РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

Электронный аналог печатного издания,
утвержденного 09.09.04

СБОРНИК НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Книга четырнадцатая

НД No 2-139902-019

Санкт-Петербург
2004

В сборниках нормативно-методических материалов публикуются расчетные методики, одобренные Регистром, инструкции, другие нормативные материалы, а также материалы, поясняющие содержание требований Правил РС.

Настоящий сборник является продолжением серии сборников, изданных в 1979–2004 гг., и включает:

Методику расчета местной вибрационной прочности корпусных конструкций;

Методику расчета параметров общей ходовой вибрации корпуса судна;

Инструкцию по проведению формализованной оценки безопасности эксплуатации судовых аммиачных холодильных установок;

Методику проведения расчетов на прочность воздушных труб, подверженных волновому воздействию на открытых частях палуб в соответствии с УТ МАКО S27;

Альбом напряженно-деформированного состояния типовых узлов судовых котлов и сосудов под давлением.

ISBN 5-89331-113-2 © Российский морской регистр судоходства, 2004

СОДЕРЖАНИЕ

Методика расчета местной вибрационной прочности корпусных конструкций

Введение.....7
1 Область распространения.....7
2 Определения.....8
3 Основные положения.....9
3.1 Усилия, вызывающие местную вибрацию.....9
3.2 Конструкции, подлежащие расчету.....11
3.3 Объем выполняемых расчетов.....12
3.4 Критерии вибрационной прочности.....19
3.5 Требования к конструктивному оформлению узлов сварных соединений в районах, подверженных интенсивной вибрации.....20
4 Методы расчета вибрации основных конструкций судового корпуса.....20
4.1 Вибрация пластин и балок набора.....20
4.2 Вибрация перекрытий.....30
5 Определение возмущающих усилий.....35
5.1 Пульсирующие гидродинамические давления, передаваемые на корпус судна работающим гребным винтом.....35
5.2 Инерционные усилия жидкости, обусловленные общей вибрацией корпуса судна.....36
Приложение А Теоретические основы расчетов местной вибрации.....38
А1 Присоединенные массы жидкости в расчетах вибрации.....38
А2 Методы расчета вибрации корпусных конструкций.....43
Приложение Б Влияние технологических факторов на свободные колебания корпусных конструкций. Запасы по частоте.....52
Б1 Влияние начальной погиби и остаточных напряжений на свободные колебания конструкций.....53
Б2 Влияние переката листов и отступлений от чертежа в размерах конструкций.....55
Б3 Коэффициенты запаса по частоте.....55
Приложение В Рассеяние энергии при колебаниях.....56
Приложение Г Критерии вибрационной прочности.....57
Приложение Д Принципы рационального конструирования узлов в районе действия вибрационных нагрузок.....59

Методика расчета параметров общей ходовой вибрации корпуса судна

Введение.....62
1 Область применения.....62
2 Определения.....62
3 Общие положения.....63
4 Усилия, вызывающие общую ходовую вибрацию.....64
4.1 Усилия, обусловленные работой гребных винтов.....64
4.2 Усилия, обусловленные работой дизелей.....67
5 Расчетные модели корпуса.....68
5.1 Балочная расчетная модель.....68
5.2 Плоская расчетная модель.....71
5.3 Пространственная расчетная модель.....72
6 Алгоритм расчета параметров общей ходовой вибрации корпуса.....74
7 Расчет параметров общей вибрации на стадии технического проекта.....75
Приложение А Теоретические основы расчетного прогнозирования параметров общей ходовой вибрации корпуса.....76
А1 Периодические усилия, возникающие на гребном винте.....76
А2 Редукционные коэффициенты по изгибу $K_И$ и сдвигу K_C.....81
А3 Присоединенные массы воды.....83
Приложение Б Пример сопоставления расчетных и экспериментальных параметров вибрации.....85
Б1 Сопоставление собственных частот корпуса, вычисленных по приближенным формулам, с результатами экспериментальных замеров.....85
Б2 Пример сопоставления экспериментальных значений с результатами расчета параметров общей вибрации, вычисляемых с использованием балочной схематизации корпуса.....85
Приложение В Коэффициенты матриц жесткостей и масс балочного конечного элемента.....90

Список литературы.....92

Инструкция по проведению формализованной оценки безопасности эксплуатации судовых аммиачных холодильных установок.....95
Приложение 1 Опросный лист для проведения формализованной оценки безопасности эксплуатации судовой аммиачной холодильной установки.....104
Приложение 2 Акт освидетельствования судна.....156

Методика проведения расчетов на прочность воздушных труб, подверженных волновому воздействию на открытых частях палуб в соответствии с УТ МАКО S27 159

Альбом напряженно-деформированного состояния типовых узлов судовых котлов и сосудов под давлением 165

Настоящие методики разработаны по заказу ФГУ «Российский морской регистр судоходства» ФГУП ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова в рамках НИР 2003 г. и предназначены для выполнения проектных расчетов вибрации корпусных конструкций судов в соответствии с положениями 1.5 части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (Правила РС).

Использование данных методик при выполнении расчетов вибрации в процессе проектирования судна позволяют определить необходимость мероприятий по предотвращению повышенной вибрации корпусных конструкций.

Методики могут использоваться для оценки эффективности мероприятий по снижению вибрации до допускаемых нормами уровней на существующем судне.

Указания по использованию данных методик будут введены в Правила РС Бюллетенем изменений и дополнений № 2.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МЕСТНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Отменено в связи с потерей актуальности

ВВЕДЕНИЕ

Методика расчета местной вибрационной прочности корпусных конструкций[1] содержит положения по выполнению расчетов собственной частоты колебаний основных конструкций корпуса судна и амплитуды их вынужденных колебаний, а также содержит рекомендации для обеспечения вибрационной прочности указанных конструкций корпуса.

Во избежание усталостных повреждений корпусных конструкций, подверженных воздействию вибрационных нагрузок, а также для обеспечения нормальных условий работы установленного на них оборудования, в процессе проектирования судна должны быть приняты меры, исключающие возможность возникновения недопустимой вибрации этих конструкций.

В настоящей Методике содержатся:

основные положения по выполнению расчетов вибрации корпусных конструкций;

теоретические обоснования расчетов местной вибрации корпусных конструкций с учетом влияния основных технологических и эксплуатационных факторов;

расчетные формулы по определению свободной и вынужденной вибрации конструкций, а также возмущающих усилий;

рекомендации по рациональному конструированию узлов в районах интенсивной вибрации.

1 ОБЛАСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

1.1 Настоящая Методика предназначена для проектных расчетов вибрации корпусных конструкций судов в соответствии с положениями 1.5 части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства[2], регламентирующих допустимые значения параметров вибрации корпусных конструкций.

1.2 В настоящей Методике приведен порядок выполнения расчетов вибрации в процессе проектирования судна с целью определения необходимости и достаточности мероприятий по предотвращению на нем повышен-

[1] В дальнейшем – настоящая Методика.

[2] В дальнейшем – Правила РС.

ной вибрации конструкций и, в случае необходимости, по снижению ее до допустимых пределов.

1.3 Область распространения настоящей Методики – металлические суда длиной более 30 м.

2 ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Общая ходовая вибрация – колебания корпуса судна, вызванные работающими гребными винтами и главными двигателями.

Местная вибрация – колебания корпусных конструкций и их элементов (пластин, ребер жесткости, балок набора, перекрытий и т. п.), возбуждаемые гребными винтами, неуравновешенными механизмами, либо общей ходовой вибрацией корпуса.

Частота первого порядка – частота, равная частоте вращения гребного винта или коленчатого вала двигателя.

Частота лопастного порядка – частота, равная частоте вращения гребного винта, умноженная на число его лопастей.

Частоты основных порядков дизелей – частоты первого и второго порядков по отношению к частоте вращения коленчатого вала, а также частота, порядок которой равен числу цилиндров (для двухтактных дизелей) либо половине от числа цилиндров (для четырехтактных дизелей).

Амплитуда колебаний – амплитудное (пиковое) значение виброперемещения.

Панель – участок перекрытия, ограниченный балками основного набора и подкрепленный ребрами жесткости одного направления.

Внутренняя конструкция – конструкция, не соприкасающаяся с забортной водой.

Присоединенная масса – масса жидкости, условно присоединяемая к массе колеблющейся в ней (соприкасающейся с нею) конструкции, кинетическая энергия которой эквивалентна кинетической энергии жидкости, приведенной в движение колебаниями в ней этой конструкции.

Коэффициент запаса по частоте – коэффициент, показывающий насколько частота свободных колебаний конструкции должна отличаться от частоты возмущающей силы, чтобы полностью исключить резонансное усиление при ее вынужденных колебаниях.

Основные обозначения

λ – частота основного тона колебаний конструкции;

a – короткая сторона пластины, м;

$в$ – длинная сторона пластины, длина ребра жесткости, ширина панели, м;

l – длина панели, м;

h – толщина пластины (обшивки, настила) панели, м;

E – модуль нормальной упругости, Па;

μ – коэффициент Пуассона;

ρ – плотность материала конструкции, кг/м^3;

I – момент инерции балки набора (ребра жесткости, перекрестной связи и т. п.) с присоединенным пояском обшивки (настила), м^4;

ω – частота возмущающей силы, Гц;

$\overline{\omega} = 2\pi\omega$ – круговая частота возмущающей силы, Гц;

w – амплитуда вынужденных колебаний конструкции, м;

η – коэффициент присоединенных масс жидкости.

Система единиц

В качестве системы единиц в настоящей Методике используется система СИ.

3 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1 УСИЛИЯ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ МЕСТНУЮ ВИБРАЦИЮ

3.1.1 Основными возмущающими усилиями, вызывающими местную вибрацию, являются:

.1 пульсирующие гидродинамические давления лопастного и удвоенного лопастного порядков от работающих гребных винтов;

.2 усилия и моменты основных порядков дизелей и других неуравновешенных механизмов;

.3 инерционные усилия, обусловленные кинематическим возбуждением – колебаниями опорного контура конструкции и окружающей жидкости вследствие общей ходовой вибрации корпуса и (или) работы неуравновешенных механизмов.

3.1.2 Пульсирующие гидродинамические давления, действующие на наружную обшивку корпуса судна.

3.1.2.1 Возникающие при работе винта пульсирующие гидродинамические давления передаются через воду на обшивку корпуса и выступающие части (в случае их попадания в зону давлений от винта). Пульсирующие давления зависят от числа лопастей гребного винта и его геометрии, от зазора между винтом и корпусом, от неравномерности поля скоростей в диске винта, наличия кавитации на лопастях, глубины фарватера и т. п.

3.1.2.2 Частоты пульсирующих давлений в расчетах местной вибрации принимаются равными лопастной и удвоенной лопастной частоте (первые две гармоники давлений);

3.1.2.3 Район непосредственного воздействия пульсирующих давлений от работы гребных винтов принимается равным (район 1 на рис. 3.1.4):

по длине судна: по одному диаметру винта в нос и в корму от его диска – для некавитирующих гребных винтов; по полтора диаметра – для кавитирующих гребных винтов;

по ширине судна: от скулы до скулы или части корпуса судна, расположенной ниже ватерлинии, соответствующей водоизмещению в полном грузу, если явно выраженные скулы в этом районе отсутствуют.

3.1.2.4 Величины пульсирующих гидродинамических давлений от работы гребных винтов определяются по формулам, приведенным в Методике расчета общей вибрации корпуса.

Примечания:

1. В случае, если на судне имеется несколько винтов, расположенных в разных сечениях по длине судна, суммирование давлений при их совместной работе не производится, даже если районы действия пульсирующих давлений перекрывают друг друга.

2. При эксплуатации судна на мелководье пульсирующие давления от работы гребных винтов следует определять с учетом глубины фарватера.

3. Если винт работает в насадке, максимальные пульсирующие давления, передаваемые на обшивку корпуса, приближенно следует считать вдвое меньшими тех давлений, которые передавались бы на нее при отсутствии насадки.

3.1.3 Возмущающие усилия, обусловленные работой неуравновешенных механизмов.

Неуравновешенные усилия от работы механизмов, воздействуя непосредственно на перекрытие, на котором установлен механизм, возбуждают его вибрацию, а также общую вибрацию корпуса судна. Пластины и ребра жесткости обшивки такого перекрытия и близлежащих конструкций возбуждаются кинематически вследствие колебаний их опорного контура. Величины усилий от работы неуравновешенных механизмов и соответствующие им частоты принимаются по технической документации на поставку этих механизмов.

3.1.4 Инерционные усилия, обусловленные общей ходовой вибрацией.

При кинематическом возбуждении конструкции, обусловленном общей ходовой вибрацией корпуса, возмущающими усилиями являются силы инерции самой конструкции с расположенными на ней грузами (твердыми, жидкими, сыпучими) и инерционные усилия забортной воды. Величина этих инерционных усилий, вызывающих вибрацию корпусных конструкций, зависит как от величины масс, вовлеченных в колебательный процесс, так и от параметров (амплитуды и частоты) вибрации корпуса.

Район распространения интенсивной общей вибрации лопастного порядка, в котором должны производиться расчеты местной вибрации, простирается на длину – $L/8$, считая от крайней кормовой точки корпуса (район 3 на рис. 3.1.4). Общая ходовая вибрация с удвоенной лопастной частотой проявляется в корме (район 2 на рис. 3.1.4) протяженностью – $L/16$. Ориентировочно, соотношение амплитуд общей вибрации корпуса на лопастной (w_{01}) и удвоенной лопастной (w_{02}) частотах может быть принято равным: $w_{02} = (0{,}5 \ldots 0{,}7)\, w_{01}$.

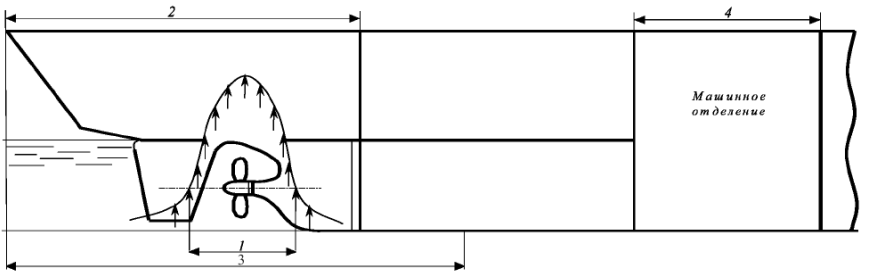


Рис. 3.1.4 Районы по длине корпуса, в которых производится проверка местной вибрации:

1 – район непосредственного действия пульсирующих гидродинамических давлений;

2 – район кормовой оконечности, подверженный общей вибрации с удвоенной лопастной частотой;

3 – район кормовой оконечности с интенсивной общей вибрацией лопастной частоты;

4 – район машинного отделения (МО)

Район и параметры распространения интенсивной общей вибрации корпуса также могут быть установлены на основании расчетов общей вибрации или натурных испытаний однотипных судов. При отсутствии таких данных параметры общей вибрации должны приниматься в соответствии с техническими нормами вибрации Правил РС для жестких связей корпуса.

Примечания:

1. Величины присоединенных масс воды корпуса и массы жидкости в цистернах, создающих основные инерционные усилия вследствие общей вибрации корпуса, определяются по формулам, приведенным в разд. 5 настоящей Методики.

2. Для судов, эксплуатирующихся на мелководье, присоединенные массы забортной воды должны определяться с учетом влияния на них ограниченной глубины фарватера.

3.2 КОНСТРУКЦИИ, ПОДЛЕЖАЩИЕ РАСЧЕТУ

3.2.1 К конструкциям, подверженным действию интенсивных вибрационных нагрузок и подлежащих соответствующим расчетам, относятся (см. рис. 3.1.4 и табл. 3.2.2):

днищевые конструкции в районе расположения гребных винтов, подвергающиеся непосредственному воздействию пульсирующих гидродинамических давлений от работы винтов и инерционных усилий, обусловленных общей вибрацией корпуса судна (район 1);

конструкции кормовой оконечности, подвергающиеся интенсивному воздействию инерционных усилий, вызываемых общей вибрацией (районы 2 и 3);

корпусные конструкции машинного отделения, находящиеся в районе установки неуравновешенных механизмов (район 4);

конструкции выступающих частей, подвергающиеся действию пульсирующих давлений от работы гребных винтов или кинематическому возбуждению, обусловленному общей вибрацией (район 2).

3.2.2 Элементами корпусных конструкций, для которых производятся расчеты местной вибрации, являются:

пластины наружной обшивки, настила перекрытий и двойного дна, полотнищ переборок и платформ, стенок балок основного набора и т. п.;

ребра жесткости, подкрепляющие пластины;

балки основного набора;

перекрытия в целом.

Примечание.

Местная вибрация внутренних конструкций может не проверяться в случае, если расчетные амплитуды общей вибрации в месте их расположения не превышают половины от допускаемых значений требуемых Правилами РС норм.

3.3 ОБЪЕМ ВЫПОЛНЯЕМЫХ РАСЧЕТОВ

3.3.1 Основные положения по выполнению расчетов местной вибрации приведены в табл. 3.2.2.

3.3.2 Для предотвращения резонансов, являющихся, как правило, основной причиной повышенной вибрации, выполняются расчеты собственных частот корпусных конструкций и их элементов, перечисленных в 3.2.2, и производится сравнение их с замерами частот возмущающих усилий. Условия предотвращения резонансов для обеспечения допустимой местной вибрации конструкций определяются величинами коэффициентов запаса по частоте, приведенными в 3.3.7.

Примечания:

1. При выполнении расчетов должно учитываться влияние присоединенных масс жидкости.

2. При расположении машинного отделения с неуравновешенными механизмами в районе корпуса с интенсивной общей вибрацией для предотвращения резонансов его конструкций необходимо удовлетворить требованиям, предъявляемым как к конструкциям, подвергающимся действию инерционных усилий от общей ходовой вибрации, так и к конструкциям, подвергающимся воздействию неуравновешенных усилий от работы механизмов.

3.3.3 В дополнение к проверке отсутствия резонанса для элементов конструкций, непосредственно воспринимающих действие пульсирующих давлений от работы гребных винтов, должен быть выполнен расчет местной вибрационной прочности на совместное действие периодических нагрузок от работы винтов и инерционных усилий от общей вибрации. Вибрационная прочность конструкции считается обеспеченной, если нормальные напряжения в районе сварных соединений этих конструкций при их вынужденных

Таблица 3.2.2

Рекомендации и основные положения по выполнению расчетов местной вибрации корпусных конструкций

Тип конструкции	Районы корпуса, в которых проверяется местная вибрация*)	Характер возмущающих усилий	Коэффициент запаса по частоте	Частоты возмущающих усилий	Условия, необходимые и достаточные для обеспечения допустимой вибрации конструкций		Граничные условия, принимаемые в расчете	Примечание
					Условие предотвращения резонанса	Условие обеспечения вибрационной прочности		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пластины и ребра жесткости наружной обшивки корпуса и выступающих частей	Район 1	Совместное действие пульсирующих давлений и инерционных усилий, вызываемых общей вибрацией	κ=1,5 – для пластин; κ=1,3 – для ребер жесткости и балок набора	$nz/60$ $2nz/60$	$\lambda \geq 2\kappa n_{max} z/60$	Расчет вынужденной вибрации на действие усилий, указанных в столбце 3, с частотой $nz/60$ и удовлетворение критериям прочности (см. 3.4.1)	1. В расчетах свободных колебаний: пластины свободно оперты на жестком контуре; ребра – свободно оперты. 2. В расчетах вынужденной вибрации: пластины жестко заделаны на упругих ребрах; ребра – свободно оперты	Величина пульсирующих давлений на корпусе от винта в насадке, принимается равной половине их максимального значения, которое было бы при отсутствии насадки

*) Протяженность и нумерация районов, в которых производится проверка местной вибрации корпуса, указаны в соответствии с рис. 3.1.4.

Продолжение табл. 3.2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Район 2, за исключением района 1	Инерционные усилия, вызываемые общей вибрацией	То же	То же	То же	—	Пластины свободно оперты на жестком контуре; ребра свободно оперты на опорах. Шпангоуты жестко заделаны на скуле, условия их заделки на палубе определяются конструкцией крепления	
	Район 3, за исключением района 2	То же	То же	$nz/60$	—	$\lambda \geq \kappa n_{max} z/60$	То же	
Элементы внутренних конструкций корпуса (за исключением перекрытий в целом)	Район 2	Инерционные усилия, вызываемые общей вибрацией	κ=1,5 – для пластин; κ=1,3 – для ребер жесткости и балок набора	$nz/60$ $2nz/60$	$\lambda \geq 2\kappa n_{max} z/60$	В случае невыполнения условий предотвращения резонанса требуется произвести расчет вынужденной вибрации на действие инерционных усилий с резонансной частотой и удовлетворить критериям прочности (см. 3.4.1)	Пластины конструкций переборок и платформ жестко заделаны на упругих ребрах (стойках). Ребра жесткости свободно оперты, если конструктивно не созданы иные граничные условия. (Подробнее о граничных условиях см. примечания 1–3 к 3.3.3)	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Район 3, за исключением района 2	То же	То же	$nz/60$	$\lambda\, \kappa \cdot n_{max} \cdot z/60$	То же	То же	
	Район 4 (МО)	Инерционные усилия, вызываемые вибрацией перекрытия МО при действии неуравновешенных усилий от работы механизмов	То же	ω_p	$\lambda\, \kappa\, \omega_p$	То же	То же	1. На элементы конструкций перекрытия МО распространяются также требования, относящиеся к району 2 или 3, если МО находится в соответствующем районе

Продолжение табл. 3.2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Перекрытия	Районы 2, 3	Инерционные усилия, вызываемые общей вибрацией корпуса	κ=1,3	$nz/60$	$\lambda \geq \kappa n_i z/60$ или $\lambda \leq n_i z/60\kappa$	В случае невыполнения условия предотвращения резонанса требуется произвести расчет вынужденной вибрации на действие инерционных усилий с резонансной частотой и удовлетворить критериям допустимой вибрации (3.4.2)	Граничные условия определяются исходя из рассмотрения конструктивных особенностей закрепления перекрытия по контуру или путем расчета его колебаний совместно с соседними конструкциями	n_i – числа оборотов гребных винтов на спецификационных режимах хода
	Район 4 (МО)	Неуравновешенные усилия от работы механизмов	То же	ω_p	$\lambda \geq \kappa\omega_p$ или $\lambda \leq \omega_p/\kappa$	При невыполнении условий предотвращения резонанса требуется произвести расчет вынужденной резонансной вибрации на действие неуравновешенных усилий и удовлетворить критериям допустимости вибрации (3.4.2)	То же	На конструкцию перекрытия МО распространяются также требования, относящиеся к району 2 или 3, если МО находится в соответствующем районе

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кронштейны, насадки гребных винтов и другие консольные конструкции	Район 2	Колебания опорного контура, обусловленные вибрацией корпуса, и пульсирующие давления от гребных винтов	То же	$nz/60$	$\lambda \geq \kappa\, n \cdot z/60$	—	Граничные условия определяются конструкцией закрепления	

В табл. 3.2.2 приняты следующие обозначения:

ω – частота возмущающих усилий;

κ – коэффициент запаса по частоте;

n – число оборотов гребного винта в минуту;

z – число лопастей гребного винта;

λ – частота свободных колебаний конструкции

нерезонансных колебаниях не превышают допускаемых величин, приведенных в табл. 3.3.3.

Таблица 3.3.3

Значения допускаемых напряжений

Материал	Верхний предел текучести, МПа	Допускаемые нормальные напряжения в районе угловых двухсторонних сварных соединений, МПа
Сталь	235 – 390	40
Алюминиевые сплавы	150 – 220	20

Примечания:

1. Частоты свободных колебаний пластин наружной обшивки и подкрепляющего ее набора, расположенных в районе 1 определяются в предположении свободного опирания пластин на жесткий контур и свободного опирания ребер на опоры.

2. При расчете вынужденной вибрации в районе 1 пластины принимаются жестко заделанными на опорном контуре (упругом – при наличии ребер).

3.3.4 В случае невыполнения требуемых запасов по частоте для внутренних конструкций, должен быть произведен расчет их вибрационной прочности на действие инерционных усилий, возникающих при колебаниях опорного контура (общей вибрации корпуса). В этом случае вибрация считается допустимой, если нормальные напряжения в районе сварных соединений этих конструкций при их резонансных колебаниях не превышают допускаемых величин, приведенных в табл. 3.3.3.

Примечания:

1. Расчеты свободной и вынужденной вибрации пластин и ребер жесткости внутренних конструкций необходимо определять с учетом их динамического взаимодействия, считая пластины жестко заделанными на упругих ребрах (стойках). Ребра жесткости (стойки) следует считать свободно опертыми по концам, если нет каких-либо особенностей, касающихся иных граничных условий.

2. Если пролеты соседних пластин существенно отличаются друг от друга, то дополнительно должна быть произведена проверка частот свободных колебаний этих пластин в предположении их свободного опирания на жестком контуре.

3. Частоты свободных колебаний пластин стенок балок основного набора следует определять, считая их:

жестко заделанными на верхней и нижней кромках и свободно опертыми на боковых кромках при наличии второго дна;

жестко заделанными на обшивке и свободно опертыми на пояске и боковых кромках, если нет второго дна.

Если стенка или поясок разделены жесткими связями на равные участки, то на этих связях пластины можно считать жестко заделанными.

3.3.5 При невыполнении требуемых запасов по частоте для конструкций, расположенных в районе установки неуравновешенных механизмов, должен быть произведен расчет вынужденной вибрации на действие неуравнове-

шенных усилий или кинематического возбуждения, в зависимости от того, по отношению к каким из этих усилий запас не обеспечен. В этом случае вибрация считается допустимой, если нормальные напряжения в районе сварных соединений этих конструкций при их резонансных колебаниях не превышают допускаемых величин, приведенных в табл. 3.3.3.

3.3.6 Пластины обшивки выступающих частей рассчитываются, исходя из тех же положений, что и пластины наружной обшивки корпуса в районе действия пульсирующих давлений от работы гребных винтов.

3.3.7 Для предотвращения резонанса конструкций корпуса и выступающих частей с частотами возмущающих усилий должны быть обеспечены следующие запасы по частоте (см. табл. 3.2.2):

$\kappa \geq 1{,}5$ – для пластин наружной обшивки, переборок, платформ и др. конструкций;

$\kappa \geq 1{,}3$ – для ребер жесткости, балок набора, перекрытий и др. стержневых конструкций;

$\kappa \geq 1{,}3$ – для кронштейнов, насадок и т. п. выступающих частей.

Примечание.

Выбор коэффициентов запаса по частоте при расчетах совместных колебаний пластин и ребер жесткости осуществляется соответственно их парциальным частотам.

3.3.8 Расчеты параметров (амплитуд виброперемещений и нормальных напряжений) вынужденной резонансной вибрации корпусных конструкций производятся с учетом рассеяния энергии колебаний, характеризуемого коэффициентами затухания – ψ, численные значения которых для соответствующих элементов конструкций корпуса получены в результате натурных экспериментов на судах (см. табл. В-1 приложения В).

3.4 КРИТЕРИИ ВИБРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ

3.4.1 Критерием вибрационной прочности корпусных конструкций, для которых выполняются расчеты вынужденной вибрации, являются допускаемые Правилами РС напряжения, определяемые пределом усталости сварных соединений конструкций с учетом запаса вибрационной прочности (см. табл. 3.3.3).

3.4.2 Техническими нормами вибрации перекрытий являются допускаемые значения параметров вибрации балок их основного набора и опорных балок фундаментов механизмов, установленные Правилами РС.

3.4.3 Использование критериев допустимой вибрации, изложенных в 3.4.1 и 3.4.2, не исключает необходимости выполнения санитарных норм и требований органов здравоохранения России о допустимых параметрах вибрации на рабочих местах, в жилых, служебных и других судовых помещениях.

3.5 ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКТИВНОМУ ОФОРМЛЕНИЮ УЗЛОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В РАЙОНАХ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ВИБРАЦИИ

Во избежание значительной концентрации напряжений, резко снижающей усталостную прочность корпусной конструкции, расположенной в районах 1–4, необходимо:

приварку набора к наружной обшивке, полотнищам переборок, настилу платформ и т. п. производить двухсторонним сплошным швом;

конструктивные узлы соединения отдельных балок набора, прохода ребер жесткости через полотнища переборок и стенки балок набора, установки набора и подкреплений различных корпусных конструкций (переборок, платформ, стенок балок основного набора и т. д.) должны создавать замкнутые контуры из жестких связей конструкции и обеспечивать плавный переход от более жестких связей к менее жестким (см. рис. Д-1 – Д-3 приложения Д).

4 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВИБРАЦИИ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СУДОВОГО КОРПУСА

4.1 ВИБРАЦИЯ ПЛАСТИН И БАЛОК НАБОРА

4.1.1 Определение частот свободных колебаний.

4.1.1.1 Плоские пластины на жестком контуре.

Частота свободных колебаний плоской пластины, опертой на жесткий контур, определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\varphi^2}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \qquad (4.1.1.1\text{-}1)$$

где a – короткая сторона пластины;

$D = \dfrac{Eh^3}{12\left(1-\mu^2\right)}$ – цилиндрическая жесткость пластины;

h – толщина пластины;

E, μ, ρ – модуль нормальной упругости, коэффициент Пуассона и плотность материала пластины.

Значения коэффициента φ, в зависимости от отношения сторон b/a и граничных условий приведены в табл. 4.1.1.1.

Таблица 4.1.1.1

Значения коэффициента φ^2 для основного тона колебаний прямоугольных пластин на жестком опорном контуре

Отношение сторон	Граничные условия	
	Свободное опирание на контуре	Жесткая заделка на контуре
$b/a < 2{,}5$	$9{,}87\left(1+\frac{a^2}{b^2}\right)$	$22{,}37\sqrt{1+0{,}6\left(\frac{a}{b}\right)^2+\left(\frac{a}{b}\right)^4}$
$b/a \geq 2{,}5$	9,87	22,37

Примечание.

При $b/a \geq 2{,}5$ пластину следует рассматривать как балку-полоску, выделенную поперек длинных сторон пластины. При этом заделка пластины на ее коротких сторонах не оказывает существенного влияния на параметры колебаний.

Частота свободных колебаний пластины с учетом влияния присоединенных масс жидкости, находящейся, в общем случае, по обе стороны конструкции, определяется по выражению:

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{\sqrt{1+\eta\left(\frac{l}{nb}\right)\frac{l}{\rho nh}(\rho_1+\rho_2)}}, \qquad (4.1.1.1\text{-}2)$$

где ρ_1, ρ_2 – плотности жидкостей, находящихся по разные стороны конструкции. При соприкосновении конструкции с жидкостью одной стороной следует положить ρ_1 или ρ_2 равной нулю;

l и b – размеры панели (рис. 4.1.1.1), в состав которой входит рассматриваемая отдельная пластина;

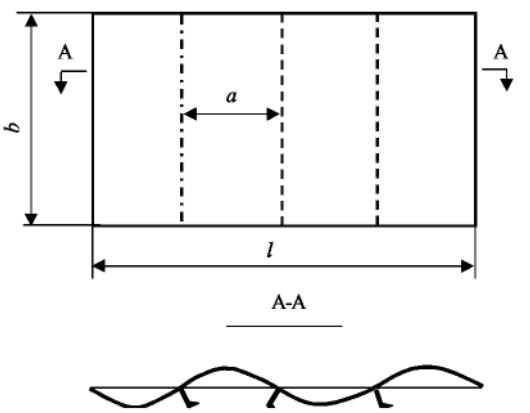


Рис. 4.1.1.1 Панель

n – число пролетов панели;

$a = \dfrac{l}{n}$ – короткая сторона отдельной пластины.

Коэффициент присоединенных масс $\eta\left(\dfrac{l}{nb}\right)$ определяется по графикам, представленным на рис. А1.1-1 – А1.1-3 приложения А, в зависимости от отношения сторон опорного контура пластины, характера ее закрепления по контуру и учитываемого в расчете числа колеблющихся пролетов n [1].

4.1.1.2 Плоские прямоугольные пластины с вырезом.

Частота основного тона свободных колебаний в воздухе пластины с вырезом определяется по формуле:

$$\lambda_0 = \lambda\left[1 + \xi\left(\frac{d}{a}\right)\right], \qquad (4.1.1.2\text{-}1)$$

где λ – частота свободных колебаний сплошной пластины, вычисляемая по формуле (4.1.1.2-1);

$\xi\left(\dfrac{d}{a}\right)$ – коэффициент, учитывающий наличие и форму выреза в пластине и определяемый по выражениям, приведенным в табл. 4.1.1.2.

Частота пластины с вырезом в жидкой среде определяется по формуле:

$$\lambda_0^* = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 + 2\eta\left(\dfrac{a}{b}\right)\chi\left(\dfrac{d}{b}\right)\dfrac{\rho_1 a}{\rho h}}}, \qquad (4.1.1.2\text{-}2)$$

где $\chi\left(\dfrac{d}{b}\right)$ – коэффициент, учитывающий поправку к присоединенной массе жидкости, обусловленную наличием выреза в пластине.

Коэффициент $\chi\left(\dfrac{d}{b}\right)$ определяется с помощью выражения:

$$\chi\left(\frac{d}{b}\right) = 1 - 1{,}5\frac{d}{b} + 1{,}5\left(\frac{d}{b}\right)^2 - 0{,}7\left(\frac{d}{b}\right)^3. \qquad (4.1.1.2\text{-}3)$$

---

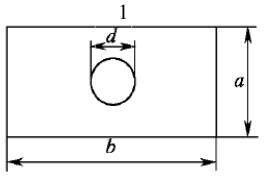
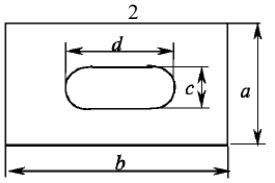
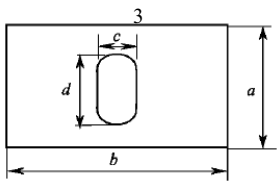
[1] Максимальное число учитываемых в расчете пролетов n, характеризующее условия перетекания жидкости принимается равным 4. Последнее объясняется тем, что графики для коэффициентов η (l/nb) построены в предположении регулярных колебаний всех пролетов конструкции (одинаковых условий закрепления на опорном контуре и равных амплитуд колебаний). В действительности, в силу известной неравномерности нагрузки и других факторов конструктивного и технологического характера, амплитуды колебаний пролетов панели различны.

Зависимость (4.1.1.2-3) справедлива для прямоугольных пластин произвольного удлинения с центральным круглым или продольным овальным вырезом (тип 2 в табл. 4.1.1.2). Для пластин с поперечно ориентированными вырезами (тип 3 в табл. 4.1.1.2) вид зависимости сохраняется, но вместо $\frac{d}{b}$ следует брать аргумент $\frac{d_э}{b}$, где $d_э$ – эквивалентный диаметр круглого выреза с площадью, равной площади $S_в$ овального выреза:

$$d_э = \sqrt{\frac{4S_в}{\pi}}. \qquad (4.1.1.2\text{-}4)$$

Таблица 4.1.1.2

Значения коэффициента $\xi\left(\frac{d}{a}\right)$

Тип выреза	Граничные условия	
	Свободное опирание на контуре	Жесткая заделка на контуре
1  2  	$\frac{2{,}5\left[\left(\frac{a}{b}\right)^{2+\frac{b}{4a}}\left(\frac{d}{a}\right)^3\right]}{\left(\frac{d}{c}\right)^2+\frac{d}{c}-1}$	$\frac{5\left[\left(\frac{a}{b}\right)^{2+\frac{b}{2a}}\left(\frac{d}{a}\right)^3\right]}{\left[\left(\frac{d}{c}\right)^2+\frac{d}{c}-1\right]^{\frac{a}{b}}}$
3  	То же	$5\frac{d}{c}\left(\frac{a}{b}\right)^{2+\frac{b}{2a}}\left(\frac{c}{a}\right)^3$

4.1.1.3 Изогнутые пластины.

Для цилиндрических изогнутых пластин (две противоположные кромки которых криволинейные, две другие – прямолинейные) наименьшей собс-

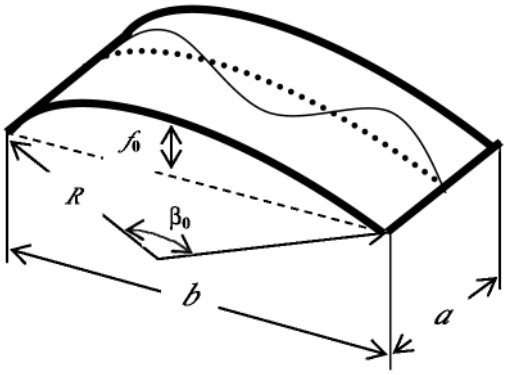


Рис. 4.1.1.3 Изогнутая пластина

твенной частоте соответствует форма колебаний с одной полуволной вдоль образующей и одной или несколькими полуволнами вдоль криволинейной кромки. Приведенные ниже формулы предназначены для расчетов изогнутых пластин, относящихся к пологим оболочкам, т. е. с отношением стрелы погиби к хорде $\frac{f_0}{b} \le 0{,}2$.

Частоты свободных колебаний изогнутой пластины, свободно опертой по контуру, определяются по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{2\pi R}\sqrt{\frac{1}{\rho h}\left[\frac{D}{R^2}\left(\delta_k^2+\gamma_n^2\right)^2+\frac{Eh\delta_k^4}{\left(\delta_k^2+\gamma_n^2\right)^2}\right]}, \qquad (4.1.1.3\text{-}1)$$

где R – радиус кривизны пластины (см. рис. 4.1.1.3);
a – размер пластины вдоль прямолинейной кромки;
β_o – угол раскрытия изогнутой пластины (в радианах);
коэффициенты $\delta_к$ и γ_n определяются по формулам:

$$\delta_k = \frac{k\pi R}{a}, \qquad \gamma_n = \frac{n\pi}{\beta_0}; \qquad (4.1.1.3\text{-}2)$$

k – число полуволн вдоль образующей (прямолинейной кромки пластины);
n – число полуволн вдоль криволинейной кромки.

Наименьшему значению частоты соответствует $k = 1$ (одна полуволна вдоль образующей). При этом γ_n определяется следующим образом:

$$\text{из условия } \gamma_n^2 = \delta_1\left[\sqrt[4]{\frac{12R^2\left(1-\mu^2\right)}{h^2}}-\delta_1\right] \qquad (4.1.1.3\text{-}3)$$

определяется γ_n;

по выражению (4.1.1.3-2), путем округления полученного значения до ближайшего целого числа, находится *n*;

соответственно полученному целому числу *n* по формуле (4.1.1.3-2) уточняется значение γ_n, которое подставляется в формулу (4.1.1.3-1).

При вычислениях могут быть использованы дополнительные соотношения:

$$R = \frac{f_0}{2} + \frac{b^2}{8f_0}, \qquad b = 2\,R \sin\frac{\beta_0}{2}, \qquad f_0 = R\left(1 - \cos\frac{\beta_0}{2}\right). \qquad (4.1.1.3\text{-}4)$$

Учет инерционного влияния присоединенных масс воды при колебаниях изогнутых пластин производится по той же формуле (4.1.1.3-1), что и для плоских пластин. Части изогнутой пластины между узловыми линиями рассматриваются при этом, как отдельные пластины. Поэтому при определении коэффициента присоединенных масс η (рис. А1.1-1 – А1.1-3 приложения А) в качестве размеров пластин следует принимать размеры прямоугольников, образуемых этими пластинами в плане, т. е. $\frac{b}{n}$ и $\frac{a}{k}$, а за число колеблющихся пластин (число пролетов) – число полуволн *n*.

4.1.1.4 Балки набора.

Частоты свободных колебаний балок основного набора и ребер жесткости (без учета влияния на них колебаний обшивки) определяются по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{2\pi}\frac{\varphi^2}{b^2}\sqrt{\frac{EJ}{\rho S}}, \qquad (4.1.1.4\text{-}1)$$

где *b* – длина ребра жесткости (ширина панели, см. рис. 4.1.1.1);

J – момент инерции поперечного сечения ребра вместе с присоединенным пояском;

S – площадь поперечного сечения ребра вместе с пояском шириной, равной расстоянию между ребрами;

φ – безразмерный коэффициент, равный:

3,14 – при свободном опирании концов;

3,93 – при свободно опертом одном конце и жестко заделанном другом;

4,73 – при жесткой заделке концов.

Частоты свободных колебаний балок набора с учетом влияния присоединенных масс жидкости, находящейся, в общем случае, по обе стороны конструкции, определяются по формуле:

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \eta\left(\frac{b}{l}\right)\frac{(\rho_1 + \rho_2)\,b}{\rho h_{\text{ср}}}}}, \qquad (4.1.1.4\text{-}2)$$

где $h_{ср}$ – средняя толщина обшивки с учетом балок набора (ребер жесткости);

$\eta\left(\frac{b}{l}\right)$ – коэффициент, учитывающий влияние присоединенных масс жидкости и определяемый по графикам рис. А1.1-1–А1.1-3 (см. приложение А) в зависимости от отношения сторон поля $\left(\frac{b}{l}\right)$, характера заделки его опорного контура и возможности перетекания жидкости в смежные пролеты;

ρ_1, ρ_2 – плотности жидкостей, находящихся по разные стороны конструкции. При соприкосновении конструкции с жидкостью одной стороной следует положить ρ_1 или ρ_2 равной нулю.

4.1.1.5 Свободные колебания пластин и ребер жесткости с учетом их динамического взаимодействия.

При колебаниях неразрезной пластины (панели) по симметричным формам подкрепляющий ее набор получает поперечные перемещения. В этом случае расчеты свободной и вынужденной вибрации пластин и ребер жесткости необходимо производить с учетом их динамического взаимодействия и взаимодействия с жидкостью, вовлекаемой в сложное движение этими элементами конструкции (см. А2 приложения А).

Определение собственных частот пластины и ребер с учетом их взаимодействия выполняется по формуле:

$$\lambda_{1,2}^2 = \frac{A_1 + A_3 \pm \sqrt{(A_1 + A_3)^2 - 4A_1A_3(1 - A_0A_2)}}{8\pi^2(1 - A_0A_2)}, \qquad (4.1.1.5\text{-}1)$$

где A_0, A_1, A_2, A_3 – величины, зависящие от параметров конструкции, формы колебаний и соприкосновения с жидкостью.

Для пластины, жестко заделанной на ребрах, когда ребра и короткие стороны пластины свободно оперты:

$$A_0 = \frac{4}{3m^*}\left(\rho h + \sqrt{\frac{3}{2} m_в m_в^n}\right); \qquad A_2 = \frac{1}{2m_n^*}\left(\rho h + \sqrt{\frac{3}{2} m_в m_в^n}\right);$$

$$A_1 = \frac{16D\pi^4}{3a^4m^*}\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{a}{b}\right)^2 + \frac{3}{16}\left(\frac{a}{b}\right)^4\right]; \qquad A_3 = \left(\frac{\pi}{b}\right)^4 \frac{EI}{m_n^* a}. \qquad (4.1.1.5\text{-}2)$$

Для пластины, жестко заделанной по контуру, когда ребра жестко заделаны по концам:

$$A_1 = \frac{16D\pi^4}{3a^4m^*}\left[1 + \frac{2}{3}\left(\frac{a}{b}\right)^2 + \left(\frac{a}{b}\right)^4\right]; \quad A_3 = \frac{16}{3}\left(\frac{\pi}{b}\right)^4 \frac{EJ}{m_n^* a}, \qquad (4.1.1.5\text{-}3)$$

A_0 и A_2 определяются по соответствующим выражениям (4.1.1.5-2).

В формулах (4.1.1.5-2) и (4.1.1.5-3):

$m_п$ – масса единицы площади пластины с учетом распределенной по ее поверхности массы ребер жесткости;

$m_в^п$, $m_в$ – присоединенная масса жидкости, приходящаяся на единицу площади пластины и обусловленная соответственно колебаниями ребер жесткости и пластины относительно ребер (см. А1 приложения А, формулы (А1.1-3) и (А1.2));

m^* – присоединенная масса жидкости;

$m_п^*$ – присоединенная масса жидкости с учетом конструкции;

$m^* = \rho h + m_в$; $m_п^* = m_п + m_в^п$.

При колебаниях конструкции в воздухе $m_в^п = m_в = 0$.

Парциальные частоты пластины и ребра соответственно равны:

$$\lambda_{пл} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{A_1}; \quad \lambda_р = \frac{1}{2\pi}\sqrt{A_3}. \qquad (4.1.1.5\text{-}4)$$

4.1.2 Расчет вынужденной вибрации.

Пластины корпусных конструкций и подкрепляющие их ребра жесткости (поля перекрытий) рассчитываются на действие следующих возмущающих сил – пульсирующих гидродинамических давлений от работы гребных винтов и инерционных усилий, обусловленных общей вибрацией корпуса или колебанием перекрытия, на котором установлен неуравновешенный механизм (см. табл. 3.2.2). При действии этих усилий с одинаковой частотой берется их сумма.

При расчетах вынужденной вибрации пластины принимаются жестко заделанными на упругих ребрах, а в случае большой жесткости набора или опирания пластин на высокие флоры или бракеты (что обычно имеет место в кормовой оконечности) – жестко заделанными на жестком контуре. Ребра и другие неразрезные балки набора принимаются жестко заделанными в районе равномерной или близкой к таковой нагрузке, а также в случае соответствующего конструктивного оформления их опорных сечений, и свободно опертыми – в районе значительного изменения нагрузки (см. табл. 3.2.2).

4.1.2.1 Плоские пластины на жестком контуре.

Величина максимальных напряжений на опорном контуре пластины определяется по формуле:

$$\sigma = 6\, K_1 \frac{Eh}{a^2}\frac{P}{C}\,\beta, \qquad (4.1.2.1\text{-}1)$$

где P – приведенная возмущающая сила;

C – приведенная жесткость пластины;

β – коэффициент динамичности;

K_1 – безразмерный коэффициент, зависящий от отношения сторон опорного контура пластины и условий ее закрепления (значения приведены в табл. 4.1.2.1).

Приведенная жесткость пластины C определяется по выражению:

$$C = \frac{3D\pi^4 \cdot b}{4a^3}\left[1 + \frac{2}{3}\left(\frac{a}{b}\right)^2 + \left(\frac{a}{b}\right)^4\right]. \qquad (4.1.2.1\text{-}2)$$

Таблица 4.1.2.1

Значения коэффициента K_1

$\frac{b}{a}$	Пластина жестко заделана по контуру	Пластина жестко заделана по длинным кромкам и свободно оперта по коротким
	K_1	K_1
1,0	3,75	3,26
1,2	3,20	3,17
1,4	3,14	3,08
1,5	3,12	3,07
2,0	3,00	2,96
3,0	2,98	2,93

Приведенная сила P при одновременном действии на пластину пульсирующих давлений и инерционных усилий, обусловленных общей вибрацией, определяется по формуле:

$$P = \frac{ab}{4}\left[\left(\rho h + \frac{3}{2}\sqrt{m_к m_{в(з)}} + \frac{3}{2}\sqrt{m_{ст} m_{в(ц)}}\right) w_0 \overline{\omega}^2 + p_в\right], \qquad (4.1.2.1\text{-}3)$$

где $p_в$ – максимальное значение пульсирующих давлений от работы гребных винтов с частотой ω;

w_o, $\overline{\omega}$ – амплитуда и круговая частота 1/с ($\overline{\omega} = 2\pi\omega$) колебаний опорного контура пластины (общей вибрации корпуса в районе, где находится рассматриваемая пластина) (см. табл. 3.2.2).

Через m с соответствующими индексами в (4.1.2.1-3) обозначены присоединенные массы жидкости, приходящиеся на единицу площади пластины и обусловленные:

$m_к$ и $m_{ст}$ – колебаниями корпуса судна, индексы (к) и (ст) относятся к забортной воде и столбу жидкости в цистерне;

$m_{в(з)}$ и $m_{в(ц)}$ – колебаниями пластин относительно ребер, при этом индексы (*з*) и (*ц*) относятся к забортной воде и жидкости в цистерне.

В зависимости от рассматриваемой конструкции и действующих на нее усилий в формуле (4.1.2.1-3) опускаются соответствующие слагаемые. Так, вне района непосредственного воздействия пульсирующих давлений от работы гребных винтов $p_в = 0$. Если пластина не соприкасается с забортной водой – $m_к = 0$, при отсутствии жидкости в цистерне – $m_{ст} = 0$.

Коэффициент динамичности β определяется по выражениям:

вне резонанса ($\lambda^* \geq 1{,}5\ \omega$) $\beta = \dfrac{1}{1-\left(\dfrac{\omega}{\lambda^*}\right)^2}$; (4.1.2.1-4)

в условиях резонанса ($\lambda^* < 1{,}5\ \omega$) $\beta = \dfrac{2\pi}{\psi}$. (4.1.2.1-5)

Значения коэффициентов демпфирования ψ для элементов конструкций, работающих в составе корпуса, приведены в табл. В-1 приложения В.

4.1.2.2 Вынужденная вибрация пластин и ребер жесткости с учетом их динамического взаимодействия.

Амплитуды вынужденной вибрации пластин $w_{пл}$ и подкрепляющих их ребер $w_р$, полученные с учетом демпфирования, определяются по формулам:

$$w_{пл} = \frac{\sqrt{(MB+NC)^2+(NB-MC)^2}}{B^2+C^2};$$
$$w_р = \frac{\sqrt{(M_1B+N_1C)^2+(N_1B-M_1C)^2}}{B^2+C^2}, \quad (4.1.2.2\text{-}1)$$

где $B = A_1A_3 - (A_1 + A_3)\,\overline{\omega}^2 + (1 - A_0A_2)\,\overline{\omega}^4$;
$C = [2\,A_1A_3 - (A_1 + A_3)\,\overline{\omega}^2]\,\varepsilon$;
$M = PA_3 + (P_1A_0 - P)\,\overline{\omega}^2$; $N = P\,A_3\,\varepsilon$;
$M_1 = P_1A_1 + (PA_2 - P_1)\,\overline{\omega}^2$; $N_1 = P_1A_1\,\varepsilon$;

$$\varepsilon = \frac{\psi_{пл}}{2\pi} = \frac{\psi_р}{2\pi};$$

$\psi_{пл}$ и $\psi_р$ – коэффициенты неупругого сопротивления пластины и ребра приняты одинаковыми;

P и P_1 – обобщенные силы, отнесенные соответственно к приведенной массе пластины и ребра;

A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты (см. 4.1.1.5).

При одновременном воздействии пульсирующих давлений от работы гребных винтов и инерционных усилий, обусловленных общей вибрацией, обобщенные силы P и P_1 для различных условий закрепления конструкции на опорном контуре могут быть представлены следующими выражениями:

пластина жестко заделана на ребрах, ребра и короткие стороны пластины свободно оперты

$$P = \frac{4}{3m^*}\left[\left(\frac{4}{\pi}\rho\,h + \sqrt{3\,m_к\,m_{в(з)}} + \sqrt{3\,m_{ст}\,m_{в(ц)}}\right)w_0\,\overline{\omega}^2 + \frac{4}{\pi}p_в\right],$$
$$P_1 = \frac{1}{m_п^*}\left[\left(\frac{4}{\pi}m_п + \sqrt{2\,m_к\,m''_{в(з)}} + \sqrt{2\,m_{ст}\,m''_{в(ц)}}\right)w_0\,\overline{\omega}^2 + \frac{4}{\pi}p_в\right]; \quad (4.1.2.2\text{-}2)$$

пластина жестко заделана по контуру, ребра жестко заделаны на опорах

$$P = \frac{16}{9m^*}\left[\left(\rho h + \frac{3}{2}\sqrt{m_{к}\, m_{в\,(з)}} + \frac{3}{2}\sqrt{m_{ст}\, m_{в\,(ц)}}\right) w_0\, \overline{\omega}^2 + p_{в}\right],$$
$$P_1 = \frac{4}{3m_{п}^*}\left[\left(m_{п} + \sqrt{\frac{3}{2}\, m_{к}\, m_{в\,(з)}^{n}} + \sqrt{\frac{3}{2}\, m_{ст}\, m_{в\,(ц)}^{n}}\right) w_0\, \overline{\omega}^2 + p_{в}\right]. \qquad (4.1.2.2\text{-}3)$$

Здесь через $m^{n}_{в\,(з)}$ и $m^{n}_{в\,(ц)}$ обозначены присоединенные массы жидкости, приходящиеся на единицу площади пластины и обусловленные перемещениями панели; индексы (*з*) и (*ц*) относятся к забортной воде и жидкости в цистерне. Остальные обозначения *m* с индексами приведены в 4.1.2.1.

Значения m^* и $m_{п}^*$ определяются с учетом фактического контакта пластины с жидкостью одной или двумя ее поверхностями (см. 4.1.1.5).

Формулами (4.1.2.2-1) можно пользоваться для расчета вынужденной вибрации конструкций как в резонансной, так и в нерезонансной областях.

Напряжения посредине длинных сторон опорного контура пластины определяются по формуле:

$$\sigma_{пл} = 6\, К_1\, \frac{Eh}{a^2}\, w_{пл}, \qquad (4.1.2.2\text{-}4)$$

где K_1 – безразмерный коэффициент (см. табл. 4.1.2.1).

Напряжения в ребрах равны:

в середине пролета свободно опертого ребра

$$\sigma_{р} = \frac{48EJ}{5W_{\min}b^2}\, w_{р}; \qquad (4.1.2.2\text{-}5)$$

в заделке жестко заделанного ребра

$$\sigma_{р} = \frac{32EJ}{W_{\min}b^2}\, w_{р}. \qquad (4.1.2.2\text{-}6)$$

В формулах (4.1.2.2-5) и (4.1.2.2-6) $W_{\min}$ – минимальный момент сопротивления ребра жесткости с присоединенным пояском.

4.2 ВИБРАЦИЯ ПЕРЕКРЫТИЙ

4.2.1 Судовые перекрытия, под которыми в настоящей Методике понимается система пересекающихся балок набора, могут иметь сложную конфигурацию, содержать в своем составе непризматические связи, вырезы, пиллерсы, крупные сосредоточенные и распределенные массы. Большое влияние на вибрационные характеристики перекрытий оказывают присоединенные массы жидкости. Наиболее универсальным методом расчета вибрации перекрытий является метод конечных элементов. В А2.3 приложения А приведе-

ны аналитические формулы, позволяющие выполнить приближенный расчет простейших регулярных перекрытий методом приведения.

4.2.2 Расчет частот свободных колебаний регулярных перекрытий.

Частота первого тона свободных колебаний перекрытия с одной или несколькими одинаковыми и равноотстоящими перекрестными связями (рис. 4.2.2) определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{2\pi b^2}\sqrt{\frac{Ei_0}{m}\frac{d+ck}{s+r}}, \qquad (4.2.2\text{-}1)$$

где b – расстояние между перекрестными связями (при одной перекрестной связи b равно половине соответствующего размера перекрытия);

i_0 – момент инерции балки главного направления с присоединенным пояском;

d, c и s – безразмерные коэффициенты, определяемые по табл. 4.2.2 в зависимости от граничных условий и числа перекрестных связей;

k и r – безразмерные параметры, определяемые выражениями:

$$k = \frac{Ib^3 l}{L^4 i_0}, \qquad r = \frac{Ml}{mb}, \qquad (4.2.2\text{-}2)$$

I – момент инерции перекрестной связи с присоединенным пояском;

L – длина перекрытия (длина перекрестной связи);

l – расстояние между балками главного направления;

M – погонная масса перекрестной связи без учета массы присоединенного пояска;

m – погонная масса балки главного направления с учетом массы настила, распределенных масс оборудования и насыщения.

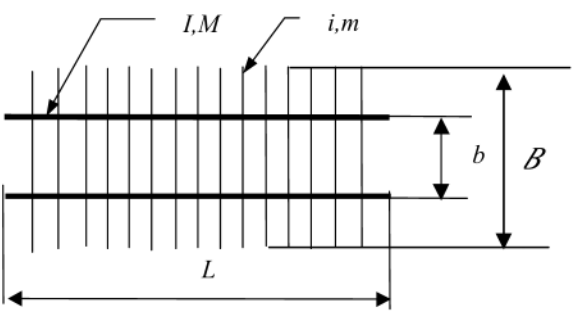
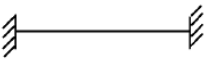
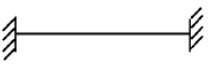
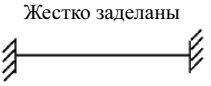
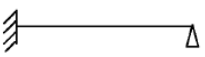
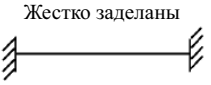


Рис. 4.2.2 Схема перекрытия

Учет влияния присоединенных масс жидкости на собственную частоту перекрытия производится по формулам (А2.3.1-4) и (А2.3.1-5) приложения А.

Таблица 4.2.2

Значения коэффициентов *d, c* и *s*

№ п/п	Условия опирания перекрестных связей	Число перекрестных связей	Условия опирания балок главного направления	*d*	*s*	*c*
1	Свободно оперты	1	Свободно оперты	6	1	97,2
2		2		1,2		
3		3		0,38		
4		4		0,16		
5		1	Жестко заделаны 	24	0,77	
6		2		6	0,98	
7		3		1,95	1	
8		4		0,80		
9	Жестко заделаны 	1	Свободно оперты	6	1	500
10		2		1,2		
11		3		0,38		
12		4		0,16		
13		1	Жестко заделаны 	24	0,77	
14		2		6	0,98	
15		3		1,95	1	
16		4		0,80		
17	Один конец жестко заделан, другой – свободно оперт 	1	Свободно оперты	6	1	238
18		2		1,2		
19		3		0,38		
20		4		0,16		
21		1	Жестко заделаны 	24	0,77	
22		2		6	0,98	
23		3		1,95	1	
24		4		0,80		

4.2.3 Расчет вынужденной вибрации перекрытий.

4.2.3.1 Вынужденная вибрация, вызываемая неуравновешенными усилиями жестко установленного на перекрытии двигателя.

Расчет производится в том случае, если частота первого тона свободных колебаний перекрытия λ^* отличается менее чем в 1,3 раза (в любую сторону) от частоты возбуждения ω_p. (см. табл. 3.2.2).

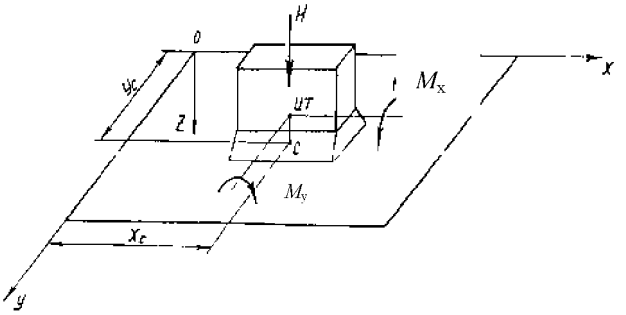


Рис. 4.2.3.1 Схема приложения возмущающих сил
при расчете вынужденной вибрации перекрытия

Максимальная амплитуда резонансных колебаний перекрытия с частотой неуравновешенного усилия p-го порядка в точке приведения с координатами (x_0, y_0) (см. А2.3 приложения А) определяется по выражению:

$$w^{(p)}(x_0, y_0) = \frac{2\pi}{\psi} \frac{H\ f(x_c, y_c) + M_x\ \alpha(x_c, y_c) + M_y\ \upsilon(x_c, y_c)}{K_{пр}} \left(\frac{\omega_p}{p\omega_н}\right)^2, \quad (4.2.3.1\text{-}1)$$

где $f_{пер}(x, y)$ – форма колебаний перекрытия;

H, M_x, M_y, – неуравновешенные сила и моменты p-го порядка, генерируемые двигателем при номинальной частоте вращения коленчатого вала $\omega_н$;

$\upsilon = \frac{\partial f_{пер}(x,y)}{\partial x}$, $\alpha = \frac{\partial f_{пер}(x,y)}{\partial y}$ – углы поворота сечений балок перекрытия;

ψ – коэффициент демпфирования при колебаниях перекрытия (табл. В-1 приложения В);

$K_{пр}$ – приведенная жесткость перекрытия, определяемая по формуле (А2.3.1-2) (см. А2 приложения А).

Колебания любой другой точки перекрытия с координатами – x_i, y_j определятся по выражению:

$$w^{(p)}(x_i, y_j) = w^{(p)}(x_0, y_0)\, f_{пер}(x_i, y_j). \quad (4.2.3.1\text{-}2)$$

4.2.3.2 Вынужденная вибрация перекрытия, вызываемая колебаниями опорного контура.

Перекрытие при колебаниях опорного контура (кинематическом возбуждении) участвует в двух движениях: вместе с опорным контуром – корпусом судна (переносное перемещение) и относительно опорного контура (относительное перемещение). Колебания перекрытия при кинематическом возбуж-

дении рассматриваются как вынужденные колебания под действием гармонической нагрузки, состоящей из сил инерции масс собственно перекрытия при перемещениях опорного контура, а также сил инерции присоединенных масс воды, обусловленных относительным и переносным движениями перекрытия (с учетом их взаимодействия). Приведенная сила, соответствующая этим инерционным нагрузкам, является суммой двух составляющих:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2; \qquad (4.2.3.2\text{-}1)$$

$$\Phi_1 = \frac{M_{\text{пр}}}{LB}\left[\int_0^L\int_0^B f_{\text{пер}}(x, y)dxdy\right] w_0 \overline{\omega}^2; \qquad (4.2.3.2\text{-}2)$$

$$\Phi_2 = \sqrt{M_0^* M_{\text{пр}}^*}\, w_0\, \overline{\omega}^2, \qquad (4.2.3.2\text{-}3)$$

где $M_{\text{пр}}$ – приведенная масса перекрытия, определяемая по формуле (А2.3.1-3) приложения А;

w_o, ω – амплитуда (максимальная амплитуда общей вибрации в районе расположения перекрытия) и частота колебаний опорного контура;

$\overline{\omega} = 2\,\pi\,\omega$;

M_0^* – присоединенная масса воды перекрытия, обусловленная колебаниями его опорного контура;

$m_{\text{к}}$ – погонная присоединенная масса воды корпуса судна, обусловленная его общей вибрацией (принимается постоянной по длине перекрытия) (см. разд. 4);

$M_0^* = m_{\text{к}} L$;

$M_{\text{пр.ц}}^*$ – присоединенная масса перекрытия при его изгибных колебаниях

$$M_{\text{пр.ц}}^* = \rho_1 \eta \left(\frac{B}{L}\right) B \int_0^L\int_0^B f_{\text{пер}}^2(x, y)dxdy. \qquad (4.2.3.2\text{-}4)$$

Остальные обозначения см. 4.2.3.1.

Если перекрытие ограничивает цистерну, жидкость в которой имеет свободную поверхность (например, днище грузового танка), то выражение (4.2.3.2-3) будет иметь вид:

$$\Phi_2 = \left(\sqrt{M_0^*\, M_{\text{пр}}^*} + \sqrt{M_1^*\, M_{\text{пр.ц}}^*}\right) w_0\, \overline{\omega}^2, \qquad (4.2.3.2\text{-}5)$$

где $M_1^* = \rho_2\, BLH$;

ρ_2, H – соответственно плотность и высота столба жидкости в цистерне;

$M_{\text{пр.ц}}^*$ – присоединенная масса перекрытия, создаваемая жидкостью в цистерне при его изгибных колебаниях:

$$M_{\text{пр.ц}}^* = \rho_1 \eta \left(\frac{B}{L}\right) B \int_0^L\int_0^B f_{\text{пер}}^2(x, y)dxdy. \qquad (4.2.3.2\text{-}6)$$

Амплитуда вынужденных резонансных колебаний (относительно опорного контура) точки приведения перекрытия определяется по формуле:

$$w(x_0, y_0) = \frac{\Phi}{\left(M_{\text{пр}} + M^*_{\text{пр}}\right)\overline{\omega}^2} \frac{2\pi}{\psi}. \qquad (4.2.3.2\text{-}7)$$

Амплитуда колебаний точки приведения в абсолютном движении равна:

$$w_{\Sigma}(x_0, y_0) = w_0 + w(x_0, y_0). \qquad (4.2.3.2\text{-}8)$$

Амплитуда колебаний любой другой точки вычисляется аналогично 4.2.3.1.

5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ УСИЛИЙ

5.1 ПУЛЬСИРУЮЩИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ДАВЛЕНИЯ, ПЕРЕДАВАЕМЫЕ НА КОРПУС СУДНА РАБОТАЮЩИМ ГРЕБНЫМ ВИНТОМ

При работе гребного винта, вследствие конечности числа лопастей, в окружающей жидкости создаются периодически изменяющиеся давления с частотами, кратными произведению числа лопастей на частоту вращения гребного винта (лопастные частоты). На величину пульсирующих давлений существенное влияние оказывают условия, в которых работает гребной винт: неравномерность поля скоростей в диске винта, наличие кавитации на лопастях, глубина фарватера.

В настоящее время имеются достаточно совершенные методы и программы расчета периодических давлений, возникающих на корпусе судна при работе некавитирующего гребного винта. Амплитуды пульсаций давления, вызываемого работой кавитирующего винта, определяются как суммы давлений от некавитирующего винта и нестационарных кавитационных каверн на лопастях.

Результаты расчетов пульсирующих давлений, создаваемых работой гребных винтов с учетом возможной кавитации и мелководья, для ряда основных типов современных судов показали следующее:

.1 при отсутствии кавитации на лопастях гребного винта им индуцируются интенсивные пульсирующие давления лопастной частоты, давления с удвоенной лопастной частотой значительно меньше, а высшие гармоники пренебрежимо малы;

.2 кавитация может существенно увеличить пульсирующие давления (до двух и более раз), особенно гармоники высших порядков;

.3 в связи с возрастанием на мелководье неравномерности поля скоростей в диске гребного винта возрастает опасность кавитации его лопастей, что может привести к увеличению вибрационных нагрузок, передаваемых на корпус судна. Особенно существенное возрастание величин максимальных амплитуд пульсаций давлений (над гребным винтом) может наступить с уменьшением глубины в тех случаях, когда на глубокой воде винт свободен от кавитации, а на мелководье она появляется;

.4 в тех случаях, когда гребной винт кавитирует на глубокой воде, пульсирующие давления над винтом с уменьшением глубины изменяются незначительно, однако район распространения пульсирующих давлений на мелководье увеличивается по сравнению с глубокой водой;

.5 интегральная нестационарная сила, действующая на кормовую оконечность корпуса, во всех случаях при уменьшении глубины воды возрастает на предельном мелководье ($H/T \geq 2{,}0$, H – глубина воды, T – осадка судна). Величина этой силы может возрасти в 1,8–2 раза по сравнению с силой, действующей на глубокой воде.

5.2 ИНЕРЦИОННЫЕ УСИЛИЯ ЖИДКОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ОБЩЕЙ ВИБРАЦИЕЙ КОРПУСА СУДНА

5.2.1 Возмущающими усилиями, вызывающими вибрацию корпусных конструкций и возникающими вследствие общей вибрации корпуса судна, также являются:

силы инерции самой конструкции и расположенных на ней грузов;

силы инерции присоединенных масс воды (забортной) корпуса, обусловленных общей вибрацией судна и приходящихся на рассматриваемую конструкцию;

силы инерции жидкости, находящейся внутри конструкции (цистернах, двойном дне, танках и т. п.).

Первая категория сил, если конструкция не несет на себе больших грузов, имеет обычно величину, существенно меньшую, чем вторые две, и вычисление ее не представляет затруднений. Вычисление двух других приведено ниже.

5.2.2 Инерционные усилия, создаваемые забортной водой.

Давления, обусловленные силами инерции забортной воды и определяемые в предположении недеформируемости отдельных корпусных конструкций, могут быть представлены в виде[1]:

[1] Вследствие упругости корпусных конструкций (перекрытий, пластин и ребер жесткости) величина давлений будет иной, что отражено в формулах расчета вынужденной вибрации этих конструкций.

$$q = m_к\, w_0\, \overline{\omega}^2 \sin \overline{\omega} t, \qquad (5.2.2\text{-}1)$$

где w_o и $\overline{\omega}$ – амплитуда и частота колебаний опорного контура конструкции, равные соответствующим параметрам общей вибрации рассматриваемом сечении;

$m_к$ – присоединенная масса забортной воды, приходящаяся на единицу площади обшивки и обусловленная общей вибрацией, вычисляется через погонную присоединенную массу $m(x)$ корпуса, обусловленную общей вибрацией (соответствующие формулы приведены в Методике расчета общей вибрации корпуса).

Величина присоединенной массы забортной воды $m_к$, приходящейся на единицу площади обшивки, с учетом неравномерности ее распределения по поперечному сечению корпуса судна может быть определена по выражениям:

для вертикальных колебаний корпуса –

$$m_к = r \frac{m_в(x)}{B} \sin \theta, \qquad (5.2.2\text{-}2)$$

при горизонтальных колебаниях –

$$m_к = r \frac{m_г(x)}{T} \sin \theta, \qquad (5.2.2\text{-}3)$$

где B, T – ширина и осадка судна;

θ – угол, составляемый плоскостью пластины с направлением колебаний корпуса;

$r = 1{,}3 \ldots 1{,}5$ – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения присоединенных масс по поперечному сечению корпуса.

5.2.3 Инерционные усилия, создаваемые жидкостью в цистернах.

Вследствие общей вибрации корпуса возникают также силы инерции жидкости, находящейся в цистернах, двойном дне, танках и т. п. Масса жидкости $m_{ст}$, приходящаяся на единицу площади конструкции (пластины, поля, перекрытия) равна:

$$m_{ст} = \rho_2 H, \qquad (5.2.3)$$

где ρ_2 – плотность жидкости в цистерне (двойном дне);

H – высота столба жидкости, зависящая от направления колебаний корпуса судна.

В случае не запрессованных цистерн H принимается равным расстоянию от рассматриваемой конструкции до свободной поверхности жидкости при вертикальных колебаниях корпуса и 0,8 расстояния до противоположной по направлению колебаний вертикальной конструкции (борта, продольной пе-

реборки и т. п.) – при горизонтальной вибрации[1]. В случае запрессованных цистерн H равно расстоянию между крайними точками цистерн в направлении рассматриваемых колебаний корпуса.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТОВ МЕСТНОЙ ВИБРАЦИИ

А1 ПРИСОЕДИНЕННЫЕ МАССЫ ЖИДКОСТИ В РАСЧЕТАХ ВИБРАЦИИ

Конструкции, колеблющиеся в жидкой среде, вовлекают в движение часть окружающей их жидкости, инерционные свойства которой характеризуются с помощью присоединенных масс. Значение присоединенных масс зависит от формы колебаний и размеров конструкции, возможности перетекания жидкости в соседние пролеты, участия конструкции в сложных (разного типа) перемещениях.

Определение присоединенных масс при колебаниях конструкций в жидкости производится в предположении, что жидкость идеальна, а ее течение потенциально. Это связано с тем, что инерционные свойства жидкости слабо зависят от термодинамических эффектов и вязкости. Исследование потенциального движения несжимаемой однородной жидкости сводится к нахождению потенциала скоростей φ, удовлетворяющего уравнению Лапласа и соответствующим граничным условиям. Например, при движении тела в безграничной жидкости граничными условиями являются:

условие непротекания жидкости на поверхности S тела $\left.\frac{\partial \varphi}{\partial n}\right|_S + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0$,

где $\left.\frac{\partial \varphi}{\partial n}\right|_S$;

проекция скорости частиц жидкости на внешнюю нормаль n к поверхности S;

Z – перемещение тела в рассматриваемой точке по той же нормали;

условие затухания движения частиц жидкости на бесконечном удалении от колеблющегося тела.

Возможны и другие типы краевых условий для потенциала скоростей, связанные с различными условиями эксплуатации конструкций: вблизи твердых границ, вблизи свободной поверхности, на мелководье и т. п.

[1] Для конструкций, разграничивающих цистерны (соприкасающиеся с жидкостью двумя сторонами), инерционные усилия жидкости с обеих сторон складываются.

Потенциал скоростей может быть найден не только в результате решения уравнения Лапласа, но и с помощью метода источников и стоков, согласно которому действие колеблющейся пластины на окружающую ее жидкость эквивалентно действию простых источников плотности $q = \frac{1}{2\pi} Z$, непрерывно распределенных по поверхности пластины. При использовании этого метода потенциал скоростей φ в произвольной точке *N* пространства определяется выражением:

$$\varphi(N) = -\frac{1}{2\pi} \iint_S \frac{\partial Z(P)}{\partial t} \frac{ds(P)}{r(N,P)}, \qquad \text{(A1-1)}$$

а кинетическая энергия жидкости *T* определяется зависимостью:

$$T = -\frac{\rho_в}{2} \iint_S \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial n} ds, \qquad \text{(A1-2)}$$

где *r(N,P)* – расстояние между точкой *N* и точкой *P*, расположенной на поверхности *S*;
$\rho_в$ – плотность жидкости.

Учитывая формулу (А1-1) и условие непротекания, а также представляя функцию *Z* в виде *Z(s,t)=F(s)τ(t)*, где *F(s)* – функция, характеризующая изменения нормальных перемещений по поверхности тела, *τ(t)* – функция зависимости перемещений от времени, выражение (А1-2) можно преобразовать следующим образом:

$$T = \frac{\rho_в}{4\pi} \iint_S F(s) \frac{\partial \tau}{\partial t} ds' \iint_S F(s) \frac{\partial \tau}{\partial t} \frac{ds}{r}, \qquad \text{(A1-3)}$$

$$T = \frac{1}{2} M \dot{\tau}^2(t), \qquad \dot{\tau}(t) = \frac{d\tau}{dt},$$

$$M = \frac{\rho_в}{2\pi} \iint_S F(s) ds' \iint_S F(s) \frac{ds}{r}, \qquad \text{(A1-4)}$$

где *M* – присоединенная масса жидкости.

При вращательном движении тела аналогично определяются величины статических моментов и моментов инерции присоединенных масс.

А1.1 Присоединенные массы пластин.

Разнообразие корпусных конструкций и их сложное взаимодействие с окружающей жидкостью при колебаниях заставляет использовать в практи-

ческих расчетах присоединенных масс различные приближенные приемы. При колебаниях пластины по форме *f*(x,y) выражение для ее присоединенной массы (А1-4) примет вид:

$$M = \frac{\rho_в}{2\pi} \iint\limits_S f ds' \iint\limits_S f \frac{ds}{r}. \qquad \text{(А1.1-1)}$$

Для практических расчетов удобнее пользоваться безразмерными коэффициентами присоединенных масс:

$$\eta(\frac{l}{nb}) = \frac{n}{2\pi l} \frac{\iint\limits_S f ds' \iint\limits_S f \frac{ds}{r}}{\iint\limits_S f^2 ds}. \qquad \text{(А1.1-2)}$$

Тогда присоединенная масса, приходящаяся на единицу площади пластины, при соприкосновении конструкции с жидкостью соответственно одной или двумя поверхностями будет:

$$m = \rho_1 \frac{l}{n} \eta(\frac{l}{nb}),$$

$$m = \frac{l}{n} \eta(\frac{l}{nb}) (\rho_1 + \rho_2). \qquad \text{(А1.1-3)}$$

Графики зависимости коэффициента η от отношения сторон опорного контура пластины *l/(nb)* и числа участвующих в движении пролетов представлены на рис. А1.1-1 – А1.1-3 для симметричных и антисимметричных форм ее колебаний.

Обобщенная присоединенная масса отдельного пролета пластины определяется по формуле:

$$M = m \int_0^{l/n} \int_0^b f_{пл}^2 (x, y)\, dxdy. \qquad \text{(А1.1-4)}$$

Обозначения в (А1.1-2 – А1.1-4) см. в разд. 4.

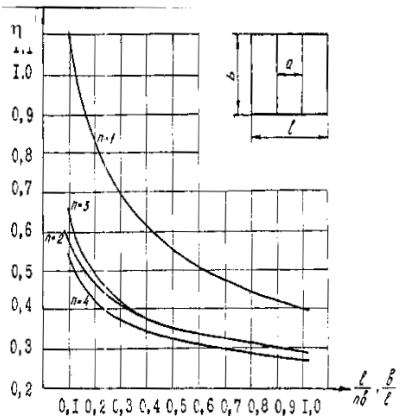


Рис. А1.1-1 Коэффициенты присоединенных масс для пластин (панелей), свободно опертыми по контуру

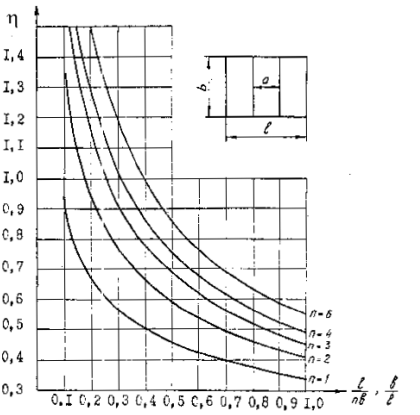


Рис. А1.1-2 Коэффициенты присоединенных масс для пластин (панелей), жестко заделанных по контуру

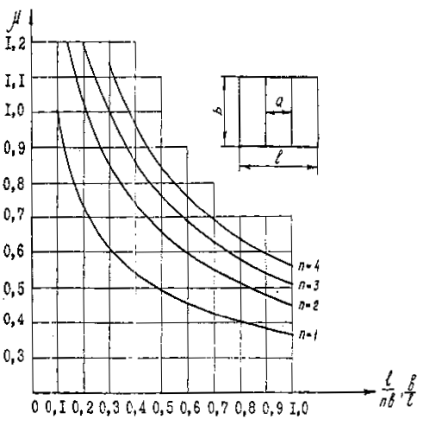


Рис. А1.1-3 Коэффициенты присоединенных масс для пластин (панелей), с двумя противоположными кромками жестко заделанными, двумя другими – свободно опертыми

А1.2 Присоединенные массы панелей и перекрытий.

Общие положения и расчетные зависимости для определения присоединенных масс пластин распространяются на перекрытия и их отдельные панели. Присоединенные массы, обусловленные колебаниями панелей и перекрытий и приходящиеся на единицу их площади, определяются соответственно по формулам:

$$m_n = \rho_в b\eta\left(\frac{b}{l}\right),\ m_{пер} = \rho_в B\eta\left(\frac{B}{L}\right), \qquad (А1.2)$$

где $\rho_в$ – плотность жидкости;
$\eta(b/l)$ и $\eta(B/L)$ – определяются по графикам рис. А1.1-1 – А1.1-3.

А1.3 Присоединенные массы жидкости при сложном движении конструкции.

Реальные конструкции судового корпуса участвуют обычно в нескольких составляющих колебательного движения. Так, перемещения при колебаниях определенного тона пластины, подкрепленной упругими ребрами, можно представить зависимостью:

$$w_{пл}(x, y, t) = q_1(t) f_р(y) + q(t) f_{пл}(x, y), \qquad (А1.3\text{-}1)$$

где $q_1(t)$, $q(t)$ – обобщенные координаты, характеризующие перемещения соответственно ребер и пластины относительно ребер;
$f_р(y)$, $f_{пл}(x,y)$ – функции, описывающие формы колебаний соответственно ребра и пластины.

Кинетическая энергия жидкости, вовлекаемой в движение колеблющейся системой, согласно (А1-3) будет равна:

$$T = \frac{\rho_в}{4\pi}\iint_S(\dot{q}_1 f_р + \dot{q} f_{пл})ds' \iint_S(\dot{q}_1 f_р + \dot{q} f_{пл})\frac{ds}{r} = \frac{1}{2}(M_1\dot{q}_1^2 + M_{01}\dot{q}_1\dot{q} + M\dot{q}^2); \qquad (А1.3\text{-}2)$$

$$M_1 = \rho_в b\eta(\frac{b}{l})\int_0^l\int_0^b f_р^2(y)\,dxdy; \qquad (А1.3\text{-}3)$$

$$M = \rho_в \frac{l}{n}\eta(\frac{l}{nb})\int_0^l\int_0^b f_{пл}^2(x, y)\,dxdy; \qquad (А1.3\text{-}4)$$

$$M_{01} = 2\sqrt{M_1 M}, \qquad (А1.3\text{-}5)$$

где M_1 – присоединенная масса панели, обусловленная колебаниями ребер;
M – присоединенная масса пластины, обусловленная ее колебаниями относительно ребер;
M_{01} – величина, обусловленная взаимодействием присоединенных масс, вызванных разными составляющими движения конструкции; выражение (А1.3-5) получено приближенно путем замены переменного по поверхности пластины распределения источников постоянным;

$\eta(b/l)$ *и* $\eta(l/nb)$ – коэффициенты присоединенных масс, вызванных соответственно колебаниями панели (ребер) и пластины относительно ребер (см. рис. А1.1-1 – А1.1-3).

Выражения для кинетической энергии (А1.3-2) используются при решении задач о свободной и вынужденной вибрации корпусных конструкций (см. А2.1).

А2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВИБРАЦИИ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Расчеты и обеспечение вибрационной прочности и допустимой местной вибрации всего многообразия корпусных конструкций (пластин, балок набора, оболочек, перекрытий, выступающих частей и т. п.) требуют разного подхода к решению задач и использования различных видов идеализации основных факторов, влияющих на вибрацию. Все эти задачи решаются на основании общей теории колебаний упругих систем. Учет влияния окружающей конструкцию жидкости производится по методу присоединенных масс.

Определенные трудности возникают в тех случаях, когда конструкция участвует в сложных перемещениях, в которых сочетаются несколько видов или составляющих колебательного процесса. Так, изгибные колебания корпуса судна, различных выступающих частей в жидкости могут сопровождаться крутильными колебаниями. Или, например, пластины, балки и другие конструктивные элементы корпуса участвуют одновременно в нескольких движениях: вместе с основными несущими конструкциями и относительно них.

В каждой из составляющих движения конструкция увлекает за собой определенное количество жидкости – присоединенные массы, обусловленные данным видом колебаний конструкции. Поэтому взаимодействие конструкции с окружающей жидкостью является сложным, что приводит к известным трудностям при применении принципа присоединенных масс: при сочетании различного вида движений в выражении для кинетической энергии жидкости появляются члены, содержащие произведения скоростей составляющих движения (в общем случае поступательных и угловых), т. е. появляются присоединенные массы и присоединенные моменты инерции жидкости, обусловленные различными видами деформации, и присоединенные статические моменты жидкости, вызванные различными комбинациями этих деформаций.

А2.1 Панели.

Наиболее уязвимыми с точки зрения вибрационной прочности являются пластины с подкрепляющим набором, общий вид которых показан на рис. А2.1 (*а*).

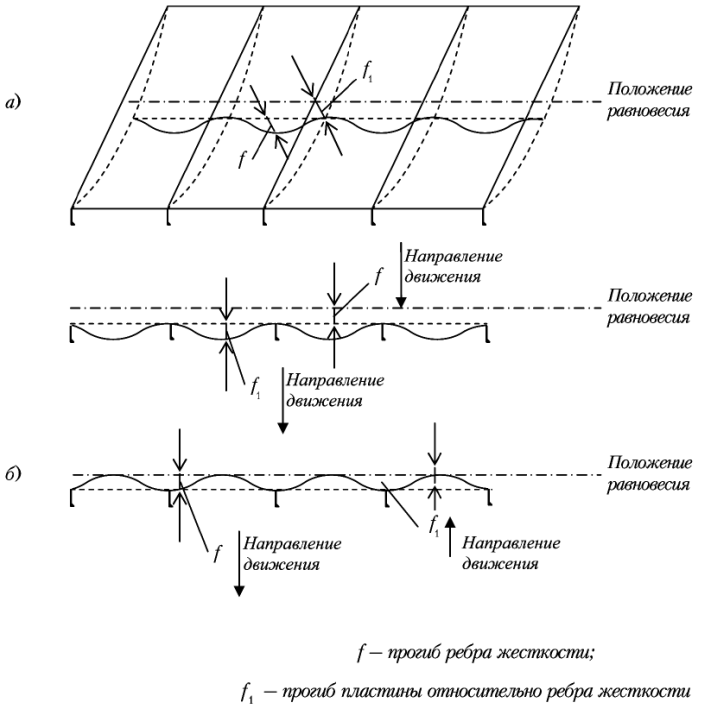


Рис. А2.1 Симметричные формы колебаний пластин, подкрепленных упругими ребрами жесткости

Расчеты свободной и вынужденной вибрации таких пластин при симметричных формах колебаний[1], показанных на рис. А2.1 (*б*), производятся с учетом динамического взаимодействия с жидкостью, вовлекаемой в сложное движение различными составляющими колебаний конструкции.

Уравнения движения пластины, подкрепленной упругими ребрами, можно получить энергетическим методом, представив перемещение пластины в виде (А1.3-1). Составление выражений для кинетической и потенциальной энергий самой конструкции затруднений не представляет. Особенности составления выражения для кинетической энергии жидкости описаны в А1.

Систему дифференциальных уравнений, описывающих свободные колебания панели, можно получить с помощью уравнений Лагранжа:

[1] При симметричных формах колебаний многопролетной пластины подкрепляющий ее набор работает как упругий (упругие опоры), при антисимметричных – как жесткий.

$$\ddot{q} + A_0\ddot{q}_1 + A_1 q = 0;$$
$$\ddot{q}_1 + A_2\ddot{q} + A_3 q_1 = 0, \qquad \text{(A2.1-1)}$$

где A_0, A_1, A_2, A_3 – величины, зависящие от параметров конструкции, условий ее закрепления на контуре (формы колебаний) и соприкосновения с жидкостью:

$$A_0 = \frac{M_{01}^k + 0{,}5M_{01}}{M^k + M}; \quad A_1 = \frac{C}{M^k + M};$$
$$A_2 = \frac{M_{01}^k + 0{,}5M_{01}}{M_1^k + M_1}; \quad A_3 = \frac{C_1}{M_1^k + M_1}. \qquad \text{(A2.1-2)}$$

M_1^k и M^k – обобщенные массы пластин при их колебаниях вместе с ребрами жесткости и при колебаниях относительно ребер, соответственно;

M_{01}^k – величина, обусловленная взаимодействием пластин и ребер при их совместных колебаниях;

$$M_1^k = m_{\text{п}} \int_0^l \int_0^b f_{\text{р}}^2(y)\, dxdy;$$
$$M^k = m_{\text{пл}} \int_0^l \int_0^b f_{\text{пз}}^2(x, y)\, dxdy; \qquad \text{(A2.1-3)}$$
$$M_{01}^k = m_{\text{пл}} \int_0^l \int_0^b f_{\text{пз}}\, f_{\text{р}}(x, y)\, dxdy,$$

где $m_{\text{пл}}$ – масса единицы площади пластины;

$m_{\text{п}}$ – масса единицы площади панели с учетом ребер жесткости;

C и C_1 – обобщенные жесткости соответственно пластины и ребра жесткости;

M, M_1 и M_{01} – определяются по формулам (А1.3-3) – (А1.3-5).

Таким образом, знаменатели в выражениях (А2.1-2) являются обобщенными массами пластины ($M^k + M$) и панели ($M_1^k + M_1$) с учетом их присоединенных масс.

В выражениях (А2.1-2) A_1 и A_3 представляют собой квадраты собственных парциальных (вычисленных в предположении изолированной работы) частот пластин и ребер жесткости.

Формула (4.1.1.5-1) (см. 4.1.1.5) для определения совместных собственных частот пластины и ребер жесткости с учетом их динамического взаимодействия и влияния окружающей жидкости получена из условия равенства нулю определителя системы уравнений (А2.1-1).

Пределы значений совместных частот пластины и ребер жесткости расширяются по сравнению с их парциальными частотами. Как показали расчеты реальных судовых пластин, подкрепленных ребрами, низшая частота снижается на 20–30 %, а высшая – может увеличиться в несколько раз, при-

ближаясь к соответствующей частоте конструкции в воздухе. Это и понятно: при первой частоте совместных колебаний ребра жесткости и пластина колеблются в фазе (рис. А2.1), т. е. влияние присоединенных масс растет. При второй частоте, когда ребра и пластины колеблются в противофазе, происходит некоторая компенсация воздействия на конструкцию присоединенных масс, обусловленных этими перемещениями конструкции. Правильность и достаточная точность полученных результатов была подтверждена результатами экспериментов, проведенных на плавающих судах.

Дифференциальные уравнения вынужденных колебаний пластины, подкрепленной ребрами жесткости, с учетом неупругого сопротивления конструкции имеют вид:

$$\ddot{q} + A_0 \ddot{q}_1 + A_1 (1 + i\,\varepsilon_{пл})\, q = P\, e^{i\omega t},$$

$$\ddot{q}_1 + A_2 \ddot{q} + A_3 (1 + i\,\varepsilon_{р})\, q_1 = P_1\, e^{i\omega t}.$$

Значения входящих в эти уравнения коэффициентов и обобщенных сил P и P_1 представлены в 4.1.1.5 и 4.1.2.2.

Амплитуды вынужденных колебаний пластин и ребер жесткости с учетом их динамического взаимодействия определяются по выражениям (4.1.2.2-1).

А2.2 Изогнутые пластины и пластины с вырезами.

А2.2.1 Свободные колебания изогнутых пластин.

Кривизна пластин сказывается на их собственных частотах уже при весьма малых значениях погиби f_0. Так, для свободно опертой пластины при относительной погиби пластины $f_0/h = 1$ собственная частота увеличивается примерно на 5 %.

Для цилиндрических изогнутых пластин (две противоположные кромки криволинейные, две другие прямолинейные) наименьшей собственной частоте соответствует обычно форма колебаний по одной полуволне вдоль образующей и одной или нескольким полуволнам вдоль криволинейной кромки.

Для расчета колебаний изогнутой пластины при отношении ($f_0/a \le 0{,}2$), (a – наименьший размер в плане) используется теория пологих оболочек.

Уравнения колебаний пологой цилиндрической оболочки представляют систему двух линейных бигармонических уравнений относительно прогиба w и функции напряжений φ:

$$D\nabla^4 w - \frac{1}{R}\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + m\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = p\,(x, y, t); \qquad \text{(А2.2.1-1)}$$

$$\nabla^4 \varphi = -\frac{Eh}{R}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2},$$

где R, h, m – соответственно радиус кривизны, толщина и масса единицы площади оболочки;
$p(x, y, t)$ – давление на ее поверхность;
x, y – координаты соответственно вдоль прямолинейной и изогнутой кромок;
a и b – размеры оболочки в плане (рис. 4.1.1.3);
β_0 – угол раскрытия.

Функция напряжений определяет величину нормальных T_1, T_2 и касательных S усилий, возникающих в изогнутых пластинах уже при малых колебаниях:

$$T_1 = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}; \qquad T_2 = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}; \qquad S = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}. \tag{А2.2.1-2}$$

Определение собственных частот колебаний свободно опертой на жестких кромках оболочки производится из уравнений свободных колебаний (при p=0) путем задания форм колебаний в виде произведения синусов целой кратности в обоих направлениях. Разыскивая решение уравнений свободных колебаний в виде:

$$w = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{kn} \cdot \sin \delta_k \frac{x}{R} \sin \gamma_n \beta \cdot \cos \lambda_{kn} t;$$

$$\varphi = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} B_{kn} \cdot \sin \delta_k \frac{x}{R} \sin \gamma_n \beta \cdot \cos \lambda_{kn} t, \tag{А2.2.1-3}$$

получим после подстановки этих выражений в (А2.2.1-1) при $p(x,y,t) = 0$ в формулу для собственных частот (4.1.1.3-1).

В выражениях (А2.2.1-3) обозначено:

$$\delta_k = \frac{k\pi R}{b}; \qquad \gamma_n = \frac{n\pi}{\beta_0},$$

где k, n – число полуволн соответственно вдоль прямолинейной и вдоль криволинейной кромок пластины.

Учет влияния присоединенных масс воды при колебаниях изогнутых пластин производится по тем же формулам, что и для плоских пластин. При этом части изогнутой пластины между узловыми линиями можно рассматривать как отдельные пластины, учитывая перетекание жидкости в соседние участки разделенной узловыми линиями пластины.

При большом значении числа n учет влияния присоединенных масс воды на собственные частоты изогнутых пластин удобнее производить по формуле, полученной для замкнутых оболочек:

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{\sqrt{1+\dfrac{R(\rho_1+\rho_2)}{m\sqrt{\delta_k^2+\gamma_n^2}}}}. \qquad \text{(A2.2.1-4)}$$

A2.2.2 Свободные колебания пластины с вырезами.

Расчет свободных колебаний пластины с вырезами производится путем интегрирования уравнения малых колебаний пластин с переменной цилиндрической жесткостью, зависящей от формы и числа вырезов. При этом цилиндрическая жесткость представлялась с помощью единичных функций,

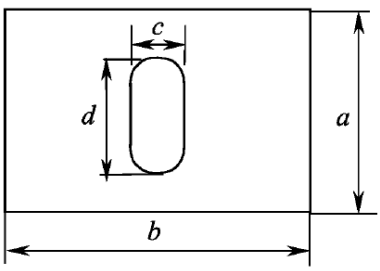


Рис. А2.2.2 Пластина с вырезом

определяющих наличие «пустых» мест в районе вырезов. Интегрирование уравнения выполняется методом Бубнова-Галеркина, причем в качестве фундаментальных функций прямоугольной пластины принимаются следующие функции:

$f(x,y) = \sin\dfrac{\pi x}{a}\cdot\sin\dfrac{\pi y}{b}$ – для свободно опертой на жестких опорных кромках пластины,

$f(x,y) = \sin^2\dfrac{\pi x}{a}\cdot\sin^2\dfrac{\pi y}{b}$ – для жестко заделанной пластины.

Окончательно формулы для определения собственных частот пластин с вырезами и присоединенных масс жидкости для этих пластин сводятся к аналогичным формулам для сплошных пластин, в которых вводятся поправочные коэффициенты $\xi\left(\dfrac{d}{a}\right)$ и $\chi\left(\dfrac{d}{b}\right)$ (см. формулы (4.1.1.2-1) и (4.1.1.2-2)).

Коэффициент $\xi\left(\frac{d}{a}\right)$ выражает зависимость частоты колебаний пластины в воздухе от размеров выреза; коэффициент $\chi\left(\frac{d}{b}\right)$ учитывает влияние выреза на присоединенные массы;

Аппроксимации для коэффициентов $\xi\left(\frac{d}{a}\right)$ и $\chi\left(\frac{d}{b}\right)$ получены путем сравнения экспериментально полученных собственных частот в воде и воздухе большой серии пластин с вырезами.

Наличие вырезов уменьшает присоединенные массы пластины и соответственно увеличивает ее собственные частоты по сравнению с аналогичной сплошной пластиной.

А2.3 Судовые перекрытия.

Судовые перекрытия представляют собой систему перекрестных балок и разделяются на регулярные и нерегулярные перекрытия. Первые образованы одинаковыми, равноотстоящими призматическими балками главного направления и одной или несколькими призматическими перекрестными связями. Балки каждого из направлений регулярного перекрытия имеют одинаковые условия закрепления на опорном контуре. Регулярные перекрытия являются весьма распространенными конструкциями судового корпуса. К ним относятся большинство палубных, днищевых и бортовых перекрытий, а также перекрытия, создаваемые набором платформ и переборок. Нерегулярные перекрытия могут быть образованы непризматическими и неравноотстоящими связями, произвольно закрепленными на опорном контуре. Перекрытия могут иметь вырезы и подкрепляться пиллерсами. Наиболее характерным примером нерегулярного перекрытия является днищевое перекрытие машинного отделения, на котором расположены фундаменты под механизмы, а сами механизмы могут устанавливаться на амортизаторах. Граничные условия для перекрытий (условия опирания балок главного направления и перекрестных связей) в общем случае определяются, исходя из формы совместных колебаний рассматриваемого и смежных с ним днищевых и бортовых перекрытий. В ряде случаев граничные условия могут быть назначены, исходя из конструктивных особенностей закрепления балок. Например, наличие коффердамов (и других, близко расположенных переборок) ведет к жесткой заделке перекрестных связей; мощные скуловые кницы и наличие рамных шпангоутов ведут к жесткой заделке у бортов балок главного направления.

Для расчета свободных и вынужденных колебаний регулярных перекрытий с простейшими граничными условиями (свободным опиранием или жесткой заделкой балок перекрытия) может быть использован метод приведения. Для определения параметров вибрации нерегулярных перекрытий,

перекрытий с усложняющими элементами (вырезами, пиллерсами, амортизированными механизмами), а также для определения граничных условий перекрытия из рассмотрения его совместных колебаний с соседними конструкциями следует использовать метод конечных элементов.

А2.3.1 Основные зависимости метода приведения. Присоединенные массы перекрытий с учетом влияния мелководья.

При использовании метода приведения форма колебаний перекрытия задается в виде функции $f(x, y) = X(x)\ Y(y)$, удовлетворяющей условиям закрепления связей. Предполагая перекрестные связи, ориентированными вдоль оси ОХ, а балки главного направления – вдоль оси ОУ, обычно принимают:

в случае свободного опирания соответственно перекрестных связей и балок главного направления –

$$X(x) = \sin\frac{\pi x}{L}, \qquad Y(y) = \sin\frac{\pi y}{B};$$

в случае их жесткой заделки –

$$X(x) = \sin^2\frac{\pi x}{L}, \qquad Y(y) = \sin^2\frac{\pi y}{B},$$

где L – длина перекрестных связей;
B – длина балок главного направления.

Выражение для частоты свободных колебаний перекрытия имеет вид:

$$\lambda^2 = \frac{K_{\text{пр}}}{M_{\text{пр}}}, \qquad \text{(А2.3.1-1)}$$

где $K_{\text{пр}}$ и $M_{\text{пр}}$ – соответственно приведенная жесткость и приведенная масса перекрытия, определяемые формулами:

$$K_{\text{пр}} = EI\sum_{1}^{k}\int_{0}^{L}\left[f''_x(x, y_j)\right]^2 dx + Ei_o\sum_{1}^{n}\int_{0}^{B}\left[f''_y(x_i, y)\right]^2 dy; \qquad \text{(А2.3.1-2)}$$

$$M_{\text{пр}} = M\sum_{1}^{k}\int_{0}^{L} f^2(x, y_j)\,dx + \sum_{1}^{n}\int_{0}^{B} f^2(x_i, y)\,dy + \int_{0}^{B}\int_{0}^{L} m_p f^2(x, y)\,dxdy + \sum_{1}^{r} m_s f^2(x_s y_s), \qquad \text{(А2.3.1-3)}$$

где I, i_o, M и m – моменты инерции поперечных сечений и погонные массы соответственно перекрестных связей и балок главного направления;
k и n – число перекрестных связей и балок главного направления;
f''_x и f''_y – частные производные от функции $f(x,y)$ соответственно по x и по у;
m_p, m_s – распределенные (на единицу площади) и сосредоточенные массы, расположенные на перекрытии;
r – число сосредоточенных масс.

Частота свободных колебаний перекрытия с учетом влияния присоединенных масс жидкости определяется по формуле:

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{\sqrt{1+\eta\left(\frac{B}{L}\right)\frac{B}{m_{эк}}(\rho_1+\rho_2)}}, \qquad \text{(А2.3.1-4)}$$

где $\eta\left(\frac{B}{L}\right)$ – коэффициент присоединенных масс, определяемый по графикам на рис. А1.1-1–А1.1-3 при $n = 1$ – если отсутствует перетекание жидкости и $n = 3$ – если перетекание есть;

$m_{эк} = \frac{Q}{BL}$;

Q – суммарная масса конструкции, оборудования, а также топлива и воды в запрессованных цистернах и двойном дне.

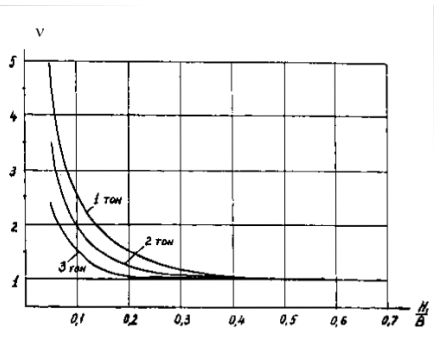


Рис. А2.3.1 Значения коэффициента ν в зависимости от номера тона колебаний

Влияние мелководья ($H_1 \le 0{,}5B$, H_1 – глубина под килем) на частоту свободных колебаний учитывается по формуле:

$$\lambda^*_{м} = \frac{\lambda^*}{\sqrt{\nu}}, \qquad \text{(А2.3.1-5)}$$

где ν – коэффициент, учитывающий влияние мелководья на присоединенные массы перекрытия и определяемый по графику рис. А2.3.1.

При определении амплитуд резонансных колебаний перекрытия, находящегося под воздействием гармонических усилий $p\,(x, y)\sin\overline{\omega}\,t$, вводится понятие приведенной силы:

$$\Phi_{\text{пр}} = \int_0^B \int_0^L p(x, y) \sin \overline{\omega} t \, f(x, y) \, dx dy. \qquad \text{(А2.3.1-6)}$$

Максимальная амплитуда резонансных колебаний перекрытия определяется по формуле:

$$a_{\max} = \frac{\Phi_{\text{пр}}}{K_{\text{пр}}} \frac{2\pi}{\psi}, \qquad \text{(А2.3.1-7)}$$

где ψ – коэффициент сопротивления при колебаниях перекрытия, принимаемый в соответствии с данными, приведенными в табл. В1 приложения В. Величина $\frac{2\pi}{\psi}$ представляет собой коэффициент динамичности.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ЗАПАСЫ ПО ЧАСТОТЕ

Расчеты вибрации судовых конструкций производятся обычно без учета технологических факторов, возникающих при сварке и сборке конструкций. Влияние этих факторов на частоты свободных и амплитуды вынужденных колебаний конструкций учитывается путем введения коэффициентов запаса по частоте и прочности, гарантирующих отсутствие резонанса конструкций с возмущающими усилиями и достаточную прочность при действии этих сил.

Основными технологическими факторами в судовых конструкциях, оказывающими влияние на их динамические характеристики, являются:

остаточные напряжения, вызванные сваркой;

бухтиноватость (начальная погибь) пластин, образующаяся в результате обработки листового материала, неравномерного остывания при сварке, потери устойчивости пластин под действием сварочных напряжений;

перекат (отклонение толщины от номинального значения в пределах отрицательного допуска) листов;

отступления от чертежа в расстояниях между ребрами жесткости (изменения в размерах пластин).

Б1 ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ПОГИБИ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

Почти всякая сварка вызывает местные напряжения, приближающиеся по своей величине к пределу текучести свариваемого материала. Остаточные напряжения, обусловленные стеснением деформации, могут быть двух типов. Первичные или местные сварочные напряжения возникают в любом случае сварки, даже если свариваемый объект свободен от связей. Эти напряжения являются следствием усадки материала при охлаждении, то есть того стеснения, которое испытывает при своем перемещении одна часть основного материала со стороны других его частей. Местные сварочные напряжения локализуются в непосредственной близости от сварного шва. Вторичные или реактивные сварочные напряжения вызываются стеснением свариваемого объекта в его температурных деформациях со стороны связей или стеснением, налагаемым извне на свободное движение конструкции или отдельной его части. Реактивные напряжения захватывают большие объемы металла и несут в себе значительные количества энергии в противоположность местным остаточным напряжениям. В пластинах судовых конструкций реактивные напряжения могут достигать величины эйлеровых напряжений, вызывая потерю устойчивости этими пластинами и образование так называемой начальной технологической погиби. Технологическая погибь возникает также в результате деформаций, вызываемых наложением угловых швов (приваркой набора к обшивке) и усадкой материала при остывании. В большинстве случав технологическая погибь обусловлена совместным действием обеих этих причин.

Существуют нормы на допустимую местную построечную деформацию сварных корпусных конструкций, в которых указаны величины допустимых стрелок бухтин для судовых пластин. Они зависят от толщины пластин и расстояния между набором и для конструкций кормовой оконечности обычно не превышают толщины листов.

Экспериментальные исследования остаточных напряжений в корпусных конструкциях, проведенные на ряде судов, показали, что остаточные напряжения в сварных швах и около них являются растягивающими и достигают предела текучести материала, а в местах, отдаленных от швов (реактивные напряжения), как правило, бывают сжимающими и составляют 25–30 % от этого значения. Каждый этап в технологии сборки оставляет след в нарастании остаточных напряжений.

Оценка влияния остаточных напряжений и технологической погиби на частоты свободных колебаний пластин может быть произведена с помощью выражения для собственной круговой частоты пластины, полученной из решения дифференциального уравнения поперечных колебаний пластины,

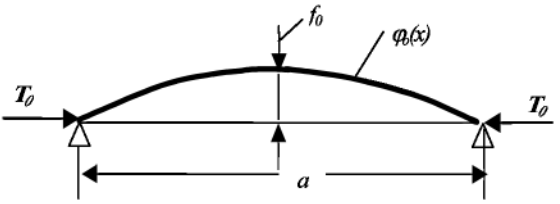


Рис. Б1 Форма начальной погиби

имеющей начальную погибь и осевые усилия в срединной поверхности. При цилиндрическом изгибе пластины (пластины с $b/a \geq 2{,}5$) указанная частота может быть представлена как частота балки-полоски, выделенной из пластины поперек ее длинных сторон:

$$\overline{\lambda}^2 = \frac{1}{m_0 \int_0^a w_\phi^2 dx} \left(D \int_0^a w_\phi^{IV} w_\phi dx + T_0 \int_0^a w_\phi'' w_\phi dx - \frac{EhxAf_0^2}{a} \int_0^a \varphi_0'' w_\phi dx\right), \qquad (Б1)$$

где m_o – погонная масса балки-полоски вместе с присоединенной массой воды;
$w_\phi(x)$ – форма свободных колебаний пластины;
$\varphi_0(x)$ – форма начальной погиби (рис. Б1);
f_0 – стрелка начальной погиби в середине пластины;
x – коэффициент распора;
T_0 – сжимающие усилия;

$$A = \int_0^a \varphi_o'' w_\phi' \, dx.$$

Первый член в выражении (Б1) является квадратом частоты плоской пластины, а два следующих – поправками, учитывающими соответственно влияние сжимающей силы T_0 и начальной погиби f_0. Первая поправка всегда отрицательна, а вторая положительна, так как сжимающие усилия и интеграл в последнем члене выражения (Б1) отрицательны.

Результаты расчетов, произведенных для пластин с параметрами, характерными для традиционных корпусных конструкций, и при значениях

$f_o = (0 \div 1{,}5)h$, $\Delta = \frac{T_0}{T_{кр}} = 0 \div 1{,}0$ ($T_{кр}$ – эйлеровы усилия) и $x = 0{,}5$, показали, что

начальная погибь может повышать собственную частоту плоской пластины на 25–30 %, в то время как сжимающие усилия могут понижать значение частоты на 15–25 %. Для ребер жесткости поправки, учитывающие влияние на собственные частоты указанных факторов, значительно меньше, чем для пластин, и не превышают 10 %.

Б2 ВЛИЯНИЕ ПЕРЕКАТА ЛИСТОВ И ОТСТУПЛЕНИЙ ОТ ЧЕРТЕЖА В РАЗМЕРАХ КОНСТРУКЦИЙ

В судовых конструкциях допуски на толщину листов h разрешаются только в меньшую сторону от номинала, и максимальный перекат листов не превышает 10 %. Отступления от чертежа в расстояниях между ребрами a может составить 3–5 %. Оценить изменение частоты свободных колебаний пластин λ, вызванное указанными технологическими факторами, можно из выражения:

$$\delta\lambda = \frac{\partial\lambda}{\partial a}\delta a + \frac{\partial\lambda}{\partial h}\delta h. \qquad \text{(Б2)}$$

Используя формулу для определения частоты свободных колебаний балки-полоски и учитывая, что изменение толщины пластины по отношению к номиналу возможно только в меньшую сторону, а изменение расстояния между ребрами – в любую сторону, выражение (Б2) можно представить в виде $\delta\lambda = \lambda\left(-\frac{\delta h}{h} \pm 2\frac{\delta a}{a}\right)$ или $\delta\lambda \approx (-0{,}1 \pm 0{,}05)\lambda$.

Изменение частоты свободных колебаний пластин судового корпуса, вызванное перекатом листов и отступлением от номинального значения – a, составляет соответственно –10 % и ± 5 %.

Б3 КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗАПАСА ПО ЧАСТОТЕ

Запас по частоте, обеспечивающий отсутствие резонанса, должен учитывать степень точности теоретического определения частот свободных колебаний с учетом погрешности в изготовлении конструкции, влияния различных технологических факторов, а также необходимость удаления от резонанса. Значение коэффициента запаса, необходимого для ухода конструкции от резонанса, может быть оценено по ширине резонансных пиков соответствующих реальных конструкций.

Значения коэффициентов запаса по частоте для различных корпусных конструкций представлены в табл. Б3.

Таблица Б3

Значения коэффициентов запаса по частоте

Тип конструкции	Коэффициент запаса по частоте
Пластины наружной обшивки, переборок, платформ и других конструкций	$k \geq 1{,}5$
Ребра жесткости, балки набора, перекрытия и другие стержневые конструкции	$k \geq 1{,}3$
Кронштейны, насадки и другие выступающие части	$k \geq 1{,}3$

РАССЕЯНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ

Поведение конструкции в резонансном и околорезонансном режимах работы определяется рассеянием энергии при колебаниях конструкции (потерями энергии на внутреннее и внешнее сопротивления), характеризуемым логарифмическим декрементом колебаний δ или так называемым коэффициентом демпфирования (сопротивления) $\psi = 2\delta$.

Рассеяние энергии при колебаниях конструкций (перекрытий, выступающих частей и др.) и их отдельных элементов (пластин, ребер жесткости) происходит в самом материале (весьма малая величина)[1], в узлах соединений, соседних конструкциях, окружающей среде, а также зависит от насыщения и загрузки конструкции. Совокупностью этих факторов определяют одинаковый порядок величин коэффициентов сопротивления аналогичных конструкций, изготовленных из разных металлических материалов. Определение коэффициента ψ производится экспериментально.

Для определения коэффициентов демпфирования корпусных конструкций используются известные способы:

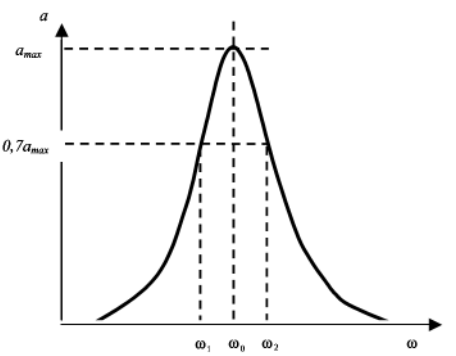


Рис. В-1 Определение коэффициента ψ по ширине резонансного пика

по кривым свободных затухающих колебаний для тех элементов конструкций (обычно, пластин и ребер жесткости), для которых резонансные пики амплитудно-частотных кривых оказывались слишком узкими и построить их весьма затруднительно;

по относительной ширине резонансных пиков (рис. В-1):

[1] Внутреннее поглощение энергии в материале составляет 3–5 % от общей величины.

$$\psi = 2\pi \cdot \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0},$$

где ω_0 – резонансная частота колебаний системы;
ω_2, ω_1 – частоты, возмущающей силы, соответствующие 0,7 a_{max}.

Многочисленные экспериментальные исследования пластин, ребер жесткости, перекрытий, входящих в состав судового корпуса, позволяют рекомендовать при расчетах резонансных колебаний металлических корпусных конструкций значения коэффициентов ψ, приведенные в табл. В-1.

Таблица В-1

Значения коэффициентов сопротивления корпусных конструкций

Тип конструкции	Величина коэффициента сопротивления ψ
Судовые пластины, поля перекрытий (ребра жесткости)	0,2–0,3
Палубные перекрытия	0,3–0,5
Палубные перекрытия твиндечного типа, днищевые перекрытия	0,5–0,6
Днищевые перекрытия машинных отделений	0,7–0,9

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

КРИТЕРИИ ВИБРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ

Критериями вибрационной прочности конструкций судового корпуса являются допускаемые напряжения на действие вибрационных нагрузок или их долговечность – в зависимости от характера изменения усталостной прочности с ростом числа циклов нагружения.

Корпусные конструкционные материалы в коррозионной среде (морской воде), а некоторые из них (например, алюминиево-магниевые сплавы) и в воздухе, не имеют физического предела усталости: их усталостная или коррозионно-усталостная прочность монотонно уменьшается с ростом числа перемен нагрузки. В то же время у малоуглеродистых и низколегированных сталей в воздухе усталостные кривые выходят на горизонталь.

Усталостные испытания проводились на консольных образцах (рис. Г-1), размеры которых исключают влияние масштабного фактора. Испытаниям подвергались гладкие образцы и сварные соединения со стыковыми и тавровыми (угловыми) сварными швами: односторонними сплошными, двухсторонними сплошными и прерывистыми.

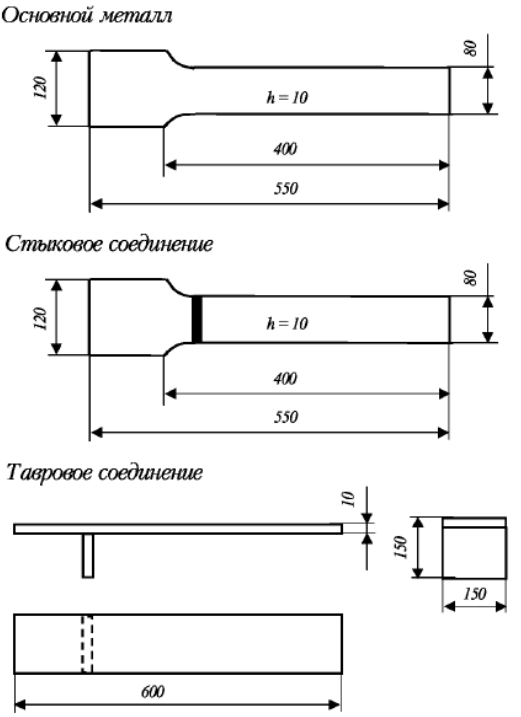


Рис. Г-1 Типовые образцы для проведения усталостных испытаний

Причинами снижения усталостной прочности сварных соединений по сравнению с усталостной прочностью основного металла являются структурные изменения в металле в районе сварных швов, в результате которых изменяются его механические свойства, концентрация напряжений, создаваемая формой шва и технологическими дефектами, а также внутренние напряжения, обусловленные усадочными явлениями в металле при остывании. Наиболее значительное снижение усталостной прочности тавровых соединений с прерывистыми швами связано с более резко выраженной концентрацией напряжений.

Допускаемые напряжения $\sigma_{доп}$ определяются как предел усталости σ_{-1} (физический или ограниченный, соответствующий числу перемен нагрузки за весь срок эксплуатации судна), деленный на коэффициент запаса κ=1,65. Коэффициент запаса учитывает погрешности определения внешней нагрузки, расчетов параметров вибрации, определения усталостных характеристик и т. д.

ПРИНЦИПЫ РАЦИОНАЛЬНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ УЗЛОВ В РАЙОНЕ ДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК

Рациональное проектирование корпусных конструкций, находящихся под воздействием вибрационных усилий, заключается не только в соответствующем выборе балок набора, длины шпации, толщины обшивки, обеспечивающих запас по частоте (по отношению к частотам возмущающих усилий) или допустимую амплитуду колебаний, но и в рациональном оформлении узлов конструкций, т. к. отдельные неудачно спроектированные узлы могут явиться источником концентрации напряжений, приводящей к снижению усталостной прочности и повреждениям (рис. Д-1).

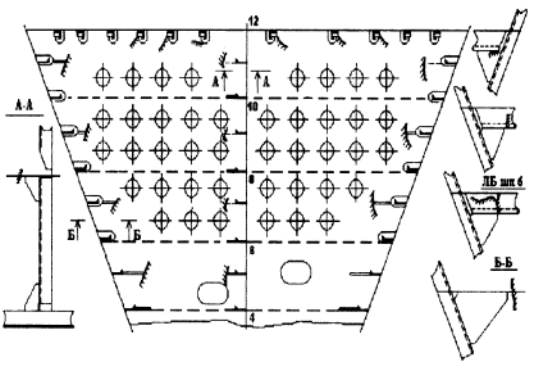


Рис. Д-1 Пример усталостных повреждений конструкции поперечной переборки

Основным принципом проектирования конструкций, подвергающихся действию вибрационных нагрузок, является устранение узлов, создающих концентрацию напряжений. Это достигается созданием замкнутых контуров из жестких связей конструкций; исключением резкого изменения поперечного сечения связей; исключением «жестких» точек, возникающих, главным образом, у концов книц, не доведенных до жестких связей, и в местах прохода ребер жесткости через полотнища переборок и стенки балок основного набора. Так, ребра жесткости (и другие балки набора) в местах прохода через полотнища переборок, флоров и стрингеров должны быть перевязаны со стойками переборок и поясками основных балок набора (рис. Д-2). Для менее ответственных конструкций корпуса могут допускаться узлы прохода

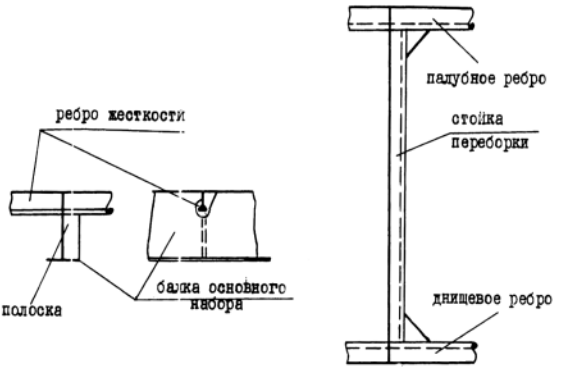


Рис. Д-2 Пример рационального оформления узлов прохода ребер через стенки балок основного набора и обшивку переборок

связей через пластины без перевязки с набором, если надежно обеспечено отсутствие резонанса для всех их конструктивных элементов. Однако это не относится к конструкциям в районе непосредственного воздействия пульсирующих давлений от гребных винтов, где необходимо устранение мест концентрации напряжений во всех связях. Для поперечных переборок наиболее рациональной является конструкция, при которой ее стойки совмещены с днищевыми и палубными ребрами жесткости, при этом их соединение должно осуществляться с помощью книц. В случае разного расстояния между стойками переборки и ребрами жесткости днища и палубы рекомендуется конструкция переборок с легкими шельфами, на которые опираются стойки

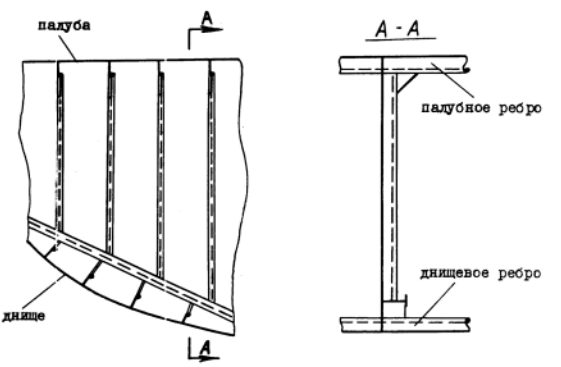


Рис. Д-3 Пример рационального оформления узлов соединения переборки с днищевым и палубным набором

и с которыми соединяются с помощью книц днищевые и палубные ребра жесткости (рис. Д-3). Узлы соединения поясков продольных и поперечных балок основного набора должны быть оформлены с помощью книц. Динамические усилия от неуравновешенных механизмов должны передаваться на жесткие связи. Приварка набора в конструкциях, воспринимающих вибрационные нагрузки, должна производиться только сплошными двухсторонними швами.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОБЩЕЙ ХОДОВОЙ ВИБРАЦИИ КОРПУСА СУДНА

Отменено в связи с потерей актуальности

ВВЕДЕНИЕ

Расчетное определение вибрационных характеристик корпусов судов, осуществляемое в процессе их проектирования, имеет целью проверку возможностей возникновения на построенном судне недопустимой вибрации, а также оценку эффективности внедрения (в случае необходимости) различного рода мероприятий для ее снижения до допускаемых нормами уровней.

Настоящая методика, устанавливающая порядок и основные положения выполнения расчетов вибрации при проектировании судна, позволяет в широком диапазоне частот оценить ожидаемые уровни вибрации корпуса на спецификационных режимах хода, а также рассчитывать частоты и формы его резонансных колебаний.

1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1 Методика предназначена для выполнения проектных расчетов вибрации корпусных конструкций судов в соответствии с положениями 1.5 части II «Корпус»[1], Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства, регламентирующих допустимые значения параметров общей вибрации корпуса судна.

1.2 В методике приведен порядок выполнения расчетов вибрации в процессе проектирования судна с целью определения необходимости и достаточности мероприятий по предотвращению на нем повышенной вибрации и по снижению ее, в случае необходимости, до допустимых пределов.

1.3 Методика выполнения расчетов общей вибрации не распространяется на режимы плавания судна во льдах.

1.4 Областью распространения методики являются металлические однокорпусные суда с классом РС длиной более 30 м.

2 ОПРЕДЕЛЕНИЯ

О б щ а я х о д о в а я в и б р а ц и я – колебания корпуса судна, вызванные работающими гребным винтом и главным двигателем.

[1] В дальнейшем – Правила РС.

Частота первого порядка – частота, равная частоте вращения гребного винта или коленчатого вала дизеля.

Частота лопастного порядка – частота, равная частоте вращения гребного винта, умноженная на число его лопастей.

Частоты основных порядков дизелей – частоты первого и второго порядков по отношению к частоте вращения коленчатого вала, а также частота, порядок которой равен числу цилиндров (для двухтактных дизелей) либо половине от числа цилиндров (для четырехтактных дизелей).

Присоединенная масса – масса жидкости, присоединяемая к массе колеблющегося в ней (соприкасающегося с нею) корпуса судна, кинетическая энергия которой эквивалентна кинетической энергии жидкости, вовлеченной корпусом в движение.

Возмущающие силы – внешние периодические силы и моменты, вызывающие общую ходовую вибрацию.

Основные обозначения

E, G – модуль нормальной упругости и сдвига материала корпуса, Па;

μ – коэффициент Пуассона материала корпуса;

$\rho_в$ – плотность воды, кг/м^3;

z – число лопастей гребного винта;

R – радиус гребного винта, м;

L – длина судна между перпендикулярами, м;

$B_\otimes$ – ширина судна на миделе, м;

B_x – ширина судна в поперечном сечении корпуса с продольной координатой x, м;

$d_\otimes$ – осадка судна на миделе для рассматриваемого грузового состояния, м;

d_x – осадка судна в поперечном сечении корпуса с продольной координатой x, м;

x – отстояние рассматриваемого поперечного сечения корпуса от кормового перендикуляра, м;

Δ – водоизмещение судна, т;

λ_n – частота n-го тона свободных колебаний корпуса, Гц;

ω – частота вращения гребного винта, Гц.

Система единиц

В качестве системы единиц в методике используется система СИ.

3 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1 Целью расчетов является определение уровней вибрации на жестких связях корпуса, т. е. в местах пересечения палуб с прочными поперечными и продольными переборками, бортами, транцем, стенками надстройки и т. п.

3.2 Расчетной оценке подлежат вертикальная, горизонтально-траверзная и продольная составляющие общей ходовой вибрации корпуса в стандартных треть-октавных полосах частот.

3.3 Расчет производится для спецификационных вариантов загрузки судна на основных эксплуатационных режимах.

3.4 В качестве возмущающих сил, рассматриваются вертикальные усилия первого, лопастного и удвоенного лопастного порядков от работающих гребных винтов, а также вертикальные усилия и моменты основных порядков главных дизелей.

3.5 На начальной стадии проектирования может производиться приближенная оценка собственных частот колебаний корпуса с помощью простых аналитических формул.

3.6 На стадии технического проектирования в качестве расчетного метода используется метод конечных элементов (МКЭ). Методика в основном ориентирована на использование компактных балочных расчетных моделей, позволяющих максимально снизить трудоемкость расчета при сохранении достаточной для практики точности. Правила сведения реального корпуса к компактной модели базируются на результатах теоретических и экспериментальных исследований, а также на опыте расчетов по натуроподобным моделям. Кроме того, в методике даны общие рекомендации по построению плоских и пространственных моделей корпуса.

Структура и порядок действий по предотвращению повышенной общей вибрации на стадии технического проектирования в общем виде представляются следующим образом:

1 этап − расчеты частот и форм резонансных колебаний корпуса для оценки возможности возникновения резонансных явлений в диапазоне изменения частот возмущающих усилий;

2 этап − расчеты уровней вынужденной вибрации корпуса и оценка их допустимости;

3 этап – разработка (при необходимости) рекомендаций по применению конструктивных или иных мероприятий, направленных на снижение повышенной вибрации, оценка их эффективности и достаточности.

4 УСИЛИЯ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ОБЩУЮ ХОДОВУЮ ВИБРАЦИЮ

4.1 УСИЛИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ РАБОТОЙ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ

Динамическое взаимодействие корпуса судна с находящимися в непосредственной близости от него винтами приводит к возникновению неуравновешенных периодических усилий, которые различаются по частоте и по месту их непосредственного воздействия на судовые конструкции (см.

также А1 приложения А). При наличии двух винтов суммарная величина усилия принимается равной усилию от одного винта, умноженному на 1,41.

4.1.1 Усилия первого порядка.

Актуальность учета усилий первого порядка объясняется близостью частот вращения винтов к низшим собственным частотам корпуса. Учитывая высокие значения коэффициентов динамичности корпуса на низших тонах (от 25 до 150, а в отдельных случаях и выше, в зависимости от типа судна, его загрузки и др.), возникновение резонансов с частотами первого порядка может привести к недопустимой вибрации даже при относительно небольших величинах возмущающих усилий.

Возникновение возмущающей силы первого порядка является, в основном, следствием гидродинамической неуравновешенности гребного винта, обусловленной, в свою очередь, неточностью его изготовления (разношаговостью, различием углов между лопастями и т. д.).

Для приближенной расчетной оценки этого усилия может быть использована формула:

$$F_1 = \left[1 + \frac{34}{z}\left(\frac{A}{A_D}\right)\left(\frac{H}{2R}\right)^2\right] k\, \rho_в\, \omega^2\, R^4, \qquad (4.1.1)$$

где $\frac{A}{A_D}$ – дисковое отношение гребного винта;

$\frac{H}{2R}$ – шаговое отношение гребного винта;

$к$ = 0,96 · 10 $^{-4}$; 1,15 · 10 $^{-4}$; 1,91 · 10 $^{-4}$ – для винтов особого, высшего и среднего классов соответственно.

4.1.2 Усилия лопастных порядков.

Возмущающие усилия лопастных порядков передаются на корпус судна двумя путями: непосредственно через воду (пульсирующие гидродинамические давления) и через опорные конструкции подшипников валопровода (усилия, возникающие на лопастях винта при его работе в неравномерном поле скоростей). Равнодействующая этих усилий, действующих на одной частоте, принимается равной арифметической сумме указанных составляющих (различия по фазе и месту приложения не учитываются).

4.1.2.1 Пульсирующие гидродинамические давления, возникающие на поверхности корпуса судна.

4.1.2.1.1 Возникающие при работе винта пульсирующие гидродинамические давления передаются через воду на обшивку корпуса и зависят от числа лопастей гребного винта и его геометрии, от зазора между винтом и корпусом, от неравномерности поля скоростей в диске винта, наличия кавитации на лопастях, глубины фарватера и т. п.

4.1.2.1.2 Частоты пульсирующих давлений в расчетах общей вибрации принимаются равными лопастной и удвоенной лопастной частоте (первые две гармоники давлений).

В настоящей методике приведены методы расчета периодических давлений, возникающих на корпусе судна при работе некавитирующего гребного винта. Амплитуды пульсаций давления, вызываемого работой кавитирующего винта, определяются путем суммирования давлений от некавитирующего винта и нестационарных кавитационных каверн на лопастях. Результаты расчетов пульсирующих давлений с учетом возможной кавитации и мелководья, для ряда основных типов современных судов, показали следующее:

при отсутствии кавитации на лопастях гребного винта индуцируются интенсивные пульсирующие давления лопастной частоты, давления с удвоенной лопастной частотой значительно меньше давлений лопастной частоты, а высшие гармоники пренебрежимо малы;

кавитация может существенно увеличить пульсирующие давления (до двух и более раз), особенно гармоники высших порядков;

в связи с возрастанием на мелководье неравномерности поля скоростей в диске гребного винта возрастает опасность кавитации его лопастей, что может привести к увеличению вибрационных нагрузок, передаваемых на корпус судна. Особенно существенное возрастание величин максимальных амплитуд пульсаций давлений может наступить с уменьшением глубины в тех случаях, когда на глубокой воде винт свободен от кавитации, а на мелководье она появляется;

в тех случаях, когда гребной винт кавитирует на глубокой воде, пульсирующие давления с уменьшением глубины изменяются незначительно, однако район их распространения по длине корпуса на мелководье увеличивается по сравнению с глубокой водой;

равнодействующая пульсирующих давлений, действующая на кормовую оконечность корпуса, во всех случаях при уменьшении глубины воды h возрастает. На предельном мелководье ($h/d_{\otimes} \leq 2{,}0$, h − глубина воды) величина этой силы может возрасти в 1,8−2 раза по сравнению с силой, действующей на глубокой воде.

4.1.2.1.3 Если винт работает в насадке, максимальные пульсирующие давления, передаваемые на обшивку корпуса, приближенно следует считать вдвое меньшими тех давлений, которые передавались бы на нее при отсутствии насадки.

4.1.2.1.4 Для приближенной оценки равнодействующих пульсирующих давлений используются результаты статистической обработки базы экспериментальных данных по замерам давлений, полученных как в натурных условиях так и в опытовом бассейне. Структура зависимостей для расчета усилий первого и второго лопастных порядков имеет одинаковый вид:

$$P = 16 \sqrt{\overline{\Delta p_0}^2 + \overline{\Delta p_C}^2}\ \rho_в\ \omega^2\ R^4; \qquad (4.1.2.1.4\text{-}1)$$

$$\overline{\Delta p_0} = k_{oi} \frac{1}{z^{1,5}} \left(\frac{R}{d - 0{,}9R} \right)^{A_O}; \qquad (4.1.2.1.4\text{-}2)$$

$$\overline{\Delta p_c} = k_{ci} \frac{v_S\ \overline{w}}{\sqrt{h_в + 10{,}4}} \left(\frac{R}{d - 0{,}9R} \right)^{A_C}, \qquad (4.1.2.1.4\text{-}3)$$

где $\overline{\Delta p_0}$ – относительное давление, обусловленное нагрузкой на лопасть и ее толщиной;

$\overline{\Delta p_c}$ – относительное давление, обусловленное кавитацией винта;

k_{Oi} и k_{ci} – коэффициенты, зависящие от номера гармоники рассчитываемого лопастного усилия (i =1 или 2);

d – расстояние от оси винта до обшивки корпуса судна, м;

v_S – скорость судна, м/с;

$\overline{w}$ – неравномерность попутного потока;

$h_в$ – углубление оси винта, м;

A_O и A_C – коэффициенты, зависящие от отношения $\frac{d}{R}$.

Равнодействующая пульсирующих давлений P приложена по нормали к обшивке корпуса судна, поэтому для определения усилий, действующих в вертикальном (P^z) и траверзном (P^y) направлениях, используются зависимости:

$$P^z = P \cos \beta,\ P^y = P \sin \beta, \qquad (4.1.2.1.4\text{-}4)$$

где β – угол между касательной к обшивке корпуса и основной плоскостью.

4.1.2.2 Усилия, возникающие на лопастях гребного винта.

Периодические усилия на лопастях винта возникают вследствие того, что углы атаки и скорости набегающего на лопасти потока изменяются за время оборота винта из-за неоднородности поля, в котором он работает. Обычно эти усилия не превосходят половины равнодействующей пульсирующих давлений. Способ их вычисления приведен в А1 приложения А.

4.2 УСИЛИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ РАБОТОЙ ДИЗЕЛЕЙ

Эксплуатация судовых дизелей сопровождается образованием неуравновешенных усилий, которые при определенных условиях могут вызвать недопустимую вибрацию. В качестве основных причин возникновения этих усилий можно выделить следующие:

«кинематическую», связанную с конечностью числа цилиндров дизеля;

«деформационную», обусловленную конечной жесткостью его остова;

«технологическую», возникающую из-за неизбежных погрешностей изготовления отдельных частей дизеля и их сборки.

Так как номенклатура устанавливаемых на судах малооборотных дизелей ограничена, то для определения неуравновешенных сил и моментов, образующихся при их эксплуатации, используются значения неуравновешенных усилий различных порядков, вычисленные с учетом пространственной деформации корпуса.

В общем случае, для оценки наиболее значительных компонент силового воздействия на корпус со стороны работающего дизеля рекомендуется использовать результаты его стендовых заводских испытаний. При этом представляется возможным полностью учесть особенности эксплуатации конкретного дизеля, а также характеристики его крепления к фундаментной раме в машинном отделении.

На ранних стадиях проектирования, а также в случае отсутствия результатов стендовых испытаний в Методике допускается возможность использования норм Регистра, которые регламентируют предельные уровни вибрации судовых дизелей в частотном диапазоне, перекрывающем верхнюю границу октавы 63 Гц.

5 РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ КОРПУСА

5.1 БАЛОЧНАЯ РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Достоверность расчетного прогнозирования вибрационных характеристик проектируемых судов в большой мере зависит от того, насколько обоснованно выбрана расчетная модель. Для практических расчетов, выполняемых в обеспечение текущего проектирования большинства типов судов, в качестве расчетной модели традиционным является представление корпуса судна в виде непризматической безопорной балки Тимошенко с частотнозависимыми параметрами (см. рис. 5.1). Для супертанкеров, судов типа

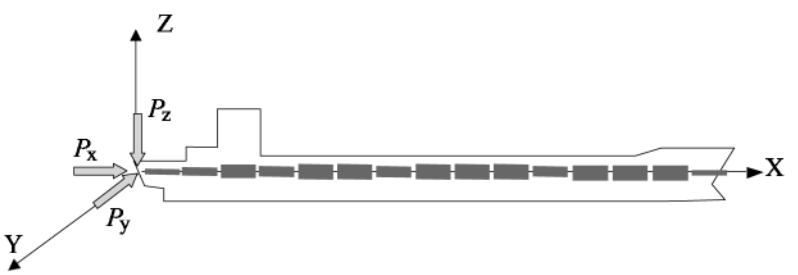


Рис. 5.1 Балочная расчетная модель корпуса судна

ро-ро, судов с большим раскрытием палуб, у которых на параметры общей вибрации могут оказывать большое влияние такие факторы, как поперечная податливость корпуса, связность траверзных и крутильных колебаний, целесообразно использовать пространственные модели.

Обоснованность сведения реального корпуса к балочной модели проверена путем сопоставления результатов расчетов общей вибрации, выполненных по пространственной и балочной моделям, а также сопоставлением результатов расчетов и натурных экспериментов.

5.1.1 Определение жесткостных характеристик расчетной модели.

При аппроксимации судового корпуса в виде непризматической безопорной балки задание необходимой исходной информации для расчетов вибрации становится самостоятельной задачей, так как прямое использование параметров эквивалентного бруса может привести к недопустимым погрешностям. Одним из основных вопросов при этом является корректное задание жесткости корпуса на изгиб и сдвиг в широком диапазоне частот (см. также А2 приложения А). С учетом теории о присоединенном пояске широкополых балок при определении жесткостных характеристик модели корпуса при расчете вибрации вводятся редукционные коэффициенты по изгибу $K_и$ и сдвигу $K_с$, соответственно равные:

$$K_и = Y_{эф} / Y, \tag{5.1.1-1}$$

$$K_с = F_{эф} / F, \tag{5.1.1-2}$$

где $Y_{эф}$ – эффективный момент инерции;
Y – геометрический момент инерции эквивалентного бруса;
$F_{эф}$ – эффективная площадь связей, работающих на сдвиг;
F – площадь настилов палуб, обшивки днища, бортов, продольных переборок и т. п.

5.1.2 Определение присоединенных масс воды.

Погонные присоединенные массы корпуса при общей вибрации в вертикальном $m_В$ и траверзном $m_Т$ направлениях рассчитываются по следующим зависимостям:

$$m_В(x) = \frac{\pi}{8} \rho B_x^2 c_В K_В, \tag{5.1.2-1}$$

$$m_Т(x) = \frac{\pi}{2} \rho d_x^2 c_Т K_Т, \tag{5.1.2-2}$$

где B_x, d_x – полуширина и осадка в данном поперечном сечении;
$c_В$, $c_Т$ – коэффициенты, определяющие присоединенные массы при плоском обтекании;
$K_В$, $K_Т$ – коэффициенты, учитывающие трехмерность обтекания.

Коэффициенты $c_В$, $c_Т$ на глубокой воде определяются следующим образом:

$$c_В = 1 + (\delta - \alpha)(\delta - \alpha + 1), \qquad (5.1.2\text{-}3)$$

$$c_Т = \frac{4}{\pi^2}\left[1 + \frac{4}{3\delta^2}(\delta - \alpha + 1)^2\right], \qquad (5.1.2\text{-}4)$$

где $\alpha = \frac{3}{2}(1+\delta) - \frac{1}{2}\sqrt{1 + 10\delta + \delta^2 - \frac{32\,\delta\,\sigma}{\pi}}$, (5.1.2-5)

$$\delta = \frac{2d_x}{B_x}, \ \sigma = \frac{S(x)}{B_x d_x}, \qquad (5.1.2\text{-}6)$$

где S (x) – площадь погруженной части сечения.

Значения присоединенных масс воды зависят от глубины под килем. При вибрации судна, плавающего на мелководье (при $h/B_{\otimes} \leq 0{,}3$), вовлекаемые им в вертикальные колебания массы воды оказываются существенно больше, чем на глубокой воде.

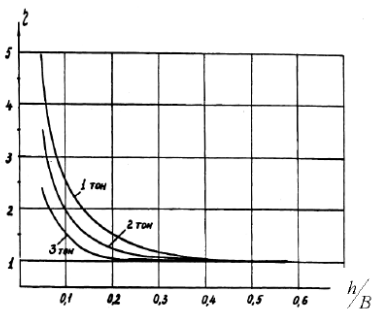


Рис. 5.1.2 Значение коэффициента η, учитывающего влияние мелководья на присоединенные массы корпуса (осредненная кривая для первых пяти тонов свободных колебаний)

Погонная присоединенная масса корпуса при вертикальных колебаниях с учетом влияния мелководья определяется по формуле:

$$m_В^{м}(x) = m_В(x)\,(2{,}3\,\eta - 1), \qquad (5.1.2\text{-}7)$$

где η − выбирается по графику, приведенному на рис. 5.1.

5.1.3 Характеристики демпфирования колебаний.

Результаты натурных экспериментов свидетельствуют о том, что с ростом частоты возмущающего усилия амплитуды резонансных колебаний судов существенно снижаются, а относительная ширина резонансных пиков увеличивается, в результате чего резонансные пики постепенно сливаются. В связи с этим наиболее простой и удобной для практического использования является гипотеза Фохта, представляющая линейную зависимость силы неупругого сопротивления от скорости деформации.

При этом допущении нормальные и касательные напряжения в балке при относительных линейных и сдвиговых деформациях ε и γ, будут определяться зависимостями:

$$\sigma = E\left(\varepsilon + \vartheta\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}\right), \qquad (5.1.3\text{-}1)$$

$$\tau = G\left(\gamma + \chi\frac{\partial \gamma}{\partial t}\right), \qquad (5.1.3\text{-}2)$$

где ϑ, χ – коэффициенты внутреннего неупругого сопротивления.

При представлении относительной деформации в комплексной форме решение задачи о вынужденных колебаниях балки с учетом диссипативных сил может быть заменено решением аналогичной задачи без учета диссипативных сил, но в последнем следует заменить модули упругости E и сдвига G на комплексные величины вида:

$$\overline{E} = E\,(1+ i\omega\,\vartheta),$$
$$\overline{G} = G\,(1+ i\omega\,\chi). \qquad (5.1.3\text{-}3)$$

Значения коэффициентов ϑ, χ определяются экспериментально для разных типов судов.

5.2 ПЛОСКАЯ РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Плоские расчетные модели (рис. 5.2) используются при определении вибрационных характеристик корпуса судна с учетом влияния на них колебаний надстройки.

В этом случае рассматривается пластина переменной толщины, конфигурация которой соответствует проекции корпуса судна и надстройки на диаметральную плоскость. На уровнях палуб ярусов пластина подкрепляется продольно расположенными стержнями, имитирующими палубы. Массы стенок надстройки, ее продольных и поперечных переборок, т. е. массы

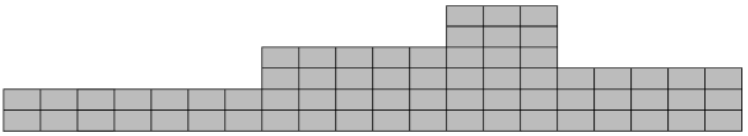


Рис. 5.2 Плоская расчетная модель корпуса и надстройки судна

всех конструкций надстройки с учетом изоляции и навешенного на них оборудования распределяются по площади пластины переменной толщины в соответствии с их фактическим пространственным расположением. Массы палуб и размещенного на них оборудования равномерно распределяются по стержням, имитирующим соответствующие палубы.

Корпус набирается из прямоугольных пластинчатых элементов, работающих в плоском напряженном состоянии, толщина которых δ_i назначается из условия:

$$\delta_i = \frac{(F^z_{эф})_i}{D_i}, \qquad (5.2)$$

где $(F^z_{эф})_i$ – суммарная площадь связей корпуса (пластин обшивки бортов и продольных переборок в сечении *i*-го теоретического шпангоута), работающих на сдвиг;
D_i – высота борта в сечении *i*-го теоретического шпангоута.

Палубы и днище моделируются стержнями, работающими на растяжение-сжатие. Площади поперечных сечений стержней, моделирующих палубы и днище в *i*-ом сечении, подбираются из условия моделирования момента инерции эквивалентного бруса.

Массовая нагрузка корпуса (за вычетом массы надстройки) равномерно распределяется по площади пластинчатых элементов. При сведении реального корпуса к плоской расчетной модели для редуцирования жесткостей на изгиб и сдвиг, а также для определения присоединенных масс воды в зависимости от номера тона используются аппроксимации, описанные в 5.1.1 и 5.1.2.

5.3 ПРОСТРАНСТВЕННАЯ РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

При использовании пространственной схематизации корпуса судна определение параметров его общей вибрации осуществляется методом конечных элементов (МКЭ) или его модификациями – методом суперэлементов (МСЭ), модуль-элементов (ММЭ) или редуцированных элементов (МРЭ). Преимущества МКЭ по сравнению с другими численными методами расчета вибрации судов сводятся к следующему:

абсолютная универсальность по отношению к типу судов;

возможность относительно просто автоматизировать формирование разрешающих уравнений;

ленточная структура матриц этих уравнений.

К недостаткам МКЭ относится большое число неизвестных. Стремление к уменьшению числа неизвестных в разрешающей системе уравнений МКЭ и к сокращению объема используемой информации привело к созданию МСЭ, ММЭ и МРЭ. В основе МСЭ лежит идея независимого расчета отдельных частей конструкции − подструктур (ПС) и последующего учета их взаимодействия. Вследствие этого перемещения конструкции рассматриваются в виде суперпозиции двух составляющих. Первая из них представляет собой перемещения, вызванные внешними силами при полном закреплении границ подструктуры. При этом считается, что каждая подструктура независима от других, и перемещения ее узлов определяются из уравнений, включающих неизвестные, относящиеся только к данной подструктуре. Второй составляющей являются перемещения, вызванные фактическими перемещениями границ подструктур с исключенными внутренними узлами. Перемещения границ определяются из условия уравновешенности всего ансамбля суперэлементов.

В методе модуль-элементов вместо простых КЭ рассматривают пространственные модули, а в качестве обобщенных перемещений приняты перемещения плоскости поперечного сечения объемной конструкции, как твердого тела, депланационные смещения отдельных узлов, перекосы контура поперечного сечения. Число степеней свободы такого модуль-элемента может быть достаточно велико. Оно зависит от того, какие формы деформации отражает выбранный набор обобщенных перемещений. Матрицы жесткости типовых модуль-элементов получены на основе полубезмоментной теории оболочек.

Согласно основной концепции МРЭ, рассматриваемая область разбивается на большое число мелких КЭ, для которых допускается некоторое искусственное искажение формы (например, четырехугольник заменяется прямоугольником и т. д.). В результате их матрицы жесткости могут быть определены в явном виде по простым алгебраическим зависимостям. Ансамбль элементов, образованный таким путем, содержит очень большое число неизвестных, которое уменьшается (редуцируется) на один−два порядка специальным экономичным методом. Формирование системы уравнений осуществляется постепенно с одновременным ее решением методом матричной прогонки.

Широкому использованию сложных пространственных моделей для обеспечения текущего проектирования судов препятствуют:

применимость пространственной схематизации корпуса лишь на завершающей стадии проектирования, что делает расчет вибрационных характеристик судна только поверочным;

большая трудоемкость подготовки исходной информации.

Кроме того использование сложных моделей корпуса требует достаточно высокой квалификации расчетчика при формировании модели и особенно при анализе результатов расчета. Формальное использование балочных конечных элементов, находящихся в библиотеках различных программных комплексов, без четкого понимания работы конструкции, может привести к грубым ошибкам. Пространственные модели корпуса судна, особенно натуроподобные, рационально применять при численных исследованиях особенностей вибрации судов нетрадиционных архитектурных форм.

6 АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОБЩЕЙ ХОДОВОЙ ВИБРАЦИИ КОРПУСА

Для решении задачи о вынужденных колебаниях корпуса судна, представленного балочной расчетной моделью, описанной выше в разд. 5, используется метод конечных элементов (МКЭ) в варианте метода перемещений. Использование МКЭ применительно к решаемой задаче позволяет построить достаточно гибкий и универсальный вычислительный алгоритм, допускающий высокую степень автоматизации расчетной процедуры.

Основная система уравнений, описывающая поведение рассматриваемой модели корпуса, в матричном виде записывается, как обычно, следующим образом:

$$[K]\ \{q\} + [M]\ \{\ddot{q}\} = [P], \qquad (6)$$

где $[K]$ и $[M]$ – общие матрицы жесткости и масс модели (являются матричной суммой соответствующих матриц базовых конечных элементов;

$\{q\}$ – вектор узловых перемещений, представляющий обобщенные перемещения каждого узла расчетной модели;

$\{P\}$ – вектор внешних возмущающих сил, характеризующий силовое возбуждение в узлах расчетной модели.

Матрица жесткости $[K]$ является комплексной. Ее мнимая часть описывает демпфирование колебаний в расчетной модели. Исходные данные для вычисления $[K]$ и $[M]$ представлены ниже.

$\overline{E}$ – комплексный модуль нормальной упругости материала корпуса;

$\overline{G}$ – комплексный модуль сдвига материала корпуса;

μ – коэффициент Пуассона материала корпуса;

$L_{\max}$ – наибольшая длина корпуса;

n – число теоретических шпаций;

x_i – координата i-го (=0,1,2…, n) теоретического шпангоута;

z_k – число разбиений теоретической шпации на конечные элементы;

$F_a(x_i)$ – полная площадь связей корпуса судна в сечении x_i;

$F_y(x_i)$ − проекция площадей стенок связей корпуса на плоскость XOY в сечении x_i;

$F_z(x_i)$ − проекция площадей стенок связей корпуса на плоскость XOZ в сечении x_i;

$Y_z(x_i)$ − момент инерции поперечного сечения корпуса в сечении x_i относительно оси z;

$Y_y(x_i)$ − момент инерции поперечного сечения корпуса в сечении x_i относительно оси y;

$m(x_i)$ − погонная масса корпуса в сечении x_i с учетом присоединенной массы воды;

P_x, P_y, P_z − значения продольной и поперечных составляющих возмущающих сил.

В качестве базового конечного элемента в расчетной модели корпуса судна используется призматический стержневой элемент, работающий на изгиб и сдвиг в двух плоскостях, а также на растяжение-сжатие вдоль оси x (рис. 6.1). Ось x проходит через центр тяжести поперечного сечения элемента, а оси y и z совпадают с главными центральными осями инерции сечения. Коэффициенты матрицы жесткости конечного элемента и матрицы масс приведены в приложении В.

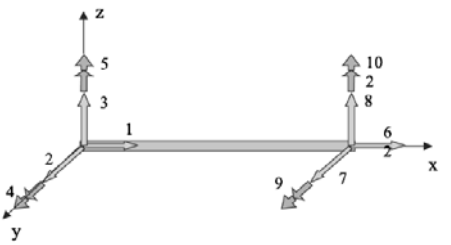


Рис. 6 Базовый конечный элемент

7 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОБЩЕЙ ВИБРАЦИИ НА СТАДИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА

На ранней стадии проектирования определяются частоты свободных поперечных колебаний корпуса по приближенным формулам, приведенным в табл. 7.

Таблица 7

Приближенные формулы для определения низших собственных частот поперечных колебаний корпуса на ранней стадии проектирования

№ п/п	Вид колебаний	Приближенные формулы для определения частоты первого тона	Формулы для оценки частот высших тонов
1	Вертикальные	$\lambda_1 = \frac{0{,}142}{\sqrt{1{,}2 + \frac{B_\otimes}{3d_\otimes}}} \sqrt{\frac{EY_y}{\Delta L^3}}$	$\lambda_2 = 2{,}2\ \lambda_1$ $\lambda_3 = 3{,}2\ \lambda_1$
2	Горизонтальные (траверзные)	$\lambda_1 = \frac{0{,}13}{\sqrt{1{,}3 + \frac{d_\otimes}{3B_\otimes}}} \sqrt{\frac{EY_z}{\Delta L^3}}$	$\lambda_2 = 2{,}1\ \lambda_1$

В табл. 7 приняты следующие обозначения:

Y_y – момент инерции миделевого сечения судна относительно оси y,

Y_z – момент инерции миделевого сечения судна относительно оси z,

F_a – полная площадь связей в миделевом сечении корпуса судна.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЩЕЙ ХОДОВОЙ ВИБРАЦИИ КОРПУСА

А1 ПЕРИОДИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ НА ГРЕБНОМ ВИНТЕ

Динамическое взаимодействие корпуса судна с находящимися в непосредственной близости от него винтами приводит к возникновению неуравновешенных периодических усилий, которые различаются по частоте и по месту их непосредственного воздействия на судовые конструкции. Для расчета возмущающих усилий от работы гребных винтов необходимо использовать не только основные законы гидромеханики и специальные теоретические методы (в частности, вихревую теорию), но и результаты модельных испытаний в опытовых бассейнах. Непосредственно на гребном винте образуются периодические усилия с частотами, равными частоте вращения винта (усилия первого порядка), а также с частотами, кратными произведению частоты вращения на число лопастей (усилия лопастного, удвоенного лопастного и т. д. порядков). Физическая природа возникновения усилий первого и лопастных порядков принципиально различна и по этой причине они рассматриваются отдельно.

А1.1 Усилия первого порядка.

Причиной возникновения усилий первого порядка является наличие неизбежных, в процессе изготовления винта, отклонений от номинальных значений его геометрических характеристик, таких как:

длина, ширина и толщина лопастей;

шаг лопастей на одном и том же радиусе;

взаимное расположение осевых линий лопастей по окружности в плоскости диска винта;

положение лопастей вдоль оси винта.

В результате при вращении гребного винта возникает его механическая и гидродинамическая неуравновешенность. Механическая неуравновешенность, обусловленная несовпадением оси вращения винта и его главной центральной оси инерции, приводит к появлению центробежной силы и момента. Однако, с учетом технологических возможностей современного производства гребных винтов и наличия жестких требований к геометрии можно считать, что гребные винты, изготовленные в соответствии с этими требованиями, являются механически уравновешенными.

Гидродинамическая неуравновешенность является следствием различия размеров отдельных лопастей винта. В результате при его вращении в жидкости на каждой лопасти образуются различные силы упора и силы сопротивления вращению. Главный вектор сил сопротивления вращению F_1 и главный момент сил упора L_1 в этом случае не равны нулю и являются искомыми возмущающими усилиями первого порядка. Эти усилия рассчитывают как сумму сил, каждая из которых определяется отступлением от номинала одного из параметров (шага, ширины лопастей, центральных углов между ними и т. д.).

Более строгим является рассмотрение общего случая нагружения, при котором:

к i-й лопасти приложены упор P_i (на расстоянии r_i от оси винта) и сила сопротивления вращению Q_i,

осевая линия этой лопасти в плоскости диска смещена относительно номинального значения на малый угол $\Delta\alpha_i$.

В этом случае центральный угол α_i между теоретическим положением осевой линии первой лопасти и фактическим положением осевой линии i –й лопасти будет равен:

$$\alpha_i = \frac{2\pi}{z}(i-1) + \Delta\alpha_i, \qquad \text{(А1-1)}$$

где z − число лопастей винта.

Для искомых усилий в связанной с винтом подвижной системе координат будут иметь место следующие зависимости:

$$F_1 = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{z} Q_i \sin \alpha_i\right)^2 \left(\sum_{i=1}^{z} Q_i \cos \alpha_i\right)^2}, \quad \text{(A1-2)}$$

$$L_1 = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{z} P_i r_i \sin \alpha_i\right)^2 \left(\sum_{i=1}^{z} P_i r_i \cos \alpha_i\right)^2}. \quad \text{(A1-3)}$$

Определение P_i, r_i и Q_i по фактическим размерам i-й лопасти и режиму работы винта, с достаточной для практики точностью, может быть осуществлено с помощью вихревой теории с учетом ряда упрощающих допущений (пренебрежением влияния профильного сопротивления, центробежных сил и кривизны потока между лопастями).

Второй проблемой является задание фактических размеров гребного винта, которые на стадии проектирования корабля, очевидно, неизвестны. Тем не менее, с учетом того, что предельные отклонения винта регламентированы, возможна оценка величины максимальных значений усилий первого порядка с последующей корректировкой результатов при помощи коэффициентов, определенных в результате статистической обработки данных для реальных гребных винтов. Это может быть реализовано путем введения в рассмотрение величин ΔQ_i и ΔP_i:

$$\Delta Q_i = Q_i - Q, \quad \text{(A1-4)}$$

$$\Delta P_i = P_i - P, \quad \text{(A1-5)}$$

где Q и P – силы сопротивления вращению и упора на каждой лопасти при ее номинальных размерах.

С учетом (А1-4) и (А1-5), а также соотношения:

$$\sum_{i=1}^{z} \sin \frac{2\pi}{z}(i-1) = \sum_{i=1}^{z} \cos \frac{2\pi}{z}(i-1) = 0, \quad \text{(A1-6)}$$

формулы (А1-2) и (А1-3) преобразуются к виду:

$$F_1 = \sqrt{f_1^2 + f_2^2}, \quad \text{(A1-7)}$$

$$L_1 = \sqrt{m_1^2 + m_2^2}, \quad \text{(A1-8)}$$

где $f_1 = \sum_{i=1}^{z} \left[\Delta Q_i \sin \frac{2\pi}{z}(i-1) + Q\,\Delta\alpha_i \cos \frac{2\pi}{z}(i-1)\right]$, (A1-9)

$$f_2 = \sum_{i=1}^{z} \left[\Delta Q_i \cos \frac{2\pi}{z}(i-1) + Q\,\Delta\alpha_i \sin \frac{2\pi}{z}(i-1)\right], \quad \text{(A1-10)}$$

$$m_1 = 0{,}65\, R \sum_{i=1}^{z} \left[\Delta P \sin \frac{2\pi}{z} (i-1) + P\, \Delta\alpha_i \cos \frac{2\pi}{z} (i-1) \right], \qquad \text{(A1-11)}$$

$$m_2 = 0{,}65\, R \sum_{i=1}^{z} \left[\Delta P \cos \frac{2\pi}{z} (i-1) + P\, \Delta\alpha_i \sin \frac{2\pi}{z} (i-1) \right]. \qquad \text{(A1-12)}$$

Значения $\Delta\alpha_i$ в (А1-9)−(А1-12) берутся непосредственно из стандартов на изготовление гребных винтов, величины ΔQ_i и ΔP_i рассчитываются в зависимости от максимально допустимых отклонений геометрических размеров винта (прежде всего шага лопасти).

А1.2 Усилия лопастных порядков.

Основными гидромеханическими характеристиками, которые определяются экспериментальным путем и используются для оценки периодических усилий, являются так называемые кривые действия винта – коэффициенты упора K_1 и момента K_2, а также параметры, описывающие попутный поток за корпусом судна.

Коэффициенты K_1 и K_2 определяют упор P и момент гребного винта M:

$$P = 16\, K_1\, \rho_в\, \omega^2\, R^4, \qquad \text{(A1-13)}$$

$$M = 32\, K_2\, \rho_в\, \omega^2\, R^5. \qquad \text{(A1-14)}$$

Типичная для судов зависимость коэффициентов K_1 и K_2 от относительной поступи винта $\lambda_р = \dfrac{v}{2\omega R}$, где ν – скорость осевого перемещения винта (судна), показана на рис. А1-1.

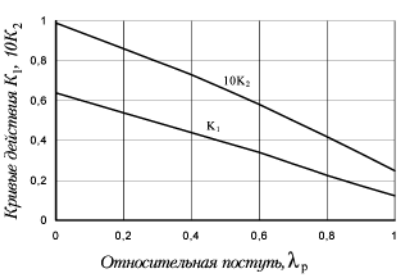


Рис. А1-1 Типичные кривые действия гребного винта

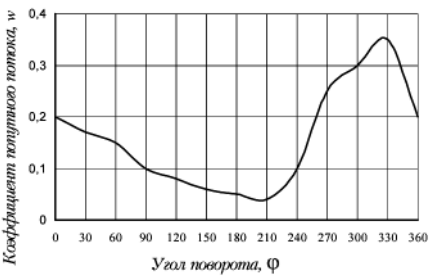


Рис. А1-2 Типичное распределение попутного потока

Поток жидкости, в котором работает гребной винт, неоднороден. Это обусловлено главным образом тем, что движущееся судно создает попутный поток с неравномерным полем скоростей. Основной характеристикой неравномерности набегающего попутного потока служит распределение величины:

$$w\,(r,\varphi) = 1 - \frac{v_A(r,\varphi)}{v_s}, \qquad \text{(A1-15)}$$

где $v_A\,(r,\varphi)$ – продольная скорость жидкости в данной точке диска гребного винта;
v_s – скорость движения судна;
r, φ – координаты точки в плоскости диска винта, отсчитываемые в полярной системе координат.

Обычно значения w (r, φ), полученные во время модельных испытаний, задают для нескольких радиусов r = (0,4R ÷ 1,0R), при изменении угла φ через 15−30 градусов. Иллюстрацией характера зависимости w(r, φ) на радиусе 0,7 R для двухвинтового судна служит рис. А1-2.

Возрастание неравномерности попутного потока повышает вероятность возникновения кавитации на лопастях винта и, следовательно, приводит к увеличению возмущающих усилий. В связи с этим, следует иметь в виду, что к повышению неравномерности потока приводит увеличение коэффициента общей полноты и водоизмещения судна.

Усилия лопастных порядков на гребном винте возникают вследствие того, что углы атаки и скорости набегающего на лопасти попутного потока изменяются за время одного оборота винта. Таким образом, при различном положении лопастей гребного винта в неравномерном потоке на них возникают различные по величине силы сопротивления вращению. Суммы проекций этих усилий на координатные оси при данном положении винта, которое характеризуется углом φ, дают мгновенные значения вертикальной и горизонтальной составляющих периодических усилий. В результате можно построить кривую изменения усилий за один оборот гребного винта. Гармонический анализ этой кривой позволяет определить амплитудные значения усилий лопастных порядков, возникающих на гребном винте.

Для реализации описанной процедуры используется формула (А1-14) в предположении, что сила сопротивления вращению i-й лопасти Q_i приложена в сечении, отстоящем от центра винта на расстоянии r. В этом случае можно получить следующую зависимость:

$$Q_i = \frac{32\rho_B\,\omega^2\,R^5}{zr} K^2\,(\lambda_p), \qquad \text{(A1-16)}$$

$$\lambda_P = \lambda_0\,(1 - w)\,, \qquad \text{(A1-17)}$$

где λ_0 – относительная поступь, соответствующая невозмущенному потоку.

Вертикальная и горизонтальная проекции силы сопротивления *i*-й лопасти $Q_i^{\text{В}}$, $Q_i^{\text{Г}}$ в этом случае будут равны:

$$Q_i^{\text{В}} = Q_i \sin \varphi, \qquad \text{(A1-18)}$$

$$Q_i^{\text{Г}} = Q_i \cos \varphi. \qquad \text{(A1-19)}$$

Суммы $Q_i^{\text{В}}$, $Q_i^{\text{Т}}$ по всем лопастям винта дают мгновенные значения вертикального и горизонтального возмущающих усилий $Q^{\text{В}}(\varphi)$, $Q^{\text{Г}}(\varphi)$. Гармоническое разложение $Q^{\text{В}}(\varphi)$ и $Q^{\text{Г}}(\varphi)$ позволяет определить амплитудные значения усилий первого лопастного, второго лопастного и последующих порядков.

А2 РЕДУКЦИОННЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПО ИЗГИБУ $K_{\text{и}}$ И СДВИГУ $K_{\text{с}}$

Расчет редукционных коэффициентов по изгибу $K_{\text{и}}$ и сдвигу $K_{\text{с}}$, производится на основе решения динамической задачи теории упругости для призматической тонкостенной конструкции длиной L с поперечным сечением, показанным на рис. А2.

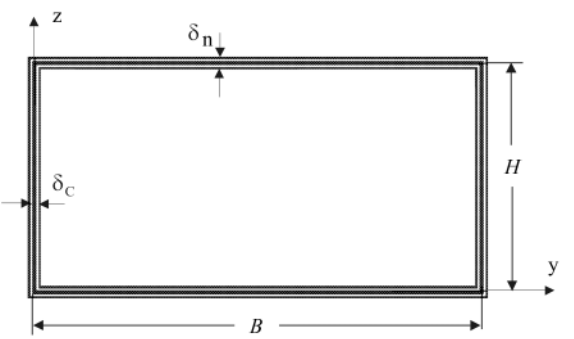


Рис. А2 Поперечное сечение призматической тонкостенной конструкции, используемой для вычисления редукционных коэффициентов

Порядок вычисления коэффициентов $K_{\text{и}}$ и $K_{\text{с}}$ состоит в следующем. На основе метода конечных элементов вычисляется спектр собственных частот вертикальных колебаний конструкции. Для каждого тона колебаний определяются компоненты напряженно-деформируемого состояния всех составляющих ее пластин и находятся значения удельной потенциальной энергии, обусловленной нормальными ($W_{\text{и}}$) и касательными ($W_{\text{с}}$) напряжениями:

$$W_{\text{и}} = \frac{1}{2E}\left[\sigma^2_X + \sigma^2_Y + \sigma^2_Z - 2\,\mu\,(\sigma_X\sigma_Y + \sigma_X\sigma_Z + \sigma_Y\sigma_Z)\right], \qquad \text{(A2-1)}$$

$$W_c = \frac{1}{2G}\,(\tau_{XY}^2 + \tau_{XZ}^2 + \tau_{ZY}^2), \qquad \text{(А2-2)}$$

где σ_X, σ_Y, σ_Z – нормальные напряжения;
τ_{XY}, τ_{XZ}, τ_{YZ} – касательные напряжения.

Полная потенциальная энергия, соответствующая изгибным деформациям тонкостенной конструкции будет, равна:

$$U_и = \iiint_V W_u\,dxdydz = \frac{1}{E}\left[\sigma_П \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} (\sigma_X^2 + \sigma_Z^2 - 2\mu\sigma_X\sigma_Z)\,dxdz + \delta_c \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} (\sigma_X^2 + \sigma_Z^2 - 2\mu\sigma_X\sigma_Z)\,dxdz\right]. \qquad \text{(А2-3)}$$

Аналогично для сдвиговых деформаций:

$$U_с = \iiint_V W_c\,dxdydz = \frac{1}{G}\,(\sigma_n \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \tau_{xy}^2\,dxdy + \delta_c \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \tau_{xz}^2\,dxdz). \qquad \text{(А2-4)}$$

Соответствующие технической теории изгиба зависимости для потенциальной энергии (с учетом редуцирования) имеют следующий вид:

$$U_и^Б = \frac{1}{2EYK_и} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} M^2\,dx, \qquad \text{(А2-5)}$$

$$U_с^Б = \frac{1}{2GFK_с} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} N^2\,dx, \qquad \text{(А2-6)}$$

где M – изгибающий момент;
N – перерезывающая сила.

Учитывая, что:

$$M = \delta_n H \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \delta_x\,dy + 2\,\delta_c \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \sigma_x z\,dz, \qquad \text{(А2-7)}$$

$$N = 2\,\delta_c \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \tau_{xz}\,dz, \qquad \text{(А2-8)}$$

$K_и$, $K_с$ будут равны:

$$K_и = \frac{1}{2EYU_и} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} M^2\, dx, \qquad \text{(А2-9)}$$

$$K_с = \frac{1}{2GFU_с} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} N^2\, dx. \qquad \text{(А2-10)}$$

Исследование влияния геометрических параметров конструкции на значения редукционных коэффициентов показывает следующее:

величина $K_и$ существенно зависит от номера тона колебаний, изменяясь от 0,9−0,95 на первых тонах до ≈ 0,1 на тонах, соответствующих лопастной частоте;

коэффициент $K_с$ с увеличением частоты колебаний практически не изменяется.

А3 ПРИСОЕДИНЕННЫЕ МАССЫ ВОДЫ

Как следует из решения уравнений классической гидромеханики, на тело, совершающее неравномерное движение в идеальной жидкости, действуют гидродинамические силы давления, пропорциональные ускорению тела. Эффект от действия этих сил можно учесть, увеличив массу тела на величину так называемой присоединенной массы, величина которой зависит от геометрических размеров тела и плотности жидкости.

Определение присоединенных масс при колебаниях конструкций в жидкости производится в предположении, что жидкость идеальна, а ее течение потенциально. Это связано с тем, что инерционные свойства жидкости слабо зависят от термодинамических эффектов и вязкости. Исследование потенциального движения несжимаемой однородной жидкости сводится к нахождению потенциала скоростей φ, удовлетворяющего уравнению Лапласа и соответствующим граничным условиям. Например, при движении тела в безграничной жидкости, граничными условиями являются:

условие непротекания жидкости на поверхности *S* тела $-\left.\frac{\partial \varphi}{\partial n}\right|_S + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0$,

где $\left.\frac{\partial \varphi}{\partial n}\right|_S$ – проекция скорости частиц жидкости на внешнюю нормаль *n* к поверхности S;

Z – перемещение тела в рассматриваемой точке по той же нормали;

условие затухания движения частиц жидкости на бесконечном удалении от колеблющегося тела.

Возможны и другие типы краевых условий для потенциала скоростей: вблизи твердых границ, вблизи свободной поверхности, на мелководье и т. п.

При вычислении присоединенных масс колеблющегося корпуса также учитывается, что:

корпус представляет собой вытянутое тело, поэтому присоединенные массы могут быть определены для каждого сечения независимо (из решения двумерной задачи) с введением поправок на пространственность обтекания потока;

граничное условие на свободной поверхности жидкости имеет вид $\varphi = 0$;

формы собственных колебаний корпуса в воде и в воздухе совпадают.

Потенциал скоростей φ может быть найден с помощью метода источников и стоков. В этом случае потенциал скоростей в точке N пространства от непрерывно распределенных на поверхности S источников представляется в виде:

$$\varphi(N) = -\frac{1}{2\pi}\iint_S \frac{\partial Z(P)}{\partial t}\frac{ds(P)}{r(N,P)}, \qquad \text{(А3-1)}$$

где $r(N, P)$ – расстояние между точками N пространства и P на поверхности S.

Кинетическая энергия жидкости T определяется зависимостью:

$$T = -\frac{\rho_в}{2}\iint_S \varphi\frac{\partial \varphi}{\partial n}, \qquad \text{(А3-2)}$$

где $\rho_в$ – плотность воды.

Учитывая соотношение (А3-1) и условия непротекания, а также представляя функцию Z в виде $Z(s,t) = F(s)\tau(t)$ (здесь $F(s)$ – функция характеризующая изменение перемещений по поверхности тела, например, форму упругих колебаний, а $\tau(t)$ – функция зависимости перемещений от времени), выражение (А3-2) можно преобразовать к виду:

$$T = \frac{\rho_в}{4\pi}\iint_S F(s)\frac{\partial \tau}{\partial t}\,ds'\iint_S F(s)\frac{\partial \tau}{\partial t}\frac{ds'}{r}. \qquad \text{(А3-3)}$$

Величины $M = \frac{\rho_в}{2\pi}\iint_S F(s)\,ds'\iint_S F(s)\frac{ds}{r}$ называются присоединенными массами.

ПРИМЕР СОПОСТАВЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ

Б1 СОПОСТАВЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОРПУСА, ВЫЧИСЛЕННЫХ ПО ПРИБЛИЖЕННЫМ ФОРМУЛАМ, С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗАМЕРОВ

Для сопоставления выбрана группа из 14 судов, в которую вошли танкеры и сухогрузы водоизмещением от 8000 до 90000 т.

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных значений низших собственных частот представлены на рис. Б1, на котором каждое целое число на оси абсцисс обозначает одно из этих судов. Расчеты производились по приближенным формулам, приведенным в разд. 6. Из рис. Б1 видно, что погрешность расчета по этим формулам не превышает 30 %.

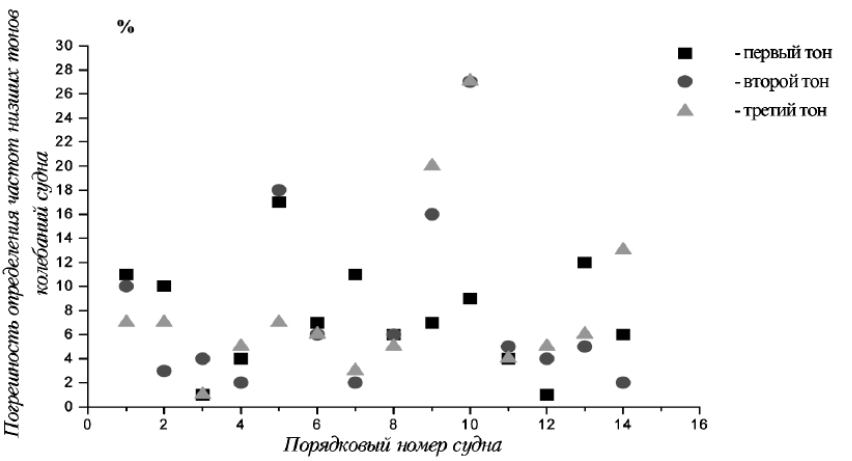


Рис. Б1 Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных значений низших собственных частот корпуса

Б2 ПРИМЕР СОПОСТАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОБЩЕЙ ВИБРАЦИИ, ВЫЧИСЛЯЕМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЛОЧНОЙ СХЕМАТИЗАЦИИ КОРПУСА

Сопоставление расчетных параметров общей вибрации судна, получаемых при использовании балочной расчетной модели корпуса, с данными

натурных измерений проиллюстрировано на примере танкера «Победа», характеристики которого указаны в табл. Б2-1. Распределение массовых и жесткостных характеристик по длине его корпуса приведено в табл. Б2-3. Необходимые для расчетов данные по гребному винту приведены в табл. Б2-2. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений собственных частот корпуса дано в табл. Б2-4. Сравнение рассчитанных и замеренных на режиме полного хода судна амплитуд ходовой вибрации корпуса с лопастной частотой показано на рис. Б2.

Результаты сопоставления имеющихся данных натурных измерений параметров общей вибрации корпусов других судов с вычисленными по программам, основанным на использовании балочной схематизации, позволили сделать следующие выводы:

погрешность вычисления собственных частот корпуса не превышает 10−12 %;

расчетные значения уровней вибрации, по крайней мере до лопастного порядка включительно, на жестких связях по всей длине корпуса, как правило, не превышают соответствующие им экспериментальные значения более, чем в два раза (на 6 дБ).

Таблица Б2-1

Основные характеристики танкера «Победа»

Длина наибольшая, м	242,8
Ширина корпуса, м	32,2
Высота борта, м	18,0
Осадка на миделе, м	13,6
Водоизмещение полное, т	86120
Главный двигатель – малооборотный дизель	7ДКРН 80/160-4
Длительная эксплуатационная мощность, квт	121360
Количество гребных винтов	1
Диаметр гребного винта, м	6,5
Число лопастей винта	4
Частота вращения вала, об/мин	122
Дисковое отношение	0,713
Шаговое отношение H/2R на 0,6R	0,652
Скорость хода V_s, узл.	16

Таблица Б2.2

Кривые действия винта

Относительная поступь λ_p	Коэффициент упора K_1	Коэффициент момента K_2
0	0,360	0,040
0,1	0,320	0,036
0,2	0,280	0,033
0,3	0,240	0,029
0,4	0,190	0,025
0,5	0,150	0,020
0,6	0,100	0,015
0,7	0,050	0,010
0,8	0,030	0,005
0,9	0,020	0,003
1,0	0,010	0,001

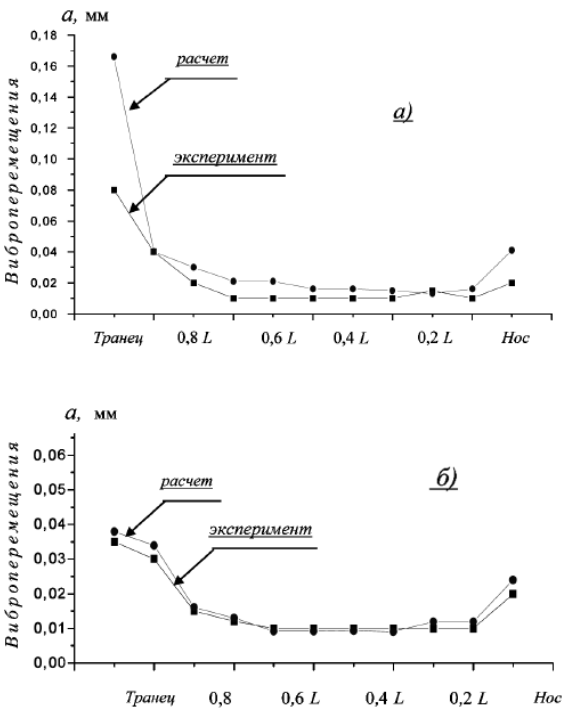


Рис. Б2 Распределение виброперемещений по длине корпуса танкера «Победа» при вибрации с лопастной частотой
а) в вертикальной и *б*) горизонтальной плоскостях

Таблица Б2-3

Геометрические, жесткостные и массовые параметры корпуса танкера «Победа» (исходные данные, принятые в расчете)

Номер теоретической шпации	Погонная масса, т/м	Полуширина $B_x/2$, м	Осадка d_x, м	Площадь погруженной части сечения $S(x)$, м^2	Момент инерции поперечного сечения Y_y, м^4	Момент инерции поперечного сечения Y_z, м^4	Полная площадь связей поперечного сечения F_a, м^2	Проекция площадей стенок связей на плоскость XOY F_y, м^2	Проекция площадей стенок связей на плоскость XOZ F_z, м^2
1	154,7	0,10	12,5	36,4	45,0	20	0,52	0,36	0,20
2	162,2	5,35	12,5	141,7	97,0	80	1,54	0,88	0,56
3	271,6	10,57	12,5	265,4	141,5	163	2,37	1,31	0,88
4	343,5	14,32	12,5	360,0	199,0	300	2,96	1,33	1,08
5	552,4	15,95	12,5	402,9	220,0	390	3,36	1,34	1,15
6	414,3	16,10	12,5	410,7	223,1	393	3,41	1,37	1,15
7	424,3	16,10	12,5	410,7	223,1	393	3,41	1,37	1,15
8	444,5	16,10	12,5	410,7	223,1	393	3,41	1,37	1,15
9	315,3	16,10	12,5	410,7	223,1	393	3,41	1,37	1,15
10	524,6	16,10	12,5	410,7	223,1	393	3,41	1,37	1,15
11	318,0	16,10	12,5	410,7	223,1	393	3,41	1,37	1,15
12	339,0	16,10	12,5	410,7	223,1	393	3,41	1,37	1,15
13	320,6	16,10	12,5	410,7	223,1	393	3,41	1,37	1,15
14	410,0	16,10	12,5	410,7	223,1	393	3,41	1,37	1,15
15	572,8	16,10	12,5	410,7	223,1	393	3,41	1,37	1,15
16	427,5	16,10	12,5	404,7	223,1	386	3,41	1,37	1,15

17	225,0	16,10	12,5	370,9	223,1	335	3,25	1,20	1,11
18	178,6	15,25	12,5	301,4	221,4	310	3,04	0,95	0,95
19	144,0	13,45	12,5	202,0	159,7	224	2,90	0,85	0,85
20	89,9	10,30	12,5	76,90	106,0	132	2,36	0,56	0,56
		5,85	12,5	27,4	34,0	50	0,93	0,24	0,24

Таблица Б2-4

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений частот свободных вертикальных колебаний корпуса танкера «Победа», Гц

Номер тона	Расчет	Эксперимент	Номер тона	Расчет	Эксперимент
1	0,60	0,68	6	4,76	5,34
2	1,35	1,25	7	5,62	6,18
3	2,16	2,10	8	6,48	6,78
4	3,20	3,44	9	7,38	7,76
5	3,90	4,43	10	8,30	8,75

КОЭФФИЦИЕНТЫ МАТРИЦ ЖЕСТКОСТЕЙ И МАСС БАЛОЧНОГО КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Таблица В-1

Матрица жесткости базового конечного элемента

γ					$-\gamma$				
	δ_z			$\frac{1}{2}\delta_z l$		$-\delta_z$			$\frac{1}{2}\delta_z l$
		δ_y	$\frac{1}{2}\delta_y l$				$-\delta_y$	$\frac{1}{2}\delta_y l$	
			$\left(\frac{1}{3}+\beta_y\right)\delta_y l^2$				$-\frac{1}{2}\delta_y l$	$\left(\frac{1}{6}-\beta_y\right)\delta_y l^2$	
				$\left(\frac{1}{3}+\beta_z\right)\delta_z l^2$		$-\frac{1}{2}\delta_z l$			$\left(\frac{1}{6}-\beta_z\right)\delta_z l^2$
					γ				
						δ_z			$-\frac{1}{2}\delta_z l$
							δ_y	$-\frac{1}{2}\delta_y l$	
								$\left(\frac{1}{3}+\beta_y\right)\delta_y l^2$	
									$\left(\frac{1}{3}+\beta_z\right)\delta_z l^2$

Таблица В-2

Матрица масс базового конечного элемента

M_{11}					M_{16}				
	M_{22}			M_{25}		M_{27}			$-M_{57}$
		M_{33}	M_{34}				M_{38}	$-M_{48}$	
			M_{44}				M_{48}	M_{49}	
				M_{55}		M_{57}			M_{510}
					M_{11}				
						M_{22}			M_{25}
							M_{33}	M_{34}	
								M_{44}	
									M_{55}

В табл. В-1 и В-2 обозначено:

$$l = \frac{L_{max}}{n \cdot z_k}, \tag{В-1}$$

$$\beta_y = \frac{\overline{E}\, Y_y(x_i)}{\overline{G}\, F_z(x_i)\, l^2}, \qquad \beta_z = \frac{\overline{E}\, Y_z(x_i)}{\overline{G}\, F_y(x_i)\, l^2}, \tag{В-2}$$

$$\delta_y = \frac{12\overline{E}\, Y_y(x_i)}{(1+12\beta_y) l^3}, \quad \delta_z = \frac{12\overline{E}\, Y_z(x_i)}{(1+12\beta_z) l^3}, \tag{В-3}$$

$$\gamma = \frac{\overline{E} F_a(x_i)}{l}, \tag{В-4}$$

$$M_{11} = m\,(x_i)\, l / 3,\ M_{16} = m\,(x_i)\, l / 6, \tag{В-5}$$

$$M_{22} = (13 / 35 + 8{,}4\,\beta_z + 48\,\beta_z^2)\,\psi_z, \tag{В-6}$$

$$M_{25} = (11 / 210 + 1{,}1\,\beta_z + 6\,\beta_z^2)\, l\,\psi_z, \tag{В-7}$$

$$M_{27} = (9 / 70 + 3{,}6\,\beta_z + 24\,\beta_z^2)\,\psi_z, \tag{В-8}$$

$$M_{55} = (1 / 105 + 0{,}2\,\beta_z + 1{,}2\,\beta_z^2)\, l^2\,\psi_z, \tag{В-9}$$

$$M_{57} = (13 / 420 + 0{,}9\,\beta_z + 6\,\beta_z^2)\, l\,\psi_z, \tag{В-10}$$

$$M_{510} = -(1 / 140 + 0{,}2\,\beta_z + 1{,}2\,\beta_z^2)\, l^2\,\psi_z, \tag{В-11}$$

$$M_{33} = (13 / 35 + 8{,}4\,\beta_y + 48\,\beta_y^2)\,\psi_y, \tag{В-12}$$

$$M_{34} = (11 / 210 + 1{,}1\,\beta_y + 6\,\beta_y^2)\, l\,\psi_y, \tag{В-13}$$

$$M_{38} = (9 / 70 + 3{,}6\,\beta_y + 24\,\beta_y^2)\,\psi_y, \tag{В-14}$$

$$M_{44} = (1 / 105 + 0{,}2\,\beta_y + 1{,}2\,\beta_y^2)\, l^2\,\psi_y, \tag{В-15}$$

$$M_{48} = (13 / 420 + 0{,}9\,\beta_y + 6\,\beta_y^2)\, l\,\psi_y, \tag{В-16}$$

$$M_{49} = -(1 / 140 + 0{,}2\,\beta_y + 1{,}2\,\beta_y^2)\, l^2\,\psi_y, \tag{В-17}$$

$$\psi_z = \frac{m(x_i) l}{(1+12\beta_z)^2}, \quad \psi_y = \frac{m(x_i) l}{(1+12\beta_y)^2}. \tag{В-18}$$

Список литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства.
2. Бабаев Н.Н., Лентяков В.Г. Некоторые вопросы общей вибрации судов. – Л.: Судостроение, 1963.
3. Бояновский В.С. Определение возмущающих усилий первого порядка, обусловленных гидродинамической неуравновешенностью гребных винтов // Вопросы судостроения. Проектирование судов. – Вып. 31. – 1982.
4. Разработка метода расчета и средств снижения вибрационных нагрузок, вызываемых гребным винтом в начальных стадиях кавитации. Отчет ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – Вып. 30908. – 1981.
5. Андреев Ю.М., Бавин В.Ф. и др. Периодические силы, передаваемые гребным винтом корпусу судна // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – Л.: Судостроение. – Вып. 273. – 1972.
6. Holden K.O. Exitation forses and afterbody vibrations induced by blade cavitation // Norvegian maritime research. – No. 1. – 1979.
7. Дорофеюк С.К. Экспериментальное исследование зависимости периодических давлений, возбуждаемых гребным винтом, от толщины лопасти // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – Вып. 264. – 1971.
8. Справочные данные по виброактивности длинноходных малооборотных дизелей БМЗ. Дополнение к «Методике расчетной оценки уровней вибрации палуб жилых и служебных помещений надстроек» // Отчет ЦНИИМФ. – 1986.
9. Короткин А.И., Присоединенные массы судна // Справочник. – Л.: Судостроение, 1986.
10. Методика расчета местной прочности корпусов судов на действие вибрационных нагрузок // Отчет ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – Вып. 30846. – 1985.
11. Постнов В.А., Дмитриев С.А., Елтышев Б.К., Родионов А.А. Метод суперэлементов в расчетах сооружений. – Л.: Судостроение, 1979;
12. Постнов В.А., Тарануха Н.А. Оценка напряженно-деформированного состояния корпуса методом модуль-элементов. – Л.: Судостроение, 1983.
13. Вороненок Е.Я., Палий О.М., Сочинский С.В., Метод редуцированных элементов для расчета конструкций. – Л.: Судостроение, 1990.
14. Басин А.М., Миниович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. – Л.: Судпромгиз, 1963.
15. Бавин В.Ф., Завадовский Н.Ю., Левковский Ю.Л., Мицкевич В.Г. Гребные винты. Современные методы расчета. – Л.: Судостроение, 1983.

16. Болеско М.Н. Редуцирование жесткости корпуса судна при изгибных колебаниях // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова. – Вып. 251. – 1969.
17. Palm L. Berechnung vertikalen Schiffskorperligenschwingungen. – Schiffbau-forschung, 1977. – 1/2, 16, 12-17.
18. Landweber L., Macagno M. Added mass of a threeparameters family of two-dimensional forms oscillating in a free surface. J.S.R. – Vol. 2. – No. 4. – 1959.
19. Ростовцев Д.М. Исследование гидроупругих колебаний. Диссертция на соискание звания доктора технических наук. – Л., 1977.
20. Matsuura Y., Arima K.A. Study on the added virtual mass for ellipsoid of revolution in vertical vibration in water. J.K.S.N.A. – Japan. – No. 167. – 1977.
21. Методика расчета параметров общей вибрации транспортных судов // Отчет ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова. – Вып. 20790. – 1982.

Вопросы, связанные с безопасной эксплуатацией аммиачных холодильных установок являются актуальными, в связи с широким использованием аммиака в холодильных установках морских судов в настоящий момент, а также – в перспективе, в связи с ограничениями, вводимыми Монреальским и Киотским протоколами в применении для данной цели фреонов.

Формализованная оценка безопасности (ФОБ) разработана в рамках НИР №РС-38/2000 «Формальная оценка безопасности судовых аммиачных холодильных установок» и №РС-46/2002 «Разработка программы для расчета формальной оценки безопасности судовых аммиачных холодильных установок», выполненных в 2000–2002 гг. по заказу ГУ Регистра Астраханским государственным техническим университетом под руководством к. т. н. Жильцова И.Б. и является примером практического применения основных принципов ФОБ, изложенных в Циркулярах ИМО MSC/Circ.1023 и MEPS/Circ.392-2002.

Настоящая Инструкция разработана сотрудниками отдела механического оборудования и систем ГУ Регистра: главным специалистом В. К. Шурпяком и старшим экспертом В. Т. Аксеновым на основе опыта применения ФОБ на судах с аммиачными холодильными установками при переклассификации. В предлагаемой инструкции по заполнению чек-листа приведены структурные схемы, лежащие в основе программы компьютеризированного расчета показателей безопасности, приведен порядок формирования входных данных, критерии оценки результатов расчета с выработкой рекомендаций по снижению степени риска.

Применение описанной формализованной оценки безопасности рекомендовано при рассмотрении вопроса о возможности размещения аммиачных холодильных установок в общем машинном отделении. В приложении 2 к статье содержится образец заполнения формы документов, оформляемых при практическом применении формализованной оценки безопасности.

Применяется для судов, на которые распространяется требования Правил классификации и постройки морских судов издания 2005 – 2023 г.г. и применяются к еще более ранним судам

ИНСТРУКЦИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ФОРМАЛИЗОВАННОЙ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ АММИАЧНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Инструкция по проведению формализованной оценки безопасности эксплуатации судовых аммиачных холодильных установок[1] позволяет количественно оценивать степень риска эксплуатации данных установок. При этом учитывается опасность возникновения аварий, обусловленных не только техническим состоянием судна, но и человеческим фактором. Настоящая Инструкция и Процедура формализованной оценки безопасности судовых аммиачных холодильных установок, полностью согласуется с циркулярами ИМО MSC/Circ.1023 и MEPC/Circ.392-2002. В процессе разработки настоящего документа была проведена оценка безопасности на 40 судах и анализ причин возникновения 56 аварийных случаев с такими установками. При оценке безопасности судов с аммиачными холодильными установками принимались во внимание такие показатели, как подготовленность экипажа (текучесть кадров, профобразование, возраст, плавательный ценз), бытовые условия (наличие системы кондиционирования, санитарные условия, количество мест в каютах), организация досуга (наличие кают-компании, помещения для приема пищи, спортзала, библиотеки).

Несмотря на видимую сложность модели, разработанная программа для персонального компьютера позволяет решать задачи оценки быстро и эффективно.

Формализованная оценка безопасности эксплуатации судовых аммиачных холодильных установок применяется при приеме в класс РС судов с аммиачной холодильной установкой, расположенной в общем машинном отделении, что отличается от практики постройки судов в классе Регистра. Процедура оценки ФОБ включает в себя расширенное освидетельствование холодильной установки, заполнение чек-листа (всего 189 вопросов), расчет показателей безопасности по специальной программе, разработка дополнительных требований для обеспечения безопасности (если это требуется), составление акта по форме 6.3.10 с указанием дополнительных требований, после выполнения которых безопасность судна может быть признана достаточной для присвоения судну класса РС.

Применение Формализованной оценки безопасности необходимо и обязательно при приеме в класс РС судов, не отвечающих требованиям п. 5 УТ МАКО М57 и 3.1.1 части XII «Холодильные установки» Правил клас-

[1] В дальнейшем – настоящая Инструкция.

сификации и постройки морских судов[2], которые допускают расположение аммиачного оборудования в общем машинном отделении только для судов длиной менее 55 м. Настоящая Инструкция позволяет перейти от принципа запрещения по одному формальному признаку (длина судна менее 55 м) к принятию решения на основе количественной оценки риска эксплуатации опасного объекта по множеству параметров и сравнения с его риском эксплуатации уже существующих объектов. Разработанная методика количественной оценки риска при эксплуатации судовых аммиачных холодильных установок предусматривает использование квалиметрической модели и единый механизм выявления резервов снижения риска для конкретного рискующего субъекта. Фактически предлагается численная шкала для измерения уровня риска и методика определения положения рискующего субъекта на этой шкале.

Как известно, формализованная оценка безопасности (FSA) включает в себя 5 этапов:

1 – идентификация опасностей;

2 – оценка риска;

3 – определение возможных вариантов управления риском;

4 – оценка затрат и выгод;

5 – принятие решения.

Первый этап – идентификация опасностей и их ранжирование – проводился при разработке Методики формализованной оценки безопасности судовых аммиачных холодильных установок. Для этого был произведен анализ причин возникновения 56 аварийных случаев на судах с аммиачными холодильными установками. Изучение проблемы безопасности позволило в итоге определить следующие виды опасности, которые потенциально могут приводить к возникновению аварийных случаев на аммиачных холодильных установках с причинением ущерба людям, судну (оборудованию), грузу и окружающей среде:

механическая опасность;

пожароопасность;

взрывоопасность (в том числе опасность высоких давлений);

химическая опасность.

Указанные виды опасности приняты частными показателями первого ранга «дерева свойств А» и являются факторами, формирующими комплексный показатель А нулевого ранга. Причем, данные виды опасности (частные показатели) имеют различную степень формирования показателя А, которая учитывается коэффициентами значимости.

Модель представлена в виде «дерева свойств А», состоящего из «ветвей» (см. рис. 1).

---

[2] В дальнейшем – Правила РС.

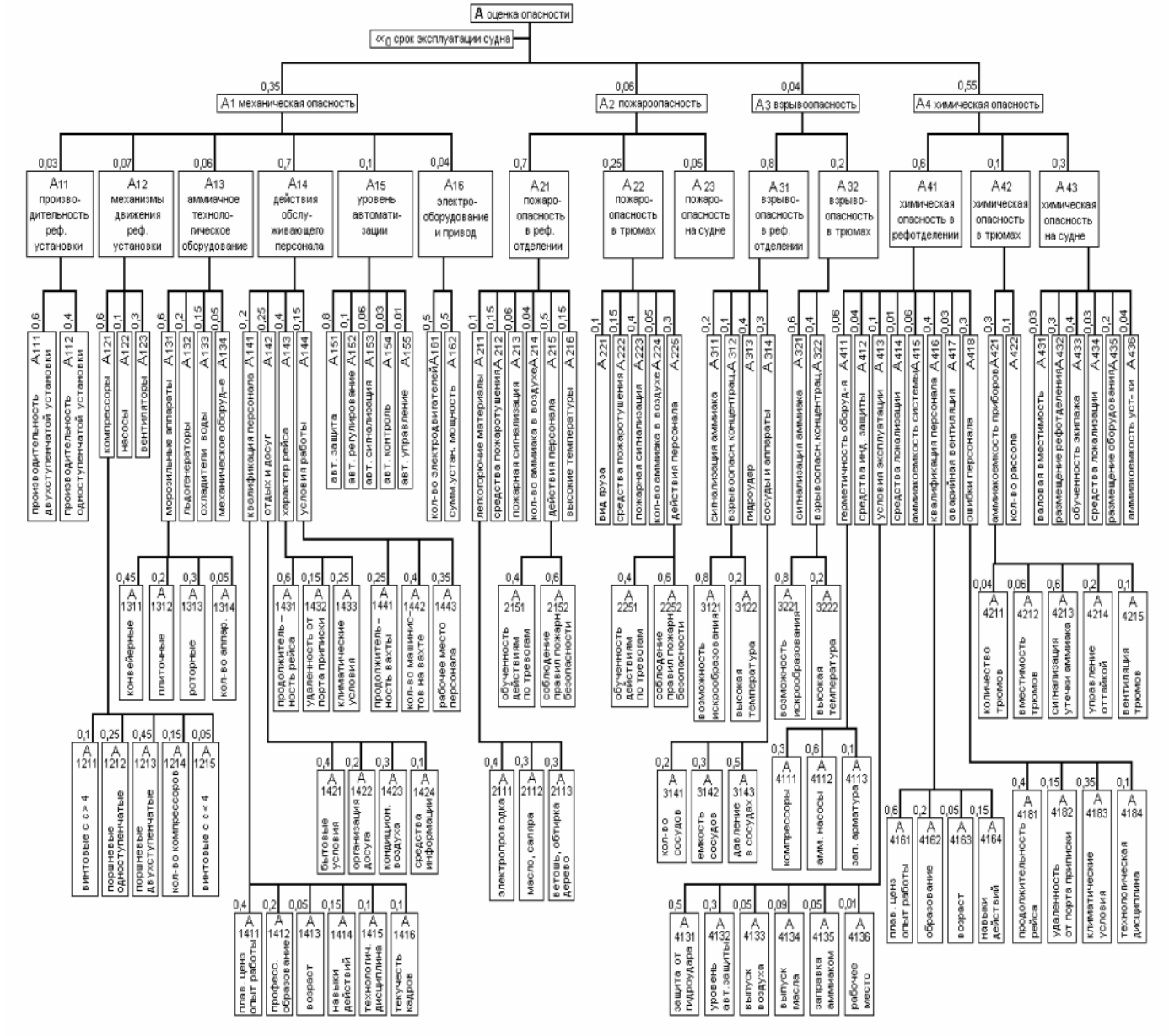


Рис. 1
Квалиметрическая модель оценки степени опасности судовой аммиачной холодильной установки

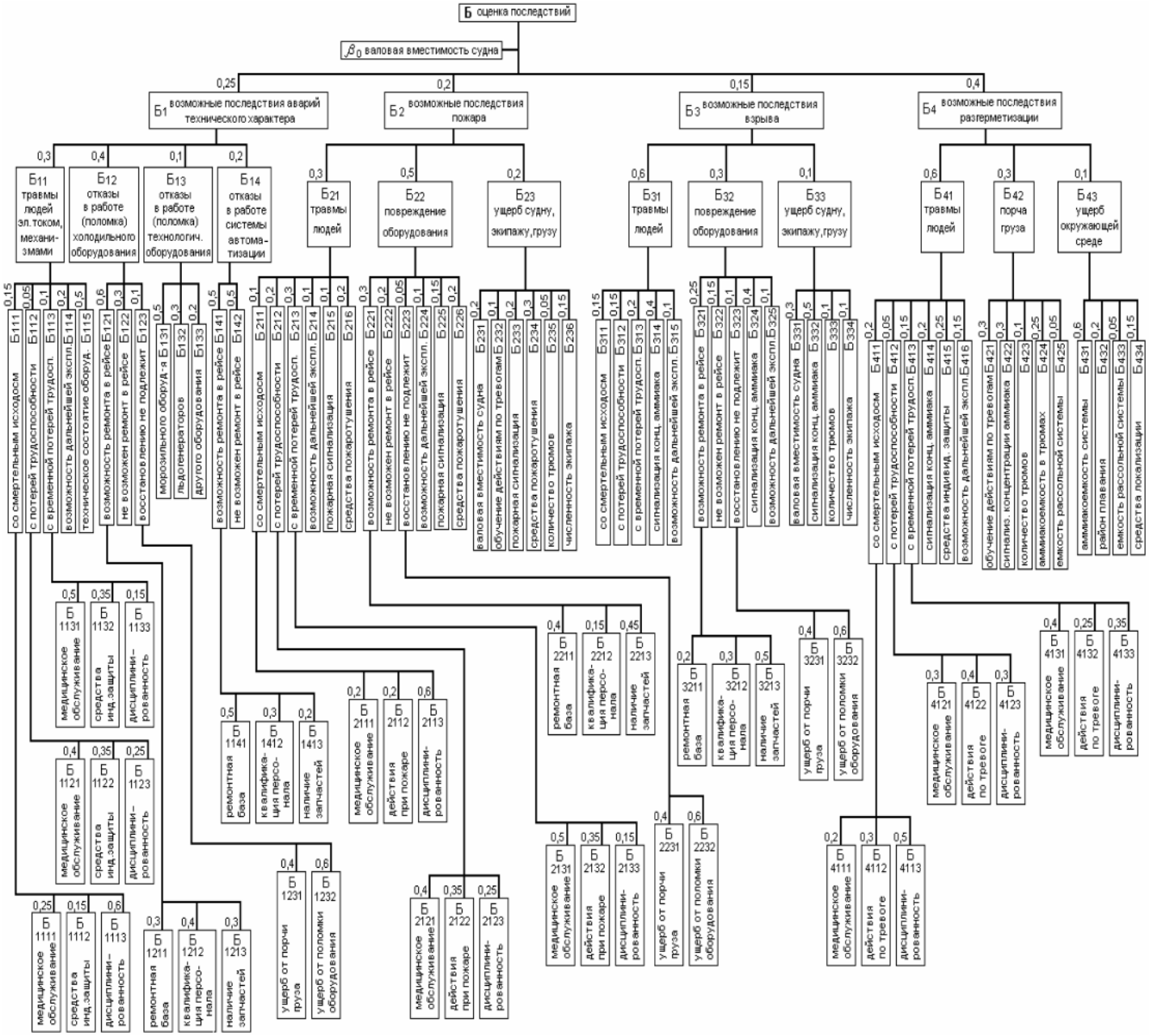


Рис. 2

Квалиметрическая модель оценки возможных последствий аварии судовой аммиачной холодильной установки

Понятие вероятности возникновения аварийного случая приравнивается к понятию степень опасности холодильной установки. Степень опасности аммиачной холодильной установки в квалиметрической модели оценивается показателем А, который является показателем высшего (нулевого) ранга.

Согласно приведенным выше формулам, показатель А может теоретически принимать числовые значения от нуля до единицы. При этом полагается, что А не может быть равным нулю, т. к. холодильная установка с показателем А = 0 должна быть абсолютно безопасна, что не соответствует действительности. Не реальным следует считать также А = 1, т. к. эксплуатация установки с таким показателем обязательно приведет к аварии. Поэтому:

$0 < А < 1$.

Возможные последствия аварий на аммиачной холодильной установке в квалиметрической модели оценивается показателем Б, который является показателем высшего (нулевого) ранга. Модель представлена в виде «дерева свойств Б» (см. рис. 2).

Согласно приведенным выше формулам, показатель Б может теоретически принимать числовые значения от нуля до единицы. При этом полагается, что возможные последствия аварий (также как и степень опасности А) не могут быть равными нулю, т. к. в этом случае это событие нельзя расценивать как аварию. Под Б = 1 будем подразумевать последствия с обязательным максимально возможным ущербом – эксплуатация объекта с такими последствиями недопустима. Поэтому $Б \neq 0$ и $Б \neq 1$, а именно:

$0 < Б < 1$.

Второй этап – оценка риска – осуществляется путем заполнения чек-листа (см. приложение 1) и расчета показателей безопасности А и Б по специальной программе. Чек-лист в электронном виде помещен на сайте Регистра (см. разд. Отдел механического оборудования и систем).

Чек-лист содержит 189 вопросов (некоторые из них повторяются, т. к. влияют на безопасность с точки зрения возможности возникновения разных видов опасности). Сведения, необходимые для заполнения чек-листа по ФОБ судовой аммиачной холодильной установки, можно сгруппировать следующим образом (в скобках указаны номера пунктов опросного листа).

1. Данные технической документации:
   Валовая вместимость судна (93, 144, 163, 189);
   Срок эксплуатации судна (188);
   Расположение рефотделения (94);
   Общая емкость трюмов (89);
   Количество трюмов с аммиачным оборудованием (88, 148, 165, 181);
   Холодопроизводительность холодильной установки (1, 2);
   Количество насосов (водяных, аммиачных, рассольных) (3);
   Количество вентиляторов (в т. ч. вентиляторов морозильных аппаратов) (4);

Количество компрессоров (8);
Производительность компрессоров (5, 6, 7, 9);
Производительность льдогенераторов (10);
Аммиакосодержащее оборудование (11);
Аммиакоемкость холодильной установки (68, 98, 182, 184);
Оборудование, не содержащее аммиак (12);
Количество, тип и производительность морозильных аппаратов (13, 14, 15, 16);
Количество и мощность электродвигателей (38, 39);
Количество, емкость и максимальное давление сосудов и теплообменных аппаратов в рефотделении (60, 61, 62);
Производительность вентилляции в рефотделении и трюмах (69, 92);
Емкость рассольной системы (87, 183, 186);
Возможность работы холодильной установки с нарушениями технологического режима, запас производительности, резервирование (110, 114, 116, 135, 142, 155, 161);
Резервирование льдогенераторов, охладителей, кондиционеров и др. оборудования (117, 118, 136, 157);
Ущерб от потери не подлежащего восстановлению оборудования (115, 143, 162);

2. Сведения о рейсе:
Продолжительность рейса (27, 83);
Район плавания (185);
Удаленность района плавания (28, 84);
Климатические условия в районе плавания (29, 85);
Пожароопасность груза (50);

3. Сведения, относящиеся к экипажу и персоналу, обслуживающему холодильное оборудование:
Численность экипажа (149, 166);
Возраст (19, 81);
Профессиональное образование, квалификация (18, 80, 95, 112, 121, 140, 159);
Плавательный ценз. Опыт работы на аммиачных холодильных установках данного типа (17, 79);
Опыт работы на данном судне (22);
Обученность, тренировки и опыт персонала по действиям в экстремальных ситуациях и по тревогам (кроме пожара) (20, 82, 95, 119, 171, 174, 177, 179);
Обученность, тренировки и опыт персонала по действиям при пожаре (48, 54, 127, 128, 130, 131, 133, 134, 145);
Технологическая дисциплинированность (21, 86, 103, 106, 109, 128, 172, 175, 178);

Взаимозаменяемость персонала холодильной установки (99, 123, 154, 169);

4. Уровень медицинского обслуживания (101, 104, 107, 126, 129, 132, 150, 151, 170, 173, 176);
   Наличие средств индивидуальной защиты (66, 102, 105, 108, 168, 187);
5. Организация:
   Продолжительность вахты (30);
   Количество рефмашинистов на вахте (31);
   Соблюдение правил ППЗ (49, 55);
6. Данные о фактическом состоянии судна:
   Техническое состояние оборудования (100);
   Ремонтопригодность оборудования (117, 118);
   Состояние ремонтной базы (111, 120, 139, 158);
   Обеспеченность запчастями и ремонтными материалами (113, 122, 141, 160);
   Средства информации и связи (26);
   Рабочее место рефмашиниста (32, 78);
   Средства локализации химической опасности (67, 96, 187);
   Бытовые условия персонала обслуживающего холодильную установку (23, 24, 25);
7. Устройства автоматики и сигнализации:
   Автоматическая защита (33, 57, 73, 74);
   Автоматическое управление (34, 37, 91);
   Автоматический контроль и сигнализация (35, 36, 90, 153, 156, 164, 167, 180);
8. Противопожарная защита:
   Наличие средств пожаротушения (40, 41, 51, 125, 138, 147);
   Пожарная сигнализация (42, 52, 124, 137, 146);
9. Рефотделение:
   Герметичность конструкции компрессоров (70);
   Герметичность конструкции насосов (71);
   Герметичность конструкции арматуры (72);
   Наличие аммиака в воздухе (43, 56);
   Высокие температуры (44, 59);
   Возможность искрообразования (45, 58);
   Наличие ГСМ (46, 47);
   Выпуск воздуха (75);
   Выпуск-заправка масла (76);
   Заправка (дозаправка) аммиаком (77);
10. Трюма:
    Наличие аммиака (53, 63);

Возможность искрообразования (64);
Высокие температуры (65).

Перед заполнением чек-листа необходимо ознакомиться с технической документацией на судно и холодильную установку и провести освидетельствование холодильной установки. При освидетельствовании следует уделять особое внимание техническому состоянию оборудования, из которого возможны значительные разовые утечки аммиака в помещения судна. Прежде всего это:

наличие и состояние защиты компрессоров от гидравлического удара (необходимо четко представлять сколько ступеней защиты предусмотрено);

техническое состояние сосудов под давлением, содержащих аммиак (прежде всего коллекторы жидкого аммиака). При этом очень важен всесторонний внешний осмотр, т. к. указанные сосуды под давлением подвержены внешней коррозии. Особое внимание следует уделять патрубкам и штуцерам для крепления арматуры и приборов, т. к. толщина их стенки меньше, чем основного корпуса. В случае наличия коррозии необходимо требовать проведения замеров остаточных толщин и проверочных расчетов на прочность;

техническое состояние трубопроводов аммиака. При этом особое внимание необходимо уделять участкам трубопроводов, на которых производился ремонт. Типы соединений таких трубопроводов должны строго соответствовать требованиям части VIII «Системы и трубопроводы» Правил РС для трубопроводов первого класса.

Заполнение чек-листа необходимо производить совместно с представителями судоходной компании, старшим механиком, рефмехаником и капитаном. В случае, если происходит смена экипажа, при оценке квалификации и возраста персонала, обслуживающего холодильную установку, следует использовать наиболее низкие оценки.

После заполнения чек-листа по специальной программе производится расчет показателей А и Б.

Если сумма показателей А и Б меньше 1, допускается присвоение судну класса РС.

Следующие этапы проведения ФОБ:

определение возможных вариантов управления риском;

оценка затрат и выгод;

принятие решения (осуществляется судовладельцем и согласуется с Регистром).

Если сумма показателей А и Б больше 1, можно осуществить ряд мероприятий, которые позволят снизить либо показатель опасности холодильной установки (А), либо показатель последствий аварийных случаев (Б), либо и то и другое так, чтобы суммарный показатель (А+Б) стал меньше 1, т. е. снизить степень риска до допустимых пределов. Влияние этих мероприятий

на уровень риска можно быстро определить с помощью программы. Для уменьшения вероятных последствий аварийных случаев можно оборудовать медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием и аптекой, ввести в судовую роль врача и фельдшера. Эти мероприятия изменят частные показатели $Б_{1111}$, $Б_{1121}$, $Б_{1131}$, $Б_{2111}$, $Б_{2121}$, $Б_{2131}$, $Б_{311}$, $Б_{4111}$, $Б_{4121}$, $Б_{4131}$, $Б_{313}$, $Б_{312}$ и, кроме этого, исключить случаи нарушения правил пожарной безопасности и эксплуатации. В итоге это приведет к уменьшению комплексного показателя Б. Показатель опасности А можно уменьшить, например, путем установки централизованной система кондиционирования воздуха (A_{1423}), ликвидации из рефотделения емкостей для хранения масла (A_{2112}), установки средств пожаротушения и сигнализации с автоматическим включением средств пожаротушения (A_{223}), сигнализаторов аммиака с автоматическим включением вентиляции (A_{4213}), автоматизирования процесса оттайки (A_{4214}), автоматизирования процесса заправки маслом (A_{4134}) и выпуска воздуха (A_{4133}), установления дублированной системы автоматической защиты от гидроудара (A_{313}) и т. п.

Предложенные мероприятия позволяют снизить риск до допустимых пределов, однако это потребует от судовладельца дополнительных затрат (приобретение и монтаж средств автоматизации, оснащение медпункта, зарплата врача и фельдшера и. п.). Для судов с небольшим превышением границы допустимого риска для снижения степени риска потребуется меньшее число мероприятий, у судовладельца появится выбор. При выборе предпочтительного варианта мероприятий судовладелец (капитан судна) как правило, руководствуется экономическими или временными факторами. Если финансовые возможности судовладельца ограничены, то из всех возможных мероприятий, снижающих риск, он выберет и осуществит те, которые обойдутся ему с минимальными финансовыми затратами. Выбор мероприятий по снижению риска остается за судовладельцем. После принятия им решения производится корректировка данных в чек-листе и новый расчет. Если сумма показателей А и Б становится меньше 1, то допускается присвоить судну класс РС, выставив дополнительные требования.

После окончания освидетельствования составляется акт по форме 6.3.10, в котором указываются основные данные по установке, требования выставляемые по результатам освидетельствования, мероприятия позволяющие снизить риск до допустимых пределов, показатели риска А и Б (указываются значения после выполнения требований настоящего акта и мероприятий по снижению риска). Примеры заполнения акта приводятся в приложении 2.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ОПРОСНЫЙ ЛИСТ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ФОРМАЛИЗОВАННОЙ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВОЙ АММИАЧНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Название судна Регистровый номер

№	Показатели (вопросы)	Варианты ответов	№ отв
1	*Механическая опасность.* Холодопроизводительность 2-х ступенчатой установки (при режиме технологического регламента): **A_{111}**	Более 1000 кВт	1
		От 700 до 1000 кВт	2
		От 300 до 700 кВт	3
		Менее 300 кВт	4
		Двухступенчатая установка отсутствует	5
2	*Механическая опасность*. Холодопроизводительность 1-ступенчатой холодильной установки: **A_{112}**	Более 1000 кВт	1
		От 500 до 1000 кВт	2
		От 100 до 500 кВт	3
		Менее 100 кВт	4
		Одноступенчатая установка отсутствует	5
3	*Механическая опасность; механизмы движения холодильной установки.* Количество установленных насосов *(водяных, аммиачных, рассольных)*: **A_{122}**	Более 12 насосов	1
		От 8 о 12	2
		От 4 до 8	3
		Менее 4	4
		Отсутствуют насосы	5
4	*Механическая опасность; механизмы движения холодильной установки.* Кол-во вентиляторов, в том числе, вентиляторов морозильных аппаратов: **A_{123}**	Более 20 вентиляторов	1
		От 10 до 20 вентиляторов	2
		От 5 до 10 вентиляторов	3
		Менее 5 вентиляторов	4
		Вентиляторы отсутствуют	5
5	*Механическая опасность; механизмы движения холодильной установки; компрессоры.* Суммарная холодопроизводительность винтовых компрессоров (со степенью сжатия ε>4): **A_{1211}**	Более 1000 кВт	1
		От 400 до 1000 кВт	2
		От 100 до 400 кВт	3
		Менее 100 кВт	4
		Винтовые компрессоры отсутствуют	5

6	*Механическая опасность; механизмы движения холодильной установки; компрессоры***.** Производительность одноступенчатых поршневых компрессоров *(при стандартном режиме)*: $\mathbf{A_{1212}}$	Более 800 кВт	1
		От 300 до 800 кВт	2
		От 30 до 300 кВт	3
		Менее 30 кВт	4
		Поршневые компрессоры отсутствуют	5
7	*Механическая опасность; механизмы движения холодильной установки; компрессоры.* Производительность двухступенчатых поршневых компрессоров: (с температурой кипения ниже минус 40 °С). $\mathbf{A_{1213}}$	Более 300 кВт	1
		От 200 до 300 кВт	2
		От 80 до 200 кВт	3
		Менее 80 кВт	4
		Двухступенчатые поршневые компрессоры отсутствуют	5
8	*Механическая опасность; механизмы движения холодильной установки; компрессоры.* Количество компрессоров: $\mathbf{A_{1214}}$	Семь и более компрессоров	1
		Шесть компрессоров	2
		Пять компрессоров	3
		Четыре компрессора	4
		Три и менее компрессоров	5
9	*Механическая опасность; механизмы движения холодильной установки; компрессоры.* Суммарная холодопроизводительность винтовых компрессоров (со степенью сжатия ε<4, при стандартном режиме): $\mathbf{A_{1215}}$	Более 1800 кВт	1
		От 600 до 1200 кВт	2
		От 200 до 600 кВт	3
		Менее 200 кВт	4
		Винтовые компрессоры отсутствуют	5
10	*Механическая опасность; механизмы движения холодильной установки.* Производительность льдогенераторов: $\mathbf{A_{132}}$	Свыше 10 т льда в сутки	1
		От 6 до 10 т льда в сутки	2
		От 1 до 6 т льда в сутки	3
		Менее 1 т льда в сутки	4
		Льдогенераторы отсутствуют	5
11	*Механическая опасность; технологическое оборудование, работающее на аммиаке.* Охладители воды и другое аммиакосодержащее оборудование: $\mathbf{A_{133}}$	Охладители открытого типа с мешалками и другое подобное	1
		Водоохладители закрытого типа	2
		Центральные кондиционеры с промежуточным хладоносителем	3
		Другое технологическое оборудование, использующее аммиак, с холодопотреблением не более 2 кВт	4
		Отсутствуют охладители и другое подобное технологическое оборудование, использующее аммиак	5

12	*Механическая опасность; технологическое оборудование.* Механическое оборудование и механизмы, не использующие аммиак: $\mathbf{A_{134}}$	Транспортеры, грузоподъемные механизмы и т. п. с электроприводом, электропогрузчики и др. механизмы	1
		Или транспортеры, или грузоподъемные механизмы с электроприводом и др. механизмы	2
		Электропогрузчики и механизмы без электропривода (рольганги, тележки и т. п.)	3
		Грузоподъемные и транспортные механизмы без электропривода	4
		Отсутствуют механизмы движения, не использующие аммиак	5
13	*Механическая опасность; технологическое оборудование, работающее на аммиаке; морозильные аппараты.* Производительность конвейерных морозильных аппаратов: $\mathbf{A_{1311}}$	Более 50 т/сутки	1
		От 20 до 50 т/сутки	2
		От 10 до 20 т/сутки	3
		Менее 10 т/сутки	4
		Отсутствие конвейерных аппаратов	5
14	*Механическая опасность; технологическое оборудование, работающее на аммиаке; морозильные аппараты.* Производительность плиточных аппаратов: $\mathbf{A_{1312}}$	Более 30 т/сутки	1
		От 20 до 30 т/сутки	2
		От 7 до 20 т/сутки	3
		Менее 7 т/сутки	4
		Отсутствие плиточных аппаратов	5
15	*Механическая опасность; технологическое оборудование, работающее на аммиаке; морозильные аппараты.* Производительность роторных аппаратов: $\mathbf{A_{1313}}$	Более 50 т/сутки	1
		От 20 до 50 т/сутки	2
		От 10 до 20 т/сутки	3
		Менее 10 т/сутки	4
		Отсутствие роторных аппаратов	5
16	*Механическая опасность; технологическое оборудование, работающее на аммиаке; морозильные аппараты.* Количество морозильных аппаратов: $\mathbf{A_{1314}}$	Более 10 аппаратов	1
		От 6 до10 аппаратов	2
		От 2 до 6 аппаратов	3
		Один аппарат	4
		Отсутствие морозильных аппаратов	5
17	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; квалификация обслуживающего персонала.*	Плавательный ценз до 1 года имеет только рефмеханик, отсутствие у персонала опыта работы на холодильных установках данного типа	1

	Плавательный ценз, опыт работы на холодильных установках данного типа: $\mathbf{A_{1411}}$	Рефмеханик имеет плавательный ценз более 3-х лет, но не имеет опыта работы на холодильных установках данного типа; большинство рефмашинистов не имеет опыта работы на холодильных установках данного типа	2
		Рефмеханик имеет плавательный ценз более 3-х лет и опыт работы на установках данного типа; большинство рефмашинистов не имеют опыта	3
		Рефмеханик имеет плавательный ценз не более 3-х лет и опыт работы на холодильных установках данного типа; большинство рефмашинистов имеют опыт работы на холодильных установках данного типа	4
		Рефмеханик и рефмашинисты имеют плавательный ценз более 5 лет и постоянно работают на холодильных установках данного типа	5
18	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; квалификация персонала холодильной установки*. Профессиональное образование: $\mathbf{A_{1412}}$	Более половины персонала не имеет специального образования	1
		Более половины состава имеет специальное образование, остальные − не имеют специального образования	2
		Более половины персонала имеет высшее специальное образование, остальные − среднее специальное образование	3
		Весь персонал имеет специальное образование и рабочие дипломы	4
		Весь персонал имеет высшее мореходное специальное образование	5
19	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; квалификация обслуживающего персонала.* Возраст обслуживающего персонала: $\mathbf{A_{1413}}$	Более 60 % персонала − моложе 23 лет, остальные − старше 50 лет	1
		Более 50 % персонала − старше 50 лет, остальные − моложе 23 лет	2
		Персонал состоит из лиц разных возрастных групп	3
		Более 50 % персонала − в возрасте от 30 до 40 лет	4
		Весь персонал в возрасте от 30 до 40 лет	5

20	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; квалификация обслуживающего персонала.* Навыки действий в сложной ситуации, в условиях стресса: $\mathbf{A_{1414}}$	Отсутствие у персонала опыта действий в сложных ситуациях	1
		Недостаточные навыки действий в сложных ситуациях у большинства обслуживающего персонала	2
		Персонал имеет навыки поведения в сложных ситуациях	3
		Более половины персонала имеют опыт действий в сложных ситуациях	4
		Весь персонал имеет опыт действий в сложных ситуациях	5
21	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; квалификация обслуживающего персонала.* Технологическая (не) дисциплинированность (оценивается по записям вахтенного журнала предыдущего рейса, характеристикам (рекомендациям), трудовым книжкам обслуживающего персонала, самооценка и др.): $\mathbf{A_{1415}}$	Низкий уровень технологической дисциплины у всего обслуживающего персонала	1
		Низкий уровень технологической дисциплины у большинства обслуживающего персонала	2
		Низкий уровень дисциплины у некоторых членов персонала	3
		Допустимый уровень дисциплины; возможны отдельные случаи нарушения технологической дисциплины	4
		Высокий уровень дисциплины у всего персонала; соблюдение всех инструкций по ТБ и технологических инструкций	5
22	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; квалификация обслуживающего персонала.* Текучесть кадров: (оценка кадрового состава обслуживающего персонала перед рейсом): $\mathbf{A_{1416}}$	Полностью обновленный состав обслуживающего персонала перед рейсом	1
		Персонал обновлен на 50 %	2
		Персонал обновлен на 25 %	3
		Изменений в составе обслуживающего персонала перед рейсом нет	4
		Большая часть обслуживающего персонала неоднократно ходит в рейсы на данном судне	5
23	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; отдых и досуг.* Бытовые условия: $\mathbf{A_{1421}}$	Низкий уровень бытовых и санитарных условий	1
		В каюте более двух членов экипажа, плохие санитарные условия	2
		Двухместная каюта без санузла, общая баня, прачечная	3
		Двухместная каюта с санузлом, общая баня, прачечная	4

		Одноместная каюта с санузлом, общая баня, сауна, прачечная, судовой магазин и т. п.	5
24	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; отдых и досуг.* Организация досуга: $\mathbf{A_{1422}}$	Отсутствие мест для проведения коллективного досуга	1
		Кают-компания или общее место приема пищи	2
		Кают-компания, общее место приема пищи, оборудованный спортзал	3
		Кают-компания, общее место приема пищи, спортзал, библиотека, игротека и др.	4
		Тоже, что и в 4-м варианте ответа; хорошая организация досуга	5
25	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; отдых и досуг.* Система кондиционирования воздуха: $\mathbf{A_{1423}}$	Отсутствие или неработоспособность устройств для создания комфортных климатических условий в помещениях	1
		Только приточно-вытяжная вентиляция	2
		Частичная обработка воздуха в кондиционере	3
		Централизованная система кондиционирования воздуха	4
		Централизованная система кондиционирования воздуха с возможностью индивидуальной регулировки в каютах	5
26	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; отдых и досуг.* Средства информации и связи: $\mathbf{A_{1424}}$	Отсутствие средств информации в каюте	1
		Только судовая радиотрансляция в каютах	2
		Судовая радиотрансляция в каютах; радио, TV, видео в общей кают-компании	3
		Судовая радиотрансляция в каютах; радио, TV, телефон только в каюте рефмеханика	4
		Радио, TV, телефон во всех каютах	5
27	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; рабочие условия.* Продолжительность рейса: $\mathbf{A_{1431}}$	Более 6 месяцев, без захода в порты (без высадки экипажа на берег)	1
		От 4 до 6 месяцев	2
		От 2 до 4 месяцев	3
		От 1 до 2 месяцев	4
		Менее 1 месяца	5

28	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; рабочие условия.* Удаленность рейса от порта приписки: $\mathbf{A}_{1432}$	При переходе в одном направлении более шести суток	1
		В нейтральных и иностранных водах	2
		Во внутренних водах	3
		На рейде, в порту без схода с судна	4
		На рейде, в порту с выходом на берег	5
29	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; рабочие условия.* Климатические условия в районе плавания (в больший период рейса): $\mathbf{A}_{1433}$	Ледовые или штормовые условия	1
		Тропические условия	2
		Условия с резко переменным климатом	3
		Умеренные климатические условия	4
		Комфортные климатические условия	5
30	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; характеристика рейса.* Продолжительность вахты: $\mathbf{A}_{1441}$	Свыше 8 часов	1
		От 6 до 8 часов (отдых …часов), участие в сверхурочных работах по совместительству	2
		От 4 до 6 (отдых …часов), участие в сверхурочных работах по совместительству	3
		От 4 до 6 (отдых …часов)	4
		Безвахтенное обслуживание холодильной установки	5
31	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; характеристика рейса.* Количество рефмашинистов на вахте: $\mathbf{A}_{1442}$	Один рефмашинист	1
		Один рефмашинист и рефмеханик	2
		Два рефмашиниста и рефмеханик (днем)	3
		Два рефмашиниста, слесарь-ремонтник и рефмеханик (днем)	4
		Безвахтенное обслуживание холодильной установки	5
32	*Механическая опасность; действия обслуживающего персонала; характеристика рейса.* Рабочее место обслуживающего персонала: $\mathbf{A}_{1443}$	В рефотделении, совмещенном с машинным отделением главного двигателя	1
		В рефотделении	2
		В помещении, отделенном от рефотделения	3
		В помещении, отделенном от рефотделения, с возможностью дистанционного управления (ЦПУ)	4
		В отдельном помещении, с полной мнемосхемой холодильной установки, дистанционным контролем и управлением параметров и управлением (ЦПУ)	5

33	*Механическая опасность; уровень автоматизации.* Автоматическая защита: $\mathbf{A_{151}}$	Отсутствие или неработоспособность автоматической защиты от гидроудара или повышенного давления нагнетания	1
		Имеется возможность не санкционированного отключения автоматической защиты	2
		Защита только от гидроудара и давления нагнетания	3
		Наличие защиты от гидроудара, давления нагнетания и частичная защита от остальных аварийных ситуаций	4
		Защита от всех аварийных ситуаций	5
34	*Механическая опасность; уровень автоматизации.* Автоматическое регулирование: $\mathbf{A_{152}}$	Отсутствие автоматического регулирования	1
		Автоматическое регулирование температуры в трюмах	2
		Автоматическое регулирование производительности компрессоров	3
		Автоматическое регулирование температуры в трюмах и производительности компрессоров	4
		Полное автоматическое регулирование процесса производства холода	5
35	*Механическая опасность; уровень автоматизации.* Автоматическая сигнализация: $\mathbf{A_{153}}$	Отсутствие или недостаточно полная сигнализация	1
		Только аварийная сигнализация	2
		Аварийная сигнализация и сигнализация об изменении регулируемых параметров	3
		Аварийная, исполнительная и сигнализация об изменении параметров	4
		Наличие мнемосхемы холодильной установки с полной автоматической сигнализацией	5
36	*Механическая опасность; уровень автоматизации.* Автоматический контроль: $\mathbf{A_{154}}$	Отсутствие автоматического контроля	1
		Частичный автоматический контроль	2
		Автоматический контроль за основными технологическими параметрами производства холода	3
		Автоматический контроль за всеми технологическими параметрами производства холода	4

		Полный автоматический контроль с регистрацией (при безвахтенном обслуживании холодильной установки)	5
37	*Механическая опасность; уровень автоматизации.* Автоматическое управление: **A_{155}**	Отсутствие автоматического управления	1
		Автоматическое управление компрессорами	2
		Автоматическое управление компрессорами и процессом оттайки приборов охлаждения трюмов	3
		Автоматическое управление компрессорами, насосами и процессом оттайки приборов охлаждения из отдельного помещения	4
		Полное автоматическое управление с возможностью безвахтенного обслуживания	5
38	*Механическая опасность; электрооборудование и привод.* Количество электродвигателей мощностью свыше 0,4 кВт: **A_{161}**	Более 30 электродвигателей	1
		От 25 до 30	2
		От 20 до 25	3
		От 10 до 20	4
		Менее 10 электродвигателей	5
39	*Механическая опасность; электрооборудование и привод.* Суммарная установленная мощность электродвигателей: **A_{162}**	Более 1000 кВт	1
		От 800 до 1000 кВт	2
		От 400 до 800 кВт	3
		От 50 до 400 кВт	4
		Менее 50 кВт	5
40	*Пожароопасность.* Пожароопасность на судне: **A_{23}**	Средства пожаротушения не соответствуют требованиям Правил РС	1
		Средства пожаротушения отвечают требованиям Правил РС в минимальном объеме	2
		Максимально возможный набор средств пожаротушения на судне	3
		Автоматически действующие средства пожаротушения на судне	4
		Исключена возможность пожара на судне	5
41	*Пожароопасность; пожароопасность в рефотделении.* Средства пожаротушения: **A_{212}**	Средства пожаротушения не соответствуют требованиям Правил РС	1
		Только огнетушители	2

		Средства пожаротушения отвечают требованиям Правил РС в минимальном объеме	3
		Максимально возможный набор средств пожаротушения (с запасом)	4
		Автоматически действующие средства пожаротушения или отсутствие возможности возникновения пожара	5
42	*Пожароопасность; пожароопасность в рефотделении.* Пожарная сигнализация: $\mathbf{A_{213}}$	Отсутствие пожарной сигнализации	1
		Сигнализация на местном посту управления холодильной установкой	2
		Сигнализация на местном посту управления холодильной установкой с выводом на ходовой мостик	3
		Сигнализация о повышенной концентрации CO_2 (задымление)	4
		Сигнализация с автоматическим включением средств пожаротушения	5
43	*Пожароопасность; пожароопасность в рефотделении.* Наличие аммиака в воздухе: $\mathbf{A_{214}}$	Имеется вероятность утечки аммиака во время пожара	1
		Низкая степень герметизации оборудования (сальники, резьбовые и фланцевые соединения и т. п.)	2
		Высокая степень герметизации оборудования (отсутствие сальников, только сварные соединения трубопроводов и т. п.)	3
		Имеется сигнализация о наличии аммиака в воздухе рефотделения с выводом сигнала на ходовой мостик	4
		Имеется сигнализация о наличии аммиака в воздухе рефотделения с автоматическим включением аварийной вентиляции, блокировка вентиляции во время пожара	5
44	*Пожароопасность; пожароопасность в рефотделении.* Высокие температуры: $\mathbf{A_{216}}$	Работа холодильной установки при температуре нагнетания свыше 140 °С, или наличие обогревателей с высокой температурой поверхностей, или открытого пламени	1
		Работа при температуре нагнетания свыше 140 °С, другие источники тепла с высокими температурами отсутствуют	2
		Работа при температуре нагнетания ниже 140 °С, наличие обогревателей с высокой температурой поверхностей	3

		Работа при температуре нагнетания ниже 140 °С, другие источники тепла с высокими температурами отсутствуют	4
		Отсутствие источников тепла с температурой выше 70 °С или открытого пламени	5
45	*Пожароопасность; пожароопасность в рефотделении; легковозгораемые материалы и оборудование.* Электропроводка: $\mathbf{A_{2111}}$	Имеются нарушения требований Правил к электропроводке	1
		Не исключена возможность распространения пожара по электропроводке в соседние помещения	2
		Степень защищенности электрооборудования и проводки соответствует требованиям	3
		Исключена возможность распространения пожара по электропроводке	4
		Материал электроизоляции проводки не поддерживает горение, автоматическая защита исключает токи короткого замыкания	5
46	*Пожароопасность; пожароопасность в рефотделении; легковозгораемые материалы и оборудование.* Наличие масла, саляры и др.: $\mathbf{A_{2112}}$	В рефотделении хранятся переносные емкости с маслом и др. горючесмазочными материалами	1
		В рефотделении имеются стационарные емкости для хранения ГСМ	2
		Отсутствует хранение в рефотделении ГСМ; возможно скопление масла под пайолами	3
		Централизованная заправка компрессоров маслом и выпуска масла из сосудов и аппаратов	4
		Отсутствие в рефотделении масла, саляры и других горючих материалов	5
47	*Пожароопасность; пожароопасность в рефотделении; легковозгораемые материалы и оборудование.* Дерево, промасленная ветошь, обтирка, краска и др. горючие материалы: $\mathbf{A_{2113}}$	Наличие стационарного оборудования изготовленного с применением горючих материалов (дерево, краска и т. п.)	1
		Постоянное хранение промасленной ветоши, обтирки, краски и др. горючих материалов	2
		Имеется вероятность скопления в рефотделении промасленной ветоши, обтирки, краски и др. горючих материалов	3
		Отсутствие оборудования из горючих материалов	4

		Отсутствие оборудования из горючих материалов и хранения горючих материалов	5
48	*Пожароопасность; пожароопасность в рефотделении; действия персонала.* Обученность обслуживающего персонала рефотделения действиям по тревогам: $\mathbf{A_{2151}}$	Только теоретическое обучение	1
		Проведение тренировок персонала действиям по тревоге на берегу и в рейсе	2
		Члены экипажа не имеют навыков действий в экстремальных ситуациях и при пожаре	3
		Персонал прошел все виды обучения и тренировок и имеет навыки действий при пожаре	4
		Весь персонал имеет опыт действий в экстремальных ситуациях и при пожаре	5
49	*Пожароопасность; пожароопасность в рефотделении; действия персонала.* Соблюдение правил пожарной безопасности: (оценивается по записям вахтенного журнала предыдущего рейса, характеристикам (рекомендациям), трудовым книжкам обслуживающего персонала, самооценка и др.): $\mathbf{A_{2152}}$	Имеются нарушения правил пожарной безопасности, отсутствуют наглядная агитация по правилам пожарной безопасности и инструкции	1
		Имеется наглядная агитация по Правилам пожарной безопасности и инструкции, проводятся инструктажи, тем не менее правила нарушаются	2
		Возможны отдельные случаи нарушения Правил пожарной безопасности	3
		Соблюдение всех правил пожарной безопасности и инструкций	4
		Соблюдение всех Правил пожарной безопасности и инструкций, исключена возможность проведения огневых работ	5
50	*Пожароопасность; пожароопасность в трюмах.* Вид груза и теплоизоляции, горючесть, самовозгорание груза (первые четыре варианта ответов для судов с аммиакосодержащим оборудованием в трюмах): $\mathbf{A_{221}}$	Груз склонный к самовозгоранию (например, рыбная мука), горючая теплоизоляция трюмов, наличие в трюмах горючих материалов	1
		Наличие горючих материалов в трюмах (деревянная или картонная тара, деревянные решетки), горючий груз, теплоизоляция, поддерживающая горение	2
		Только горючий груз или теплоизоляция поддерживает горение	3
		Не горючий груз, отсутствие горючих материалов, не горючая теплоизоляция	4
		Отсутствие в трюмах аммиакосодержащего оборудования	5

51	*Пожароопасность; пожароопасность в трюмах.* Средства пожаротушения (первые четыре варианта ответов для судов с аммиакосодержащим оборудованием в трюмах): $\mathbf{A_{222}}$	Средства пожаротушения не соответствуют требования Правил РС	1
		Средства пожаротушения отвечают требованиям Правил РС в минимальном объеме	2
		Максимально возможный набор средств пожаротушения	3
		Автоматически действующие средства пожаротушения	4
		Отсутствие в трюмах аммиакосодержащего оборудования	5
52	*Пожароопасность; пожароопасность в трюмах.* Пожарная сигнализация (первые четыре варианта ответов для судов с аммиакосодержащим оборудованием в трюмах): $\mathbf{A_{223}}$	Отсутствие сигнализации	1
		Сигнализация на посту управления холодильной установкой и ходовом мостике	2
		Сигнализация о повышенной концентрации CO_2 (задымление) с выводом на ходовой мостик	3
		С автоматическим включением средств пожаротушения	4
		Отсутствие в трюмах аммиакосодержащего оборудования	5
53	*Пожароопасность; пожароопасность в трюмах.* Наличие аммиака в воздухе трюмов (первые четыре варианта ответов для судов с аммиакосодержащим оборудованием в трюмах): $\mathbf{A_{224}}$	Большая аммиакоемкость батарей, наличие в трюмах аммиачной запорной арматуры и резьбовых соединений аммиачных трубопроводов	1
		Большая аммиакоемкость, отсутствие запорной арматуры и резьбовых соединений	2
		Малая аммиакоемкость (воздухоохладители), запорная арматура, резьбовые	3
		Малая аммиакоемкость, отсутствие запорной арматуры и резьбовых соединений	4
		В трюмах отсутствует аммиакосодержащее оборудование	5
54	*Пожароопасность; пожароопасность в трюмах; действия персонала.* Обученность по тревогам членов экипажа: $\mathbf{A_{2251}}$	Только теоретическое обучение	1
		Проведение тренировок экипажа действиям по тревоге на берегу и в рейсе	2
		Соблюдение всех Правил пожарной безопасности и инструкций	3
		Члены экипажа имеют навыки действий в условиях пожара	4

		Более половины членов экипажа имеют опыт действий в сложных ситуациях	5
55	*Пожароопасность; пожароопасность в трюмах; действия персонала.* Соблюдение правил пожарной безопасности (оценивается по записям вахтенного журнала предыдущего рейса, характеристикам (рекомендациям), трудовым книжкам обслуживающего персонала, самооценка и др.): $\mathbf{A}_{2252}$	Имеются нарушения Правил пожарной безопасности, отсутствуют наглядная агитация по Правилам пожарной безопасности и инструкции	1
		Низкая дисциплина выполнения Правил пожарной безопасности	2
		Возможны отдельные случаи нарушения Правил пожарной безопасности	3
		Соблюдение всех правил пожарной безопасности	4
		Отсутствие в трюмах аммиакосодержащего оборудования	5
56	*Взрывоопасность; взрывоопасность в рефотделении.* Контроль предельной концентрации аммиака в воздухе: $\mathbf{A}_{311}$	Отсутствие газоанализаторов	1
		Недостаточное количество или неработоспособность газоанализаторов (сигнализаторов)	2
		Наличие газоанализаторов с выводом сигнализации на пост управления холодильной установкой	3
		Наличие газоанализаторов с выводом сигнализации на ходовой мостик и местный пост управления холодильной установкой	4
		Наличие газоанализаторов с сигнализацией и автоматическим включением аварийной вентиляции	5
57	*Взрывоопасность; взрывоопасность в рефотделении.* Гидроудар: $\mathbf{A}_{313}$	Отсутствие или неработоспособность автоматической защиты от гидроудара	1
		Возможность не санкционированного отключения автоматической защиты от гидроудара	2
		Отсутствие дублирования средств автоматической защиты от гидроудара	3
		Наличие дублированной системы автоматической защиты от гидроудара	4
		Дублированная автоматическая защита и дистанционное или безвахтенное управление холодильной установкой	5
58	*Взрывоопасность; взрывоопасность в рефотделении; взрывоопасная концентрация аммиака в воздухе.*	Недостаточно защищенное электрооборудование и проводка	1
		Высокая степень защищенности электрооборудования и проводки, имеется	2

	Возможность искрообразования: A_{3121}	возможность электростатического разряда	
		Высокая степень защищенности электрооборудования и проводки, отсутствует возможность образования статического электричества	3
		Высокая степень защищенности электрооборудования и проводки, отсутствует возможность образования статического электричества, исключено проведение огневых работ (сварка)	4
		Отсутствует возможность образования искры	5
59	*Взрывоопасность; взрывоопасность в рефотделении; взрывоопасная концентрация аммиака в воздухе.* Возможность высоких температур: A_{3122}	Работа холодильной установки при температуре нагнетания свыше 140 °С, наличие обогревателей с высокой температурой поверхностей	1
		Работа при температуре нагнетания свыше 140 °С, другие источники тепла с высокими температурами	2
		Работа при температуре нагнетания ниже 140 °С, наличие обогревателей с высокой температурой поверхностей	3
		Работа при температуре нагнетания ниже 140 °С, другие источники тепла с высокими температурами отсутствуют	4
		Отсутствие источников тепла с температурой выше 70 °С	5
60	*Взрывоопасность; взрывоопасность в рефотделении; сосуды и аппараты.* Количество сосудов и аппаратов: A_{3141}	18 и более	1
		От 14 до 18	2
		От 10 до 14	3
		От 7 до 10	4
		Пять и менее	5
61	*Взрывоопасность; взрывоопасность в рефотделении; сосуды и аппараты.* Суммарная емкость сосудов A_{3142}	8 и более м^3	1
		От 5 до 8 м^3	2
		От 2 до 5 м^3	3
		От 1 до 2 м^3	4
		1 и менее м^3	5
62	*Взрывоопасность; взрывоопасность в рефотделении; сосуды и аппараты.* Максимальное давление в сосудах: A_{3143}	11 и более сосудов низкого давления 11 и более сосудов высокого давления	1
		От 6 или 10 сосудов низкого давления 9 или 10 сосудов высокого давления	2

		От 6 или 10 сосудов низкого давления 7 или 8 сосудов высокого давления	3
		От 6 до 10 сосудов низкого давления 5 или 6 сосудов высокого давления	4
		5 и менее сосудов низкого давления 4 и менее сосудов высокого давления	5
63	*Взрывоопасность; взрывоопасность в трюмах.* Контроль предельной концентрации аммиака в воздухе (первые четыре варианта ответов для трюмов с аммиакосодержащим оборудованием): $\mathbf{A_{321}}$	Отсутствие газоанализаторов или вентиляции трюмов	1
		Наличие газоанализаторов с выводом сигнализации на местный пост управления	2
		Наличие газоанализаторов с выводом сигнализации на местный пост управления холодильной установки и ходовой мостик	3
		Наличие газоанализаторов с сигнализацией и автоматическим включением вентиляции	4
		Отсутствует аммиакосодержащее оборудование в трюмах	5
64	*Взрывоопасность; взрывоопасность в трюмах; взрывоопасная концентрация аммиака в воздухе.* Возможность искрообразования: $\mathbf{A_{3221}}$	Недостаточно защищенное электрооборудование и проводка, возможность электростатического разряда	1
		Высокая степень защищенности электрооборудования и проводки, возможность электростатического разряда	2
		Высокая степень защищенности электрооборудования и проводки, отсутствие возможности электростатического разряда	3
		Отсутствие в трюмах возможности искрообразования	4
		Отсутствие в трюмах аммиакосодержащего оборудования	5
65	*Взрывоопасность; взрывоопасность в трюмах; взрывоопасная концентрация аммиака в воздухе.* Возможность высоких температур в трюмах: $\mathbf{A_{3222}}$	Наличие в трюмах продуктов склонных к самовозгоранию; наличие обогревателей с высокой температурой поверхностей, возможность токов короткого замыкания	1
		Обогреватели с высокой температурой поверхностей (электрооттайка), возможность токов короткого замыкания	2
		Возможность токов короткого замыкания в электропроводке	3

		Отсутствие в трюмах возможности высоких температур	4
		Отсутствие в трюмах аммиачного оборудования	5
66	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении.* Средства индивидуальной защиты от аммиака: $\mathbf{A_{412}}$	Дефицит или неработоспособность средств индивидуальной защиты	1
		Минимально-необходимое обеспечение средствами индивидуальной защиты	2
		Достаточное количество средств защиты, изолированных дыхательных аппаратов и костюмов (не менее 2-х комплектов)	3
		Максимально-возможное обеспечение средствами защиты, дыхательными аппаратами и костюмами	4
		Максимально-возможное обеспечение средствами защиты, дыхательными аппаратами и костюмами, обязательное ношение спецодежды	5
67	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении.* Средства локализации: $\mathbf{A_{414}}$	Отсутствие средств локализации	1
		Только водяные завесы	2
		Водяные завесы и другие средства локализации	3
		Возможность полной герметизации помещения холодильной установки	4
		Средства локализации включаются автоматически по сигналу газоанализатора	5
68	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении.* Аммиакоемкость холодильной установки: $\mathbf{A_{415}}$	Более 10 т	1
		От 6 до 10 т	2
		От 2 до 6 т	3
		От 0,5 до 2 т	4
		Менее 0,5 т	5
69	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении.* Аварийная и общеобменная вентиляция: $\mathbf{A_{417}}$	Дефицит аварийной вентиляции	1
		Недостаточная кратность аварийной вентиляции (менее 30 объемов/час) покрывается общеобменной	2
		Достаточная производительность вентиляции, отсутствие резервных вентиляторов	3
		Достаточная производительность вентиляции, наличие резервных вентиляторов	4

		Автоматическое включение аварийной вентиляции по сигналу газоанализаторов	5
70	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; герметичность холодильного оборудования.* Компрессоры: $\mathbf{A_{4111}}$	Сальниковые конструкции компрессоров обычного исполнения	1
		Надежные конструкции сальников, высококачественный уплотнительный материал	2
		Фланцевое соединение корпуса компрессора и электродвигателя	3
		Высокая степень герметичности компрессоров (полу герметичное исполнение)	4
		Мотор-компрессорные агрегаты с герметичным исполнением	5
71	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; герметичность холодильного оборудования.* Аммиачные насосы: $\mathbf{A_{4112}}$	Сальниковые конструкции аммиачных насосов	1
		Безсальниковые конструкции аммиачных насосов	2
		Высокая степень герметизации насосов и их соединений	3
		Высокая степень герметизации насосов; автоматическое управление, переключение на резервный	4
		Аммиачные насосы отсутствуют	5
72	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; герметичность холодильного оборудования.* Запорная арматура, соединения трубопроводов и др.: $\mathbf{A_{4113}}$	Сальниковые конструкции запорной арматуры, резьбовые и фланцевые соединения аммиачных трубопроводов	1
		Большая часть запорной арматуры сальникового исполнения, резьбовые или фланцевые соединения аммиачных трубопроводов	2
		Большая часть запорной арматуры без сальникового исполнения, резьбовые или фланцевые соединения аммиачных трубопроводов	3
		Большая часть запорной арматуры без сальникового исполнения, высокая степень герметичности соединений трубопроводов	4
		Безсальниковые конструкции запорной арматуры, высокая степень герметичности соединений трубопроводов	5

73	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; условия эксплуатации.* Уровень (надежность) автоматической защиты от гидроудара: $\mathbf{A}_{4131}$	Отсутствие или неработоспособность автоматической защиты от гидроудара	1
		Возможность не санкционированного отключения автоматической защты, отсутствие возможности проверки работоспособности схемы защиты	2
		Отсутствие дублирования системы защиты от гидроудара и предупредительной сигнализации	3
		Надежная автоматическая защита и возможность ее проверки; малая вероятность гидроудара (например, при винтовых компрессорах)	4
		Высокая надежность автоматической защиты от гидроудара, дублирование защиты, наличие предупредительной сигнализации, тлько ручное отключение аварийной сигнализации после ее срабатывания	5
74	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; условия эксплуатации.* Уровень (полнота) автоматической защиты: $\mathbf{A}_{4132}$	Отсутствие или неработоспособность автоматической защиты от гидроудара	1
		Возможность не санкционированного отключения автоматической защиты	2
		Наличие защиты от гидроудара и частичная защита от остальных аварий	3
		Наличие зашиты от гидроудара, давления нагнетания и частичная защита от остальных аварийных ситуаций	4
		Защита от всех аварийных ситуаций	5
75	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; условия эксплуатации.* Выпуск воздуха: $\mathbf{A}_{4133}$	Вручную, из конденсатора или линейного ресивера периодически по графику	1
		Вручную, из конденсатора или линейного ресивера по мере накопления	2
		Вручную, через воздухоотделитель	3
		Периодически, через автоматический воздухоотделитель	4
		Через постоянно действующий автоматический воздухоотделитель	5
76	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; условия эксплуатации.* Выпуск (заправка) масла: $\mathbf{A}_{4134}$	Вручную непосредственно из сосудов и аппаратов	1
		Вручную через маслосборник	2
		Выпуск автоматически, заправка вручную	3

		Выпуск − автоматически, заправка − централизованно вручную	4
		Выпуск и заправка − автоматически	5
77	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; условия эксплуатации.* Заправка (дозаправка) аммиаком: $\mathbf{A}_{4135}$	Из баллонов, хранящихся на судне, во время рейса	1
		Из стационарной емкости, хранящейся на судне, централизованно, во время рейса	2
		Только перед рейсом из баллонов, хранящихся на судне	3
		Только перед рейсом, из стационарной емкости, хранящейся на судне, централизованно	4
		Только перед рейсом; хранения запаса аммиака на судне нет	5
78	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; условия эксплуатации.* Рабочее место рефмашиниста: $\mathbf{A}_{4136}$	В рефотделении, совмещенном с машинным отделением	1
		В отдельном рефотделении	2
		Рабочее место вне рефотделения	3
		В отдельном помещении, отделенном от рефотделения прозрачной перегородкой	4
		В отдельном помещении; полное дистанционное управление холодильной установкой	5
79	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; квалификация обслуживающего персонала.* Плавательный ценз, опыт работы на холодильных установках данного типа: $\mathbf{A}_{4161}$	Плавательный ценз до 1 года имеет только рефмеханик, отсутствие у персонала опыта работы на холодильных установках данного типа	1
		Рефмеханик имеет плавательный ценз более 3-х лет, но не имеет опыта работы на холодильных установках данного типа; большинство рефмашинистов не имеют опыта работы на холодильных установках данного типа	2
		Рефмеханик имеет плавательный ценз более 3-х лет и опыт работы на холодильных установках данного типа; большинство рефмашинистов не имеют опыта работы на холодильных установках данного типа	3
		Рефмеханик имеет плавательный ценз не более 3-х лет и опыт работы на холодильных установках данного типа; большинство рефмашинистов имеют опыт работы на холодильных установках данного типа	4

		Рефмеханик и рефмашинисты имеют плавательный ценз более 5 лет и постоянно работают на холодильных установках данного типа	5
80	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; квалификация обслуживающего персонала.* Профессиональное образование: $\mathbf{A}_{4162}$	Более половины состава персонала не имеет специального образования	1
		Более половины состава имеет высшее специальное образование	2
		Более половины состава имеет высшее специальное образование, остальные − среднее профессиональное образование	3
		Весь персонал имеет высшее специальное образование и рабочие дипломы	4
		Весь обслуживающий персонал имеет высшее мореходное специальное образование	5
81	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; квалификация обслуживающего персонала.* Возраст: $\mathbf{A}_{4163}$	Более 50 % персонала − моложе 23 лет	1
		Более 50 % персонала − старше 50 лет, остальные − моложе 23 лет	2
		Персонал состоит из лиц разных возрастных групп	3
		Более 50 % персонала − от 30 до 40 лет	4
		Возраст персонала − от 30 до 40 лет	5
82	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; квалификация обслуживающего персонала.* Навыки действия в сложных ситуациях, в условиях стресса: $\mathbf{A}_{4164}$	Отсутствие навыков действия в сложных ситуациях	1
		Недостаточные навыки действий в сложных ситуациях	2
		Весь персонал имеет навыки действий в сложных ситуациях	3
		Более половины персонала имеет опыт действия в сложных ситуациях	4
		Весь персонал имеет опыт поведения в сложных ситуациях	5
83	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; ошибки обслуживающего персонала.* Продолжительность рейса: $\mathbf{A}_{4181}$	Более 6 месяцев, без захода в порты (без высадки экипажа на берег)	1
		От 4 до 6 месяцев	2
		От 2 до 4 месяцев	3
		От 1 до 2 месяцев	4
		Менее 1 месяца	5
84	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; ошибки обслуживающего персонала.*	При переходе в одном направлении более шести суток	1
		В нейтральных и иностранных водах	2

	Удаленность от порта приписки: A_{4182}	Во внутренних водах	3
		На рейде, в порту без схода на берег	4
		На рейде, в порту с выходом на берег после вахты	5
85	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; ошибки обслуживающего персонала.* Климатические условия в районе плавания: A_{4183}	Ледовые или штормовые условия в продолжение большей части рейса	1
		Тропические условия в большей части рейса	2
		Резко-переменные климатические условия	3
		Умеренные климатические условия	4
		Комфортные климатические условия	5
86	*Химическая опасность; химическая опасность в рефотделении; ошибки обслуживающего персонала.* Технологическая (не) дисциплинированность (оценивается по записям вахтенного журнала, характеристикам (рекомендациям), трудовым книжкам, самооценка и др.): A_{4184}	Низкий уровень технологической дисциплины у всего обслуживающего персонала	1
		Низкий уровень технологической дисциплины у большинства обслуживающего персонала	2
		Низкий уровень дисциплины у некоторых членов персонала	3
		Допустимый уровень дисциплины; возможны отдельные случаи нарушения технологической дисциплины	4
		Высокий уровень дисциплины у всего персонала; соблюдение всех инструкций по ТБ и технологических инструкций	5
87	*Химическая опасность; химическая опасность в трюмах.* Количество рассола: A_{422}	Свыше 30 т	1
		От 16 до 30 т	2
		От 8 до 16 т	3
		Менее 8 т	4
		Отсутствует рассольная система охлаждения	5
88	*Химическая опасность; химическая опасность в трюмах; аммиакоемкость.* Количество трюмов с аммиакосодержащим оборудованием: A_{4211}	Один трюм	1
		Два трюма	2
		Три трюма	3
		Четыре и более	4
		Отсутствие в трюмах аммиакосодержащего оборудования	5
89	*Химическая опасность; химическая опасность в трюмах; аммиакоемкость.*	Более 15 000 м^3	1
		От 10000 до 15000 м^3	2
		От 5000 до 10000 м^3	3

	Общая емкость трюмов: A_{4212}	От 2000 до 5000 м^3	4
		Менее 2000 м^3	5
90	*Химическая опасность; химическая опасность в трюмах; аммиакоемкость.* Сигнализация об утечке аммиака: A_{4213}	Отсутствие сигнализаторов	1
		Наличие газоанализаторов с выводом сигнализации на пост управления холодильной установкой	2
		Наличие газоанализаторов с выводом сигнализации на ходовой мостик и местный пост управления холодильной установкой	3
		Наличие газоанализаторов с автоматическим включением вентиляции	4
		Отсутствие аммиакосодержащего оборудования в трюмах	5
91	*Химическая опасность; химическая опасность в трюмах; аммиакоемкость.* Управление оттайкой приборов охлаждения: A_{4214}	Ручной режим управления оттайкой	1
		Полуавтоматическое управление процессом оттайки с использованием горячих паров аммиака	2
		Полуавтоматическое управление процессом оттайки с использованием электронагревателей	3
		Процесс оттайки полностью автоматизирован	4
		Отсутствие аммиакосодержащего оборудования в трюмах	5
92	*Химическая опасность; химическая опасность в трюмах; аммиакоемкость.* Вентиляция: A_{4215}	Отсутствует принудительная вентиляция трюмов	1
		Дефицит производительности вентиляции	2
		Достаточная производительность вентиляторов	3
		Вентиляция включается автоматически, по сигналу газоанализатора	4
		Отсутствие аммиакосодержащего оборудования в трюмах	5
93	*Химическая опасность; химическая опасность на судне.* Валовая вместимость судна: A_{431}	Менее 600	1
		От 600 до 900	2
		От 900 до 3000	3
		От 3000 до 10000	4
		Свыше 10000	5

94	*Химическая опасность; химическая опасность на судне.* Место расположения рефотделения: $\mathbf{A}_{432}$	В общей надстройке	1
		В общем машинном отделении с главным двигателем	2
		На уровне твиндека	3
		Ниже ватерлинии	4
		В отдельной надстройке	5
95	*Химическая опасность; химическая опасность на судне.* Обученность экипажа действиям по тревоге “аммиак”: $\mathbf{A}_{433}$	Только теоретическое обучение	1
		Проведение тренировок экипажа действиям по тревоге на берегу до рейса	2
		Проведение тренировок экипажа действиям по тревоге на берегу и в условиях рейса	3
		Среди членов экипажа имеются лица с подготовкой по специальности “рефмашинист”	4
		Большинство членов экипажа имеют навыки действий в экстремальных ситуациях при разгерметизации	5
96	*Химическая опасность; химическая опасность на судне.* Средства локализации химической опасности: $\mathbf{A}_{434}$	Отсутствие средств локализации загазованности	1
		Сеть водяных завес	2
		Сеть водяных завес, перекрытие воздуховодов и другие средства	3
		Полный набор средств локализации	4
		Средства локализации включаются автоматически по сигналам газоанализаторов	5
97	*Химическая опасность; химическая опасность на судне.* Место расположения технологического оборудования: $\mathbf{A}_{435}$	В общем помещении с другими производственными помещениями	1
		На уровне твиндека под общей надстройкой	2
		На уровне твиндека в кормовой части	3
		В трюме под общей надстройкой	4
		В отдельной надстройке, на открытой палубе	5
98	*Химическая опасность; химическая опасность на судне.* Аммиакоемкость холодильной установки: $\mathbf{A}_{436}$	Более 10 т	1
		От 8 до 10 т	2
		От 5 до 8 т	3
		От 0,5 до 5 т	4
		Менее 0,5 т	5

99	*Возможные последствия аварий технического характера; травмы людей электротоком и механизмами движения;* Возможность дальнейшей эксплуатации холодильной установки без участия пострадавших: $\mathbf{Б_{114}}$	Возможно продолжение производственной деятельности в полном объеме без нарушения технологического режима	1
		Возможность замены пострадавших из числа лиц, обслуживающих холодильную установку	2
		Возможность замены пострадавших из членов экипажа	3
		Замена пострадавших не возможна, эксплуатация возможна с ограничениями	4
		Дальнейшая эксплуатация холодильной установки не возможна	5
100	*Возможные последствия аварий технического характера; травмы людей электротоком и механизмами движения; возможность дальнейшей эксплуатации.* Техническое состояние оборудования: $\mathbf{Б_{115}}$	Отсутствуют открытые механизмы движения	1
		Невозможен доступ и ремонт механизмов движения во время их работы	2
		Все механизмы движения надежно закреплены и защищены	3
		Большой моральный и физический износ оборудования; систематическая проверка заземления, электроизоляции, своевременное испытание на прочность сосудов и аппаратов	4
		Техническое состояние оборудования не исключает травм электротоком и механизмами движения (большой моральный и физический износ)	5
101	*Возможные последствия аварий технического характера; травмы людей электротоком и механизмами движения; возможность дальнейшей эксплуатации; со смертельным исходом.* Уровень медицинского обслуживания: $\mathbf{Б_{1111}}$	Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, врач, фельдшер, аптека	1
		Медпункт, фельдшер, медицинское оборудование, аптека	2
		Фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	3
		Персонал обучен оказанию первой медицинской помощи, аптечка в рефотделении	4
		Медицинское обслуживание отсутствует	5
102	*Возможные последствия аварий технического характера; травмы людей электротоком и механизмами движения; возможность дальнейшей эксплуатации; со смертельным исходом.*	Полный комплект средств индивидуальной защиты, в т. ч. электрозащитный инструмент, спецодежда, обувь, перчатки, электроизолированные инструменты и т. п.	1

	Обеспеченность средствами индивидуальной защиты: $\mathbf{Б}_{1112}$	Ненадежность индивидуальной электрозащиты, обязательное ношение спецодежды	2
		Ненадежность индивидуальной электрозащиты, отсутствие электрозащитного инструмента и спецодежды	3
		Недостаточность средств защиты, отсутствие электрозащитного инструмента и спецодежды	4
		Отсутствие средств защиты, электрозащитного инструмента и спецодежды	5
103	*Возможные последствия аварий технического характера; травмы людей электротоком и механизмами движения; возможность дальнейшей эксплуатации; со смертельным исходом.* Дисциплинированность (соблюдение правил безопасности), бдительность обслуживающего персонала: $\mathbf{Б}_{1113}$	Высокий уровень исполнения Правил безопасности; отсутствуют нарушения трудовой и технологической дисциплины	1
		Систематическое обучение Правилам безопасной эксплуатации, инструктажи, постоянный контроль исполнения	2
		Недостаточные контроль за соблюдением Правил безопасности и требовательность их исполнения	3
		Недостаточные контроль за соблюдением Правил безопасности и требовательность их исполнения	4
		Низкий уровень исполнительной дисциплины. Отсутствует контроль за соблюдением Правил безопасности	5
104	*Возможные последствия аварий технического характера; травмы людей электротоком и механизмами движения; с потерей трудоспособности.* Уровень медицинского обслуживания: $\mathbf{Б}_{1121}$	Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, врач, фельдшер, аптека	1
		Медпункт (изолятор), фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	2
		Врач или фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи	3
		Персонал обучен оказанию первой медицинской помощи, аптечка в рефотделении	4
		Медицинское обслуживание отсутствует	5
105	*Возможные последствия аварий технического характера; травмы людей электротоком и механизмами движения; с потерей трудоспособности.*	Полный комплект средств индивидуальной защиты, в т. ч. электрозащитный инструмент, спецодежда, обувь, перчатки, электроизолированные инструменты и т. п.	1

	Обеспеченность средствами индивидуальной защиты: **$Б_{1122}$**	Ненадежность индивидуальной электрозащиты, обязательное ношение спецодежды	2
		Ненадежность индивидуальной электрозащиты, отсутствие электрозащитного инструмента и спецодежды	3
		Недостаточность средств защиты, отсутствие безопасных ремонтных приспособлений, инструмента, спецодежды	4
		Отсутствие средств защиты, электрозащитного инструмента и спецодежды	5
106	*Возможные последствия аварий технического характера; травмы людей электротоком и механизмами движения; с потерей трудоспособности.* Дисциплинированность (соблюдение правил безопасности), бдительность обслуживающего персонала: **$Б_{1123}$**	Высокий уровень исполнения Правил безопасности; отсутствуют нарушения трудовой и технологической дисциплины	1
		Систематическое обучение Правилам безопасной эксплуатации, инструктажи, постоянный контроль исполнения Правил и инструкций	2
		Недостаточные контроль за соблюдением Правил безопасности и требовательность их исполнения	3
		Имеют место нарушения Правил безопасности, трудовой и технологической дисциплины	4
		Низкий уровень исполнительной дисциплины. Отсутствует контроль соблюдения Правил безопасности	5
107	*Возможные последствия аварий технического характера; травмы людей электротоком и механизмами движения; с временной потерей трудоспособности.* Уровень медицинского обслуживания: **$Б_{1131}$**	Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, врач, фельдшер, аптека	1
		Медпункт (изолятор), фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	2
		Врач или фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	3
		Персонал обучен оказанию первой медицинской помощи, аптечка в рефотделении	4
		Медицинское обслуживание отсутствует	5
108	*Возможные последствия аварий технического характера; травмы людей электротоком и механизмами движения; с временной потерей трудоспособности.*	Полный комплект средств индивидуальной защиты, в т. ч. электрозащитный инструмент, спецодежда, обувь, перчатки, электроизолированные инструменты и т. п.	1

	Обеспеченность средствами индивидуальной защиты: $\mathbf{Б_{1132}}$	Ненадежность индивидуальной электрозащиты, обязательное ношение спецодежды	2
		Ненадежность индивидуальной электрозащиты, отсутствие электрозащитного инструмента и спецодежды	3
		Недостаточность средств защиты, отсутствие безопасных ремонтных приспособлений, инструмента, спецодежды	4
		Отсутствие средств защиты, электрозащитного инструмента и спецодежды	5
109	*Возможные последствия аварий технического характера; травмы людей электротоком и механизмами движения; с временной потерей трудоспособности.* Дисциплинированность (соблюдение правил безопасности), бдительность обслуживающего персонала: $\mathbf{Б_{1133}}$	Высокий уровень исполнения Правил безопасности; отсутствуют нарушения трудовой и технологической дисциплины	1
		Систематическое обучение Правилам безопасной эксплуатации, инструктажи, постоянный контроль исполнения Правил и инструкций	2
		Недостаточные контроль за соблюдением Правил техники безопасности и требовательность их исполнения	3
		Имеют место нарушения Правил техники безопасности, трудовой и технологической дисциплины	4
		Низкий уровень исполнительной дисциплины; отсутствует контроль соблюдения Правил техники безопасности	5
110	*Возможные последствия аварий технического характера; отказы в работе (поломки) оборудования холодильной установки.* Невозможность ремонта в условиях рейса: $\mathbf{Б_{122}}$	Не отражается на качестве груза	1
		Возможна дальнейшая работа холодильной установки с некоторыми нарушениями технологического режима без существенного снижения качества груза	2
		Частичная порча груза	3
		Невозможность продолжения производственной деятельности, например, из-за отсутствия резервного оборудования: частичная порча груза	4
		Полная порча груза	5
111	*Возможные последствия аварий технического характера; отказы в работе (поломки) оборудования холодильной установки; возможен ремонт в условиях рейса.*	Мастерская с необходимым станочным парком, сварочное оборудование, достаточный набор инструментов, приспособлений, ремонтных материалов и т. п.	1

	Состояние ремонтной базы: **$Б_{1211}$**	Недостаточный станочный парк, дефицит материалов, несовершенство сварочного оборудования; достаточный набор инструментов, приспособлений, ремонтных материалов	2
		Достаточный набор инструментов, приспособлений, ремонтных материалов; отсутствие станочного парка или сварочного оборудования	3
		Недостаточный набор ремонтных инструментов, приспособлений и материалов; отсутствие станочного парка и сварочного оборудования	4
		Отсутствие или несовершенство ремонтной базы	5
112	*Возможные последствия аварий технического характера; отказы в работе (поломки) оборудования холодильной установки; возможен ремонт в условиях рейса.* Квалификация ремонтного персонала: **$Б_{1212}$**	Токарь, фрезеровщик, слесари достаточно высокой квалификации, дипломированный сварщик	1
		Квалифицированные слесари с навыками станочной работы, сварщик	2
		Слесари-ремонтники с недостаточно высокой квалификацией с навыками выполнения станочных и сварочных работ	3
		Ремонтные работы по совместительству выполняют рефмеханики; низкая квалификация ремонтного персонала	4
		Отсутствие ремонтного персонала с достаточно высокой квалификацией	5
113	*Возможные последствия аварий технического характера; отказы в работе оборудования холодильной установки; возможен ремонт в условиях рейса.* Обеспеченность запасными частями и деталями, ремонтными материалами, резервным оборудованием: **$Б_{1213}$**	Возможность переключения на резервное оборудование; полный комплект необходимых запчастей и ремонтных материалов	1
		Дефицит резервного оборудования; полный комплект необходимых запчастей и ремонтных материалов	2
		Достаточный комплект необходимых запасных частей и ремонтных материалов; запас холодопроизводительности	3
		Дефицит запчастей, ремонтных материалов; отсутствие резервного оборудования; имеется запас холодопроизводительности	4
		Отсутствие необходимых запчастей и материалов и резервного оборудования	5

114	*Возможные последствия аварий технического характера; отказы в работе (поломки) оборудования холодильной установки; восстановление поврежденного оборудования невозможно.* Ущерб от возможной порчи груза: $\mathbf{Б}_{1231}$	Не отражается на качестве груза, например, вследствие использования резервного оборудования	1
		Возможна дальнейшая работа холодильной установки с некоторыми нарушениями технологического режима, не отражающаяся существенно на качестве груза	2
		Возможна дальнейшая работа холодильной установки с некоторыми нарушениями технологического режима; частичная порча груза	3
		Невозможность продолжения производственной деятельности, например, из-за отсутствия резервного оборудования; частичная порча груза	4
		Невозможность продолжения производственной деятельности; полная порча груза	5
115	*Возможные последствия аварий технического характера; отказы в работе (поломки) оборудования; восстановление поврежденного оборудования невозможно.* Ущерб от потери не подлежащего восстановлению оборудования: $\mathbf{Б}_{1232}$	Менее 10 % остаточной стоимости холодильной установки	1
		От 10 % до 30 % остаточной стоимости холодильной установки	2
		От 30 % до 40 % остаточной стоимости холодильной установки	3
		От 30 % до 40 % остаточной стоимости холодильной установки	4
		Более 50 % от остаточной стоимости холодильной установки	5
116	*Возможные последствия аварий технического характера; отказы в работе (поломки) технологического оборудования; отказы в работе.* Поломки морозильного оборудования: $\mathbf{Б}_{131}$	Отсутствие морозильного оборудования	1
		Возможен ремонт в условиях рейса без ущерба производственной деятельности	2
		Не подлежит восстановлению в условиях рейса. Можно продолжать производственную деятельность, например, за счет резервного оборудования	3
		Не подлежит восстановлению. Производственная деятельность ограничена	4
		Нет возможности продолжения производственной деятельности (например, из-за отсутствия резервного оборудования)	5
117	*Возможные последствия аварий технического характера; отказы в работе (поломки) технологического оборудования; отказы в работе.*	Отсутствие льдогенераторов	1
		Возможен ремонт в условиях рейса без ущерба производственной деятельности	2

	Поломки льдогенераторов: **Б**$_{132}$	Не подлежит восстановлению в условиях рейса; можно продолжать производственную деятельность, например, за счет резервного оборудования	3
		Не подлежит восстановлению. Производственная деятельность ограничена	4
		Нет возможности продолжения производственной деятельности (отсутствует резервное оборудование)	5
118	*Возможные последствия аварий технического характера; отказы в работе (поломки) технологического оборудования; отказы в работе.* Поломки охладителей, кондиционеров и др: **Б**$_{133}$	Отсутствие охладителей и другого подобного аммиачного оборудования	1
		Возможен ремонт в условиях рейса без ущерба производственной деятельности	2
		Не подлежит восстановлению в условиях рейса; можно продолжать производственную деятельность без ограничений, например, за счет резервного оборудования	3
		Не подлежит восстановлению. Производственная деятельность ограничена	4
		Нет возможности продолжения производственной деятельности (отсутствует резервное оборудование)	5
119	*Возможные последствия аварий технического характера; отказы в работе (поломки) системы автоматики и сигнализации.* Не возможен ремонт в условиях рейса: **Б**$_{142}$	Обслуживающий персонал способен выполнять функции автоматического управления и регулирования при возможности переключения на резервную систему автоматической защиты	1
		Обслуживающий персонал способен выполнять функции автоматического управления и регулирования при условии работоспособности автоматической защиты	2
		Обслуживающий персонал способен выполнять функции автоматической защиты при наличии автоматической сигнализации	3
		Все функции системы автоматики могут быть возложены на обслуживающий персонал и выполнены	4
		Система автоматизации, в т. ч. автоматическая сигнализация и защита не работоспособны; нет возможности дальнейшей эксплуатации холодильной установки без средств автоматизации (т. е. вручную)	5

120	*Возможные последствия аварий технического характера; отказы в работе (поломки) системы автоматики и сигнализации; возможен ремонт в условиях рейса.* Состояние ремонтной базы: **Б$_{1411}$**	Мастерская с необходимым станочным парком, сварочное оборудование, достаточный набор инструментов, приспособлений, ремонтных материалов и т. п.	1
		Недостаточный станочный парк, дефицит материалов, несовершенство сварочного оборудования; достаточный набор инструментов, приспособлений, ремонтных материалов	2
		Достаточный набор инструментов, приспособлений, ремонтных материалов; отсутствие станочного парка или сварочного оборудования	3
		Недостаточный набор ремонтных инструментов, приспособлений и материалов; отсутствие станочного парка и сварочного оборудования	4
		Отсутствие или несовершенство ремонтной базы	5
121	*Возможные последствия аварий технического характера; отказы в работе (поломки) системы автоматики и сигнализации; возможен ремонт в условиях рейса.* Квалификация обслуживающего персонала: **Б$_{1412}$**	Слесарь по КИП и Автоматике с высшим специальным образованием и опытом работы с оборудованием холодильной установки данного типа	1
		Слесарь по КИП и Автоматике с средним или высшим специальным образованием без опыта работы с оборудованием холодильной установки данного типа	2
		Судовой электромеханик, выполняющий по совместительству обязанности слесаря по КИП и Автоматике холодильной установки	3
		Ремонтные работы по КИП и Автоматике по совместительству выполняют рефмашинисты или рефмеханик	4
		Отсутствие квалифицированных специалистов по КИП и Автоматике	5
122	*Возможные последствия аварий технического характера; отказы в работе (поломки) системы автоматики и сигнализации; возможен ремонт в условиях рейса.* Обеспеченность запчастями и материалами: **Б$_{1413}$**	Возможность замены не действующих средств автоматики запасными блоками; полный комплект необходимых запчастей и материалов	1
		Максимально возможный комплект необходимых запчастей и материалов	2
		Минимально необходимое количество запчастей и материалов	3
		Дефицит запчастей и материалов	4

		Отсутствие необходимых запчастей и материалов	5
123	*Возможные последствия пожаров; травмы людей пожаром (ожоги, удушье).* Возможность дальнейшей эксплуатации холодильной установки без участия пострадавших: **$Б_{214}$**	Возможно продолжение производственной деятельности в полном объеме	1
		Возможность замены пострадавших из числа лиц, обслуживающих холодильную установку	2
		Возможность замены пострадавших из членов экипажа с сохранением всех функций холодильной установки	3
		Замена пострадавших не возможна, эксплуатация холодильной установки возможна с ограничениями	4
		Дальнейшая эксплуатация холодильной установки не возможна	5
124	*Возможные последствия пожаров; травмы людей пожаром (ожоги, удушье).* Наличие пожарной сигнализации: **$Б_{215}$**	Сигнализация с автоматическим включением средств пожаротушения	1
		Сигнализация на местном посту управления и ходовом мостике	2
		Сигнализация с выводом на пост в рефотделении	3
		Недостаточное количество датчиков сигнализаторов пожарной опасности	4
		Отсутствие пожарной сигнализации	5
125	*Возможные последствия пожаров; травмы людей пожаром (ожоги, удушье).* Наличие средств пожаротушения: **$Б_{216}$**	Автоматически действующие средства пожаротушения	1
		Полный набор средств пожаротушения, пожарозащитная одежда	2
		Дефицит средств пожаротушения	3
		Только пожарный щит с инструментом	4
		Отсутствие или неработоспособность средств пожаротушения	5
126	*Возможные последствия пожаров; травмы людей пожаром (ожоги, удушье); со смертельным исходом.* Уровень медицинского обслуживания: **$Б_{2111}$**	Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, врач, фельдшер, аптека	1
		Медпункт (изолятор), фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	2
		Врач или фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	3
		Персонал обучен оказанию первой медицинской помощи, аптечка в рефотделении	4

		Медицинское обслуживание отсутствует	5
127	*Возможные последствия пожаров; травмы людей пожаром (ожоги, удушье); со смертельным исходом.* Действия персонала при пожаре: **$Б_{2112}$**	Большинство членов экипажа имеют навыки действий в экстремальных ситуациях пожара	1
		Проведение тренировок обслуживающего персонала действиям по тревоге на берегу и во время рейса	2
		Проведение тренировок обслуживающего персонала действиям по тревоге на берегу до рейса	3
		Только теоретическое обучение правилам пожарной безопасности	4
		Экипаж не обучен действиям по пожарной тревоге	5
128	*Возможные последствия пожаров; травмы людей пожаром (ожоги, удушье); со смертельным исходом.* Дисциплинированность (соблюдение правил пожарной безопасности), бдительность обслуживающего персонала: **$Б_{2113}$**	Высокий уровень исполнения правил пожарной безопасности; отсутствуют нарушения правил, трудовой и технологической дисциплины	1
		Систематическое обучение правилам пожарной безопасной и инструктажи; постоянный контроль исполнения правил и инструкций	2
		Недостаточный контроль за соблюдением правил пожарной безопасности и требовательность их исполнения	3
		Имеют место нарушения правил пожарной безопасности, трудовой и технологической дисциплины	4
		Низкий уровень исполнительной дисциплины; нет контроля за соблюдением правил пожарной безопасности	5
129	*Возможные последствия пожаров; травмы людей пожаром (ожоги, удушье); с потерей трудоспособности.* Уровень медицинского обслуживания: **$Б_{2121}$**	Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, врач, фельдшер, аптека	1
		Медпункт (изолятор), фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	2
		Врач или фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	3
		Персонал обучен оказанию первой медицинской помощи, аптечка в рефотделении	4
		Медицинское обслуживание отсутствует	5

130	*Возможные последствия пожаров; травмы людей пожаром (ожоги, удушье); с потерей трудоспособности.* Действия персонала при пожаре: $\mathbf{Б}_{2122}$	Большинство обслуживающего холодильную установку персонала имеет навыки действий при пожарах	1
		Проведение тренировок персонала действиям по пожарной тревоге на берегу и во время рейса	2
		Проведение тренировок обслуживающего персонала действиям по пожарной тревоге на берегу до рейса	3
		Только теоретическое обучение правилам пожарной безопасности	4
		Обслуживающий холодильную установку персонал не обучен действиям по пожарной тревоге	5
131	*Возможные последствия пожаров; травмы людей пожаром (ожоги, удушье); с потерей трудоспособности.* Дисциплинированность (соблюдение правил пожарной безопасности), бдительность обслуживающего персонала: $\mathbf{Б}_{2123}$	Высокий уровень исполнения правил пожарной безопасности; отсутствуют нарушения правил, трудовой и технологической дисциплины	1
		Систематическое обучение правилам пожарной безопасной и инструктажи; постоянный контроль исполнения правил и инструкций	2
		Недостаточные контроль за соблюдением правил пожарной безопасности и требовательность их исполнения	3
		Имеют место нарушения правил пожарной безопасности, трудовой и технологической дисциплины	4
		Низкий уровень исполнительной дисциплины; отсутствует контроль за соблюдением правил пожарной безопасности	5
132	*Возможные последствия пожаров; травмы людей пожаром (ожоги, удушье); с временной потерей трудоспособности.* Уровень медицинского обслуживания: $\mathbf{Б}_{2131}$	Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, врач, фельдшер, аптека	1
		Медпункт (изолятор), фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	2
		Врач или фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	3
		Персонал обучен оказанию первой медицинской помощи, аптечка в рефотделении	4
		Медицинское обслуживание отсутствует	5

133	*Возможные последствия пожаров; травмы людей пожаром (ожоги, удушье); с временной потерей трудоспособности.* Действия персонала при пожаре: $\mathbf{Б}_{2132}$	Большинство обслуживающего холодильную установку персонала имеет навыки действий при пожарах	1
		Проведение тренировок персонала действиям по пожарной тревоге на берегу и во время рейса	2
		Проведение тренировок обслуживающего персонала действиям по пожарной тревоге на берегу до рейса	3
		Только теоретическое обучение правилам пожарной безопасности	4
		Обслуживающий холодильную установку персонал не обучен действиям по пожарной тревоге	5
134	*Возможные последствия пожаров; травмы людей пожаром (ожоги, удушье); с временной потерей трудоспособности.* Дисциплинированность (соблюдение правил пожарной безопасности), бдительность обслуживающего персонала: $\mathbf{Б}_{2133}$	Высокий уровень исполнения правил пожарной безопасности; отсутствуют нарушения правил трудовой и технологической дисциплины	1
		Систематическое обучение правилам пожарной безопасности, инструктажи, постоянный контроль исполнения	2
		Недостаточные контроль за соблюдением правил пожарной безопасности и требовательность их исполнения	3
		Имеют место нарушения правил пожарной безопасности, трудовой и технологической дисциплины	4
		Низкий уровень исполнительной дисциплины. Отсутствует контроль за соблюдением правил пожарной безопасности	5
135	*Возможные последствия пожаров; повреждение оборудования пожаром.* Невозможность ремонта в судовых условиях (в условиях рейса): $\mathbf{Б}_{222}$	Не отражается на качестве груза	1
		Возможна дальнейшая работа холодильной установки с некоторыми нарушениями технологического режима без существенного снижения качества груза	2
		Возможна дальнейшая работа холодильной установки с некоторыми нарушениями технологического режима; частичная порча груза	3
		Невозможность продолжения производственной деятельности, например, из-за отсутствия резервного оборудования; частичная порча груза	4
		Полная порча груза вследствие невозможности функционирования холодильного оборудования	5

136	*Возможные последствия пожаров; повреждение оборудования пожаром.* Возможность дальнейшей эксплуатации без оборудования, поврежденного пожаром: **$Б_{224}$**	Возможно продолжение производственной деятельности в полном объеме без использования резервного оборудования	1
		Возможность замены поврежденного оборудования резервным и продолжение эксплуатации	2
		Возможность замены поврежденного оборудования резервным; эксплуатация возможна с некоторыми нарушениями технологического режима	3
		Невозможность замены поврежденного оборудования из-за отсутствия резервного или его порчи пожаром, эксплуатация возможна с нарушениями режима	4
		Дальнейшая эксплуатация холодильной установки не возможна	5
137	*Возможные последствия пожаров; повреждение оборудования пожаром.* Наличие пожарной сигнализации: **$Б_{225}$**	Сигнализация с автоматическим включением средств пожаротушения от газоанализатора CO_2	1
		Сигнализация с автоматическим включением средств пожаротушения от температурных датчиков	2
		Сигнализация на местном посту управления и ходовом мостике	3
		Сигнализация с выводом на пост в рефотделении	4
		Отсутствие пожарной сигнализации	5
138	*Возможные последствия пожаров; повреждение оборудования пожаром.* Наличие средств пожаротушения: **$Б_{226}$**	Автоматически действующие средства пожаротушения	1
		Полный набор средств пожаротушения	2
		Дефицит средств пожаротушения	3
		Только пожарный щит с инструментом	4
		Отсутствие или неработоспособность средств пожаротушения	5
139	*Возможные последствия пожаров; повреждение оборудования пожаром; возможность ремонта оборудования в судовых условиях.* Состояние ремонтной базы: **$Б_{2211}$**	Мастерская с необходимым станочным парком, сварочное оборудование, достаточный набор инструментов, приспособлений, ремонтных материалов и т. п.	1
		Недостаточный станочный парк, дефицит материалов, несовершенство сварочного оборудования; достаточный набор инструментов, ремонтных материалов	2

		Достаточный набор инструментов, приспособлений, ремонтных материалов; отсутствие станочного парка или сварочного оборудования	3
		Недостаточный набор ремонтных инструментов, приспособлений и материалов; отсутствие станочного парка и сварочного оборудования	4
		Отсутствие или несовершенство ремонтной базы	5
140	*Возможные последствия пожаров; повреждение оборудования пожаром; возможность ремонта оборудования в судовых условиях.* Квалификация ремонтного персонала: **$Б_{2212}$**	Токарь, фрезеровщик, слесари достаточно высокой квалификации, дипломированный сварщик	1
		Квалифицированные слесари с навыками станочной работы, сварщик	2
		Слесари-ремонтники с недостаточно высокой квалификацией с навыками выполнения станочных и сварочных работ	3
		Ремонтные работы по совместительству выполняют рефмеханики; низкая квалификация ремонтного персонала	4
		Отсутствие ремонтного персонала с достаточно высокой квалификацией	5
141	*Возможные последствия пожаров; повреждение оборудования пожаром; возможность ремонта оборудования в судовых условиях.* Обеспеченность запасными частями и деталями: **$Б_{2213}$**	Возможность переключения на резервное оборудование; полный комплект необходимых запчастей и ремонтных материалов	1
		Дефицит резервного оборудования; полный комплект необходимых запчастей и ремонтных материалов	2
		Достаточный комплект необходимых запчастей и ремонтных материалов; запас холодопроизводительности	3
		Дефицит запчастей, ремонтных материалов; отсутствие резервного оборудования; имеется запас холодопроизводительности	4
		Отсутствие необходимых запчастей и материалов и резервного оборудования	5
142	*Возможные последствия пожаров; повреждение оборудования пожаром; невозможность восстановления работоспособности.* Ущерб от возможной порчи груза: **$Б_{2231}$**	Не отражается на качестве груза, например, вследствие использования резервного оборудования	1
		Возможна дальнейшая работа холодильной установки с некоторыми нарушениями технологического режима, не отра-	2

		жающаяся существенно на качестве груза	2
		Возможна дальнейшая работа холодильной установки с некоторыми нарушениями технологического режима; частичная порча груза	3
		Невозможность продолжения производственной деятельности, например, из-за отсутствия резервного оборудования; частичная порча груза	4
		Невозможность продолжения производственной деятельности; полная порча груза	5
143	*Возможные последствия пожаров; повреждение оборудования пожаром; невозможность восстановления работоспособности.* Ущерб от потери не подлежащего восстановлению оборудования: **$Б_{2232}$**	Менее 10 % остаточной стоимости холодильной установки	1
		От 10 % до 30 % остаточной стоимости холодильной установки	2
		От 30 % до 40 % остаточной стоимости холодильной установки	3
		От 40 % до 50 % остаточной стоимости холодильной установки	4
		Более 50 % остаточной стоимости холодильной установки	5
144	*Последствия пожаров в помещениях с аммиачным оборудованием; ущерб 3-м лицам.* Валовая вместимость судна: **$Б_{231}$**	Свыше 9000	1
		От 5000 до 9000	2
		От 1000 до 5000	3
		От 500 до 1000	4
		Менее 500	5
145	*Возможные последствия пожаров в помещениях с аммиачным оборудованием; ущерб судну, экипажу, грузу (3-м лицам).* Количество людей, обученность действиям по тревогам: **$Б_{232}$**	Все члены экипажа обучены и имеют навыки действий в экстремальных ситуациях	1
		Большинство членов экипажа обучено и имеет навыки действий в условиях пожара	2
		Проведение тренировок экипажа действиям по тревоге на берегу и в рейсе	3
		Проведено только теоретическое обучение экипажа действиям по пожарной тревоге	4
		Экипаж не обучен действиям по тревогам	5

146	*Возможные последствия пожаров в помещениях с аммиачным оборудованием; ущерб судну, экипажу, грузу (3-м лицам).* Пожарная сигнализация: $\mathbf{Б}_{233}$	Сигнализация с автоматическим включением средств пожаротушения	1
		Сигнализация на местном посту управления и ходовом мостике	2
		Сигнализация с выводом на пост в рефотделении	3
		Сигнализация “общесудовая тревога”	4
		Отсутствие пожарной сигнализации	5
147	*Возможные последствия пожаров в помещениях с аммиачным оборудованием; ущерб судну, экипажу, грузу (3-м лицам по отношению к холодильной установке).* Средства пожаротушения и возможности локализации пожара: $\mathbf{Б}_{234}$	Автоматически действующие средства пожаротушения и локализации пожара	1
		Максимально возможный набор средств пожаротушения и средств локализации пожара	2
		Минимально необходимый набор средств пожаротушения, отсутствие средств локализации пожара	3
		Дефицит средств пожаротушения, отсутствие средств локализации пожара	4
		Отсутствие или неработоспособность средств пожаротушения, отсутствие средств локализации пожара	5
148	*Возможные последствия пожаров в трюмах; ущерб судну, экипажу, грузу.* Количество трюмов с аммиачным оборудованием: $\mathbf{Б}_{235}$	В трюмах отсутствует аммиачное оборудование	1
		4 и более трюмов	2
		3 трюма	3
		2 трюма	4
		1 трюм	5
149	*Возможные последствия пожаров; ущерб экипажу судна (3-м лицам).* Численность экипажа: $\mathbf{Б}_{236}$	Менее 20 человек	1
		От 20 до 30 человек	2
		От 30 до 40 человек	3
		От 40 до 50 человек	4
		Более 50 человек	5
150	*Возможные последствия взрыва; травмы людей взрывом (баротравмы).* Со смертельным исходом (медицинское обеспечение и персонал): $\mathbf{Б}_{311}$	Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, врач, фельдшер, аптека	1
		Врач, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	2
		Фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	3

		Медицинское обслуживание отсутствует; персонал обучен оказанию первой медицинской помощи, аптечка в рефотделении	4
		Медицинское обслуживание отсутствует	5
151	*Возможные последствия взрыва; травмы людей взрывом.* С потерей трудоспособности: **$Б_{312}$**	Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, врач, фельдшер, аптека	1
		Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, фельдшер, аптека	2
		Фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи	3
		Медицинское обслуживание отсутствует; персонал обучен оказанию первой медицинской помощи, аптечка в рефотделении	4
		Медицинское обслуживание отсутствует	5
152	*Возможные последствия взрыва; травмы людей взрывом.* С временной потерей трудоспособности: **$Б_{313}$**	Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, врач, фельдшер, аптека	1
		Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, фельдшер, аптека	2
		Фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи	3
		Медицинское обслуживание отсутствует; персонал обучен оказанию первой медицинской помощи, аптечка в рефотделении	4
		Медицинское обслуживание отсутствует	5
153	*Возможные последствия взрыва; травмы людей взрывом.* Сигнализация о предельной концентрации аммиака в воздухе: **$Б_{314}$**	Сигнализация предельной концентрации аммиака в воздухе с автоматическим включением аварийной вентиляции	1
		Сигнализация с выводом на местный пост управления холодильной установки и ходовой мостик	2
		Сигнализация с выводом на пост в рефотделении	3
		Сигнализация с выводом на пост в рефотделении; недостаточное количество датчиков аммиака в воздухе	4

		Отсутствие сигнализации о предельной концентрации аммиака в воздухе	5
154	*Возможные последствия взрыва; травмы людей взрывом.* Возможность дальнейшей эксплуатации холодильной установки без участия пострадавших: **Б**$_{315}$	Возможно продолжение производственной деятельности в полном объеме без участия пострадавших	1
		Возможность замены пострадавшего из числа лиц, обслуживающих холодильную установку	2
		Возможность замены пострадавших из членов экипажа	3
		Замена пострадавших невозможна, эксплуатация холодильной установки возможна с ограничениями	4
		Дальнейшая эксплуатация холодильной установки не возможна (отсутствует возможность замены пострадавших)	5
155	*Возможные последствия взрыва; повреждение оборудования взрывом.* Невозможен ремонт в судовых условиях: **Б**$_{322}$	Возможна дальнейшая работа холодильной установки, без оборудования, поврежденного взрывом	1
		Возможна дальнейшая работа холодильной установки с некоторыми нарушениями технологического режима, не отражающимися на качестве груза	2
		Возможна дальнейшая работа холодильной установки с некоторыми нарушениями режима, частичная порча груза	3
		Невозможность продолжения производственной деятельности, например, из-за отсутствия резервного оборудования; частичная порча груза	4
		Полная порча груза	5
156	*Возможные последствия взрыва; повреждение оборудования взрывом* Сигнализация о предельной концентрации аммиака в воздухе: **Б**$_{324}$	Сигнализация предельной концентрации аммиака в воздухе с автоматическим включением аварийной вентиляции	1
		Сигнализация с выводом на местный пост управления холодильной установки и ходовой мостик	2
		Сигнализация с выводом на пост в рефотделении	3
		Сигнализация с выводом на пост в рефотделении; недостаточное количество датчиков аммиака в воздухе	4
		Отсутствие сигнализации о предельной концентрации аммиака в воздухе	5

157	*Возможные последствия взрыва; повреждение оборудования взрывом.* Возможность дальнейшей эксплуатации без оборудования, поврежденного взрывом: **$Б_{325}$**	Возможно продолжение производственной деятельности в полном объеме без использования резервного оборудования	1
		Возможность замены поврежденного оборудования резервным и продолжение эксплуатации	2
		Возможность замены поврежденного оборудования резервным; эксплуатация возможна с некоторыми нарушениями	3
		Невозможность замены поврежденного оборудования из-за отсутствия резервного или его повреждения; эксплуатация возможна с нарушениями режима	4
		Невозможна дальнейшая эксплуатация холодильной установки	5
158	*Возможные последствия взрывов; повреждение оборудования взрывом; возможен ремонт в судовых условиях.* Состояние ремонтной базы: **$Б_{3211}$**	Мастерская с необходимым станочным парком, сварочное оборудование, достаточный набор инструментов, приспособлений, ремонтных материалов и т. п.	1
		Недостаточный станочный парк, дефицит материалов, несовершенство сварочного оборудования; достаточный набор инструментов, приспособлений, ремонтных материалов	2
		Достаточный набор инструментов, приспособлений, ремонтных материалов; отсутствие станочного парка или сварочного оборудования	3
		Недостаточный набор ремонтных инструментов, приспособлений и материалов; отсутствие станочного парка и сварочного оборудования	4
		Отсутствие или несовершенство ремонтной базы	5
159	*Возможные последствия взрывов; повреждение оборудования взрывом; возможен ремонт в судовых условиях.* Квалификация ремонтного персонала: **$Б_{3212}$**	Токарь, фрезеровщик, слесари достаточно высокой квалификации, дипломированный сварщик	1
		Квалифицированные слесари с навыками станочной работы, сварщик	2
		Слесари-ремонтники с недостаточно высокой квалификацией с навыками выполнения станочных и сварочных работ	3
		Отсутствие ремонтного персонала с достаточно высокой квалификацией	4
		Отсутствие ремонтного персонала	5

160	*Возможные последствия взрывов; повреждение оборудования взрывом; возможен ремонт в судовых условиях.* Обеспеченность запасными частями и деталями: $\mathbf{Б}_{3213}$	Возможность переключения на резервное оборудование; полный комплект необходимых запчастей и ремонтных материалов	1
		Дефицит резервного оборудования; полный комплект необходимых запчастей и ремонтных материалов	2
		Достаточный комплект необходимых запчастей и ремонтных материалов; запас холодопроизводительности	3
		Дефицит запчастей, ремонтных материалов; отсутствие резервного оборудования; имеется запас холодопроизводительности	4
		Отсутствие необходимых запчастей и материалов и резервного оборудования	5
161	*Возможные последствия взрывов; повреждение оборудования взрывом; невозможность восстановления работоспособности оборудования.* Ущерб от возможной порчи груза: $\mathbf{Б}_{3231}$	Не отражается на качестве груза, например, вследствие использования резервного оборудования	1
		Возможна дальнейшая работа холодильной установки с некоторыми нарушениями технологического режима, не отражающимися	2
		Возможна дальнейшая работа холодильной установки с некоторыми нарушениями технологического режима; частичная порча груза	3
		Невозможность продолжения производственной деятельности, например, из-за отсутствия резервного оборудования; частичная порча груза	4
		Невозможность продолжения производственной деятельности; полная порча груза	5
162	*Возможные последствия взрывов; повреждение оборудования взрывом; невозможность восстановления работоспособности оборудования.* Ущерб от потери не подлежащего восстановлению оборудования: $\mathbf{Б}_{3232}$	Менее 10 % остаточной стоимости холодильной установки	1
		От 10 % до 30 % остаточной стоимости холодильной установки	2
		От 30 % до 54 % остаточной стоимости холодильной установки	3
		От 40 % до 50 % остаточной стоимости холодильной установки	4
		Более 50 % остаточной стоимости холодильной установки	5

163	*Возможные последствия взрыва; ущерб судну и экипажу (3-м лицам по отношению к холодильной установке).* Валовая вместимость судна: **$Б_{331}$**	Свыше 9000	1
		От 5000 до 9000	2
		От 1000 до 5000	3
		От 500 до1000	4
		Менее 500	5
164	*Возможные последствия взрыва; повреждение оборудования взрывом; ущерб судну и экипажу (3-м лицам по отношению к холодильной установке).* Сигнализация о предельной концентрации аммиака в воздухе: **$Б_{332}$**	С автоматическим включением аварийной вентиляции	1
		Сигнализация с выводом на местный пост в рефотделении и ходовой мостик	2
		Сигнализация с выводом на пост в рефотделении	3
		Сигнализация с выводом на пост в рефотделении; недостаточное количество датчиков наличия аммиака в воздухе	4
		Отсутствие сигнализации о концентрации аммиака	5
165	*Возможные последствия взрыва; ущерб судну и экипажу (3-м лицам).* Количество трюмов: **$Б_{333}$**	Отсутствие в трюмах аммиачного оборудования	1
		4 и более трюмов	2
		3 трюма	3
		2 трюма	4
		1 трюм	5
166	Возможные последствия взрыва; повреждение оборудования; ущерб судну и экипажу. Численность экипажа на судне: **$Б_{334}$**	Менее 20 человек	1
		От 20 до 30 человек	2
		От 30 до 40 человек	3
		От 40 до 50 человек	4
		Более 50 человек	5
167	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; травмы людей аммиаком (отравления, ожоги).* Сигнализация предельной концентрации аммиака в воздухе: **$Б_{414}$**	Сигнализация с автоматическим включением аварийной вентиляции	1
		Сигнализация на местном посту в рефотделении и ходовом мостике	2
		Сигнализация с выводом на пост в рефотделении	3
		Сигнализация с выводом на пост в рефотделении; недостаточное количество датчиков аммиака в воздухе	4
		Отсутствие сигнализации о концентрации аммиака	5

168	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; травмы людей аммиаком (отравления, ожоги).* Средства индивидуальной и общей защиты: **$Б_{415}$**	Двойной комплект именных противогазов, изолирующих дыхательных аппаратов, защитные костюмы и обувь; свободный доступ к средствам защиты	1
		Максимально возможный набор средств индивидуальной защиты	2
		Минимально необходимый набор средств индивидуальной защиты с постоянным контролем их исправности	3
		Дефицит средств индивидуальной защиты (например, только противогазы)	4
		Отсутствие или неисправность средств индивидуальной защиты	5
169	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной системы; травмы людей аммиаком (отравления, ожоги).* Возможность дальнейшей эксплуатации холодильной установки: **$Б_{416}$**	Возможно продолжение эксплуатации холодильной установки без участия и замены пострадавших	1
		Возможность замены пострадавшего из числа лиц, обслуживающих холодильную установку	2
		Возможность замены пострадавших из членов экипажа	3
		Замена пострадавших не возможна, эксплуатация холодильной установки возможна с ограничениями	4
		Дальнейшая эксплуатация холодильной установки не возможна	5
170	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; травмы людей аммиаком (отравления, ожоги); со смертельным исходом.* Уровень медицинского обслуживания: **$Б_{4111}$**	Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, врач, фельдшер, аптека	1
		Медпункт (изолятор), фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	2
		Врач или фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	3
		Персонал обучен оказанию первой медицинской помощи, аптечка в рефотделении	4
		Медицинское обслуживание отсутствует	5
171	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; травмы людей аммиаком (отравления, ожоги); со смертельным исходом.* Обученность экипажа действиям по тревогам: **$Б_{4112}$**	Большинство обслуживающего персонала холодильной установки и экипажа имеют навыки действий в экстремальных ситуациях разгерметизации аммиачной системы	1
		Проведение тренировок персонала холодильной установки действиям по тревоге на берегу и во время рейса	2

		Проведение тренировок персонала холодильной установки действиям по тревоге на берегу до рейса	3
		Только теоретическое обучение	4
		Обслуживающий персонал холодильной установки и экипаж не обучен действиям по тревогам химической опасности	5
172	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; травмы людей аммиаком (отравления, ожоги); со смертельным исходом.* Дисциплинированность, бдительность обслуживающего персонала: **$Б_{4113}$**	Высокий уровень исполнения Правил безопасной эксплуатации; отсутствуют нарушения Правил, инструкций, трудовой и технологической дисциплины	1
		Систематическое обучение правилам безопасной эксплуатации, инструктажи, постоянный контроль их исполнения	2
		Недостаточные контроль за соблюдением правил безопасной эксплуатации и требовательность их исполнения	3
		Имеют место нарушения правил безопасной эксплуатации, трудовой и технологической дисциплины	4
		Низкий уровень исполнительной дисциплины. Отсутствует контроль за соблюдением правил безопасной эксплуатации	5
173	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; травмы людей аммиаком (отравления, ожоги); с потерей трудоспособности.* Уровень медицинского обслуживания: **$Б_{4121}$**	Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, врач, фельдшер, аптека	1
		Медпункт (изолятор), фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	2
		Врач или фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	3
		Персонал обучен оказанию первой медицинской помощи, аптечка в рефотделении	4
		Медицинское обслуживание отсутствует	5
174	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; травмы людей аммиаком (отравления, ожоги); с потерей трудоспособности.* Обученность экипажа действиям по тревогам: **$Б_{4122}$**	Большинство обслуживающего персонала холодильной установки и экипажа имеют навыки действий в экстремальных ситуациях разгерметизации аммиачной системы	1
		Проведение тренировок персонала холодильной установки действиям по тревоге на берегу и во время рейса	2

		Проведение тренировок персонала холодильной установки действиям по тревоге на берегу до рейса	3
		Только теоретическое обучение	4
		Обслуживающий персонал холодильной установки и экипаж не обучен действиям по тревогам химической опасности	5
175	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; травмы людей аммиаком (отравления, ожоги); с потерей трудоспособности.* Дисциплинированность, бдительность обслуживающего персонала: **$Б_{4123}$**	Высокий уровень исполнения Правил безопасной эксплуатации; отсутствуют нарушения Правил, инструкций, трудовой и технологической дисциплины	1
		Систематическое обучение Правилам безопасной эксплуатации, инструктажи, постоянный контроль исполнения	2
		Недостаточные контроль за соблюдением Правил безопасности и требовательность их исполнения	3
		Имеют место нарушения Правил безопасной эксплуатации, трудовой и технологической дисциплины	4
		Низкий уровень исполнительной дисциплины. Отсутствует контроль за соблюдением правил безопасной эксплуатации	5
176	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; травмы людей аммиаком (отравления, ожоги); с временной потерей трудоспособности.* Уровень медицинского обслуживания: **$Б_{4131}$**	Медпункт (изолятор) с необходимым медицинским оборудованием, врач, фельдшер, аптека	1
		Медпункт (изолятор), фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	2
		Врач или фельдшер, средства оказания первой медицинской помощи, аптека	3
		Персонал обучен оказанию первой медицинской помощи, аптечка в рефотделении	4
		Медицинское обслуживание отсутствует	5
177	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; травмы людей аммиаком (отравления, ожоги); с временной потерей трудоспособности.* Обученность экипажа действиям по тревоге: **$Б_{4132}$**	Большинство обслуживающего персонала холодильной установки и экипажа имеют навыки действий в экстремальных ситуациях разгерметизации аммиачной системы	1
		Проведение тренировок персонала холодильной установки действиям по тревоге на берегу и во время рейса	2

		Проведение тренировок персонала холодильной установки действиям по тревоге на берегу до рейса	3
		Только теоретическое обучение	4
		Обслуживающий персонал холодильной установки и экипаж не обучен действиям по тревогам химической опасности	5
178	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; травмы людей аммиаком (отравления, ожоги); с временной потерей трудоспособности.* Дисциплинированность, бдительность обслуживающего персонала: **$Б_{4133}$**	Высокий уровень исполнения правил безопасной эксплуатации; отсутствуют нарушения правил	1
		Систематическое обучение правилам безопасной эксплуатации, инструктажи, постоянный контроль исполнения	2
		Недостаточный контроль за соблюдением правил безопасности и требовательность их исполнения	3
		Имеют место нарушения правил безопасной эксплуатации, трудовой и технологической дисциплины	4
		Низкий уровень исполнительной дисциплины. Отсутствует контроль за соблюдением правил безопасной эксплуатации	5
179	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; порча груза аммиаком или рассолом*. Обученность экипажа действиям по тревоге: **$Б_{421}$**	Большинство членов обслуживающего персонала холодильной установки и экипажа имеют навыки действий в экстремальных ситуациях разгерметизации аммиачной системы	1
		Проведение тренировок обслуживающего персонала холодильной установки и экипажа действиям по тревоге на берегу и в рейсе	2
		Проведение тренировок обслуживающего персонала холодильной установки действиям по тревоге на берегу до рейса	3
		Только теоретическое обучение	4
		Обслуживающий персонал холодильной установки и экипаж не обучен действиям по тревогам химической опасности	5

180	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; порча груза аммиаком или рассолом.* Сигнализация предельной концентрации аммиака в воздухе трюмов: **Б$_{422}$**	Отсутствие аммиакосодержащего оборудования в трюмах; сигнализация о функционировании рассольной системы с выводом на пост холодильной установки	1
		Сигнализация с автоматическим включением аварийной вентиляции трюмов	2
		Сигнализация на местном посту в рефотделении и ходовом мостике	3
		Сигнализация с выводом на пост в рефотделении	4
		Отсутствие сигнализации о концентрации аммиака	5
181	Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; порча груза аммиаком или рассолом. Количество и емкость трюмов: **Б$_{423}$**	Отсутствие аммиакосодержащего оборудования в трюмах; рассольная система охлаждения трюмов	1
		4 и более трюмов	2
		3 трюма	3
		2 трюма	4
		1 трюм	5
182	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; порча груза аммиаком или рассолом.* Аммиакоемкость оборудования в трюмах: **Б$_{424}$**	Отсутствие аммиакосодержащего оборудования в трюмах	1
		Менее 0,5 т	2
		От 0,5 до 1 т	3
		От 1 до 3 т	4
		Более 3-х т	5
183	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; порча груза аммиаком или рассолом.* Емкость рассольной системы: **Б$_{425}$**	Отсутствие рассольного охлаждения трюмов	1
		Менее 1 т	2
		От 1 до 3 т	3
		От 3 до 5 т	4
		Более 5 т	5

184	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; ущерб окружающей среде, экипажу, грузу*. Аммиакоемкость холодильной установки: **Б**$_{425}$	Менее 1 т	1
		От 1 до 4 т	2
		От 4 до 8 т	3
		От 8 до 10 т	4
		Более 10 т	5
185	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; ущерб окружающей среде, экипажу, грузу*. Район плавания (местонахождения): **Б**$_{432}$	В нейтральных водах	1
		Во внутренних водах России	2
		В районах зарубежных стран	3
		На рейде	4
		Нахождение судна в порту, у причала	5
186	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; ущерб окружающей среде, экипажу, грузу (3-м лицам).* Емкость рассольной системы: **Б**$_{433}$	Отсутствует рассольная система охлаждения	1
		Менее 2-х т	2
		От 2 до 5 т	3
		От 5 до 10 т	4
		Свыше 10 т	5
187	*Возможные последствия разгерметизации аммиачной (рассольной) системы; ущерб окружающей среде, экипажу, грузу (3-м лицам).* Средства защиты, возможность локализации распространения аммиака по судну: **Б**$_{434}$	Максимально возможное обеспечение средствами индивидуальной защиты; автоматически действующие системы локализации очага разгерметизации, в т. ч. водяные завесы с дренажом	1
		Максимально возможное обеспечение средствами индивидуальной защиты; возможность организации водяных завес с дренажем, перекрытие воздуховодов	2
		Обеспеченность всех членов экипажа индивидуальными противогазами; отсутствует возможность локализации очага разгерметизации	3
		Минимально необходимая обеспеченность экипажа средствами индивидуальной защиты	4
		Дефицит средств индивидуальной защиты экипажа; отсутствует возможность локализации	5

188	Срок эксплуатации судна с момента постройки, оценивающий моральный и механический износ аммиачного холодильного оборудования: **$А_0$**	До 10 лет	1
		От 10 до 20 лет	2
		От 20 до 30 лет	3
		От 30 до 40 лет	4
		Свыше 40 лет	5
189	Валовая вместимость судна: **$Б_0$**	Свыше 5000	1
		От 2000 до 5000	2
		От 1000 до 2000	3
		От 500 до1000	4
		Менее 500	5

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

АКТ ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЯ СУДНА

РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА
RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

6.3.10

АКТ № 03.02481.009
ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЯ СУДНА

REPORT
ON SURVEY OF THE SHIP

Название судна / Name of ship: OYANG
Регистровый номер / Registered number: IMO 7376410
Класс / Class: KR
Тип судна / Type of ship: рыболовное
Флаг / Flag: Российская Федерация
Валовая вместимость / Gross tonnage: 5074
Порт приписки / Port of registry: Магадан
Дата спуска на воду/~~последнего докования~~* / Date of launching/last dry docking*: 1974
Год и место постройки / Year and place of build: Япония
Место освидетельствования / Place of survey: Пусан

Мною, инженером-инспектором Российского Морского Регистра Судоходства Шурпяком В.К. (ф., и., о.)
I, Surveyor to Russian Maritime Register of Shipping

on 11.04 -15.04.03 (дата / date) произведено освидетельствование
have carried out the survey

судовой холодильной установки,
работающей на холодильном агенте R717 (АХУ) расположенной в общем машинном отделении с целью проведения формальной оценки безопасности (ФОБ) для определения возможности переклассификации судна в класс Регистра.

Холодильная установка т/х OYANG включает в себя следующее оборудование :

1.Компрессоры поршневые двухступенчатые
N-12.4B 130Kw x 1200 R/M - 2 шт.
N-62B 65Kw x 1200 R/M - 1 шт.
N-128 6BKw x 1200 R/M - 1 шт.
2. Конденсаторы аммиака Ø 978 x 4000
3. Маслоотделители Ø 457 x 1350 - 2 шт
Ø508 x 900 - 1 шт.
4. Коллекторы жидкого аммиака Ø1232 x 5000 - 2 шт
5. Ресиверы низкого давления Ø1338 x 3200 - 2 шт
6. Отделители жидкости Ø824 x 1650 - 1 шт
Ø762 x 1650 - 1 шт
Ø457 x 1350 - 1 шт.
7. Маслосборник Ø406 x 760 - 1 шт.
9. Насосы аммиачные 3 шт.
10. Плиточные морозильные аппараты 12 шт.
11. Змеевиковые охладители в трюмах

Управление холодильной установкой осуществляется из ЦПУ, отделённого от рефотделения и машинного отделения герметичной переборкой.

Для защиты от гидроудара ресиверы низкого давления снабжён тремя датчиками-сигнализаторами уровня жидкости. Кроме этого для предотвращения попадания жидкости в компрессоры предусмотрены 3 отделителя жидкости, расположенные в отдельном помещении на верхней палубе, откуда (при попадании туда) жидкий аммиак самотёком стекает в ресивер низкого давления, при этом сработает датчик сигнализации по переливу.

*Ненужное зачеркнуть.
Delete as appropriate.

При проведении освидетельствования, заполнении чек-листа по ФОБ и проведении расчётов исходили из того, что требования, указанные ранее ГУР должны быть выполнены к моменту получения документов РС :
1. наличие двух выходов из МО, оборудованных системой водяных завес, отвечающих требованиям 3.1.3, 3.1.4, 3.1.5 части XII Правил ;
2. место установки холодильных машин должно обслуживаться вытяжной вентиляцией не связанной с вентиляцией, других помещений и аварийной вентиляцией , отвечающей требованиям 3.1.7 части XII Правил ;
3. район холодильных машин должен обслуживаться детекторами наличия аммиака с подачей аварийного сигнала как внутри, так и снаружи МКО ;
4. в машинном отделении должно быть предусмотрено не менее двух дыхательных аппаратов.
5. должен быть предусмотрен аварийный подводный сброс аммиака.

Дополнительно по результатам освидетельствования должны быть выполнены следующие требования :
1. Учитывая возраст судна и сосудов давления аммиака, представить в ГУР чертежи аммиачных сосудов под давлением (поз. 2-8 перечня оборудования настоящего акта) для проведения оценки остаточного ресурса на основе расчётов на усталость.
2. Произвести замеры толщин стенок ресиверов высокого давления , определение остаточной прочности и остаточного ресурса на основе расчётов на усталость
3. На всех сосудах давления предохранительные клапаны отсекаются запорной арматурой, что противоречит требованиям п.5.1.2 части XII Правил РС. Необходимо предусмотреть специальные меры против несанкционированного закрытия указанных клапанов, например дооборудование их специальными замками.
4. Все механизмы должны быть снабжены инструкциями по эксплуатации на рабочем языке экипажа. Все кнопки пульта управления должны иметь перевод обозначений на рабочий язык экипажа.

Для проведения ФОБ совместно с командой судна был заполнен чек-лист, который прилагается к настоящему акту.

По результатам заполнения чек-листа должны быть выполнены следующие требования :
1.До выхода в рейс будут проведены учения по пожарной тревоге и по тревоге утечки аммиака со всем персоналом занятым в помещениях, содержащих аммиачное оборудование.
2.Необходимо предъявить рабочие дипломы персонала , занятого в эксплуатации холодильной установки.

В результате расчёта по программе ФОБ АХУ, разработанной по заказу ГУР для оценки безопасности аммиачных холодильных установок получены следующие результаты :
1. Показатель степени опасности холодильной установки A=0,58
2. Показатель последствия аварии холодильной установки B=0,23
3. Риск эксплуатации установки A+ B=0,81 < 1, следовательно является допустимым.

Выводы : по результатам проведения ФОБ допускается эксплуатация судовой холодильной установки, работающей на холодильном агенте R717 в общем машинном отделении при условии выполнения требований настоящего акта .

23.04.03

ПРОВЕРЕНО

РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА
RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

М.П. 000-26

Инженер-инспектор
Surveyor

(подпись)
(signature)

06/99

РС 6.3.10

Акт получил судовладелец ген. директор ЗАО „Тралком" М.Шведов

Унифицированные требования МАКО S27 содержат положения, применимые к воздушным трубам и вентиляторным головок, расположенных на открытых палубах в носовой части судна и подверженных воздействию волновых нагрузок. Необходимость подкрепления таких труб должна быть установлена на основе проверочного расчета. УТ S27 регламентирует допускаемые напряжения и внешние усилия, которые должны быть учтены в расчетах. Конкретных рекомендаций по алгоритму и методике расчета УТ S27 не дает, оставляя это на усмотрение классификационных обществ.

Настоящая методика дает рекомендации для расчета воздушных и вентиляционных труб согласно УТ S27, пригодна для труб с круглым и прямоугольным сечением как прямых, так и изогнутых по высоте.

Предлагаемая методика расчета разработана главным специалистом отдела механического оборудования и систем ГУ Регистра В. К. Шурпяком на основе общеизвестных зависимостей сопротивления материалов с учетом имеющегося практического опыта одобрения расчетов согласно УТ S27. Автор выражает признательность сотрудникам Морского инженерного бюро (Одесса) за ценные замечания по проекту методики, учтенные в окончательной редакции.

Проект методики обсуждался на заседании секции НТС Регистра и был рекомендован для применения на практике для инспекторского состава и работников проектных организаций.

Вспомогательная информация
необязательного характера

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ НА ПРОЧНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ТРУБ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВОЛНОВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ОТКРЫТЫХ ЧАСТЯХ ПАЛУБ В СООТВЕТСТВИИ С УТ МАКО S27

Настоящая методика проверочного расчета прочности труб, расположенных на открытых частях палубы разработана как один из вариантов расчета, требуемого УТ МАКО S27, и является рекомендательной. Разработчик в своих расчетах, представляемых Регистру на одобрение вправе отступать от предлагаемой методики, однако эти отступления не должны приводить к отклонениям в опасную сторону в конечном результате расчета, по сравнению с получаемыми по данной методике.

В настоящем расчете не учитываются нагрузки от веса трубы и вентиляционной головки, действие динамических нагрузок от качки судна, утонение стенки трубы в местах ее изгибов.

1. При проведении расчетов опасным сечение трубы следует считать:

сечение трубы или палубного стакана в месте приварки к палубе;

сечение трубы в районе ее соединения с палубным стаканом;

сечение в верхней точке приварки подкрепляющих книц.

Кроме этого следует провести расчет сварных швов.

2. Расчетная схема трубы и необходимые для расчета размеры показаны на рис. 1.

Сила воздействия на воздушную головку Q, КН, определяют как произведение наибольшей площади профиля воздушной головки на волновое давление P, определенное согласно УТ МАКО S27.

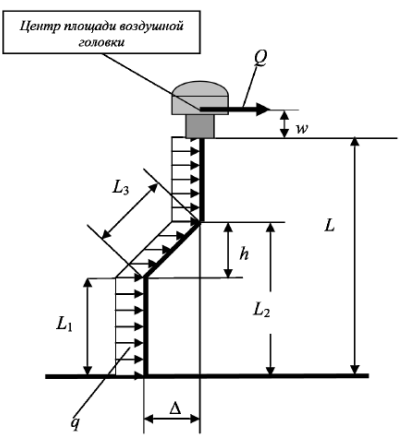


Рис. 1

$$Q = PS, \quad (2\text{-}1)$$

где P – волновое давление, КН/м^2 ;
S – площадь профиля головки (выбирается наибольшая), м^2.

Распределенное погонное усилие воздействия на трубу q, КН/м, определяют как произведение диаметра на волновое давление Р, определенное согласно УТ МАКО S27:

$$q = PD, \quad (2\text{-}2)$$

где P – волновое давление, КН/м^2 ;
D – диаметр трубы или ее наибольшая ширина (если труба не круглая), м.

Волновое давление P определяется согласно п. 4.1 УТ МАКО S27 или выбирается из табл. 1.

Таблица 1

Величина расчетного волнового давления P (КН/м^2)

Объект	Защищенные полубаком, фальшбортом или волноотбойником*	Без защиты
Круглые трубы	105	149
Круглые вентиляционные головки	167	239
Не круглые трубы и вентиляционные головки	271	388

* Защищенными считаются трубы и вентиляционные головки, расположенные непосредственно за полубаком, фальшбортом или волноотбойником на расстоянии не более половины высоты полубака, фальшборта или волноотбойника

3. При расчете труб подверженных прямому воздействию давления волн необходимо учитывать:

изгибающий момент;

крутящий момент;

перерезывающую силу.

3.1 Изгибающий момент $М_{изг,}$ КН/м, находится как сумма:

$$M_{изг} = M_1 + M_2 + M_3, \quad (3.1\text{-}1)$$

где $М_1$ – изгибающий момент от воздействия на вентиляционную головку, КН/м:

$$M_1 = Q\,(L + w), \quad (3.1\text{-}2)$$

$М_2$ – изгибающий момент от воздействия на прямую трубу, КН/м:

$$M_2 = q\,\frac{L^2}{2}, \quad (3.1\text{-}3)$$

$М_3$ – дополнительный изгибающий момент от воздействия на наклонный участок трубы (если наклонные участки отсутствуют $М_3$=0), КН/м:

$$M_3 = q\ (L_3 - h)\ (L_1 + \frac{h}{2}),\qquad (3.1\text{-}4)$$

L, L_1,W, L_3, h, (м) − см. рис. 1.

Напряжения от изгиба σ, МПа, определяются по формуле:

$$\sigma = \frac{M_{изг}}{W_{изг}} 10^6,\qquad (3.1\text{-}5)$$

где $W_{изг}$ – момент сопротивления сечения трубы, мм^3.

Для круглых труб:

$$W_{изг} = \frac{\pi(D-t)^2 t}{4},\qquad (3.1\text{-}6)$$

где D – диаметр трубы, мм;
t – толщина стенки с учетом прибавки на коррозию (2 мм), мм.

Для прямоугольных труб $W_{изг}$ выбирается как меньшее из W_y и W_x:

$$W_Y = \frac{BH^3 - bh^3}{6H} \text{ или } W_X = \frac{B^3H - b^3h}{6B},\qquad (3.1\text{-}7)$$

где B, b, H, h – см. рис. 2 с учетом прибавки на коррозию (2 мм).

3.2 Крутящий момент $M_{кр}$.

Крутящий момент $M_{кр}$, КН/м, вычисляется следующим образом:

$$M_{кр} = Q\Delta + q\ (L - L_2)\ \Delta + q\ L_3 \frac{\Delta}{2}.\qquad (3.2\text{-}1)$$

Для прямых труб $M_{кр} = 0$.

Касательные напряжения кручения $\tau_{кр}$ определяются как:

$$\tau_{кр} = \frac{M_{кр}}{W_{кр}} 10^6,\qquad (3.2\text{-}2)$$

где $W_{кр}$ − полярный момент сопротивления сечения трубы, мм^3.

Для круглых труб $W_{кр} = \frac{\pi(D-t)^2 t}{2}$, (3.2-3)

где D и t − наружный диаметр и толщина стенки трубы с учетом прибавки на коррозию (2 мм), мм.

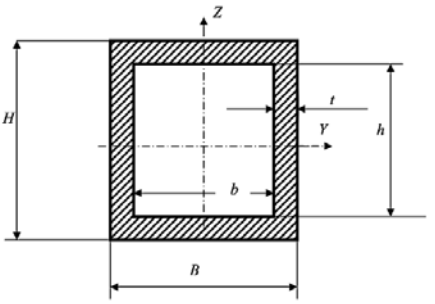


Рис. 2

Для прямоугольных труб $W_{кр} = 2\,(B - t)\,(H - t)\,t$, (3.2-4)

где B, b, H, h, t (мм) – см. рис. 2 с учетом прибавки на коррозию (2 мм).

Если толщины стенок t разные, то в расчете принимают наименьшую.

3.3 Перерезывающая сила N.

Перерезывающая сила N, КН, вычисляется следующим образом:

$$N = Q + qL + q\,(L_3 - h), \qquad (3.3\text{-}1)$$

где L, L_3, h, (м) − см. рис. 1.

Касательные напряжения среза $\tau_{ср,}$ МПа, определяются как:

$$\tau_{ср} = \frac{N}{F}\,10^3, \qquad (3.3\text{-}2)$$

где F − площадь сечения трубы с учетом прибавки на коррозию (2 мм), мм^2.

3.4 Условие прочности σ_i.

Условие прочности σ_i, МПа, определяется следующим образом:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \le 0{,}8\,\sigma_T, \qquad (3.4\text{-}1)$$

где σ − определяется согласно (3.1.5);
$\tau = \tau_{кр} + \tau_{ср,}$ $\tau_{кр}$ и $\tau_{ср}$ − см. (3.2.2 и 3.3.2);
$\sigma_т$ – предел текучести материала трубы, МПа.

Если марка стали, из которой изготовлена труба, неизвестна допускается принять $\sigma_т$= 200 МПа.

Если условие прочности не выполняется, то следует подкрепить трубу кницами.

Выбранная высота привариваемых книц должна проверяться расчетом, считая опасным сечением сечение трубы в верхней точке приварки книц.

Длина привариваемых книц должна проверяться расчетом по формулам (3.1-5) – (3.4-1), рассчитывая момент сопротивления $W_{изг}$ с учетом книц.

В случае, если используются 4 кницы, проверку расчетом длины книц можно не производить, если выполняется следующее условие:

$$\frac{\sigma_i}{K} \le 0{,}8\ \sigma_т, \qquad (3.4\text{-}2)$$

где σ_i – определяется согласно (3.4-1);

K – параметр определяемый по табл. 2 в зависимости от соотношений толщины кницы $t_{кн}$ к толщине стенки трубы t и длины кницы L в плоскости расчетного сечения (по горизонтали) к наружному диаметру трубы D;

$\sigma_т$ – предел текучести материала трубы, МПа.

Таблица 2

Значение параметра *K* в зависимости от соотношения *L/D* и $t_{кн}/t$

$t_{кн}/t$ \ *L/D*	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1,0**	**1,1**	**1,2**	**1,3**	**1,4**	**1,5**	**1,6**	**1,7**	**1,8**	**1,9**	**2,0**
0,7	1,11	1,21	1,33	1,47	1,62	1,79	1,97	2,16	2,37	2,59	2,82	3,07	3,33	3,60	3,88
0,8	1,2	1,32	1,47	1,63	1,80	2,0	2,21	2,43	2,67	2,92	3,19	3,48	3,77	4,08	4,41
0,9	1,29	1,44	1,60	1,79	1,99	2,21	2,45	2,7	2,97	3,26	3,56	3,88	4,22	4,57	4,92
1	1,39	1,55	1,74	1,95	2,17	2,42	2,68	2,97	3,27	3,59	3,93	4,29	4,66	5,05	5,46

4. Расчет сварных швов следует производить на нагрузки, определяемые в п. 3 по формулам (3.1-1), (3.2-1) и (3.3-1). При расчете напряжений в сварных швах моменты сопротивления W и площадь поперечного сечения F определяются по формулам (3.1-6), (3.1-7), (3.2-3), (3.2-4), принимая толщину стенки t равной величине катета шва, умноженному на 0,7 минус прибавка на коррозию 2 мм.

В случае, если узел приварки трубы к палубе выполнен так, что труба является пропущенной сквозь палубу (см. рис. 3) расчеты сварных швов допускается не производить.

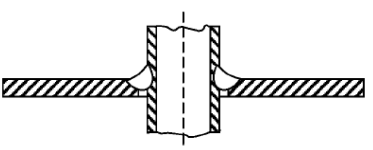


Рис. 3

5. Расчет болтов (шпилек) фланцевых соединений следует производить на нагрузки, определяемые в п. 3 по формулам (3.1-1), (3.2-1) и (3.3-1), используя национальные или международные стандарты по расчетам фланцевых соединений.

Настоящий Альбом составлен главным специалистом отдела механического оборудования и систем ГУ Регистра В. К. Шурпяком на основе расчетов по программе, разработанной в рамках НИР №РС-46/2001 «Разработка программы для расчета прочности цилиндрических, конических, сферических элементов и днищ котлов и сосудов под давлением методом конечных элементов при помощи программы ИСПА». В Альбоме представлены результаты расчета методом конечных элементов напряжений, возникающих под действием внутреннего давления в типовых узлах котлов и сосудов под давлением. Термические напряжения не учитывались в расчетах, поэтому в деталях котлов, подверженных прямому воздействию лучистого тепла возможны дополнительные зоны концентрации напряжений.

Картина распределения напряжений показывает зоны максимальной концентрации напряжений, в которых различные виды износов проходят наиболее интенсивно. Альбом может служить в качестве рекомендации для определения зон наиболее вероятного появления дефектов при проведении освидетельствования котлов и может быть использован как инспекторами Регистра, так и судовыми механиками и специалистами ремонтных предприятий.

Вспомогательная информация
необязательного характера

АЛЬБОМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТИПОВЫХ УЗЛОВ СУДОВЫХ КОТЛОВ И СОСУДОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

В результате анализа данных опыта технического наблюдения возникновение усталостного повреждения определяется, в основном, локальными ситуациями в отдельных элементах конструкций, связанных с высокими местными напряжениями. Источниками высоких напряжений могут служить неудачно выполненные конструктивные узлы, неоднородные температурные поля, технологические дефекты металла, а также различные сочетания указанных факторов.

Для своевременного определения усталостных повреждений в процессе эксплуатации котлов и сосудов под давлением при проведении наружных и внутренних осмотров разработан Альбом напряженно-деформированного состояния типовых узлов судовых котлов и сосудов под давлением[1], в котором показаны зоны наибольшей концентрации напряжений, требующие наибольшего внимания. При разработке Альбома произведен расчет методом конечных элементов типовых узлов, конструкция которых регламентируется Правилами классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства[2]. Расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций и постпроцессорная обработка результатов расчета выполняются при помощи универсального конечноэлементного вычислительного комплекса «ИСПА».

Полученные в результате расчета картины распределения напряжений были сведены в табл. 1.

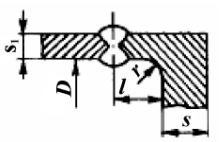
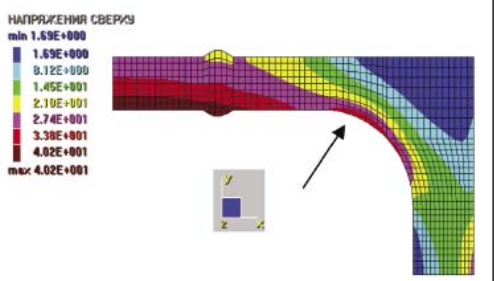
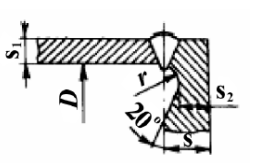
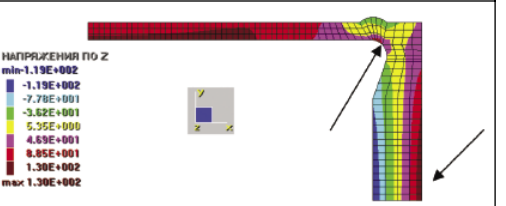
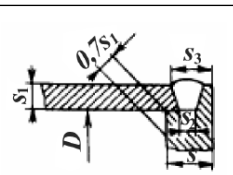
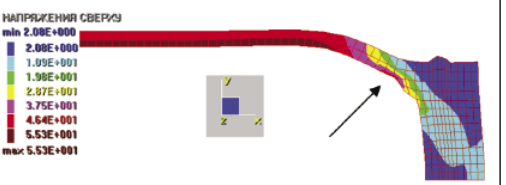
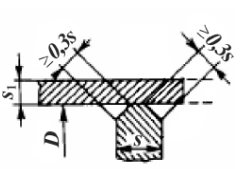
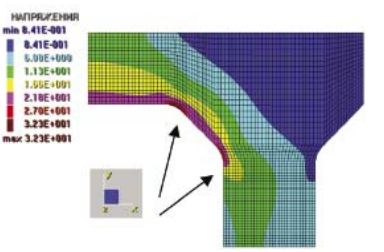
Данные, приводимые в табл. 1, могут служить рекомендацией для определения мест наиболее вероятного появления усталостных и коррозионных дефектов. В расчетах учитываются только напряжения от внутреннего давления, термические напряжения не учитываются.

[1] В дальнейшем – Альбом.

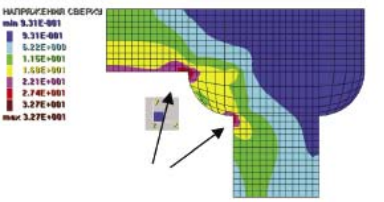
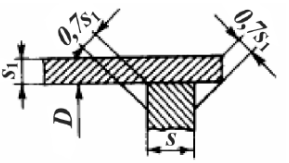
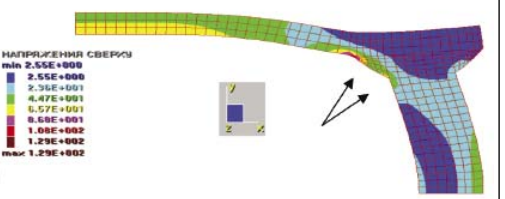
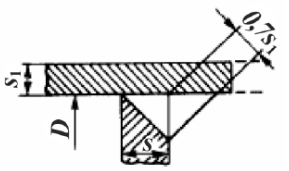
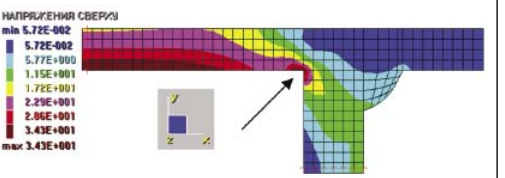
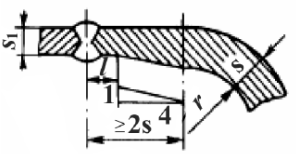
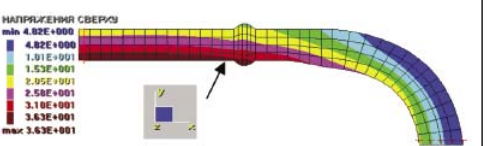
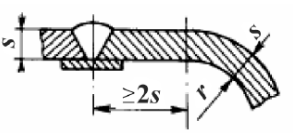
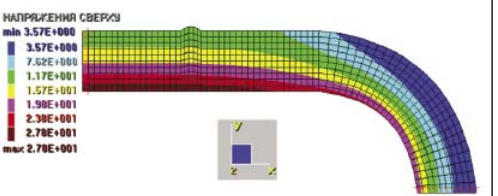
[2] В дальнейшем – Правила РС.

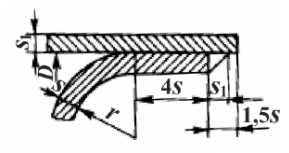
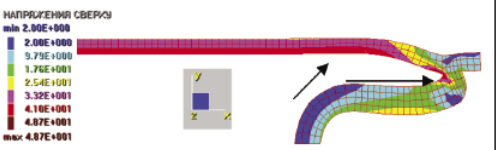
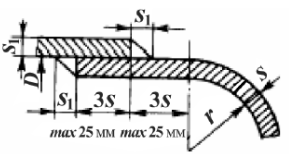
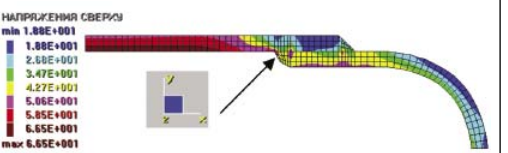
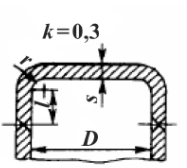
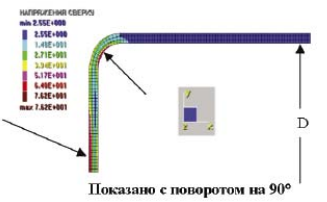
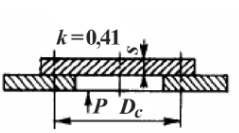
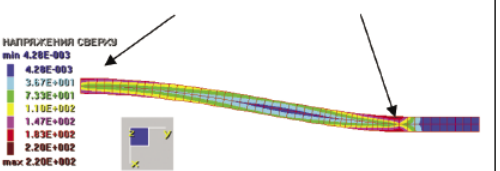
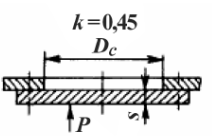
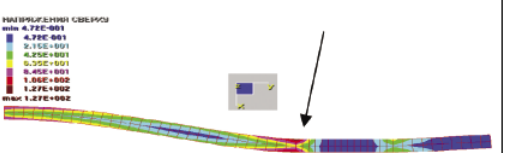
Таблица 1

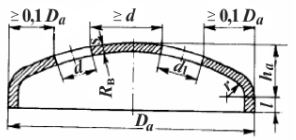
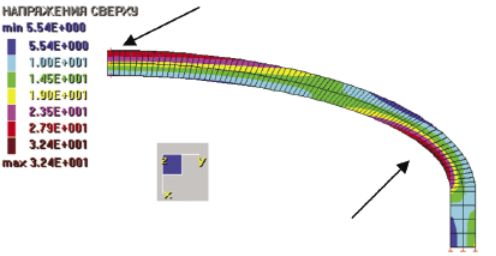
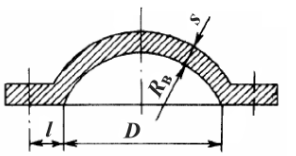
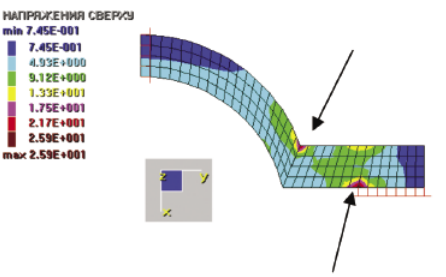
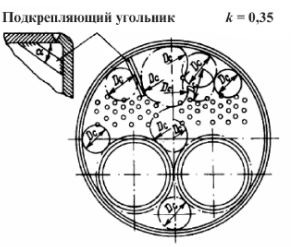
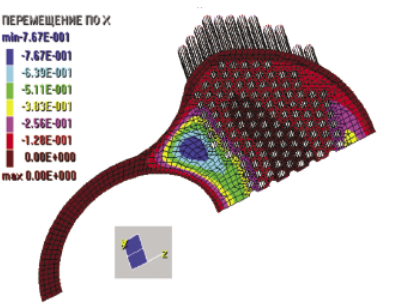
Напряженно-деформированное состояние типовых конструкций в котлах и сосудах под давлением, выполненных согласно части X «Котлы, теплообменные аппараты и сосуды под давлением» Правил РС[1]

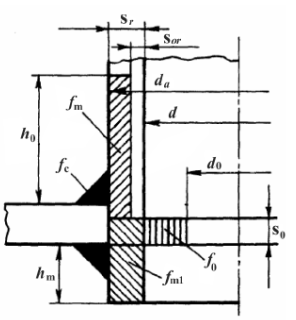
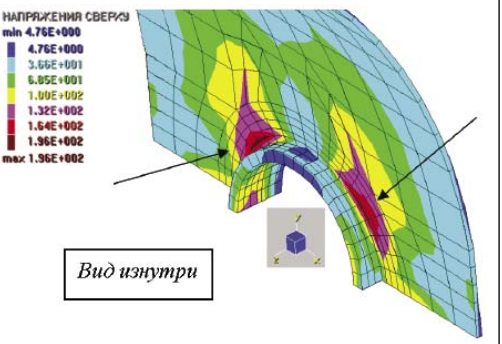
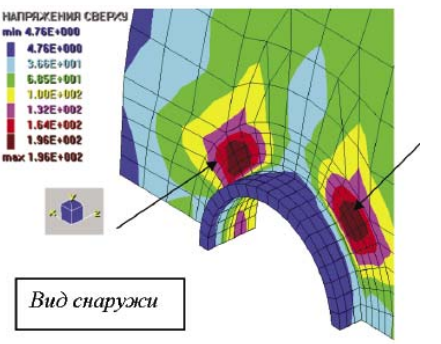
Приложение 1 к части X Правил РС Плоские днища и крышки		Картина напряжений, полученная расчетом методом конечных элементов (стрелками показаны зоны наибольшей концентрации)
1		
2		
3		
4		

[1] Далее – часть X Правил РС.

		
5		
6		
Приложение 2 к части X Правил РС Выпуклые днища		Картина напряжений, полученная расчетом методом конечных элементов (стрелками показаны зоны наибольшей концентрации)
7		
8		

9		
10		
п. 2.4.1 части X Правил РС Плоские днища и крышки		Картина напряжений, полученная расчетом методом конечных элементов (стрелками показаны зоны наибольшей концентрации)
11		
12		
13		

	п. 2.6 части X Правил РС Выпуклые днища	Картина напряжений, полученная расчетом методом конечных элементов (стрелками показаны зоны наибольшей концентрации)
14		
	п. 2.7 части X Правил РС Тарельчатые днища	Картина напряжений, полученная расчетом методом конечных элементов (стрелками показаны зоны наибольшей концентрации)
15		
	п. 2.4.2 части X Правил РС Плоская стенка, подкрепленная связями	Картина напряжений, полученная расчетом методом конечных элементов (стрелками показаны зоны наибольшей деформации)
16		

	п. 2.9.1 части X Правил РС Подкрепление выреза в цилиндрической стенке	Картина напряжений, полученная расчетом методом конечных элементов (стрелками показаны зоны наибольшей концентрации)
17		 

Проверка правильности полученных картин распределения напряжений проводилась путем сравнения с данными тензометрирования, опубликованными в справочнике Петерсона Р. «Коэффициенты концентрации напряжений», 1977, и показала для элементов котлов и сосудов под давлением достаточно хорошее совпадение результатов расчета с данными тензометрирования (рис. 1).

Кроме того проводилось сравнение полученных данных с данными по авариям судовых котлов.

Проиллюстрировать возможность применения разработанного альбома можно на примере аварии с котлом фирмы AALBORG AQ7, которая имела место 7.12.1997 на борту судна Island Princess (класс LR).

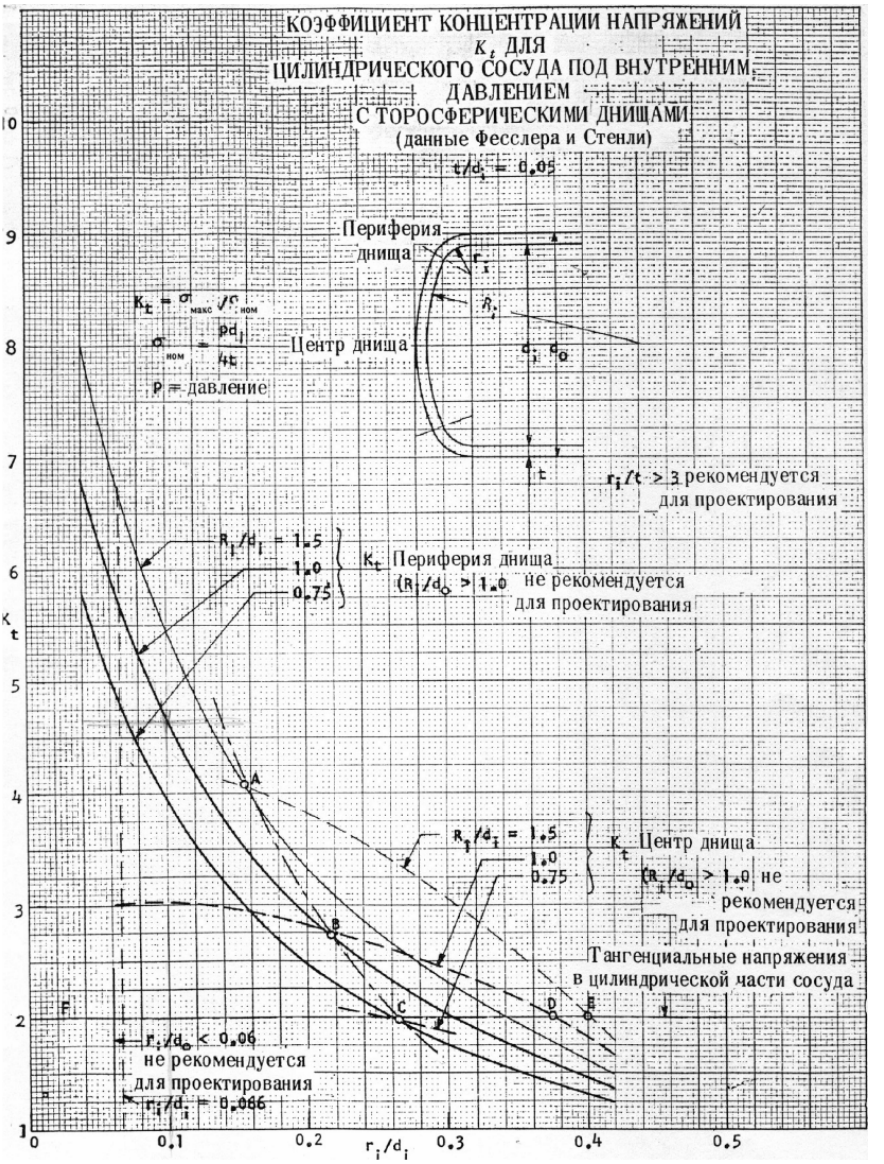


Рис. 1 Коэффициенты концентрации напряжений
на основе данных тензометрирования торосферических днищ

Взрыв утилизационного котла произошел в результате нарушения правил эксплуатации и отказа предохранительных клапанов. В результате взры-

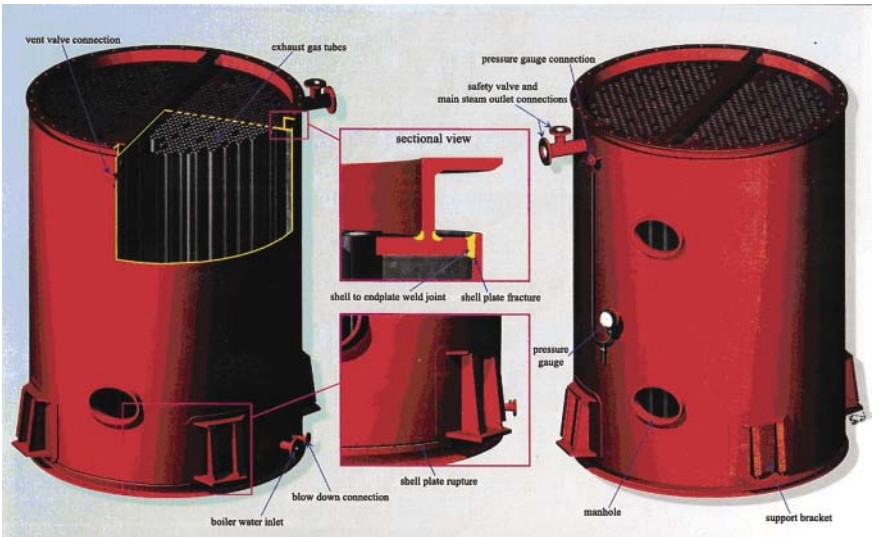


Рис. 2 Расположение трещин и разрывов утилизационного котла AQ7
на т/х Island Princess после взрыва

ва погибло 2 человека. После взрыва производилось тщательное обследование поврежденного котла и котлов на однотипных судах. В результате на всех котлах в районе приварки трубных досок к корпусу были обнаружены уста-

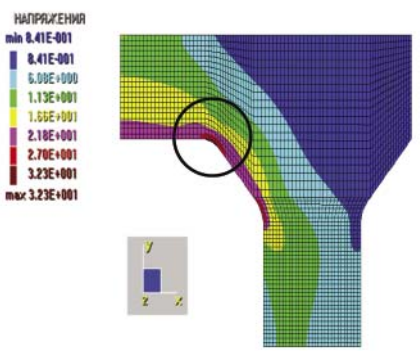


Рис. 3 Картина
напряженно-деформированного состояния
узла приварки трубной доски к корпусу

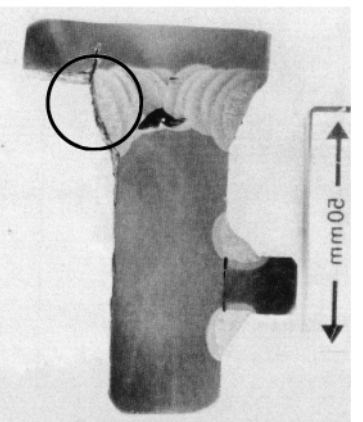


Рис. 4 Усталостная трещина
в узле приварки трубной доски
к корпусу котла AALBORG AQ7

лостные трещины глубиной до половины толщины корпуса котла (6,3 мм). Сопоставление картины напряжений, полученных методом конечных элементов (из альбома типовых узлов) (рис. 3) и геометрии трещин (рис. 4) показало, что место зарождения трещин совпадает с точкой максимальной концентрации напряжений.

Применение разработанного альбома при проведении дефектации позволит более результативно проводить дефектоскопию судовых котлов и сосудов под давлением, увеличить вероятность выявления дефектов в их наиболее нагруженных элементах при проведении внутренних и наружных освидетельствований.

Российский морской регистр судоходства
СБОРНИК НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
Книга четырнадцатая

Редакционная коллегия Российского морского регистра судоходства
Ответственный за выпуск *Е. Б. Мюллер*
Главный редактор *М. Ф. Ковзова*
Редактор *И. В. Сабинина*
Компьютерная верстка *Д. Г. Иванова*

Лицензия ИД 04771 от 18.05.01.
Подписано в печать 09.09.04. Формат 60x84/16. Гарнитура Таймс.
Печать офс. Усл. печ. л. 10. Уч.-изд. л. 9,2. Тираж 180. Заказ 2223.

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