок тоннельного кия можно уменьшить, но не более чем на 10 %.

Толщина непроницаемых стенок кия, стрингеров и флоров должна быть не менее определённой по формуле (1.16). При этом: расчётное давление p определяется по последним двум формулам (1.14) на уровне середины высоты стенки; $m = 15,8$; $k_{\sigma} = 0,85$ – для непроницаемых флоров; $k_{\sigma} = 0,75$ – для вертикального кия и стрингеров (2.4.4.2-). Кроме того, толщина непроницаемых флоров должна быть не менее толщины сплошных. Толщина непроницаемых стенок кия и стрингеров может быть не более толщины примыкающих к ним листов наружной обшивки.

Толщина стрингеров и бракет должна быть не менее толщины флоров. Толщина всех элементов внутри двойного дна должна быть не менее (2.4.4.9):

$$\text{— при } L < 80 \text{ м} \quad s_{\text{min}} = 3,9 + 0,045L;$$

$$\text{— при } L \geq 80 \text{ м} \quad s_{\text{min}} = 5,5 + 0,025L.$$

В последней формуле при $L > 250$ м следует подставлять $L = 250$ м.

Минимальную толщину вертикального кия следует увеличить на 1,5 мм.

На наливных судах толщина всех элементов, контактирующих с жидким грузом или балластом, должна быть не менее (3.5.4):

$$\text{— при } L < 80 \text{ м} \quad s_{\text{min}} = (5,5 + 0,035L); \quad (2.2)$$

$$\text{— при } L \geq 80 \text{ м} \quad s_{\text{min}} = (6,7 + 0,02L).$$

В последней формуле при $L > 290$ м следует подставлять $L = 290$ м.

Толщину балок основного набора можно принимать не более 11,5 мм.

Сечение балок основного набора (продольных балок днища и второго дна при продольной системе набора, верхних и нижних балок бракетных флоров при поперечной системе набора) подбирается по условию (1.20) и формуле (1.18). Этому же условию должны удовлетворять нижние и верхние части облегченных флоров и стрингеров в районе больших вырезов.

При этом: $m = 12$; $k_{\sigma} = 0,5$ – для продольных балок днища; $k_{\sigma} = 0,65$ – для продольных балок второго дна и для нижних балок бракетных флоров; $k_{\sigma} = 0,75$ – для верхних балок бракетных флоров (2.4.4.5-). Пролёт l балок бракетного флора измеряется между концами бракет. Пролёт l участка облегченного флора или стрингера под вырезами принимается равным длине выреза за вычетом радиуса его закругления.

Момент сопротивления продольных балок можно уменьшить на 35 %, если подкрепить их стойками посередине пролёта (рис. 2.9). Эти стойки должны иметь площадь поперечного сечения, см^2 , не менее

$$f = \frac{5pal}{k_{\sigma}\sigma_n} + 0,1h\Delta s,$$

где p – давление, кПа, со стороны моря или от груза (в зависимости от того, что больше); l – пролёт подкрепляемых балок (без учёта стойки), м; $k_{\sigma} = 0,6$; h – высота поперечного сечения стойки, см; Δs определяется по формуле (1.17).

Момент инерции сечения стойки, см^4 , должен быть не менее

$$i = 0,01f l^2 \frac{\sigma_c}{\sigma_n},$$

где l_c – длина стойки, м (2.4.4.7).

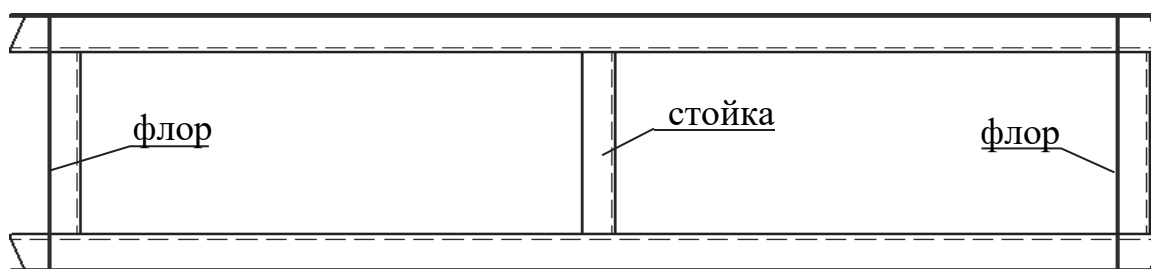


Рис. 2.9. Подкрепление продольных балок стойкой

Ребра жёсткости по непроницаемым стенкам двойного дна подбираются по формулам (1.20) и (1.18). При этом давление p определяется по последней формуле (1.14); $k_{\sigma} = 0,55$ для горизонтальных рёбер; $k_{\sigma} = 0,75$ для вертикальных рёбер; $m = 12$ для горизонтальных рёбер; $m = 10$ для вертикальных рёбер, концы которых приварены к балкам основного набора; $m = 8$ для вертикальных рёбер, концы которых срезаны «на ус» (2.4.4.6-).

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЯЗЕЙ БОРТА

Конструкция бортов судна существенно зависит от назначения судна и условий его эксплуатации. У сухогрузных судов характерно разделение борта по высоте нижними палубами на ряд перекрытий. Высота перекрытий определяется высотой трюма и твиндеков (табл. 3.1). Контейнеровозы, лихтеровозы, суда для массовых грузов (танкеры, навалочники, лесовозы) не имеют твиндеков. Суда открытого типа, накатные, а также танкеры часто имеют двойные борта.

МАРПОЛ 73/78 для большинства нефтяных танкеров требует наличия междубортных танков изолированного балласта, требования к которым приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.1

Высота трюмов и твиндеков сухогрузных судов, м

Тип судна	Трюм	Твиндеки
Универсальное	3,2...6,0	3,0...4,5
Накатное	3,5...6,0	3,5...6,0
Рефрижераторное	2,8...3,5	2,3...2,8

Суда, эксплуатирующиеся в морях с замерзающими районами и в арктических широтах, а также ледоколы, промысловые, буксирные и спасательные суда должны выдерживать довольно опасные и трудно прогнозируемые ударные нагрузки на борта (ото льда, от швартовок и т.п.). Поэтому конструкция и размеры связей борта таких судов определяются именно этими нагрузками. Для их расчётов в Правилах Регистра предусмотрено большое количество специальных требований и довольно громоздких формул. В подразделе 3.5 в упрощённом виде рассмотрено проектирование конструкций борта судов ледового плавания.

Таблица 3.2

Требования к двойным бортам танкеров

Дедвейт DW , т	Двойной борт	Требования
Менее 5000 т	Нет	Вместимость каждого грузового танка не должна превышать 700 м^3
	Есть	Ширина двойного борта $b \geq 0,4 + 2,4 \cdot DW/20\,000$, м, и не менее 0,76 м
5000 т и более	Обязателен	Минимальная ширина двойного борта $b = 2,0$ мили $b = 0,5 + DW/20\,000$, м, (в зависимости от того, что меньше), но не менее 1,0 м

3.1. Конструкции одинарного борта

Подробно конструкции бортов рассмотрены в учебниках [4; 11]. Отметим здесь лишь некоторые особенности выбора конструкций.

Простейшая система набора – однородная поперечная, состоящая из одинаковых шпангоутов. Она наиболее применима для лесовозов, универсальных сухогрузов (особенно в твиндеках), навалочников. Однако если пролёт шпангоутов большой, необходимо устанавливать промежуточные опоры – бортовые стрингеры, тогда шпангоуты получают меньшего профиля и вес перекрытия уменьшается. Кроме того, стрингеры повышают жёсткость перекрытия. Поэтому пролёт шпангоутов в МО (где возможна существенная вибрация) не должен превышать 2,5 м (2.5.2.3).

Тем не менее стрингеры сухогрузов уменьшают полезное грузовое пространство, а также могут повреждаться от ударов при грузовых операциях. Поэтому борта лесовозов в трюмах делают только по однородной системе набора.

Стрингеры могут оказаться очень громоздкими при большом пролёте (равном длине отсека). В этом случае их подкрепляют одной или несколькими промежуточными опорами – рамными шпангоутами. Рамные шпангоуты должны стоять в одной плоскости со сплошными флорами. Такая неоднородная система набора характерна для бортов наливных судов, но нередко встречается также у сухогрузных судов. Обязательна установка рамных шпангоутов в МО – не реже чем через 5 шпаций или 3 м (в зависимости от того, что больше), и, кроме того, по торцам двигателя.

Продольная система набора борта встречается редко – только на крупнотоннажных судах. В этом случае набор состоит из продольных балок и рамных шпангоутов, стоящих в одной плоскости со сплошными флорами.

3.2. Конструкции двойного борта

В конструкциях двойных бортов достаточно ясно прослеживается аналогия с конструкциями двойного дна. Рамный набор составляют вертикальные диафрагмы и горизонтальные платформы (рамные шпангоуты и бортовые стрингеры – по аналогии со сплошными флорами и днищевыми стрингерами). Основной набор составляют:

- при поперечной системе набора – шпангоуты и стойки внутреннего борта (по аналогии с балками бракетных флоров);
- при продольной системе набора – горизонтальные балки наружного и внутреннего борта (по аналогии с продольными балками двойного дна).

Диафрагмы и платформы подкрепляются рёбрами жёсткости с учётом требований подраздела 1.8. При этом меньшая сторона образуемых

пластин не должна превышать $100s\sqrt{\eta}$, мм, где s – толщина диафрагмы (платформы) (2.5.2.2).

Ширина вырезов в диафрагмах и платформах не должна превышать 0,6 ширины двойного борта. Расстояние между вырезами должно быть не менее длины вырезов. Вырезы (кроме шпигатов) не допускаются в районах опор диафрагм и платформ (ближе, чем 3 шпации или 1,5 ширины двойного борта). Кромки вырезов в пределах четверти пролёта рамных связей от их опор должны быть подкреплены поясками или рёбрами жёсткости.

3.3. Конструкция борта и цистерн навалочных судов

К борту навалочного судна примыкают подпалубная и скуловая цистерны. Между ними обычно расположено одинарное перекрытие с однородным набором (шпангоутами) либо двойной борт. Подпалубная цистерна должна иметь продольную систему набора (рис. 3.1). Скуловая цистерна обычно также имеет продольную систему набора (рис. 3.2).

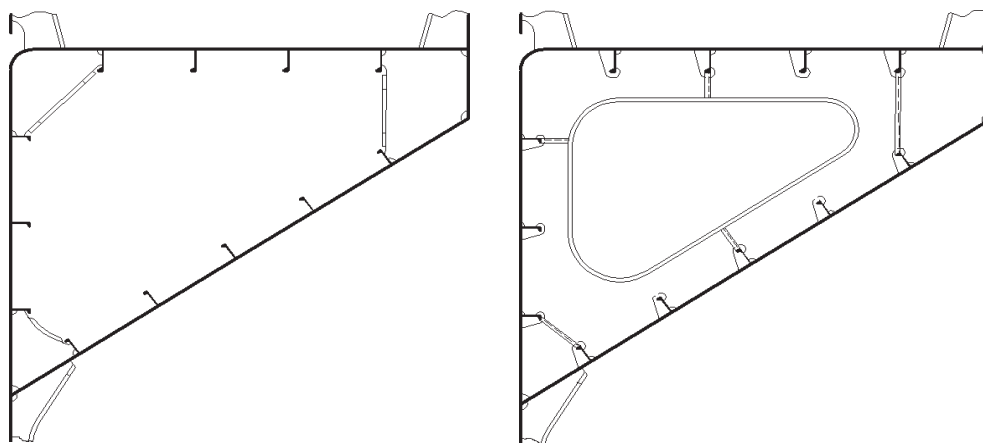


Рис. 3.1. Конструкция подпалубной цистерны

Угол наклона стенок подпалубных цистерн к ОП должен быть не менее 30°, скуловых – не менее 45°. Ширина скуловой цистерны должна быть не менее 0,125В (3.3.2.4).

Набор цистерн при продольной системе набора состоит из основных продольных балок и поперечных рамных связей таврового профиля, расположенных в плоскости флоров. В скуловых цистернах, кроме того, в плоскости каждого второго флора должны стоять поперечные диафрагмы. Эти диафрагмы могут иметь вырезы (лазы), подкреплённые поясками или рёбрами жёсткости. Размеры этих вырезов должны быть такими, чтобы их кромка по всему периметру отстояла от центра выреза не дальше половины расстояния до обшивки цистерны. В плоскости шпангоутов по всем

углам цистерн ставятся brackets, доходящие до ближайших продольных балок (3.3.2.4-).

Шпангоуты, как правило, должны иметь симметричный профиль (3.3.2.5-). Кницы шпангоутов должны быть выполнены так, как приведено на рис. 3.3. При этом концы книц не должны перекрывать примыкающие к ним brackets.

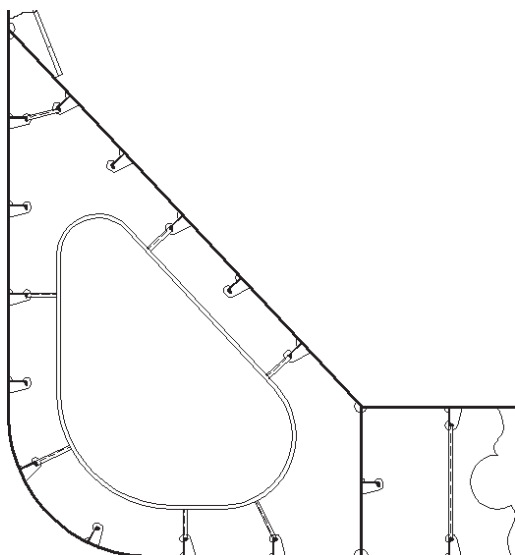


Рис. 3.2. Конструкция скуловой цистерны

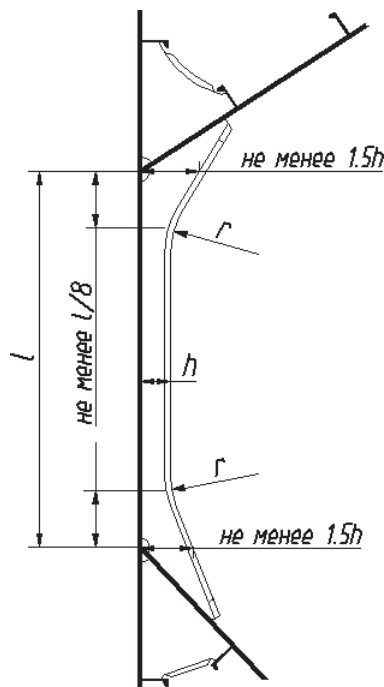


Рис. 3.3. Шпангоут навалочного судна

Радиус скругления, мм, должен быть не менее

$$r = 0,4b^2 \sqrt{s},$$

где b и s – соответственно ширина свободного пояса и толщина стенки кницы, мм.

3.4. Размеры связей

3.4.1. Общие требования

За расчетные нагрузки на связи борта принимаются наибольшие из всех возможных нагрузок. Расчетным давлением на наружный борт обычно является внешнее давление воды, определяемое по формулам (1.2) и (1.3). При этом волновое давление p_w выше летней ГВЛ должно быть не менее $p_{\min} = 0,03L + 5$, кПа (при $L > 250$ м принимается $L = 250$ м).

На конструкции внутренних бортов, а также внутренние стенки под- палубных и скуловых цистерн расчётным давлением является давление от груза либо жидкости в цистернах в соответствии с пунктом 1.5.3.

Проницаемые диафрагмы двойных бортов рассчитываются на давление со стороны моря, а непроницаемые диафрагмы – на давление жидкостив цистернах.

Толщина обшивки борта в средней части определяется по формуле (1.16) при $m = 15,8$. Коэффициент k_σ приближённо можно определить по формуле

$$k_\sigma = k_\sigma^{\text{дн}} \left(1 - 2 \frac{z}{D} \right) + 1,2 \frac{z}{D}$$

где

$k_\sigma^{\text{дн}}$ – коэффициент k_σ для обшивки днища, z – расстояние до расчётной точки обшивки от ОП или от ВП (в зависимости от того, что ближе).

Толщина обшивки должна быть не менее (2.2.4.8)

$$\text{— при } L < 30 \text{ м} \quad s_{\min} = 3,1 + 0,12L;$$

$$\text{— при } L \geq 30 \text{ м} \quad s_{\min} = (5,5 + 0,04L) \sqrt{\eta},$$

где коэффициент η определяется по формуле (1.1). При $L > 300$ м следует подставлять в формулу $L = 300$ м.

Толщина скулового пояса принимается равной толщине днища или борта в зависимости от того, что больше.

Ширина ширстрека должна быть не менее $0,8 + 0,005L$, но не более 2 м (2.2.4.5). Толщина ширстрека должна быть не менее толщин прилегающих листов борта и палубного стрингера.

Балки набора бортовых перекрытий подбираются в соответствии с указаниями подраздела 1.7. При этом величины в формулах (1.18) и (1.19) определяются по табл. 3.3 (2.5.4-).

Расчётное давление на трюмные шпангоуты не должно приниматься менее (2.5.4.1):

$$\text{— при } L < 60 \text{ м} \quad p_{\min} = 10z + 0,3L + 1;$$

$$\text{— при } L \geq 60 \text{ м} \quad p_{\min} = 10z + 0,15L + 10,$$

где z – отстояние середины пролёта шпангоута от летней ГВЛ, м.

Моменты сопротивления балок основного набора двойного борта можно уменьшить на 35 %, если подкрепить их стойками посередине пролёта аналогично стойкам двойного дна (см. рис. 2.9). Размеры этих стоек подбираются так же, как и для стоек двойного дна.

В МО рамные шпангоуты должны иметь высоту стенки $h \geq 0,1l$ и толщину стенки $s \geq 0,01h + 3,5$ (мм). Высоты профиля и толщины поясков

рамного шпангоута и бортового стрингера в МО равны. Толщина стенки стрингера может быть на 1 мм меньше толщины стенки рамного шпангоута (2.5.4.7-).

Таблица 3.3

Определение параметров в формулах (1.18) и (1.19)
для балок бортового набора

Наименование балок набора	Особенности конструкции, тип судна и др.	m	n	k_{σ}	k_{τ}
Шпангоуты при поперечной системе набора	Одинарный борт в трюме	18	-	0,65	-
	То же у опор (включая кницы)	12	-	0,65	-
	Одинарный борт в твиндеках	10	-	0,65	-
	Двойной борт: наружный внутренний	12	-	0,65	-
		12	-	0,75	-
Продольные балки основного набора*	Наружного борта	12	-	$0,5+0,3z/D$	-
	Внутреннего борта	12	-	$0,65+0,2z/D$	-
	Цистерн навалочников	12	-	$0,65+0,2z/D$	-
Бортовые стрингеры*	При отсутствии распорок	18	0,5	$0,5+0,3z/D$	0,65
	подкреплённые 1 распоркой	27,5	0,4	$0,5+0,3z/D$	0,65
	подкреплённые 2 распорками	27,5	0,375	$0,5+0,3z/D$	0,65
	подкреплённые 3 распорками	27,5	0,35	$0,5+0,3z/D$	0,65
	в МО	10	0,5	0,65	0,65
Рамные шпангоуты	В трюме без распорок	11	0,5	0,65	0,65
	подкреплённые 1 распоркой	18	0,375	0,65	0,65
	подкреплённые 2 распорками	18	0,35	0,65	0,65
	подкреплённые 3 распорками В твиндеках и подпалубных цистернах	27,5	0,35	0,65	0,65
		10	0,5	0,65	0,65
Рамные балки наклонных стенок подпалубных цистерн навалочников		10	0,5	0,75	0,75
*z – расстояние до балки от ОП или от ВП (в зависимости от того, что ближе)					

Диафрагмы и платформы двойного борта подбираются аналогично рамным шпангоутам и бортовым стрингерам. Кроме того, их толщина должна быть не менее $s_{\min} = 6,2 + 0,018L$. Толщина непроницаемых участков диафрагм и платформ определяется по формуле (1.16) при $m = 15,8$; $k_{\sigma} = 0,9$. Ребра жёсткости по непроницаемым стенкам диафрагм и платформ подбираются по формулам (1.20) и (1.18). При этом давление p определя-

ется по формулам (1.14); $k_{\sigma} = 0,75$; $m = 12$ – для рёбер, параллельных обшивке борта; $m = 10$ – для рёбер, перпендикулярных обшивке борта, концы которых приварены к балкам основного набора; $m = 8$ – для рёбер, концы которых срезаны «на ус» (2.5.4.8).

Скуловые кницы при поперечной системе набора должны полностью перекрывать скулу и иметь фланец или поясok. Толщина скуловых книц равна толщине флоров. Их ширина выбирается из расчёта, чтобы момент сопротивления шпангоута с учётом кницы увеличился как минимум в два раза. Высота скуловых книц должна быть не менее их ширины. Скуловые и прочие кницы должны удовлетворять требованиям подраздела 1.9.

3.4.2. Дополнительные требования для бортов и цистерн навалочных судов

Толщина обшивки наклонных стенок скуловой и подпалубной цистерн в средней части определяется по формуле (1.16) при $m = 15,8, k_{\sigma} = 0,9$. Толщина нижнего листа скуловой цистерны должна быть не менее толщины настила второго дна. Толщина остальных листов должна

быть не более толщины нижнего листа, но не менее $s_{\min} = (7 + 0,035L) \sqrt{\eta}$ (при $L > 260$ м следует подставлять в формулу $L = 260$ м). Толщина вертикальной стенки подпалубной цистерны (под комингсом люка) и примыкающего листа наклонной стенки должна быть не менее $s_{\min} = 10 + 0,025L$ (при $L > 200$ м следует подставлять в формулу $L = 200$ м).

При расчёте балок набора подпалубных цистерн расчётное давление не должно приниматься менее 25 кПа.

Толщина стенок диафрагм и поперечных рам скуловых цистерн должна быть не менее толщин примыкающих к ним сплошных флоров. Толщина бракет и книц в цистернах должна быть не менее 10 мм.

Толщина стенок шпангоутов одинарного борта должна быть не менее $s_{\min} = 7 + 0,03L$ (при $L > 200$ м следует принимать $L = 200$ м).

3.4.3. Дополнительные требования для бортов танкеров

На наливных судах толщина всех элементов, контактирующих с жидким грузом или балластом, должна быть не менее (3.5.4):

$$\begin{aligned} - \text{при } L < 80 \text{ м} \quad s_{\min} &= (5,5 + 0,035L) \sqrt{\eta}, \\ - \text{при } L \geq 80 \text{ м} \quad s_{\min} &= (6,7 + 0,02L) \sqrt{\eta}. \end{aligned}$$

В последней формуле при $L > 290$ м следует подставлять $L = 290$ м. Толщину балок основного набора можно принимать не более 11,5 мм.

Между бортом и продольной переборкой танкера часто ставятся распорки, упирающиеся в рамные связи борта и переборки (обычно в месте пересечения рамных шпангоутов с бортовыми стрингерами). Площадь сечения распорки f должна быть не менее

$$f = \frac{25pah}{\sigma_{кр}} + 0,05P\Delta s,$$

где p – расчётное давление на уровне распорки, кПа; a – расстояние междураспорками по длине, м; h – расстояние между распорками по высоте (высота части борта, поддерживаемой распоркой), м; P – периметр поперечного сечения распорки, см; $\sigma_{кр}$ – критические напряжения, МПа, определяемые по формулам подраздела 7.5 при эйлеровых напряжениях, вычисляемых по формуле

$$\sigma_c = \frac{206i}{fl^2},$$

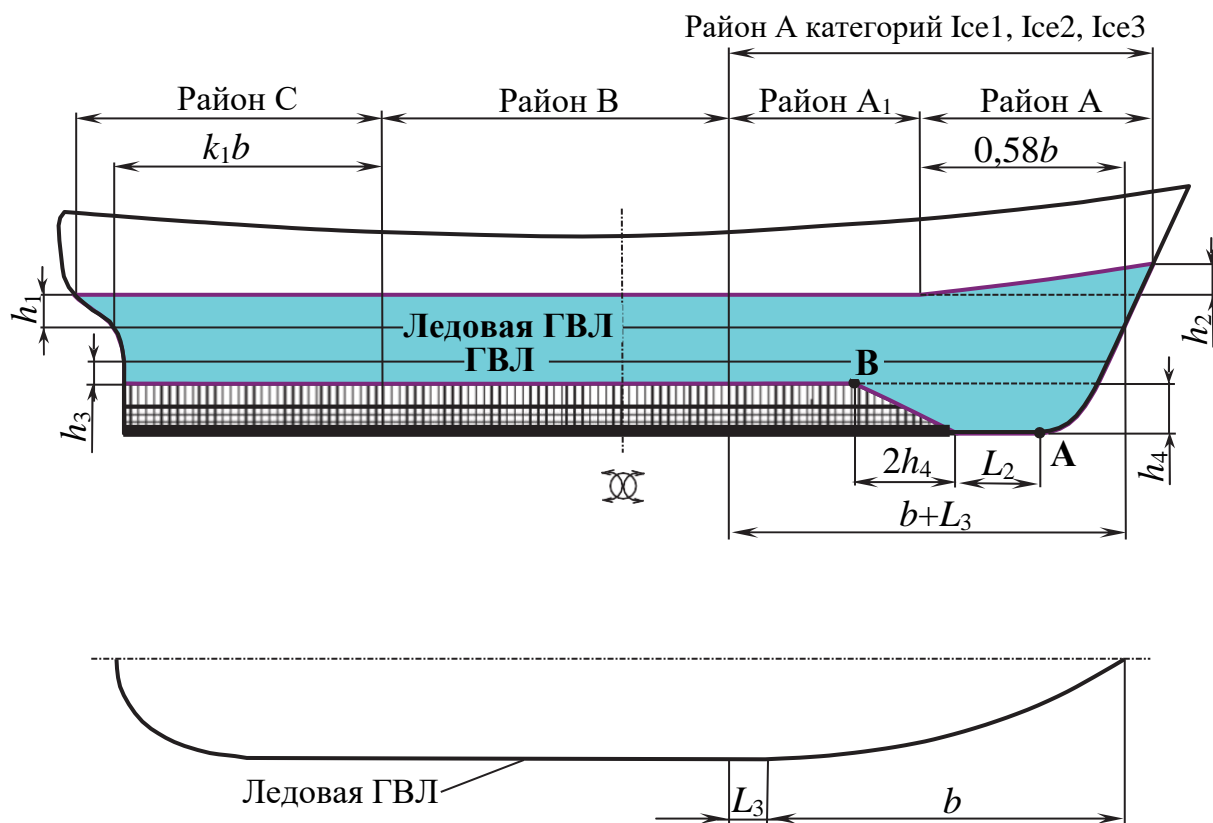
здесь i – минимальный момент инерции поперечного сечения распорки, см⁴; l – длина распорки, м. Так как площадь сечения f входит в обе последние формулы, её расчёт выполняется методом последовательных приближений.

3.5. Проектирование конструкций с ледовыми усилениями

В Правилах Регистра предусмотрено девять категорий ледового плавания судов (2.2.3) по мере возрастания ледовых нагрузок (приложение 5). Категории Ice1 – Ice3 относятся к судам для неарктических замерзающих морей. Для остальных (арктических) категорий Arc4 – Arc9 допускаемые районы эксплуатации в российских арктических морях определены в зависимости от сезона, тактики плавания (с ледоколом или самостоятельно) и тяжести навигации (2.2.3.4).

В первую очередь ледовая категория судна влияет на форму корпуса в оконечностях (наклон летней ГВЛ к ДП, наклон форштевня и шпангоутов на уровне летней ГВЛ и т.п. (3.10.1.2)). На судах арктических категорий: вертикальный борт в районе ледового пояса не допускается в нос от цилиндрической вставки; в носу не должно быть бульба; в корме не допускается транцевая форма кормы и необходим ледовый зуб (выступ для защиты руля на заднем ходу).

Расчётные нагрузки и требования к конструкциям борта установлены в зависимости от района по длине и высоте корпуса судна (рис. 3.4). В этом пособии рассмотрим только проектирование борта в средней части (в районе В). Размеры h_1 , h_3 и L_3 , обозначенные на рис. 3.4, приведены в табл. 3.4 (3.10.1.3-).



b – расстояние от носового перпендикуляра до цилиндрической вставки, но не более $0,4L$

Границы районов по периметру поперечного сечения

Положение точки А для бульбообразных обводов

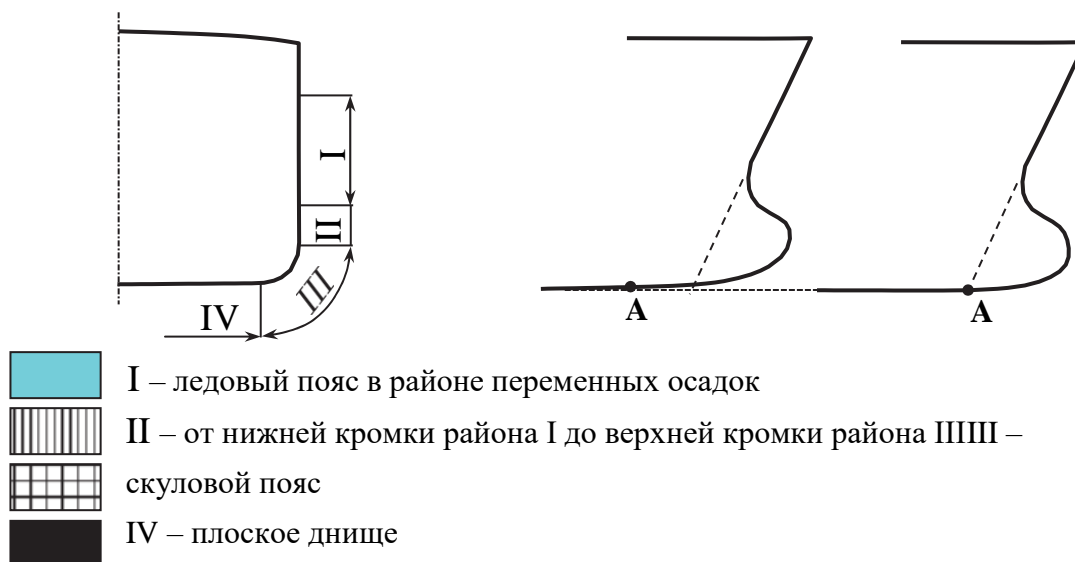


Рис. 3.4. Районы ледовых усиления [13]

Ледовые усиления выполняются: в районе VI (В – по длине, I – по высоте) – для судов категорий Ice2 и выше; в районе VII – для судов категорий Arc4 и выше; в районе VIII – для судов категорий Arc5 и выше; в районе IX – для судов категорий Arc8, Arc9

и ледоколов.

Таблица 3.4

Размеры, определяющие границы районов ледовых усилений

Параметр		Категория ледовых подкреплений					
		Arc7 – Arc9	Arc5, Arc6	Arc4	Ice3	Ice2	Ice1
h_1 , м	при $B \leq 20$ м	0,75		0,60	0,50		
	при $B > 20$ м	$\frac{0,5B + 8}{24}$		$\frac{0,5B + 8}{30}$	$\frac{0,5B + 8}{36}$		0,50
h_3 , м		$1,6h_1$	$1,35h_1$	$1,20h_1$	$1,10h_1$	h_1	
L_3 , м		$0,06L$	$0,05L$	$0,045L$	$0,04L$	$0,02L$	

3.5.1. Конструктивные особенности ледовых усилений

В момент удара льда о корпус судна площадь контакта обычно вытянута вдоль судна. Чтобы удар воспринимался как можно большим числом балок, целесообразна поперечная система набора борта. Более того, желательно уменьшать пролёт пластин обшивки, т.е. шпацию. Для этого Регистром *рекомендуется* установка *промежуточных шпангоутов*. Они чередуются (через один) с основными шпангоутами, уменьшая тем самым шпацию набора в два раза. Профиль промежуточных шпангоутов такой же, как основных. Отличаться они могут только закреплением концов.

Даже при частом расположении шпангоутов они могут оказаться недостаточно прочными, если удар льдины будет сосредоточенным на малой площади. Такую нагрузку желательно разнести на возможно большее число балок. Для этого шпангоуты соединяются между собой дополнительными *разносящими бортовыми стрингерами*, которые имеют профиль, близкий к профилю шпангоутов. Разносящие стрингеры рекомендуется делать разрезными на шпангоутах (интеркостельными).

Система набора борта может быть двух основных видов (3.10.2.1):

- монотонной, состоящей из шпангоутов одинакового профиля и разносящих стрингеров;
- усиленной рамными шпангоутами и несущими бортовыми стрингерами (с высотой профиля как у рамных шпангоутов). При этом борт может быть одинарным либо двойным.

На судах категории Arc7 и выше рекомендуется установка двойного борта, а в МО он обязателен.

На судах категории Arc5 и выше шпангоуты должны крепиться к палубам и платформам кницами. Если шпангоут разрезан на промежуточных опорах (палубах, платформах, стрингерах), то кницы ставятся с обеих сторон. Если в плоскости шпангоута нет бимса, то кница должна идти от шпангоута до ближайшей продольной подпалубной балки.

На судах категории Arc4 и выше нижние концы промежуточных шпангоутов закрепляются на крайнем междудонном листе, подкреплённом снизу бракетой или ребрами, доходящими до продольных балок днища и второго дна (рис. 3.5).

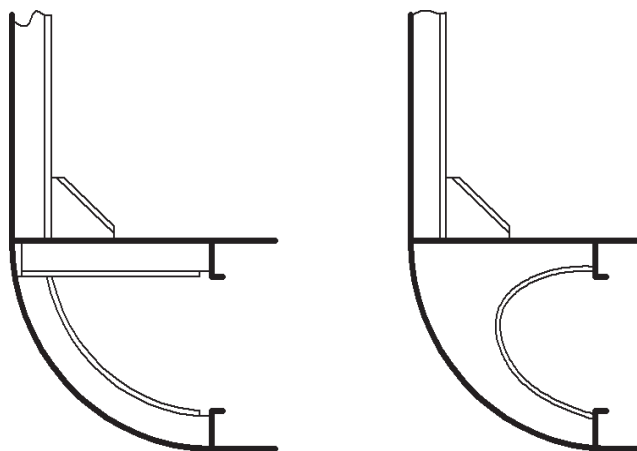


Рис. 3.5. Закрепление нижних концов промежуточных шпангоутов на судах категории Arc4

При поперечной системе набора днища бракетки или рёбра доводятся до специально поставленных для этого продольных, разрезных на флорах (интеркостельных) балок.

Верхние концы промежуточных шпангоутов на судах категории Arc4 и выше должны крепиться к палубе или платформе, расположенной выше верхней границы района I.

На судах категорий Ice1, Ice2 и Ice3 при монотонной системе набора нижние концы промежуточных шпангоутов можно не доводить до днища, а обрывать на 1 м ниже нижней границы района I, закрепляя на разносящем стрингере (рис. 3.6, а). Верхние концы можно не доводить до палубы, а обрывать на 0,5 м выше верхней границы района I, закрепляя на разносящем стрингере (рис. 3.6, б).

На судах категорий Ice1, Ice2 и Ice3 при системе набора с рамными шпангоутами нижние концы промежуточных шпангоутов также можно не доводить до днища, закрепляя на разносящем стрингере. Однако этот разносящий стрингер должен стоять на 1 м ниже несущего стрингера, который, в свою очередь, должен стоять ниже нижней границы района I.

На судах категорий Ice1, Ice2 и Ice3 при системе набора с рамными шпангоутами верхние концы промежуточных шпангоутов также можно не доводить до палубы, закрепляя на разносящем стрингере. Однако этот разносящий стрингер должен стоять на 0,5 м выше несущего стрингера, который, в свою очередь, должен стоять выше верхней границы района I.

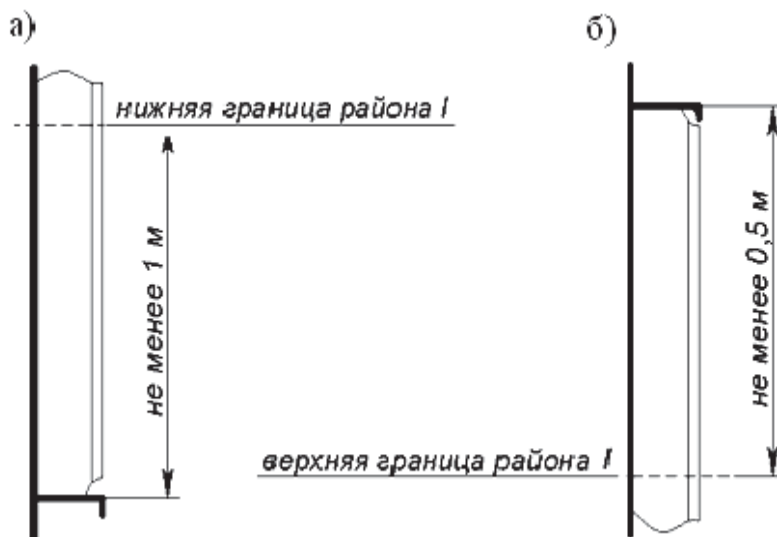


Рис. 3.6. Закрепление нижнего (а) и верхнего (б) концов промежуточного шпангоута на судах категорий Ice1, Ice2 и Ice3

Допускается применение и продольной системы набора борта. При этом на судах категории Arc4 и выше, если расстояние между рамными шпангоутами больше 2 м, необходимо ставить дополнительные (промежуточные) интеркостельные шпангоуты. Концы этих шпангоутов закрепляются так же, как и у промежуточных шпангоутов судов категорий Ice1, Ice2 и Ice3 при поперечной монотонной системе набора (3.10.2.3).

Стенки рамных балок и другие листовые конструкции, примыкающие к обшивке борта, на судах категории Arc4 и выше должны подкрепляться рёбрами жёсткости, перпендикулярными к обшивке. Расстояние между ними должно быть не более: 0,5 м – на судах категорий Arc5 и выше; 0,8 м – на судах категории Arc4 (3.10.2.4-).

Эскиз конструкции		
		
Продольная система набора в районе I на судах категорий Arc5 и выше	Поперечная система набора: на судах категорий Arc5 и выше - в районах I и II; на судах категорий Arc4 - в районе I	Для всех остальных категорий судов и районов, требующих ледовых усиления

Рис. 3.7. Оформление узлов пересечения [13]

Расстояние от кромки вырезов в листах, примыкающих к борту, до обшивки борта должно быть не менее 0,5 м.

Узлы пересечения стенок рамных балок и других листовых конструкций с основным набором должны выполняться в соответствии с рис. 3.7 (подкрепляющие ребра и кницы на рисунке условно не показаны).

3.5.2. Ледовая нагрузка

Условная ледовая нагрузка определяется в Правилах параметрами: давлением p , длиной l^H и высотой b её распределения (3.10.3.1).

В районе VI расчётное ледовое давление определяется по формуле (3.10.3.2.3)

$$p_{VI} = 1500 a_3 \sqrt[6]{\Delta/1000},$$

где a_3 – коэффициент, определяемый по табл. 3.5; Δ – водоизмещение полетнюю ГВЛ, т.

В районах VII, VIII и IV расчётное давление определяется по формулам

$$\begin{aligned} p_{VII} &= a_{VII} p_{VI} & p_{VIII} &= a_{VIII} p_{VI} & p_{IV} &= a_{IV} p_{VI}, \\ p_{VI} & & p_{VI} & & & \end{aligned}$$

где коэффициенты a_{VII} , a_{VIII} и a_{IV} определяются по табл. 3.5.

Высота распределения ледовой нагрузки, м,

$$b_B = C_3 k_\Delta,$$

где C_3 – коэффициент, определяемый по табл. 3.5; $k_\Delta = \sqrt[3]{\Delta/1000}$, но не более 3,5.

Длина распределения ледовой нагрузки, м,

$$l_B^H = 6b_B, \quad \text{но не менее} \quad 3\sqrt{k_\Delta}.$$

Таблица 3.5

Коэффициенты ледовой нагрузки

Коэффици- циент	Категория ледовых усилений							
	Ice2	Ice3	Arc4	Arc5	Arc6	Arc7	Arc8	Arc9
a_3	0,22	0,33	0,50	0,78	1,2	1,84	3,7	5,6
a_{VII}	-	-	0,4	0,5	0,5	0,5	0,55	0,55
a_{VIII} I	-	-	-	0,4	0,45	0,45	0,45	0,45
a_{IV} V	-	-	-	-	-	-	0,25	0,3
C_3	0,27	0,3	0,34	0,4	0,47	0,5	0,5	0,5

3.5.3. Размеры конструкций ледовых усиления

Толщина обшивки, мм, борта в районе усиления (3.10.4.1-) должна быть не менее

$$s = 0,75Tu + \frac{15,8a}{1 + 0,5a/c} \cdot \sqrt{\frac{p}{R_{eH}}},$$

где T – планируемый срок службы (если он не установлен, то следует принимать $T = 24$ г); u – средний износ связи за год, мм/г (он равен: для судов категорий от Arc6 до Arc9 – 0,3; Arc5 – 0,28; Arc4 – 0,26; Ice3 и менее – по табл. 1.4); a – шпация набора (с учётом промежуточных балок), м; c равно: при поперечной системе набора – высоте распределения ледовой нагрузки b или расстоянию между продольными связями (в зависимости от того, что меньше); при продольной системе набора – расстоянию между поперечными балками; p – ледовое давление в данном районе, кПа.

Проектирование балок набора ледовых усиления основано на применении критерия предельной прочности, согласно которому фактические величины предельного момента сопротивления W_{ϕ} и площади стенки A_{ϕ} балки должны быть не меньше требуемых Правилами Регистра.

Фактический предельный момент сопротивления профиля, см³, можно вычислить по формуле

$$W_{\phi} = h(f - f_{ст}/2),$$

где h – высота профиля, см; f – площадь профиля, см²; $f_{ст}$ – площадь стенки, см².

Предельный момент сопротивления *обыкновенного шпангоута*, см³, (3.10.4.3-) должен быть не менее

$$W = \frac{288pbal}{R_{eH}(F + 0,11j)} \cdot \left(1 - 0,5 \frac{b}{l} \right),$$

где p – ледовое давление в данном районе, кПа; b – высота распределения ледовой нагрузки (если $b > l$ то принимается $b = l$), м; a – расстояние между шпангоутами, м; l – пролёт шпангоута, м. Параметр F определяется следующим образом: при системе набора с рамными шпангоутами $F = 1$; при монотонной системе набора $F = 1$, если оба конца промежуточного шпангоута имеют опоры, и $F = 0,5$, если один или оба конца промежуточного шпангоута свободны (закреплены на разносящих интеркостельных стрингерах); j – число закреплённых опорных сечений в пролётах двух смежных шпангоутов, $j \leq 4$. Условия закрепления опор балок можно определить из рис. 3.8 (стрелками показаны опорные сечения, от которых измеряется пролёт балки).

Площадь стенки обыкновенного шпангоута, см^2 , должна быть не менее

$$f_{\text{ст}} = \frac{35 p a b}{R_e H} \cdot \frac{k_3 k_4}{4 - k_1} + 0,1 h \cdot \Delta s,$$

где k_1 – число свободных концов в пролётах двух смежных шпангоутов ($k_1 \leq 2$); $k_3 = 0,7$ или $k_3 = 1$ ($1 + \sqrt{\frac{b}{2z}}$ или $1 + \sqrt{\frac{b}{2l}}$ в зависимости от того, что

больше (здесь $z = \frac{b}{(2l)} \cdot (a/l)^2$; если $b > l$, то принимается $b = l$); $k_4 = 1$, 4

если в пролёте шпангоута нет разносящих стрингеров, $k_4 = 0,9$, если разносящий стрингер есть, $k_4 = 0,8$, если полка разносящего стрингера непрерывна; h – высота стенки шпангоута, см; Δs – запас толщины на коррозию, вычисляемый по формуле (1.17).

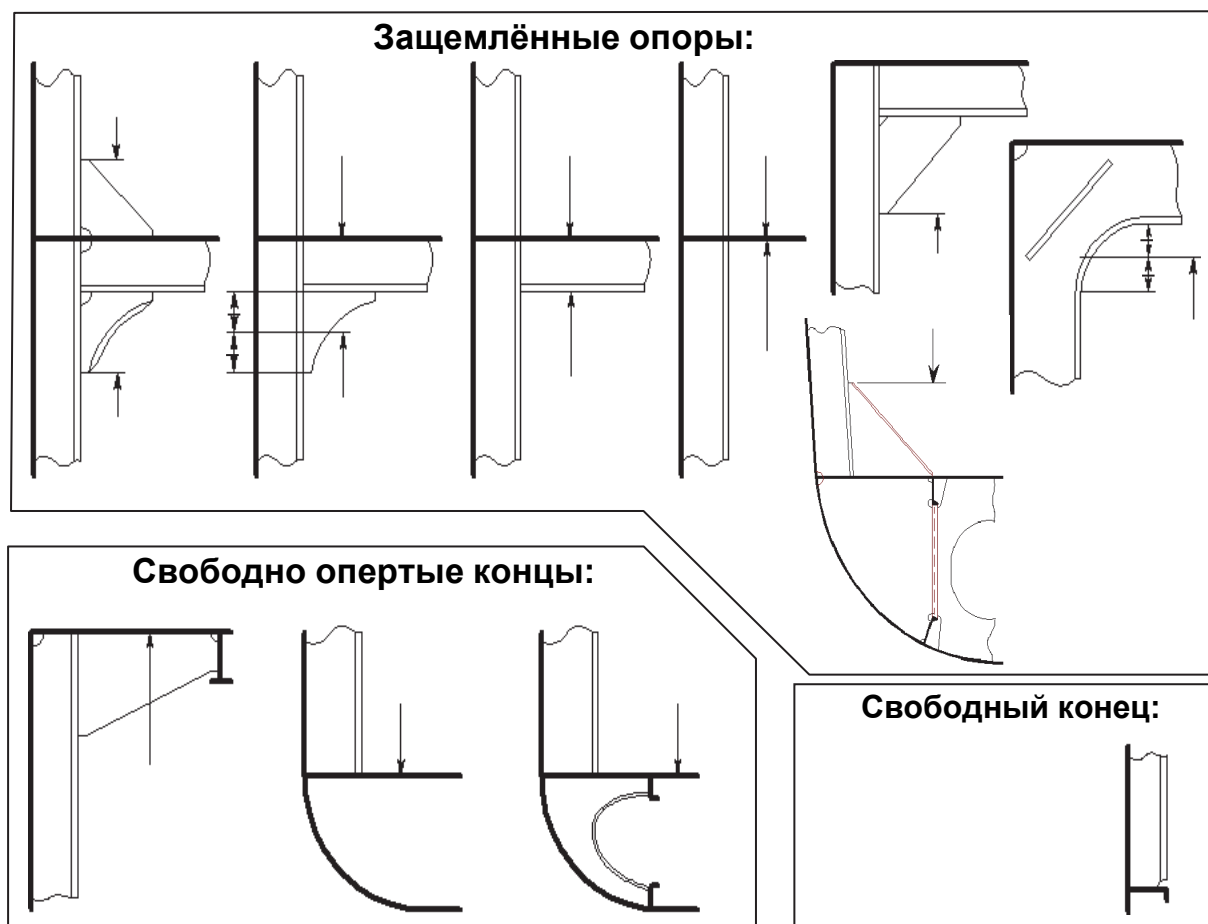


Рис. 3.8. Типичные схемы закреплений

Требования к толщине стенки $s_{\text{ст}}$, мм, обыкновенного шпангоута

$$s_{\text{ст}} \geq \frac{1,4pa}{R_{eH}} + \Delta s, \quad s_{\text{ст}} \geq 0,0114h \sqrt{R_{eH}} + \Delta s.$$

Предельный момент сопротивления **несущего бортового стрингера**, см^3 , (3.10.4.4-) должен быть не менее

$$W = \frac{101pba l^H}{R_{eH}} \left(\frac{b}{l} + c_6 + c_2 \right),$$

где a_1 – расстояние между рамными шпангоутами, м; l^H – длина распределения ледовой нагрузки (если $l^H > a_1$, то принимается $l^H = a_1$); $c_2 = 0,132$ и $c_6 = 0,32$ – при одном несущем стрингере в перекрытии, $c_2 = 0,11$ и $c_6 = 0,358$ – при двух и более несущих стрингерах.

Площадь стенки несущего стрингера, см^2 , должна быть не менее

$$f_{\text{ст}} = \frac{8,7 p a b l^H n}{R_{eH}} \left(\frac{b}{l} + c_6 + c_2 \right) + 0,1 \cdot h \cdot \Delta s,$$

где n – число шпангоутов между соседними рамными шпангоутами.

Толщина стенки несущего стрингера $s_{\text{ст}}$, мм, должна быть не менее

$$s_{\text{ст}} = 2,63c_1 \sqrt{\frac{R_{eH}}{5,34 + 4(c_1/c_2)^2}} + \Delta s,$$

где c_1 и c_2 – соответственно короткая и длинная стороны панелей, на которых стенка стрингера разделяется подкрепляющими её рёбрами жёсткости, м.

Ширина полки несущего стрингера $b_{\text{п}}$, мм, должна быть

$$b_{\text{п}} \geq 0,0165 R_{eH} \left(\frac{h}{l} + \frac{b}{l} \right) \quad b_{\text{п}} \geq 7,5s_{\text{ст}},$$

где $s_{\text{п}}$ – толщина полки, мм.

Разносящие бортовые стрингеры обычно имеют такой же профиль, как и обыкновенные шпангоуты. Во всяком случае, высота их стенки должна быть не менее 80 % от высоты стенки обыкновенных шпангоутов, а толщина стенки – не менее требуемой толщины для шпангоутов.

Рамные шпангоуты при поперечной системе набора борта (3.10.4.5-)

должны иметь предельный момент сопротивления, см^3 , не менее

$$W = \frac{101pab l^H}{R_{eH}} \left(\frac{b}{l} + \left(1 - 0,5 \frac{b}{l} + k_m n \right) \left(c_6 + c_2 \frac{b}{l} \right) \right),$$

где k_m – коэффициент, $k_m = 1$ – при одном несущем стрингере в перекрытии, $k_m = 1,33$ – при двух несущих стрингерах (если несущих стрингеров в

перекрытии больше двух, то используйте непосредственно Правила Регистра.). Если $l^H > 2a_1$ то принимается $l^H = 2a_1$.

Площадь стенки рамного шпангоута, см^2 , должна быть не менее

$$f_{\text{СТ}} = \frac{4,35 p a b l^H}{1^a R_{eH}} \left(\left| 1 + m n \left(c_6 + c_2 \frac{b}{l} \right) \right| \right) + 0,1 h \cdot \Delta s,$$

где m – число несущих бортовых стрингеров в перекрытии.

Толщина стенки рамного шпангоута $s_{\text{СТ}}$, мм, должна быть

$$s_{\text{СТ}} \geq 2,63 c_1 \sqrt{\frac{R_{eH}}{5,34 + 4(c_1/c_2)^2}} + \Delta s, \quad s_{\text{СТ}} \geq \frac{2 p a}{R_H^e} + \Delta s,$$

где c_1 и c_2 – соответственно короткая и длинная стороны панелей, на которые стенка рамного шпангоута разделяется подкрепляющими её рёбрами жёсткости, м.

Ширина полки рамного шпангоута $b_{\text{П}}$, мм, должна быть

$$b_{\text{П}} \geq A R_{eH} \sqrt{s_{\text{П}} s_{\text{СТ}}} \left(\frac{h}{s_{\text{СТ}}} - A_2 \right), \quad b_{\text{П}} \geq A s_{\text{П}},$$

где $s_{\text{П}}$ – толщина полки, мм; $A_1 = 0,0182$; $A_2 = 2,6$; $A_3 = 10$, если рёбра жёсткости, подкрепляющие стенку рамного шпангоута, отсутствуют или установлены вдоль стенки; $A_1 = 0,0039$; $A_2 = 1,4$; $A_3 = 5$, если рёбра жёсткости, подкрепляющие стенку рамного шпангоута, установлены поперёк.

При продольной системе набора продольные балки борта и днища (3.10.4.6-) должны иметь предельный момент сопротивления, см^3 , не менее

$$W = \frac{101 p b l^2}{R_{eH}},$$

где $b_1 = (1 - 0,3 a/b) b_2$; $b_2 = (1 - 0,25 b/a) b$ (если $b > 2a$, то следует принимать $b_2 = a$).

Площадь стенки продольных балок, см^2 , должна быть не менее

$$f_{\text{СТ}} = \frac{8,7 p b_1 l}{R_{eH}} k_1 + 0,1 h \cdot \Delta s,$$

где $k_1 = \frac{1}{1 + 0,76 a / (l + 0,5 a)}$, но не менее 0,8.

Требования к толщине стенки $s_{\text{СТ}}$, мм, продольных балок

$$s_{\text{СТ}} \geq \frac{1,4 p b_1}{R_{eH}} + \Delta s, \quad s_{\text{СТ}} \geq 0,013 h \sqrt{R_{eH}} + \Delta s.$$

Рамные шпангоуты при продольной системе набора борта (3.10.4.7-)

должны иметь предельный момент сопротивления, см³, не менее

$$W = \frac{202 p b l l^H}{a_1 R_{eH}} \cdot \left(1 + k_g \right) \cdot \left(1,1 + \frac{b}{a} + 0,33 k_g \right);$$

Если $l^H > 2a_1$, то принимается $l^H = 2a_1$. Коэффициент k_g принимается меньшим из следующих:

$$k_g = 3 \frac{b}{a} - 1,67 \frac{b}{a} - 2,15; \quad k_g = k - 0,125 \left(\frac{b}{a} + 2 \right),$$

где k – число продольных балок в пролёте рамного шпангоута.

Площадь стенки рамного шпангоута, см², должна быть не менее

$$f_{ст} = \frac{4,35 p b l l^H}{a_1 R_{eH}} \cdot \left(\frac{b}{a} + \frac{b}{b} \right) + \Delta \cdot 0,1 h \quad c.$$

Требования к толщине стенки и ширине полки рамного шпангоута такие же, как и при поперечной системе набора.

Промежуточные интеркостельные шпангоуты обычно имеют такой же профиль, как и продольные балки борта. Во всяком случае, высота их стенки должна быть не менее 80 % от высоты стенки продольных балок, а толщина стенки – не менее требуемой толщины для продольных балок.

Рёбра жёсткости, подкрепляющие листовые конструкции (стенки рамных шпангоутов и *бортовых* стрингеров, диафрагмы и другие листы, примыкающие к борту), желательно (а для судов категорий Агс4 и выше – обязательно) располагать перпендикулярно к наружной обшивке. Момент инерции ребер жёсткости, см⁴, должен быть не менее

$$i = 0,01 R_{eH} l^2 (10 s a + f_p),$$

где l – пролёт ребра жёсткости, м; s – толщина подкрепляемого листа, мм; a – расстояние между рёбрами жёсткости, м; f_p – площадь сечения ребра (без присоединённого пояса), см².

4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЯЗЕЙ ПАЛУБ

4.1. Конструкции

Система набора палуб определяется в соответствии с рекомендациями подраздела 1.3. Кроме того, продольная система набора палуб в районе грузовых трюмов (танков) должна применяться:

- на наливных судах длиной 80 м и более;
- на судах открытого типа* длиной 80 м и более;
- на навалочных, нефтенавалочных судах, рудовозах, нефтерудовозах;
- на накатных судах.

Нижние палубы обычно имеют поперечную систему набора (кроме палуб для накатных грузов).

Рамные бимсы при продольной системе набора палубы ставятся в плоскости сплошных флоров. В плоскости поперечных комингсов люков ставятся усиленные рамные бимсы (концевые люковые бимсы).

Карлингсы обычно располагаются в плоскости днищевых стрингеров, а также совмещаются с продольными комингсами люков, образуя комингс-карлингсы (рис. 4.1). Карлингсы опираются на поперечные переборки и, в свою очередь, являются промежуточными опорами для бимсов.

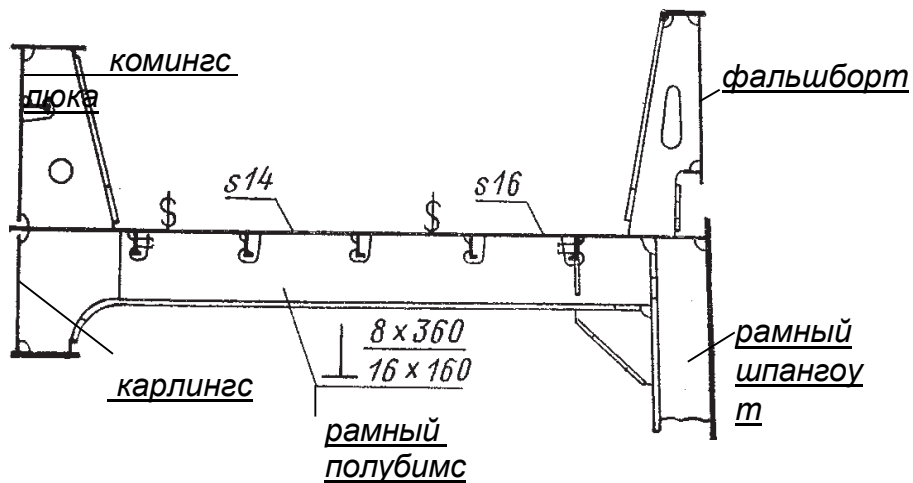


Рис. 4.1. Конструкция верхней палубы с продольной системой набора

Если отношение длины трюма (танка) к его ширине невелико, то карлингсы играют роль опор и для рамных бимсов. Так, у танкеров с двумя продольными переборками высокий карлингс (в два раза выше рамного бимса), называемый отбойным листом, ставится в диаметральной плоскости.

Соединение поясков карлингса и концевой люкового бимса должно выполняться с помощью крестовины, толщина которой должна быть равна большей толщине этих поясков (рис. 4.2).

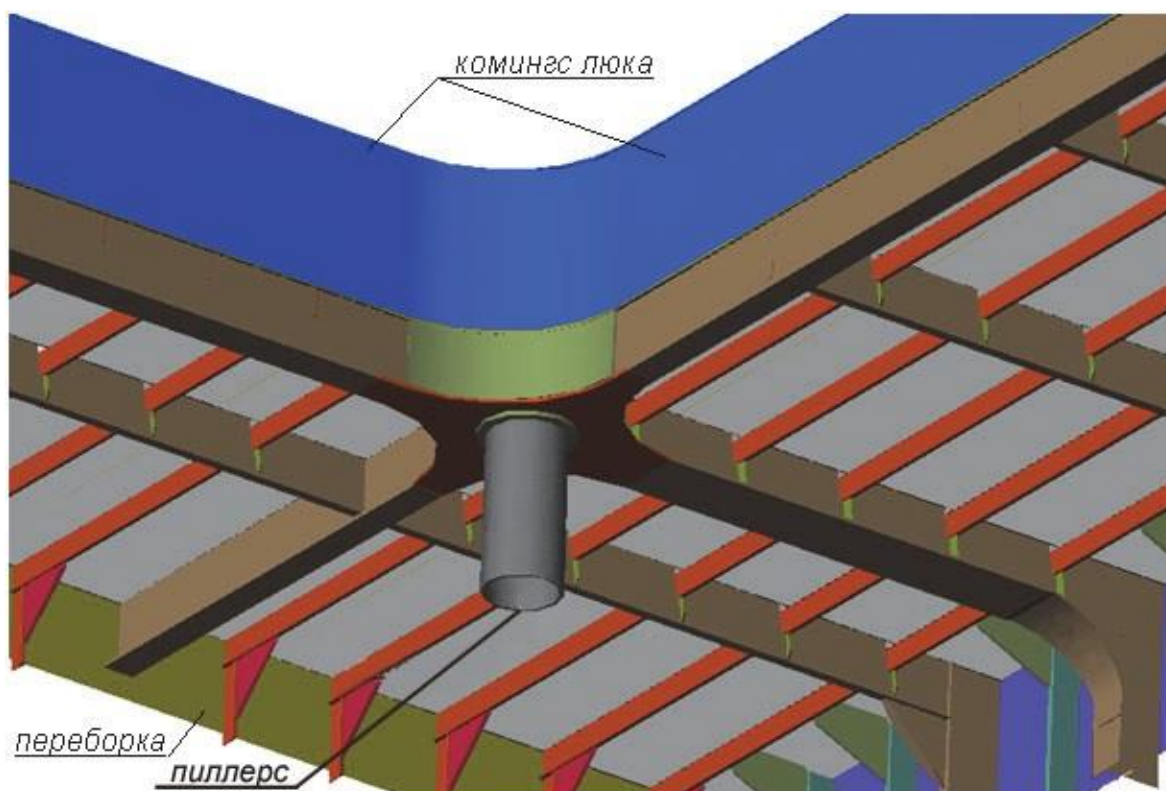


Рис. 4.2. Пиллерс в углу люкового выреза

При большом пролете рамные балки получаются высокими и мешают размещению генеральных грузов. Уменьшить размеры их сечений можно путем установки промежуточных опор, например пиллерсов (см. рис. 4.2). Однако часто стоящие пиллерсы также мешают размещению и погрузке – выгрузке грузов. При проектировании следует искать компромисс между количеством пиллерсов и размерами рамных подпалубных балок. Обычно пиллерсы ставятся по углам люка (на пересечении комингс-карлингсов с концевыми люковыми бимсами) или поддерживают концевые люковые бимсы в ДП. При большой длине люка комингс-карлингсы могут получиться слишком большими, тогда может быть полезным применение для них промежуточных опор в виде так называемых консольных бимсов (рис. 4.3). Они располагаются обычно посередине длины трюма.

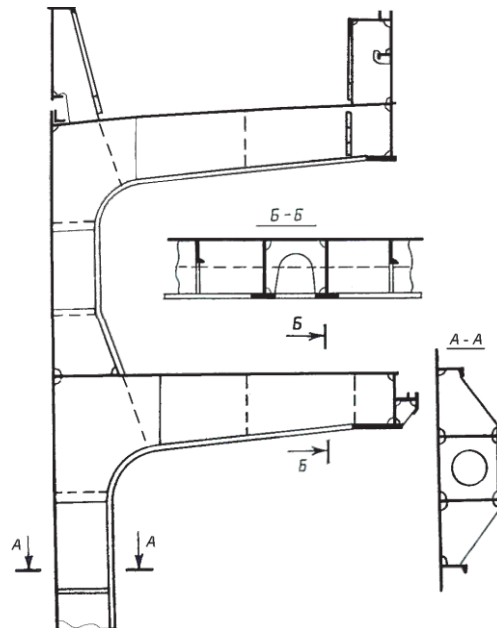


Рис. 4.3. Консольные бимсы

Комингс в углах люка может быть оформлен тремя основными способами:

- 1) со скругленным переходом продольного комингса в поперечный (рис. 4.4, а);
- 2) с кницей (рис. 4.4, б), продолжающей продольный комингс (если в их плоскости имеется карлингс);
- 3) в виде непрерывного продольного комингса, характерного для открытых и навалочных судов (рис. 4.5, а).

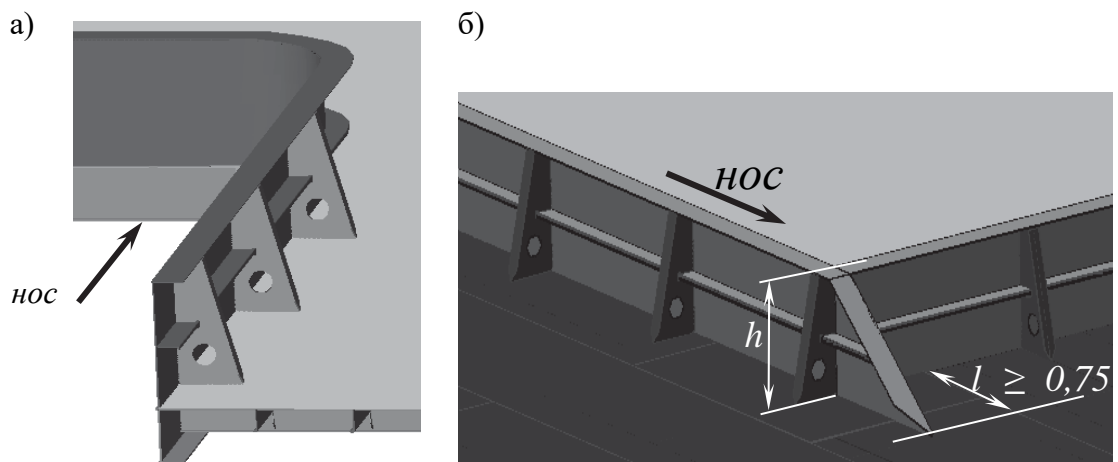


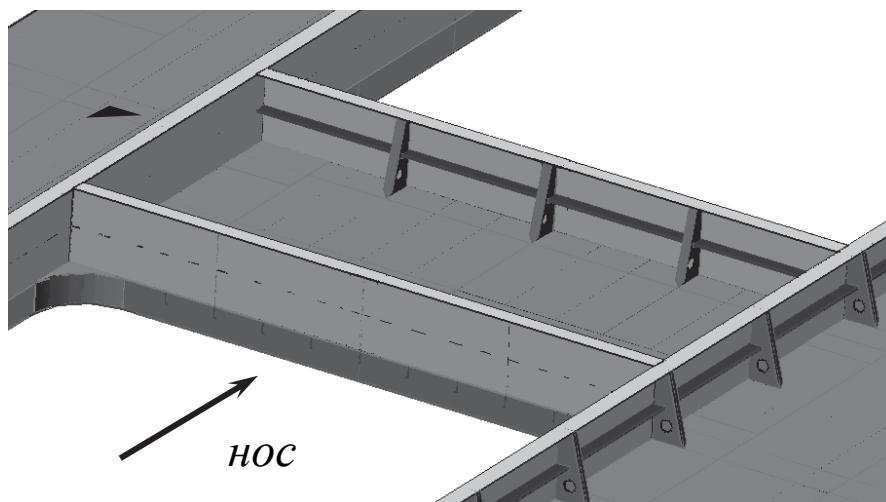
Рис. 4.4. Оформление комингса в углу люка: а – с закруглением; б – с кницей

У открытых судов с двойными бортами продольный комингс обычно является продолжением внутреннего борта. Кромки соседних люков могут быть расположены близко друг к другу, в этом случае межлюковые перемиčky рекомендуется делать коробчатой формы (рис. 4.5, б).

У накатных судов в грузовой части часто нет поперечных переборок. В этом случае карлингсы опираются на ряды пиллерсов.

У навалочных судов конструкция палубы определяется конструкцией подпалубных цистерн (см. рис. 3.1).

а)



б)

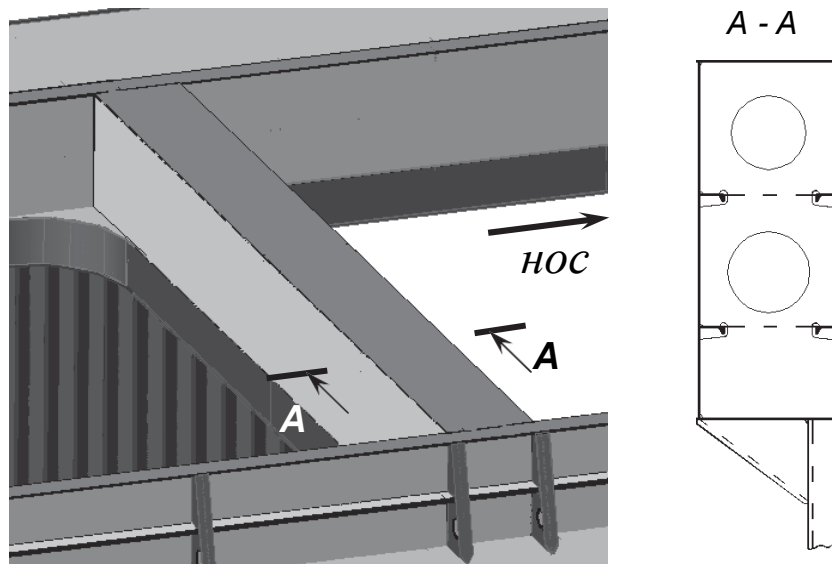


Рис. 4.5. Непрерывный продольный комингс и межлюковая перемиčka: а – традиционная конструкция; б – с перемичкой коробчатого профиля

Карлингсы и рамные бимсы в местах установки пиллерсов должны быть подкреплены кницами или бракетами. В местах соединения карлингсов с обыкновенными бимсами стенка карлингса должна быть подкреплена вертикальными ребрами жесткости или кницами (рис. 4.6).

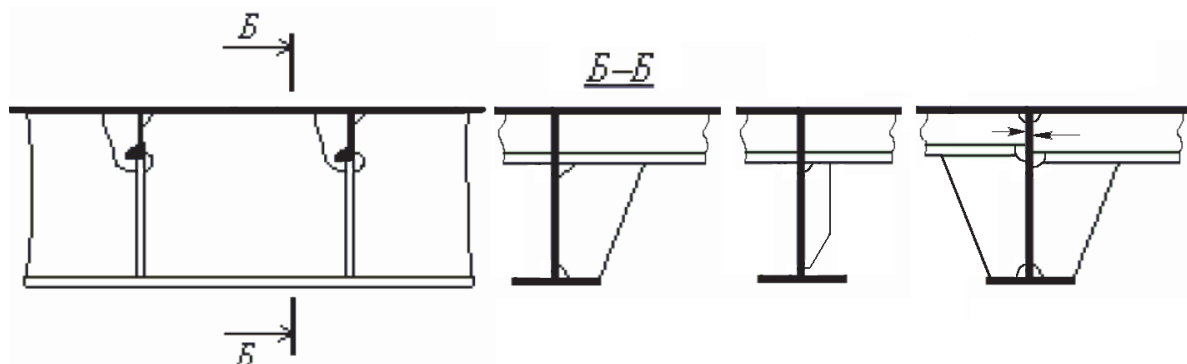


Рис. 4.6. Примеры подкреплений стенок рамных бимсов и карлингсов кницами или ребрами жесткости

В местах соединения карлингсов с рамными бимсами при разной высоте их стенок, стенка карлингса также должна быть подкреплена кницами в плоскости рамного бимса.

4.2. Размеры связей

Расчетное давление на верхнюю палубу в средней части корпуса p должно быть равно (2.6.3.1):

$$p \geq 0,7 p_w, \quad p \geq 0,015L + 7,$$

где p_w – волновая нагрузка, определяемая по формуле (1.4) на уровне палубы (z – высота надводного борта, м).

Если на палубе перевозится груз, то расчетное давление определяется по формуле (1.13). Для верхней палубы, предназначенной для перевозки круглого леса или кокса, давление груза можно уменьшить на 30 %.

При определении размеров продольных связей верхней палубы следует учитывать, что они испытывают не только местные нагрузки, но и нагрузки от общего продольного изгиба корпуса судна, поэтому размеры продольных связей далее будут уточняться в процессе анализа эквивалентного бруса корпуса.

Толщина настила палуб и платформ определяется по формуле (1.16), в которой $m = 15,8$. Коэффициент k_σ для средней части судна можно определить по рис. 4.7. Кроме того, минимальная толщина настилов s_{\min} определяется по табл. 4.1 (2.6.4.1-).

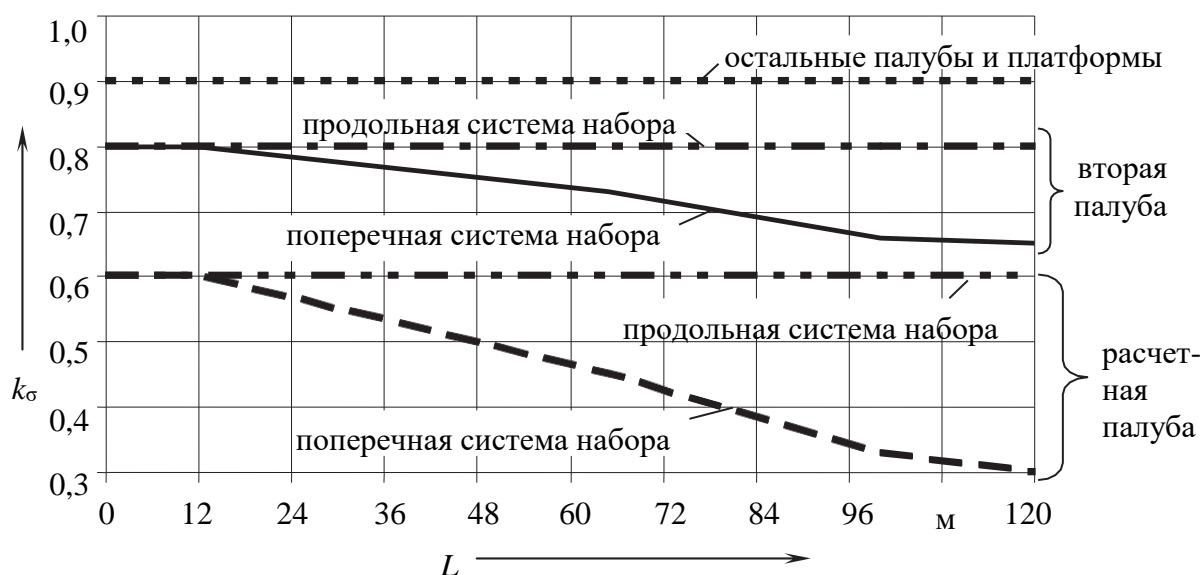


Рис. 4.7. Определение коэффициента k_{σ} для палуб

Если толщина настила расчетной палубы принимается меньше толщины обшивки борта, то необходим палубный стрингер. Его толщина должна быть не менее толщины бортовой обшивки, а ширина (мм) определяется из следующих условий:

$$b \geq 5L + 800, \quad b \geq 1800.$$

Профиль подпалубных балок подбирается по формулам (1.18) – (1.20) при следующих коэффициентах (2.6.4.2-):

- для продольных подпалубных балок $m = 12$; $k_{\sigma} = 0,45$ (для ВП); $k_{\sigma} = 0,75$ (для остальных палуб);
- для бимсов при поперечной системе набора $m = 10$; $k_{\sigma} = 0,65$;
- для рамных бимсов и полубимсов, поперечных комингсов люков и концевых люковых бимсов ВП $m = 10$; $n = 0,5$; $k_{\sigma} = k_{\tau} = 0,65$;
- для карлингсов и комингс-карлингсов ВП $k_{\sigma} = 0,35$; $k_{\tau} = 0,65$; $n = 0,5$; $m = 10$ (для прерывистых комингс-карлингсов); $m = 12$ (для непрерывных комингс-карлингсов);
- для рамных связей остальных палуб и платформ $k_{\sigma} = k_{\tau} = 0,7$; $m = 10$; $n = 0,5$.

Таблица 4.1

Минимальная толщина настилов палуб s_{\min}

Район	$L < 100$ м	$L \geq 100$ м
ВП между бортом и линией больших вырезов	$s_{\min} = (4 + 0,05L) \sqrt{\eta}$	$s_{\min} = (7 + 0,02L) \sqrt{\eta}$
Вторая палуба, ВП внутри линии больших вырезов	$s_{\min} = (4 + 0,04L) \sqrt{\eta}$	$s_{\min} = (7 + 0,01L) \sqrt{\eta}$
Остальные палубы и платформы	$s_{\min} = (5 + 0,01L) \sqrt{\eta}$	

Если опоры рамных балок не являются жесткими, то подбор их профиля следует выполнять при расчете всего палубного перекрытия как стержневой системы (2.6.4.2). Момент инерции бимсов судна длиной $L \geq 65$ м после расчета эквивалентного бруса следует уточнить из расчета устойчивости палубного перекрытия как стержневой системы*.

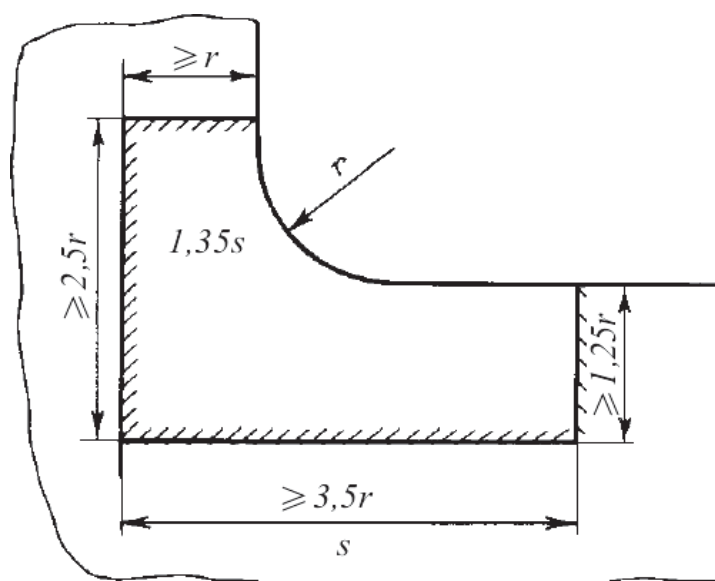


Рис. 4.8. Размеры утолщенного сварного листа

Радиус закругления r углов вырезов грузовых люков ВП должен быть не менее 10 % от ширины выреза (2.6.5.1-). Если угол подкреплен утолщенным сварным листом (рис. 4.8), то радиус можно уменьшить до 7 % от ширины выреза. Для второй палубы радиус r может быть уменьшен вдвое, но не менее 20 см.

Для остальных палуб и платформ, а также для всех палуб судов длиной менее 40 м радиус r должен быть не менее 15 см.

* При выполнении курсового проекта допускается не выполнять расчет перекрытий.

5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЯЗЕЙ ПЕРЕБОРОК

5.1. Конструкции

Простейшая и наиболее распространенная система набора переборок – однородная, состоящая из одинаковых стоек. Она наиболее применима для лесовозов, сухогрузов, навалочников.

Часто применяется гофрированная обшивка переборок, при этом гофры заменяют балки основного набора. Расстояние между вершинами (длина волны) гофра принимается равным двум шпациям.

Если пролет стоек большой, то необходимо устанавливать промежуточные опоры – шельфы. Но следует учитывать, что шельфы сухогрузов уменьшают полезное грузовое пространство. Шельфы ставятся в одной плоскости с бортовыми стрингерами.

У судов для массовых грузов шельфы осложняют зачистку трюмов, поэтому переборки таких судов в трюмах делают с однородной системой набора или с двойной обшивкой.

Для уменьшения высоты профиля шельфов их подкрепляют одной или несколькими промежуточными опорами – рамными стойками. Рамные стойки ставятся в одной плоскости с днищевыми стрингерами. Такая неоднородная система набора характерна для переборок наливных судов, но встречается также у крупных сухогрузных судов открытого типа.

Если рамные стойки и шельфы имеют одинаковую высоту профиля, то их пояски могут образовывать вторую обшивку переборки (сплошную или с вырезами). Такие переборки встречаются, например, у контейнеровозов (рис. 5.1). Двойные переборки с непроницаемыми обшивками образуют коффердамы, обеспечивающие защиту от пожара.

Система набора с горизонтальными балками основного набора встречается у крупнотоннажных судов. Такая конструкция хорошо сочетается с конструкцией борта по продольной системе набора. Такая система набора характерна для продольных переборок танкеров. Продольные переборки с горизонтальными гофрами допускаются у танкеров длиной до 180 м.

По границе гофрированной переборки, идущей вдоль гофров, должны быть предусмотрены плоские переходные участки, конструкция, толщина и подкрепление которых должны удовлетворять требованиям к плоским переборкам (2.7.2.4). Ширина плоских участков должна быть не менее $0,08B$ (у поперечных переборок с вертикальными гофрами) или $0,1D$ (у переборок с горизонтальными гофрами). Закрепление концов гофров должно выполняться непосредственной приваркой их к примыкающей обшивке (настилу), при этом следует обратить внимание на исключение «жестких точек».

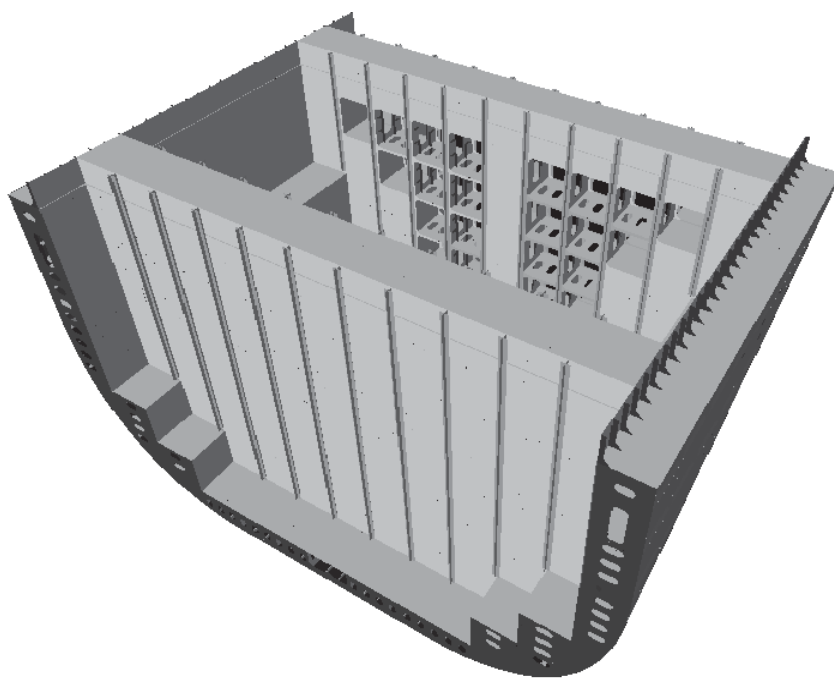


Рис. 5.1. Двойные поперечные переборки контейнеровоза

У судов для навалочных грузов (рис. 5.2) нижний край гофрированной переборки крепится к специальной трапецидальной опоре (3.3.2.10-). Верхний край должен привариваться к поперечной коробчатой балке (подпалубной цистерне) с вертикальными или наклонными стенками высотой, равной примерно одной десятой расстояния между бортовыми подпалубными цистернами (3.3.2.11-).

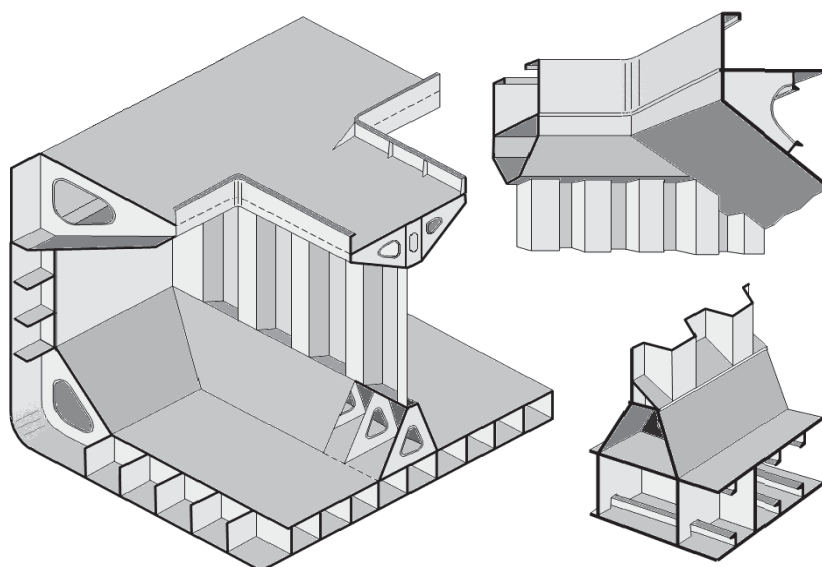


Рис. 5.2. Гофрированная переборка навалочника с трапецидальными опорами

В пересечениях продольных и поперечных переборок должна быть обеспечена конструктивная непрерывность продольных переборок.

Полупереборки должны быть плоскими и подкреплены стойками. Концы всех балок переборок должны закрепляться кницами.

5.2. Размеры связей

Определение расчетного давления на конструкции непроницаемых переборок (со стороны груза или балласта) рассмотрено в пункте 1.5.3 данного пособия. В любом случае это давление должно быть не менее 12 кПа.

Расчетное давление на отбойные переборки и отбойные листы должно быть не менее

$$p_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} \cdot (4 - L / 200) \cdot l \quad \text{для поперечных отбойных переборок,}$$

$$p_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} \cdot (5 - B / 100) \cdot b \quad \text{для продольных отбойных листов,}$$

где l и b – соответственно длина и ширина отсека, м.

Кроме того, расчетное давление на отбойные конструкции должно быть не менее 25 кПа

Ширина нижнего пояса переборки должна быть не менее 0,9 м (2.7.5.1). Ширина верхнего и нижнего поясов обшивки продольных переборок должна быть не менее $0,1D$, однако может быть не более 1,8 м.

Толщина обшивки непроницаемых переборок вычисляется по формуле (1.16), где принимается $m = 15,8$; $k_{\sigma} = 0,9$ (2.7.4.1-). Кроме того, толщина должна быть не менее

$$s_{\min} = 7 \text{ мм} \quad \text{при } L \geq 150 \text{ м,}$$

$$s_{\min} = 4 + 0,02L \quad \text{при } L < 150 \text{ м.}$$

Толщина нижних листов должна быть на 1 мм больше s_{\min} и не меньше 6 мм.

Толщина крайних листов переборки может быть принята равной толщине листов обшивки или настила, к которым они примыкают (при одинаковых шпациях набора и материалах).

Минимальная толщина обшивки и балок набора переборок наливных судов в районе грузовых и балластных танков определяется по формулам (2.2). Толщина обшивки

из коробчатых гофров должна определяться по формуле (1.16), при вычислении следует принимать значение a равным большей из величин b и c (рис. 5.3, а). При

этом должно быть выдержано

$$\text{соотношение } b/s \leq 0,06 \sqrt{\eta}.$$

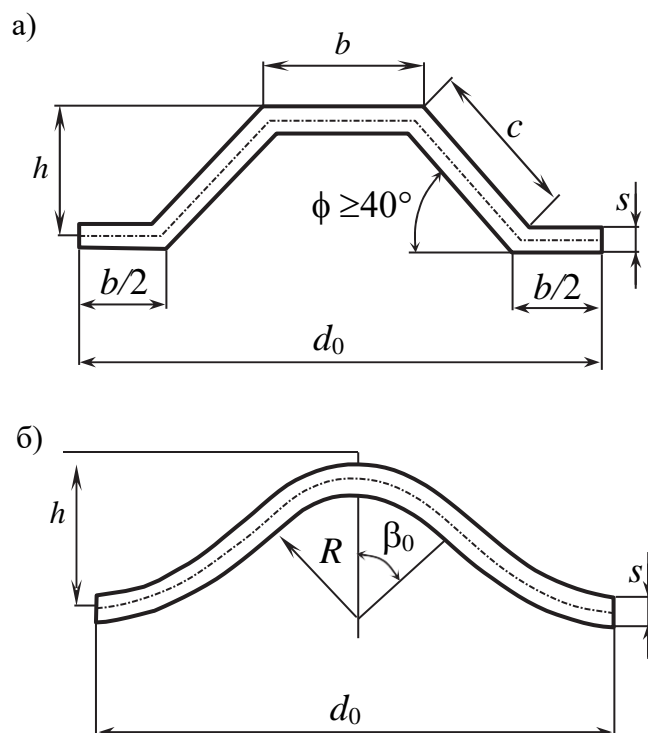


Рис. 5.3. Коробчатые (а)
и волнистые (б) гофры

Толщина обшивки из волнистых гофров должна быть не менее

$$s = 22\beta_0 R \sqrt{\frac{p}{k_\sigma \sigma_n}} + \Delta s,$$

где β_0 – половина угла раствора гофра (рис. 5.3, б), рад; R – радиус гофра, м;
 $k_\sigma = 0,9$.

При этом должно быть выдержано соотношение

$$R/s \leq 17/R_{eH}.$$

Профиль балок основного набора переборок определяется по моменту сопротивления из формулы (1.18), в которой принимается (2.7.4.2-) $m = 12$; $k_\sigma = 0,55$ (для горизонтальных балок продольных переборок танкеров); $k_\sigma = 0,75$ (в остальных случаях). При подборе гофров также используется формула (1.18), в которой принимается $m = 10$; $a = d_0$.

Неразвернутая ширина и фактический момент сопротивления гофра могут быть определены по формулам, приведенным в табл. 5.1, где линейные размеры подставляются в сантиметрах, значения ϕ и β_0 – в градусах, а коэффициент γ вычисляется по формуле

$$\gamma = 2 \cdot \frac{\beta_0 + 2\beta_0 \cos^2 \beta_0 - 1,5 \sin 2\beta_0}{\cos \beta_0}.$$

Таблица 5.1

Характеристики гофров

Тип гофра	Неразвернутая ширина, см	Момент сопротивления, см ³
Коробчатый	$d_0 = 2(b + c \cdot \cos \varphi)$	$W_0 = h \cdot s(b + c/3)$
Волнистый	$d_0 = 4R \cdot \sin \beta_0$	$W_0 = \gamma \cdot s \cdot R^2$

Можно предположить, что $b = c$, тогда после определения толщины и требуемого момента сопротивления [из формулы (1.18)] получим высоту по формуле

$$h \geq W / (s(b + c/3)).$$

Для волнистых гофров можно принять $\beta_0 = 45^\circ$, тогда радиус определится по формуле

$$R \geq \sqrt{W/\gamma s}.$$

Балки рамного набора сложных переборок (если переборка имеет и шельфы, и рамные стойки) подбираются на основе расчета перекрытия как стержневой системы.

Если же рамные балки не пересекаются с другими рамными связями, то их размеры должны быть определены в соответствии с указаниями подраздела 1.7 данного пособия. При этом в формулах (1.18) и (1.19) принимается (2.7.4.3-) $k_\sigma = 0,55$ (для шельфов продольных переборок танкеров); $k_\sigma = 0,75$ (в остальных случаях); $k_\tau = 0,75$.

Коэффициенты m и n для рам продольных переборок танкеров принимаются в зависимости от количества распорок в бортовых танках по табл. 5.2, в остальных случаях – по табл. 5.3.

Таблица 5.2

Коэффициенты m и n в зависимости от количества распорок

Балки набора	Параметр	Число распорок			
		0	1	2	3
Рамная стойка	m	11	24	24	24
	n	0,500	0,325	0,300	0,275
Шельф	m	18	36	36	36
	n	0,50	0,35	0,30	0,30

У рамных балок гофрированных переборок в качестве расчетного профиля принимается наименьшее по высоте поперечное сечение.

Таблица 5.3

Коэффициенты m и n в зависимости от места расположения балок

Балки набора		m	n
Рамная стойка	в трюмах или танках	11	0,5
	в твиндеках	10	0,5
Шельф	в цистернах	10	0,5
	в бортовых танках	18	0,5

Стойки полупереборок, поддерживающие рамные и концевые люковые бимсы, должны удовлетворять требованиям для соответствующих пиллерсов (см. раздел 6). Эйлеровы напряжения в стойках должны быть не менее 200η МПа.

6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПИЛЛЕРСОВ И ФАЛЬШБОРТА

6.1. Подбор пиллерсов

Оси пиллерсов в твиндеках и трюме следует располагать на одной вертикали. В трюме пиллерсы опираются на сплошные флоры или стрингеры, а при нагрузке на пиллерс более 250 кН – на их пересечения. Рекомендуется ставить пиллерс в месте пересечения карлингса и рамного бимса (см. рис. 4.2). Если же он поддерживает одну балку, то ее стенка над пиллерсом должна быть подкреплена кницами.

Сечение пиллерсов обычно трубчатое, однако в цистернах оно должно быть открытым. Концы пиллерсов, как правило, закрепляются кницами.

При нагрузке на пиллерс менее 250 кН вместо книц могут быть поставлены накладные или утолщенные вварные листы с диаметром, превышающим наружный диаметр пиллерса на 6 толщин листа. Толщина накладного листа s равна:

$$s \geq \frac{P}{300} + 10,$$

где P – нагрузка на пиллерс.

Нагрузка на пиллерс определяется по следующей формуле (2.9.3-):

$$P = \sum_i p_i S_i,$$

где p_i – расчетное давление на i -ю палубу (платформу), расположенную выше пиллерса, кПа; S_i – площадь части i -й палубы, поддерживаемой пиллерсом, м².

Площадь сечения пиллерса f (см²) определяется методом последовательных приближений из условия (2.9.4-):

$$f \geq \frac{20 P}{\sigma_{cr}} + \Delta f ,$$

где σ_{cr} – критическое напряжение, определяемое в зависимости от эйлерового напряжения σ_e по формулам подраздела 7.5; Δf – надбавка на износ; h_Σ – периметр профиля, мм.

Для открытого профиля принимается в 2 раза меньшая поправка на износ.

Надбавка на износ Δf определяется по формуле

$$\Delta f = 0,01 h_\Sigma \Delta s .$$

В первом приближении можно принять $f = 40 P / R_{eH}$.

Толщина стенки пиллерса должна быть не менее 6 мм, а также соответствовать следующим неравенствам:

- для трубчатых пиллерсов $s \geq d / 50 + 3,5$ (d – наружный диаметр, мм)
- для пиллерсов составного профиля $s \geq h / 50$ (h – высота стенки, мм).

6.2. Проектирование фальшборта

Конструкция фальшборта в средней части судна длиной $L \geq 65$ м должна быть такой, чтобы он не участвовал в общем изгибе корпуса (2.14.1). Это требование обеспечивается щелевым шпигатом – зазором между стенкой фальшборта и верхней кромкой ширстрека (см. рис. 4.1, 4.3). Высота фальшборта должна быть не менее 1 м.

Стенка фальшборта должна подкрепляться стойками, расстояние между которыми $a \leq 1,8$ м (при креплении к фальшборту стенозелей для лесного палубного груза, а также для судов, швартующихся в море, $a \leq 1,2$ м). Стойки должны иметь свободный пояс или отогнутый фланец, которые не привариваются к планширю и палубе. Планширь фальшборта изготавливается из полособульба или из полосы с отогнутым фланцем. Нижняя кромка стенки фальшборта (над щелевым шпигатом) подкрепляется горизонтальным ребром жесткости или фланцем.

У судов, которые при эксплуатации могут швартоваться в море в условиях волнения, фальшборт должен иметь наклон к ДП на одну десятую от своей высоты или отстоять от борта на такое же расстояние.

Минимальная толщина стенки фальшборта s (мм) равна:

$$s = 0,065 L + 1,75 \geq 3 \quad \text{при } L \leq 60 \text{ м,}$$

$$s = 0,025 L + 4 \leq 8,5 \quad \text{при } L > 60 \text{ м.}$$

Расчетной нагрузкой на фальшборт является волновое давление, определяемое по формуле (1.4). Кроме того, давление не должно быть меньше 15 кПа, а также следующих величин:

$$p_{\min} = (0,02 L + 14) \varphi_r \quad \text{при } L < 300 \text{ м,}$$

$$p_{\min} = 20 \varphi_r \quad \text{при } L \geq 300 \text{ м,}$$

где φ_r определяется по формуле (1.7).

Стойки фальшборта должны иметь момент сопротивления в соответствии с формулами (1.18) и (1.20) при $m = 2$, $k_\sigma = 0,65$. Ширина планширя принимается равной ширине верхнего конца стойки.

Если на фальшборт может воздействовать палубный груз, то необходима дополнительная проверка прочности фальшборта на эту нагрузку* с учетом крена и ускорений, определяемых по формулам соответственно (1.10) и (1.8) при коэффициенте допускаемых напряжений $k_\sigma = 0,65$.

7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБЩЕЙ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ КОРПУСА

Корпус большинства судов имеет отношение длины к поперечным размерам больше пяти и достаточно большую поперечную жесткость, обеспечиваемую поперечными переборками, поэтому он достаточно точно моделируется балкой переменного сечения (эквивалентным брусом). Расчет такой балки позволяет оценить общую продольную прочность судна.

Расчет общей продольной прочности включает в себя следующие шаги:

- вычисление расчетных нагрузок, определяющих продольную прочность судна, а именно изгибающих моментов и перерезывающих сил, которые складываются из трех составляющих: на тихой воде; волновых добавок; добавок от ударов волн в носовую оконечность (от слеминга);
- определение требований Правил Регистра в виде условий к моменту сопротивления и моменту инерции сечения эквивалентного бруса, критических и допускаемых напряжений;
- расчет параметров сечения эквивалентного бруса (фактических напряжений, момента сопротивления и момента инерции);

— оценка общей прочности путем сравнения требуемых и фактических параметров. В случае невыполнения хотя бы одного условия следует откорректировать размеры продольных связей и повторить расчет эквивалентного бруса.

7.1. Изгибающие моменты на тихой воде

Если имеются данные о форме корпуса судна (теоретический чертеж) и известно распределение весовой нагрузки по его длине, то вычисление изгибающих моментов и срезающих сил на тихой воде производится путем интегрирования нагрузки по длине судна или интегрированием по статьям нагрузки [2; 9; 16].

В курсовом проекте наибольшие изгибающие моменты на тихой воде M_{sw} (кН·м) в миделевом сечении корпуса допускается определять по приближенным формулам.

Для грузовых судов с МО в средней части значение M_{sw} вычисляется по следующим формулам:

- при перегибе корпуса судна [16]

$$M_{sw} = 0,0715 \Delta L (0,933 - c_b), \quad (7.1)$$

где $\Delta = \rho g c_b L B d$ — весовое водоизмещение судна, кН;

- при прогибе

$$M_{sw}^* = 0,1 M_{sw}. \quad (7.2)$$

При промежуточном положении МО изгибающие моменты, вычисленные по формулам (7.1) и (7.2), уменьшаются на 25 % при смещении МО в корму от миделя на $0,1L$ и на 40 % — при смещении от $0,2L$ до $0,3L$.

Для грузовых судов длиной до 140 м с МО в корме значение M_{sw} вычисляется по следующим формулам:

- при перегибе

$$M_{sw} = 0,0034 \Delta \frac{L^2}{d} (1,15 - c_b);$$

- при прогибе

$$M_{sw}^* = -0,5 M_{sw}.$$

Для грузовых судов длиной более 140 м с МО в корме значение M_{sw} вычисляется по следующим формулам:

- при прогибе

$$M_{sw}^* = -\Delta L / k;$$

- при перегибе

$$M_{sw} = -0,67M_{sw}^*$$

Коэффициент k определяется по судну – прототипу, а если его нет, то по следующим приближенным формулам:

- для сухогрузов

$$k = 0,5L + 10 \quad \text{при } L \leq 200 \text{ м,}$$

$$k = 120 \quad \text{при } L > 200 \text{ м;}$$

- для танкеров

$$k = 0,5L + 50 \quad \text{при } L \leq 200 \text{ м,}$$

$$k = 160 \quad \text{при } L > 200 \text{ м.}$$

7.2. Изгибающие моменты от волнения

Волновые изгибающие моменты M_w (кН·м) в средней части корпусасудна определяются по следующим формулам (1.4.4.1):

- момент, вызывающий перегиб корпуса:

$$M_w = 0,19c_w C_b BL^2; \quad (7.3)$$

- момент, вызывающий прогиб:

$$M_w^* = -0,11c_w (C_b + 0,7)BL^2, \quad (7.4)$$

где c_w – волновой параметр, вычисляемый по формулам (1.6).

Для судов ограниченного района плавания волновые моменты, определенные по формулам (7.3), (7.4), следует откорректировать в соответствии с требованием (1.4.4.3) Правил Регистра.

У судов длиной от 100 до 200 м с большим развалом бортов в носовой оконечности необходимо также учесть изгибающий момент M_F от удара волн в развал бортов по формулам раздела (1.4.5) Правил Регистра*.

7.3. Требования Правил Регистра по обеспечению общей продольной прочности

Требования Правил Регистра к общей продольной прочности (1.4-) распространяются на суда длиной $L \geq 60$ м. Для таких судов требуется выполнение следующих условий:

$$\begin{aligned} W_d^{\text{факт}} &\geq W, & W_b^{\text{факт}} &\geq W, \\ W_d^{\text{факт}} &\geq W^*, & W_b^{\text{факт}} &\geq W^* \end{aligned} \quad (7.5)$$

где $W_d^{\text{факт}}$ и $W_b^{\text{факт}}$ – фактические моменты сопротивления корпуса судна для точек палубы и днища соответственно, см^3 (определяются путем анализа эквивалентного бруса); W и W^* – требуемые моменты сопротивления по критериям прочности при перегибе и прогибе соответственно.

Значения W и W^* определяются по формулам

$$\begin{aligned} W &= \frac{M_{sw} + M_w}{\sigma_{\text{доп}}} \cdot 10^3, \\ W^* &= \frac{|M_{sw}^* + M_w^* + M_F|}{\sigma_{\text{доп}} \pi} \cdot 10^3, \end{aligned}$$

где $\sigma_{\text{доп}} = 175 \text{ МПа}$ – допускаемые напряжения, МПа.

Кроме того, фактические моменты сопротивления корпуса не должны превышать величины

$$W_{\min} = c_w BL^2 (C_b + 0,7) \cdot \eta \quad (7.6)$$

Для судов ограниченного района плавания величину W_{\min} следует откорректировать в соответствии с требованием (1.4.6.7) Правил Регистра.

Момент инерции поперечного сечения корпуса I (см^4), должен быть не менее

$$I_{\min} = 3c_w BL^3 (C_b + 0,7). \quad (7.7)$$

Для судов ограниченного района плавания величину I_{\min} следует откорректировать в соответствии с требованием (1.4.6.9) Правил Регистра.

Для того чтобы определить и выполнить требования к устойчивости отдельных продольных связей корпуса, сначала сформируем расчетную модель – эквивалентный брус.

7.4. Расчет эквивалентного бруса

При расчете эквивалентного бруса вначале следует вычертить все продольные связи, входящие в расчетную модель (рис. 7.1).

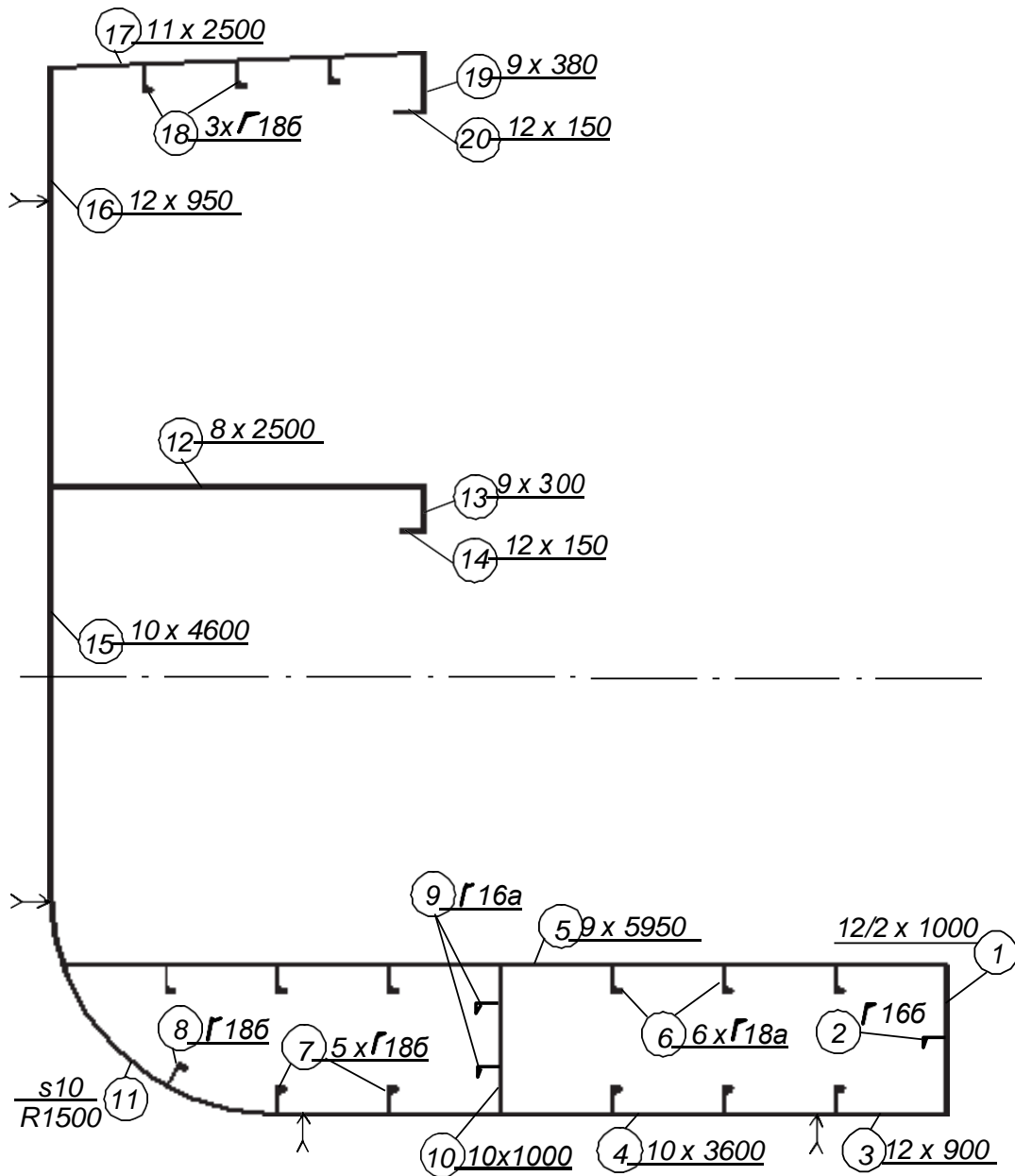


Рис. 7.1. Расчетное сечение корпуса судна

По заданным значениям D , B , углу килеватости днища α и углу наклона борта γ вычерчивается обвод мидель-шпангоута (ввиду симметрии показывается половина сечения). При этом радиус скулы R можно определить по следующим формулам:

- при плоском днище и наклонных бортах

$$R = \sqrt{\frac{d \cdot B}{0,43 - \operatorname{tg} \gamma} \cdot \left(1 - \beta - \left(\frac{d \cdot \operatorname{tg} \gamma}{B} \right) \right)} ;$$

— при килеватом днище и вертикальных бортах

$$R = \sqrt{\frac{d \cdot B}{0,43 - \operatorname{tg} \alpha} \cdot \left(1 - \beta - \left(\frac{B \cdot \operatorname{tg} \alpha}{4 \cdot d} \right) \right)} ,$$

где β – коэффициент полноты мидель-шпангоута.

Далее наносятся все непрерывные продольные связи, участвующие в общем продольном изгибе судна. К таким связям, в частности, относятся:

— обшивка и продольный набор днища, бортов, продольных переборок, скуловых и подпалубных цистерн;

— настилы;

— продольный набор палуб и второго дна;

— непрерывные продольные комингсы люков и продольные перемычки между парными (тройными) люками (при условии, что эти связи поддерживаются продольными переборками, внутренними бортами или подпалубными цистернами).

Если продольные межлюковые перемычки не поддерживаются продольными переборками, их следует включать в эквивалентный брус не всей площадью сечения $F_{\text{ПМП}}$, а площадью

$$F_{\text{ПМП}} = \xi \cdot F_{\text{ПМП}},$$

где ξ – редуцирующий коэффициент.

Коэффициент ξ определяется по формуле

$$\xi = m + \frac{1}{3} (0,65 + C \cdot b) k_L ,$$

где $m = 0,1$ (для парных люков), $m = 0,12$ (для тройных люков); k_L – коэффициент, определяемый по (1.4.8.2).

В курсовом проекте допускается принять $k_L = 1$.

Вырезы в палубах длиной более 2,5 м и (или) шириной более 1,2 м следует учитывать в эквивалентном брус (1.4.8.3).

На чертеже эквивалентного бруса необходимо пронумеровать все продольные связи, проставить размеры их сечений в сантиметрах (см. рис. 7.1).

Далее вычисляются геометрические характеристики эквивалентного бруса. Расчет оформляется в виде табл. 7.1.

Таблица 7.1

Расчет эквивалентного бруса

№	Наименование и размеры, см	Площадь сечения f_i , см ²	Расстояние от оси сравнения, z_i , м	Статический момент $f_i \cdot z_i$, м·см ²	Моменты инерции, м ² ·см ²		Расстояние от нейтральной оси z_i , м	Напряжения σ_i , МПа		
					переносный $f_i \cdot z_i^2$	собственный i_c		при прогибе	при перегибе	критические
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	ВК, 0,6х100	60	0,5	30	15	5				
2	р.ж. ВК, п/б 16б	10,58	0,5	5,29	2,65	0				
3	ГК, 1,2х90	108	0	0	0	0				
4	Обшивка днища, 1,0х360	360	0	0	0	0				
5	Настил 2 дна, 0,9х595	535,5	1	535,5	535,5	0				
6	Прод. балки 2 дна, 6 х п/б 18а	133,2	0,89	118,55	105,5	0,43				
7	Прод. балки днища, 5 х п/б 18б	129	0,11	14,2	1,56	0,42				
8	Прод. балка днища, п/б 18б	21	0,25	6,45	1,61	0,07				
9	р.ж. дн. стрингера, 2 х п/б 16а	35,92	0,5	17,96	8,98	1,44				
10	Днищевой стрингер, 1,0х100	100	0,5	50	25	8,33				
11	Скуловой лист, $s1,0 R150$	235,6	0,44	103,66	45,6	40,37				
12	Настил палубы, 0,8х250	200	4,1	820	3362	0				
...										
19	Стенка карлингса, 0,9х38	34,2	6,86	234,6	1609,4	0,41				
20	Полка карлингса, 1,2х15	18	6,67	120,1	800,8	0				
Суммы по графам		A = 2957,2	—	B = 7129,2	C = 36291					

Собственные моменты инерции сечений вертикальных элементов (графа 7 табл. 7.1) определяются по формуле

$$i_c = 100s \cdot h^3 / 12,$$

где s – толщина связи, см; h – высота, м.

Собственные моменты инерции сечений наклонных листов определяются по формуле

$$i_c = \frac{100 s \cdot l \cdot h^2}{12} = \frac{100 s \cdot b \cdot h^2}{12 \cdot \cos \alpha},$$

где s – толщина связи, см; l, h, b – соответственно длина, высота и ширина элемента, м; α – угол наклона элемента к ОП.

Собственными моментами инерции горизонтальных связей можно пренебречь ввиду их малости.

Собственные моменты инерции профилей катаных балок приведены в сортаментах (приложение 7). Собственный момент инерции скулового пояса в виде четверти окружности можно определить по формуле

$$i_c = 14,88 s \cdot R^3,$$

где R – радиус скулы, м; s – толщина скулового листа, см.

Аппликата центра тяжести скулового листа от ОП определяется по формуле

$$z_{ск} = 0,293 \cdot R.$$

После заполнения первых семи граф табл. 7.1 суммируются площади сечения связей, статические моменты и моменты инерции (соответствующие суммы обозначены в таблице как A, B и C).

Далее определяются:

– отстояние нейтральной оси эквивалентного бруса от оси сравнения, м:

$$e = B / A;$$

– момент инерции сечения бруса относительно нейтральной оси:

$$I = 2 \cdot (C - B^2 / A) = 2 \cdot (C - e \cdot B).$$

После нахождения положения нейтральной оси вычисляется расстояние от нее до центра тяжести каждой i -й связи и заполняется графа 8

табл. 7.1. При этом значения z_i вниз от нейтральной оси принимаются отрицательными.

Далее определяются фактические моменты сопротивления, см³:

$$W_{\text{факт}}^b = 100 \cdot \frac{I}{z_b}, \quad W_{\text{факт}}^d = 100 \cdot \frac{I}{z_d},$$

где z_b и z_d – отстояния крайних связей (днища и палубы) от нейтральной оси, м.

Величина z_d отсчитывается от нейтральной оси до точки пересечения ширстрека с палубным стрингером. Для судов с надпалубными непрерывными продольными связями (например, непрерывные продольные комингсы, тронки и т.п.) величина z_d определяется по формуле

$$z_d = z_c \left(0,9 + \frac{0,2y_c}{B} \right),$$

где z_c – отстояние верхней кромки надпалубной связи от нейтральной оси, м; y_c – горизонтальное отстояние ближней к борту точки верхней кромки надпалубной связи от ДП, м.

После определения моментов инерции и сопротивления сечения эквивалентного бруса проверяются условия (7.5) – (7.7). При невыполнении этих условий следует скорректировать размеры продольных связей, наиболее сильно влияющих на параметры эквивалентного бруса (например, на толщину настила ВП).

Далее вычисляются напряжения в продольных связях σ_i (графы 9, 10 табл. 7.1):

$$\sigma_i = 10 \frac{M \cdot z_i}{I},$$

где M – расчетный изгибающий момент, кН·м; z_i – отстояние i -й связи от нейтральной оси, м.

Расчетный изгибающий момент определяется для двух случаев:

– при перегибе судна на вершине волны (наибольший):

$$M = M_{sw} + M_w;$$

– при прогибе судна на подошве волны (наименьший):

$$M = M_{sw}^* + M_w^* + M_F.$$

7.5. Проверка устойчивости связей, испытывающих сжатие. Уточнение размеров связей

Проверке на устойчивость должны подвергаться все связи, испытывающие значительные сжимающие или сдвигающие нагрузки. Особенно это требование касается продольных непрерывных связей в средней части корпуса, наиболее удаленных от нейтральной оси поперечного сечения судна (связи ВП и днища), т.к. потеря их устойчивости может вызвать перелом всего корпуса судна.

Устойчивость продольной связи корпуса считается обеспеченной, если выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} |k\sigma_c| &\leq \sigma_{кр}, \\ \tau_c &\leq \tau_{кр}, \end{aligned} \quad (7.8)$$

где σ_c и τ_c – соответственно сжимающие и касательные напряжения в связи, полученные из расчета эквивалентного бруса, Мпа; $\sigma_{кр}$ и $\tau_{кр}$ – критические напряжения; $k = 1,1$ (для продольных балок основного набора), $k = 1$ (для пластин и продольных балок рамного набора) (1.6.5.2-).

На устойчивость по касательным напряжениям* в первую очередь проверяется обшивка борта в районе действия наибольшей перерезывающей силы (примерно на расстоянии четверти длины корпуса судна от перпендикуляров).

Критические напряжения вычисляются по следующим формулам (1.6.5.3):

$$\begin{aligned} \sigma_{кр} &= \sigma_{\text{Э}} \quad \text{при} \quad \sigma_{\text{Э}} \leq R_{eH} / 2, \\ \sigma_{кр} &= R_{eH} \left(1 - \frac{R_{eH}}{4\sigma_{\text{Э}}} \right) \quad \text{при} \quad \sigma_{\text{Э}} > R_{eH} / 2, \\ \tau_{кр} &= \tau_{\text{Э}} \quad \text{при} \quad \tau_{\text{Э}} \leq 0,29R_{eH}, \\ \tau_{кр} &= R_{eH} \left(0,58 - 0,08 \frac{R_{eH}}{\tau_{\text{Э}}} \right) \quad \text{при} \quad \tau_{\text{Э}} > 0,29R_{eH}, \end{aligned}$$

где $\sigma_{\text{Э}}$, $\tau_{\text{Э}}$ – эйлеровы нормальные и касательные напряжения соответственно.

Эйлерово нормальное напряжение для пластины можно определить по формуле

$$\sigma_{\text{э}} = 0,185 n(s' / \phi)^2,$$

где $n = 4$ при сжатии вдоль длинной стороны пластины (при продольной

системе набора), $n = \varepsilon \cdot \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right)^2$ при сжатии вдоль короткой стороны

пластины (при поперечной системе набора); s' – толщина пластины, уменьшенная на коррозионный износ Δs , мм; a, b – размеры пластины соответственно вдоль и поперек сжатия, м; ε – коэффициент, учитывающий профиль подкрепляющих пластину балок основного набора.

Коэффициент ε принимает следующие значения:

– $\varepsilon = 1,05$ для пластины, подкрепленной балками полосового профиля;

– $\varepsilon = 1,1$ при подкреплении балками из полособульба;

– $\varepsilon = 1,21$ при подкреплении балками таврового или симметричного полособульбового профиля;

– $\varepsilon = 1,3$ для пластины, подкрепленной рамным набором (1.6.5.5-).

Эйлерово напряжение продольной устойчивости балки определяется в виде (1.6.5.4-)

$$\sigma_{\text{э}} = 206 \frac{i}{f l^2},$$

где i – момент инерции сечения с учетом присоединенного пояска и коррозионного износа, см^4 ; f – площадь сечения с учетом присоединенного пояска и коррозионного износа, см^2 ; l – пролет балки, м.

Для проверки боковой устойчивости балок следует использовать требование (1.6.5.4.2) Правил Регистра*.

Для стенки рамной балки эйлерово напряжение определяется в виде

$$\sigma_{\text{э}} = 7,83 \cdot 10^{-5} \frac{s^2}{h^3},$$

где s, h – соответственно толщина и высота стенки, мм.

Критические напряжения вычисляются для наиболее ответственных связей эквивалентного бруса (настил ВП, обшивка днища, продольные балки ВП и днища, ширстрек, верхний пояс обшивки продольной переборки, настил второго дна и т.п.). После занесения результатов в графу 11 табл. 7.1 критические напряжения сравниваются с абсолютными значениями сжимающих (отрицательных) напряжений. Если условия

(7.8) не выполняются, следует изменить размеры сечений соответствующих связей и сделать расчет эквивалентного бруса во втором приближении [2; 9; 16].