

ПРИЛОЖЕНИЯ

К ПРАВИЛАМ КЛАССИФИКАЦИИ И ПОСТРОЙКИ СУДОВ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ НАЛИВОМ

НД № 2-020101-176



Санкт-Петербург

ПРИЛОЖЕНИЯ К ПРАВИЛАМ КЛАССИФИКАЦИИ И ПОСТРОЙКИ СУДОВ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ НАЛИВОМ

Настоящая версия Приложений к Правилам классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом Российского морского регистра судоходства (РС, Регистр), утверждена в соответствии с действующим положением и вступают в силу 1 июля 2024 года.

Настоящая версия составлена на основании версии от 1 января 2023 года и Бюллетеня изменений № 24-87473 с учетом изменений и дополнений, подготовленных непосредственно к моменту опубликования (см. Перечень изменений).

ПЕРЕЧЕНЬ ИЗМЕНЕНИЙ¹

(изменения сугубо редакционного характера в Перечень не включаются)

Для данной версии нет изменений для включения в Перечень.

¹ За исключением изменений и дополнений, вводимых Бюллетенями, а также опечаток.

ТАБЛИЦА ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

Пояснения к таблице технических требований

1. Наименования веществ (графа 1) приведены в алфавитном порядке латинских наименований.
2. Химическая формула (графа 2) приведена только для сведения.
3. Плотность (графа 3) приведена только для сведения и должна уточняться по данным грузоотправителя.
4. Тип газовева LG (графа 4) соответствует определению, приведенному в части I «Классификация» Правил классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом¹.
5. Определение вкладной емкости типа C (графа 5) приведено в разд. 23 части IV «Хранение груза».
6. Требования к регулированию атмосферы парового пространства внутри грузовых емкостей (графа 6) приведены в части V «Противопожарная защита»:
Инерт. — инертный газ;
Сушка — осушенный воздух.
7. Система обнаружения паров (графа 7):
В — обнаружение воспламеняющихся паров;
Т — обнаружение токсичных паров;
О — обнаружение кислорода (кислородомер);
В +Т — обнаружение воспламеняющихся и токсичных паров.
8. Тип контрольно-измерительных устройств (графа 8):
П — устройства полузакрытого типа;
З — устройства закрытого типа;
К — устройства косвенного замера (см. 2.2 части VIII «Контрольно-измерительные устройства и системы автоматизации»).
9. Номера по таблице РПМП («Руководство по оказанию первой медицинской помощи» (MFAG) Международной морской организации (ИМО)) (графа 9) приведены для сведения о порядке неотложных действий при несчастных случаях, связанных с веществами, на которые распространяются требования Правил LG.
Если любое из указанных веществ перевозится при отрицательной температуре, которая может вызвать обморожение, следует также применять № 620 по таблице РПМП.
10. Специальные требования (графа 10) — если не указано иное, приведены главы и разделы части X «Специальные требования».
11. * — на вещества, помеченные звездочкой, распространяются также требования Правил классификации и постройки химовозов.

¹ В дальнейшем — Правила LG.

*Приложения к Правилам классификации и постройки
судов для перевозки сжиженных газов наливом (приложение 1)*

5

Наименование вещества	Химическая формула	Плотность, кг/м ³ , при температуре, указанной в скобках	Тип газовоза LG	Требуется вкладная емкость типа С	Система регулирования парового пространства внутри грузовых емкостей	Система обнаружения паров груза	Тип контрольно-измерительных устройств	Номер по таблице РГМП	Специальные требования
Альдегид уксусный Acetaldehyde	CH ₃ CHO	780 (20,8°C)	2G/2PG	–	Инерт.	В+Т	З	300	2.1, 4.7.1 части V, 5.1, разд. 8
Аммиак безводный Ammonia Anhydrous	NH ₃	771 (–33,4°C)	2G/2PG	–	–	Т	З	725	Разд. 2, разд. 3, разд. 19
Бутадиен Butadiene	CH ₂ CHCHCH ₂	646 (0°C)	2G/2PG	–	–	В+Т	П	310	Разд. 2, 3.2, 5.2, разд. 8, разд. 10
Бутан Butane	C ₄ H ₁₀	600 (0°C)	2G/2PG	–	–	В	П	310	
Смеси бутана и пропана (СНГ) Butane/Propane mixture (LPG)			2G/2PG	–	–	В	П	310	
Бутилены Butylenes	CH ₃ CH ₂ CHCH ₂	670 (0°C)	2G/2PG	–	–	В	П	310	
Хлор Chlorine	Cl ₂	1560 (–34°C)	1G	Да	Сушка	Т	К	740	Разд. 2, 4.2, 5.1, разд. 7, разд. 9, разд. 15, разд. 22
Эфир диэтиловый простой* Diethyl Ether	(C ₂ H ₅) ₂ O	640 (34,6°C)	2G/2PG	–	Инерт.	В+Т	З	330	2.1, 3.6, 4.1, разд. 8, разд. 22, разд. 23, 29.2, 29.3
Диметиламин Dimethylamine	(CH ₃) ₂ NH	680 (0°C)	2G/2PG	–	–	В+Т	З	320	Разд. 2, разд. 3
Этан Ethane	CH ₃ CH ₃	550 (–88°C)	2G	–	–	В	П	310	
Этил хлористый Ethyle Chloride	CH ₃ CH ₂ Cl	921 (0°C)	2G/2PG	–	–	В+Т	П	340	
Этилен Ethylene	C ₂ H ₄	560 (–104°C)	2G	–	–	В	П	310	
Окись этилена Ethylene Oxide	CH ₂ CH ₂ O	882 (10°C)	1G	Да	Инерт.	В+Т	З	365	Разд. 2, 3.2, 4.2, 5.1, разд. 7, разд. 8, разд. 12

*Приложения к Правилам классификации и постройки
судов для перевозки сжиженных газов наливом (приложение 1)*

6

Наименование вещества	Химическая формула	Плотность, кг/м ³ , при температуре, указанной в скобках	Тип газовоза LG	Требуется вкладная емкость типа C	Система регулирования парового пространства внутри грузовых емкостей	Система обнаружения паров груза	Тип контрольно-измерительных устройств	Номер по таблице РГМП	Специальные требования
Смеси окиси этилена и окиси пропилена с содержанием окиси этилена не более 30 % по весу* Ethylene Oxide/Propylene Oxide mixture with Ethylene Oxide content of not more than 30% by weight			2G/2PG	–	Инерт.	В+Т	3	365	2.1, 4.1, 5.1, разд. 8, разд. 18, разд. 22, разд. 23
Изопрен* Isoprene	CH ₂ CHC(CH ₃)CH ₂	680 (34°C)	2G/2PG	–	–	В	П	310	2.1, разд. 10, разд. 22, 29.1
Изопропиламин* Isopropylamine	(CH ₃) ₂ CHNH ₂	710 (34°C)	2G/2PG	–	–	В+Т	3	320	2.1, 3.4, разд. 6, разд. 22, разд. 23, 29.1
Метан (СПГ) Methane (LNG)	CH ₄	420 (–164°C)	2G	–	–	В	3	620	
Смеси метилацетилена и пропадиена Methylacetylene/Propadiene mixture			2G/2PG	–	–	В	П	310	Разд. 13
Метил бромистый Methyl Bromide	CH ₃ Br	1730 (0°C)	1G	Да	–	В+Т	3	345	Разд. 2, 3.3, 4.2, 5.1, разд. 7
Метил хлористый Methyl Chloride	CH ₃ Cl	920	2G/2PG	–	–	В+Т	3	340	3.3
Моноэтиламин* (Этиламин) Monoethylamine (Ethylamine)	C ₂ H ₅ NH ₂	706 (0°C)	2G/2PG	–	–	В+Т	3	320	Разд. 2, разд. 3, 4.1, разд. 6, разд. 22, разд. 23, 29.1
Азот Nitrogen	N ₂	808 (–196°C)	3G	–	–	О	3	620	Разд. 14
Пентаны (все изомеры)* Pentanes (all isomers)	CH ₃ (CH ₂) ₃ CH ₃	626 (0°C)	2G/2PG	–	–	В	П	310	Разд. 22, разд. 29
Пентен (все изомеры)* Pentene (all isomers)			2G/2PG	–	–	В	П	310	Разд. 22, разд. 29
Пропан Propane	CH ₃ CH ₂ CH ₃	590 (–42,3°C)	2G/2PG	–	–	В	П	310	

*Приложения к Правилам классификации и постройки
судов для перевозки сжиженных газов наливом (приложение 1)*

7

Наименование вещества	Химическая формула	Плотность, кг/м ³ , при температуре, указанной в скобках	Тип газовоза LG	Требуется вкладная емкость типа С	Система регулирования парового пространства внутри грузовых емкостей	Система обнаружения паров груза	Тип контрольно-измерительных устройств	Номер по таблице РГМП	Специальные требования
Пропилен Propylene	CH ₃ CHCH ₂	860	2G/2PG	–	–	В	П	310	
Окись пропилена* Propylene Oxide	CH ₃ CHOCH ₂	830	2G/2PG	–	Инерт.	В+Т	З	365	2.1, 4.1, 5.1, разд. 8, разд. 18, разд. 22, разд. 23
Холодильные агенты (Охлаждающие газы) нетоксичные и невоспламеняющиеся: Refrigerant gases:			3G	–	–	–	П	350	
Дихлордифторметан Dichlorodifluoromethane	CCl ₂ F ₂	1490 (–30°C)							
Дихлормонофторметан Dichloromonofluoromethane	CHFCl ₂	1480 (8,9°C)							
Дихлортetraфторэтан Dichlorotetrafluoroethane	C ₂ F ₄ Cl ₂	1510 (3,8°C)							
Монохлордифторметан Monochlorodifluoromethane	CHClF ₂	1420 (–42°C)							
Монохлортetraфторэтан Monochlorotetrafluoroethane	C ₂ HF ₄ Cl								
Монохлортрифторметан Monochlorotrifluoromethane	CF ₃ Cl	1520 (–81,4°C)							
Двуокись серы Sulphur Dioxide	SO ₂	1460 (–10°C)	1G	Да	Сушка	Т	З	635	Разд. 2, 4.2, 5.1, разд. 7, разд. 9
Винил хлористый* Vinyl Chloride	CH ₂ CHCl	970 (–13,9°C)	2G/2PG	–	–	В+Т	З	340	2.1, 3.2, 3.3, 4.1, разд. 8, разд. 16
Эфир винилэтиловый Vinyl Ethyl Ether	CH ₂ CHOC ₂ H ₅	755	2G/2PG	–	Инерт.	В+Т	З	330	2.1, 3.2, 4.1, разд. 8, разд. 10, разд. 22, разд. 23, 29.2, 29.3
Винилиден хлористый* Vinylidene Chloride	C ₂ H ₂ Cl ₂	1250	2G/2PG	–	Инерт.	В+Т	П	340	2.1, 3.5, разд. 8, разд. 10, разд. 19, разд. 22, разд. 23
Эфир диметилловый Dimethyl Ether	C ₂ H ₆ O	1,716	2G/2PG	–	–	В+Т	С	–	

*Приложения к Правилам классификации и постройки
судов для перевозки сжиженных газов наливом (приложение 1)*

8

Наименование вещества	Химическая формула	Плотность, кг/м ³ , при температуре, указанной в скобках	Тип газовоза LG	Требуется вкладная емкость типа С	Система регулирования парового пространства внутри грузовых емкостей	Система обнаружения паров груза	Тип контрольно-измерительных устройств	Номер по таблице РГМП	Специальные требования
Смешанные грузы C ₄ Mixed Cargoes C ₄			2G/2PG	-	-	B+T	З. К	-	Разд. 2, 3.2, 5.2, 5.3, разд. 8, разд. 26
Двуокись углерода (высокой очистки) Carbon dioxide (high purity)	CO ₂	771	3G	-	-	O	З	-	Разд. 27
Двуокись углерода (низкой очистки) Carbon dioxide (low purity)	CO ₂	771	3G	-	-	O	З	-	Разд. 28

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОДЕКС ПОСТРОЙКИ И ОБОРУДОВАНИЯ СУДОВ,
ПЕРЕВОЗЯЩИХ СЖИЖЕННЫЕ ГАЗЫ НАЛИВОМ**

См. главу 18 Международного кодекса постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом.

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

См. дополнение 4 Международного кодекса постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

**СТАНДАРТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОЛОГИЙ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИ РАСЧЕТЕ СИСТЕМ УДЕРЖАНИЯ ГРУЗА НОВОЙ КОНФИГУРАЦИИ**

См. дополнение 5 Международного кодекса постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом.

РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ОТПАРНОГО ГАЗА

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Основные определения.

В целях использования Руководства по выполнению расчета температуры корпусных конструкций и интенсивности образования отпарного газа¹ вводятся следующие основные определения.

Интенсивность образования отпарного газа, BOR , % — количество жидкого груза, испарившегося из грузовой емкости вследствие наличия теплового потока в емкость. Выражается в процентах уменьшения полного первоначального объема груза в сутки.

Метод конечных элементов — это численный метод решения системы дифференциальных уравнений переноса теплоты, при котором непрерывная величина аппроксимируется дискретной моделью, состоящей из множества кусочно-непрерывных функций. Указанные функции определены на конечном числе элементарных областей, на которые разбивается исследуемая конструкция, а значения функций определяются с помощью значений температуры в конечном числе точек рассматриваемой области — узлов конечно-элементной модели.

Расчетный отсек — это замкнутый теоретический отсек в корпусе судна, стенки которого образованы листовыми конструкциями, расположенными во взаимно перпендикулярных направлениях.

Стационарный процесс передачи теплоты — это такой вид передачи теплоты, при котором температура и тепловой поток не изменяются во времени.

Тепловая конвекция — механизм передачи теплоты, который возникает в жидкостях и газах и реализуется посредством потоков самого вещества. Различают два вида тепловой конвекции: естественную конвекцию и вынужденную конвекцию. Естественная конвекция возникает при отсутствии ветра и течения. Вынужденная конвекция — при наличии ветра и течения.

Тепловой поток, Q , Вт, — количество теплоты, переданное через изотермическую поверхность в единицу времени.

Теплопроводность — механизм передачи теплоты от более нагретых участков тела к менее нагретым путем хаотического движения частиц тела.

Число Грасгофа, Gr , — критерий подобия тепловых процессов, который характеризует процесс теплообмена при конвекции в поле силы тяжести.

Число Нуссельта, Nu , — критерий подобия тепловых процессов, который характеризует соотношение между интенсивностью теплообмена за счет теплопроводности и интенсивностью теплообмена за счет тепловой конвекции.

Число Прандтля, Pr , — критерий подобия тепловых процессов, который характеризует влияние физических свойств теплоносителя на теплоотдачу.

Число Рэлея, Ra , — критерий подобия тепловых процессов, который характеризует поведение жидкости под воздействием градиента температуры.

1.2 Область распространения.

1.2.1 Настоящее Руководство описывает минимальные требования, предъявляемые к расчетам температуры корпусных конструкций и интенсивности образования отпарного газа.

¹ В дальнейшем — настоящее Руководство.

1.2.2 Требования настоящего Руководства распространяются на расчеты, применяемые при выполнении следующих требований Регистра:

требований 19.2.1 части IV «Хранение груза» в части определения расчетных температур корпусных конструкций в грузовой зоне;

требований 4.1.2 части VI «Системы и трубопроводы» в части определения максимально возможной в нормальной эксплуатации интенсивности образования отпарного газа.

1.3 Основные допущения.

1.3.1 Настоящим Руководством предусмотрено выполнение расчетов с помощью двух методов:

аналитический метод расчета;

численный метод расчета.

Предполагается, что аналитический метод применяется для определения температуры корпусных конструкций, определения интенсивности образования отпарного газа, а также для определения граничных условий заданной температуры и заданной конвекции при выполнении расчетов численным методом.

Также предполагается, что численный метод применяется для определения температуры корпусных конструкций.

1.3.2 Настоящим Руководством предусмотрена необходимость учета следующих механизмов передачи теплоты:

теплопроводности;

тепловой конвекции.

Предполагается, что процесс передачи теплоты является стационарным. Температура груза является неизменной и равна расчетному значению температуры при расчетном значении давления паров груза в емкости.

Материалы корпуса, системы хранения груза, а также жидкие и газообразные вещества являются гомогенной средой. Материалы не абсорбируют жидкий груз и не влияют на его химический состав.

1.3.3 Настоящим Руководством предусмотрено, что передача теплоты вследствие теплопроводности осуществляется в следующих случаях, как схематично указано на [рис. 1.3.3](#):

передача теплоты через конструкции корпуса судна: листы наружной обшивки, настилы палуб и платформ, полотнища переборок и т.п.;

передача теплоты через тепловую изоляцию и барьеры емкости для хранения груза: твердые, мягкие и сыпучие теплоизоляционные материалы.

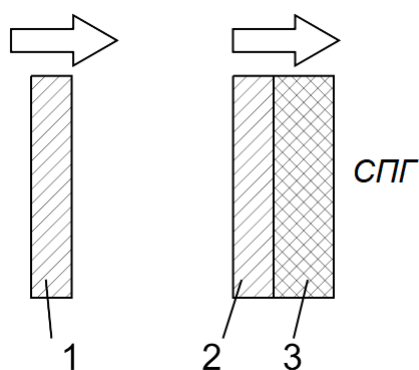


Рис. 1.3.3

Передача теплоты вследствие теплопроводности
(1, 2 — конструкции корпуса судна, 3 — тепловая изоляция)

1.3.4 Настоящим Руководством предусмотрено, что передача теплоты вследствие естественной конвекции осуществляется в следующих случаях (см. [рис. 1.3.4](#)):

передача теплоты ла корпусу судна со стороны окружающего судно воздуха и воды при отсутствии ветра и течения;

передача теплоты в междубортном, междудонном и межпалубном пространстве, коффердамах, трюмных помещениях при отсутствии принудительной циркуляции воздуха.

Настоящим Руководством предусмотрено, что передача теплоты вследствие вынужденной конвекции осуществляется в следующих случаях (см. [рис. 1.3.4](#)):

передача теплоты корпусу судна со стороны окружающего судна воздуха и воды при наличии ветра и течения;

передача теплоты в междубортном и междудонном пространстве, коффердамах, трюмных помещениях в случае принудительной циркуляции воздуха.

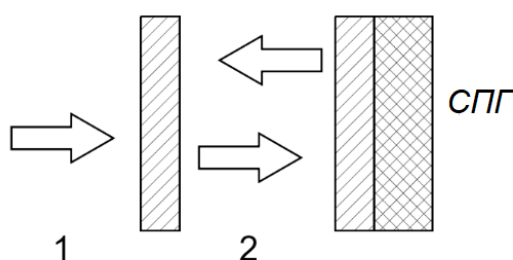


Рис. 1.3.4

Передача теплоты вследствие конвекции

(1 — внешняя среда, воздушная или водная; 2 — воздушная среда внутри корпуса судна)

1.3.5 Настоящим Руководством предусмотрено определение коэффициента конвективной теплоотдачи на основе аналитических методов и критериев подобия тепловых процессов. По согласованию с Регистром допускается применение экспериментальных методов и численных методов анализа динамики жидкости и газа (CFD) для расчета интенсивности конвективной теплоотдачи.

1.3.6 Температура окружающей среды (воздуха, морской воды) и условия выполнения расчета температур корпусных конструкций должны приниматься в соответствии с требованиями 19.2 части IV «Хранение груза».

Температура окружающей среды (воздуха, морской воды) и условия выполнения расчета максимально возможной в нормальной эксплуатации интенсивности образования отпарного газа должны приниматься в соответствии с требованиями 4.1.2 части VI «Системы и трубопроводы».

1.3.7 При расчете следует учитывать средства обогрева конструкций корпуса, удовлетворяющие требованиям 19.2.6 части IV «Хранение груза». Температура обогреваемых конструкций должна задаваться постоянной в соответствии с параметрами установленных средств обогрева.

1.3.8 Расчеты выполняются при построечных размерах конструктивных элементов корпусных конструкций и системы хранения груза.

Расчетной температурой конструкции принимается величина, равная среднему арифметическому между значениями температуры на поверхностях конструкции. Расчетная температура балок набора и ребер жесткости принимается равной расчетной температуре листовой конструкции, с которой они соединяются.

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОвого ПОТОКА

2.1 Величина теплового потока.

2.1.1 В общем виде величина теплового потока Q между точками с температурами T_1 и T_2 , °С, определяется по формуле

$$Q = A \cdot U \cdot (T_1 - T_2), \quad (2.1.1)$$

где A — площадь поверхности теплообмена, м²;
 U — коэффициент теплопередачи, который определяется в соответствии с требованиями [2.1.2](#) и [2.1.3](#), Вт/(м² °С).

2.1.2 Коэффициент теплопередачи U при передаче теплоты через плоскую стенку вследствие теплопроводности определяется по формуле

$$U = \frac{k}{t}, \quad (2.1.2-1)$$

где k — коэффициент теплопроводности материала, который определяется в соответствии с требованиями [2.2](#), Вт/(м °С);
 t — толщина конструкции, через которую проходит тепловой поток, м.

Схематичное изображение механизма передачи теплоты через плоскую стенку вследствие теплопроводности приведено на [рис. 2.1.2](#).

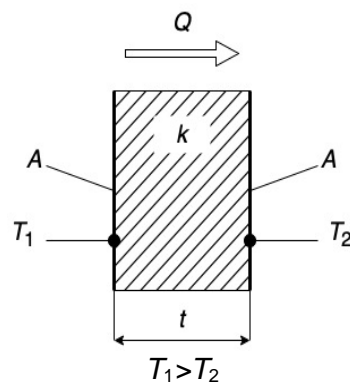


Рис. 2.1.2

Для многослойной конструкции коэффициент теплопередачи U определяется по следующему выражению:

$$\frac{1}{U} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{U_i}, \quad (2.1.2-2)$$

где m — количества слоев конструкции;
 U_i — коэффициент теплопередачи каждого i -го слоя конструкции.

2.1.3 Коэффициент теплопередачи U при передаче теплоты вследствие тепловой конвекции определяется по формуле

$$U = h \cdot \Phi, \quad (2.1.3)$$

где h — коэффициент конвективной теплоотдачи, который определяется в соответствии с требованиями [2.3](#), Вт/(м² °С);
 Φ — коэффициент оребрения поверхности;
 $\Phi = 1$ для плоской поверхности без ребер жесткости;
 $\Phi > 1$ для поверхности с ребрами жесткости в соответствии с требованиями [2.5](#).

Схематичное изображение механизма передачи теплоты вследствие тепловой конвекции приведено на [рис. 2.1.3](#).

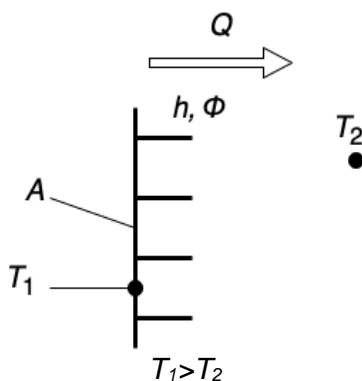


Рис. 2.1.3

2.2 Коэффициент теплопроводности.

2.2.1 Величина коэффициента теплопроводности k металлических материалов корпусных конструкций и конструкций грузовой емкости должна определяться на основе справочных данных или результатов испытаний материалов. Методика определения должна быть согласована с Регистром и учитывать изменение коэффициента теплопроводности от температуры.

Величина коэффициента теплопроводности k неметаллических материалов тепловой изоляции грузовой емкости должна определяться по результатам испытаний в соответствии с требованиями дополнения 4 к Международному кодексу постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом.

По согласованию с Регистром на ранних этапах проектирования допускается использование приближенных значений коэффициента теплопроводности в соответствии с [2.2.2](#).

2.2.2 Приближенные значения коэффициента теплопроводности k для металлических материалов приведены в [табл. 2.2.2-1](#). Приближенные значения коэффициента теплопроводности k для некоторых неметаллических материалов, применяемых при изготовлении тепловой изоляции емкостей для груза, приведены в [табл. 2.2.2-2](#).

Таблица 2.2.2-1

Материал	Коэффициент теплопроводности k , Вт/м °С		
	0 °С	-100 °С	-163 °С
Сталь нормальной и повышенной прочности	59		
Сталь с 2,5% Ni	38	33	—
Сталь с 3,5% Ni	34	29	21
Сталь с 9% Ni	28	23	16
Аустенитная сталь типа 304	14,5	12	—
Алюминиевый сплав типа 5083	115	92	70

Таблица 2.2.2-2

Материал	Коэффициент теплопроводности $k \cdot 10^2$, Вт/м °С		
	10 °С	-70 °С	-163 °С
Полиуретановая пена, армированная стекловолокном	4,0	2,9	2,0
Фанера березовая	11,8	9,5	6,2
Стекловата	3,6	3,4	3,2
Перлит вспученный	5,2	3,6	1,8

2.2.3 В случае если тепловая изоляция емкостей изготовлена из теплоизоляционных коробок, коэффициент теплопроводности коробки определяется по следующей формуле

$$k = \frac{\sum_i V_i k_i}{\sum_i V_i}, \quad (2.2.3)$$

где i — порядковый номер конструктивного элемента теплоизоляционной коробки (см. [рис. 2.2.3](#));

V_i — объем i -го конструктивного элемента в составе изоляционной коробки, м³;

k_i — коэффициент теплопроводности i -го конструктивного элемента в составе изоляционной коробки, Вт/(м °С).

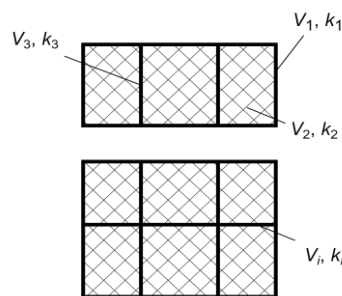


Рис. 2.2.3

2.3 Коэффициент конвективной теплоотдачи.

2.3.1 Коэффициент конвективной теплоотдачи h , Вт/(м² °С), определяется по формуле

$$h = \frac{k_{liq}}{L_s} \cdot Nu, \quad (2.3.1)$$

где k_{liq} — коэффициент теплопроводности водной или воздушной среды, который определяется в соответствии с [2.3.2](#), Вт/(м °С);

L_s — характерная длина поверхности теплообмена, которая определяется в соответствии с [2.3.3](#), м;

Nu — число Нуссельта, которое определяется в соответствии с [2.4](#).

2.3.2 Величина коэффициента k_{liq} должна приниматься для водной среды в соответствии с [табл. 2.3.2-1](#), а для воздушной среды — в соответствии с [табл. 2.3.2-2](#).

Таблица 2.3.2-1

Температура морской воды	30 °С	20 °С	10 °С	0 °С
$k_{liq} \cdot 10^2$, Вт/(м °С)	61,5	59,8	58,0	56,1

Таблица 2.3.2-2

Температура воздуха	60 °С	40 °С	20 °С	0 °С	-50 °С	-100 °С	-150 °С
$k_{liq} \cdot 10^3$, Вт/(м °С)	28,5	27,1	25,7	24,3	20,4	16,0	11,6

2.3.3 Величина L_s должна определяться в зависимости от положения поверхности теплообмена:

для вертикального положения поверхности теплообмена в соответствии с [табл. 2.4.1-1](#);

для горизонтального положения поверхности теплообмена в соответствии с [табл. 2.4.2](#);

для наклонного положения поверхности теплообмена в соответствии с [2.4.3](#).

2.4 Критерии подобия тепловых процессов.

2.4.1 Величина числа Нуссельта Nu при естественной конвекции и вертикальном положении поверхности теплообмена определяется в соответствии с требованиями [табл. 2.4.1-1](#).

Таблица 2.4.1-1

Схема теплового потока	Диапазон Ra	Величина Nu
 <p>вертикальная поверхность</p>	$Ra \leq 10^9$	$Nu = 0,68 + \frac{0,67Ra^{1/4}}{[0,825 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}}$
	$Ra > 10^9$	$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$

Величина числа Рэлея Ra определяется по формуле

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad (2.4.1-1)$$

где Gr — число Грасгофа, которое определяется по формуле (2.4.1-2);
 Pr — число Прандтля, которое для водной среды определяется в соответствии с [табл. 2.4.1-2](#), а для воздушной среды — в соответствии с [табл. 2.4.1-3](#);

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L_s^3}{\nu^2}, \quad (2.4.1-2)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²;
 β — коэффициент температурного расширения среды, который для водной среды определяется в соответствии с [табл. 2.4.1-2](#), а для воздушной среды в соответствии с [табл. 2.4.1-3](#), 1/°С;

ΔT — разница значений температуры поверхности теплообмена и температуры окружающей среды, °С;

L_s — см. [2.3.3](#), м;

ν — кинематическая вязкость среды, которая для водной среды определяется в соответствии с [табл. 2.4.1-2](#), а для воздушной среды — в соответствии с [табл. 2.4.1-3](#), м²/с.

Таблица 2.4.1-2

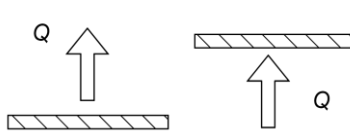
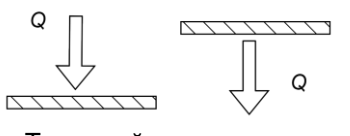
Температура воды	30 °С	20 °С	10 °С	0 °С
$\beta \cdot 10^7, 1/^\circ\text{C}$	3413	2489	1668	526
$\nu \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	6,2	6,0	5,9	5,7
Pr	5,4	7,0	9,5	13,5

Таблица 2.4.1-3

Температура воздуха	60 °С	40 °С	20 °С	0 °С	-50 °С	-100 °С	-150 °С
$\beta \cdot 10^3, 1/^\circ\text{C}$	3,0	3,2	3,4	3,7	4,5	5,8	8,2
$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	18,9	17,0	15,1	13,3	9,6	6,0	3,1
Pr	0,71			0,72	0,73	0,74	0,76

2.4.2 Величина числа Нуссельта Nu при естественной конвекции и горизонтальном расположении поверхности теплообмена определяется в соответствии с требованиями [табл. 2.4.2](#).

Таблица 2.4.2

Схема теплового потока	Диапазон Ra	Значение Nu
 <p>Тепловой поток в противоположном направлении от направления силы тяжести</p>	$Ra = 10^4 \sim 10^7$	$Nu = 0,54 \cdot Ra^{1/4}$
	$Ra = 10^7 \sim 10^{11}$	$Nu = 0,15 \cdot Ra^{1/3}$
 <p>Тепловой поток в направлении силы тяжести</p>	$Ra = 10^4 \sim 10^{11}$	$Nu = 0,27 \cdot Ra^{1/4}$
<p>Примечания:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Величина Ra определяется в соответствии с формулой (2.3.3-1). 2. Величина L_s определяется следующим образом: $L_s = \frac{A}{P},$ где A — площадь поверхности теплообмена, м²; P — периметр поверхности теплообмена, м. 		

2.4.3 Величина числа Нуссельта Nu при естественной конвекции и наклонном расположении поверхности теплообмена определяется в соответствии с требованиями [2.4.1](#). При этом величину числа Рэлея, определяемую по формуле (2.4.1-1), необходимо умножить на значение $\cos \theta$, где $\theta < 60^\circ$ (см. [рис. 2.4.3](#)). В случае, если $\theta \geq 60^\circ$, следует полагать, что поверхность теплообмена расположена горизонтально.

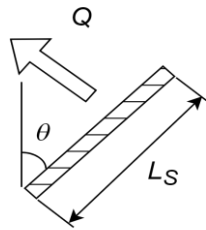


Рис. 2.4.3

2.4.4 Величина Nu при вынужденной конвекции определяется по формуле

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3}, \quad (2.4.4-1)$$

где Re — число Рейнольдса, которое определяется по формуле (2.4.4-2);
 Pr — см. [2.4.1](#);

$$Re = \frac{V_p \cdot L_s}{\nu}, \quad (2.4.4-2)$$

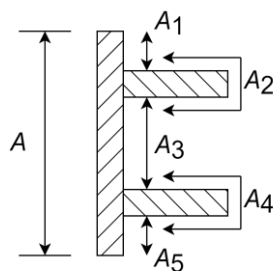
где V_p — скорость движения жидкости или газа, м/с;
 L_s — см. [2.3.3](#), м;
 ν — см. [2.4.1](#), м²/с.

2.5 Коэффициент оребрения поверхности.

2.5.1 Коэффициент оребрения поверхности Φ в случае, если на поверхности теплообмена установлены ребра жесткости, определяется по формуле

$$\Phi = \frac{A_u}{A} + \eta_f \cdot \frac{A_f}{A}, \quad (2.5.1)$$

где A_u , A , A_f — значения площади, которые определяются в соответствии с указаниями на [рис. 2.5.1](#) без учета свободного пояса ребер жесткости составного профиля, м²;
 η_f — коэффициент тепловой эффективности ребра жесткости, который определяется в соответствии с [2.5.2](#).



$$A_f = A_2 + A_4; \quad A_u = A_2 + A_4$$

Рис. 2.5.1

2.5.2 Коэффициент тепловой эффективности ребра жесткости η_f определяется по формуле

$$\eta_f = \frac{\tanh(m \cdot L_f)}{m \cdot L_f}, \quad (2.5.2)$$

где $m = \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot (w_f + t_f)}{k_f \cdot w_f \cdot t_f}}$,

L_f , w_f , t_f — геометрические параметры ребра жесткости, которые определяются в соответствии с указаниями на [рис. 2.5.2](#) без учета свободного пояса ребер жесткости составного профиля, м;

h — коэффициент конвективной теплоотдачи поверхности без учета ребер жесткости (см. [2.3.1](#)), Вт/(м² °С);

k_f — коэффициент теплопроводности материала ребра жесткости, который определяется в соответствии с указаниями [2.2](#), Вт/(м² °С).

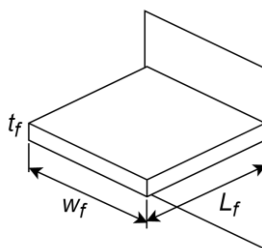


Рис. 2.5.2

3 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ

3.1 Аналитический метод расчета.

3.1.1 Настоящим Руководством предусмотрено, что аналитический метод расчета основан на рассмотрении состояния теплового равновесия каждого расчетного отсека в грузовой зоне.

При разделении грузовой зоны на расчетные отсеки следует руководствоваться нижеследующим (см. [рис. 3.1.1](#)):

для конструкции двойного борта стенки расчетных отсеков образованы пересечением наружной обшивки, рамных шпангоутов, второго борта и бортовых стрингеров;

для конструкции двойного дна стенки расчетных отсеков образованы пересечением днища, рамных флоров, настила второго дна и днищевых стрингеров;

для конструкции двойной палубы станки расчетных отсеков образованы пересечением настила верхней палубы, рамных бимсов, палубы тронка и карлингсов;

грузовой трюм и коффердамы рассматриваются как расчетные отсеки, ограниченные по длине поперечными переборками.

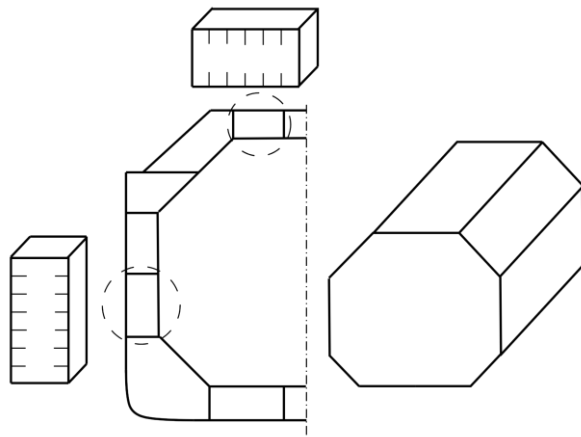


Рис. 3.1.1

3.1.2 Величина температуры корпусных конструкций должна определяться в соответствии со следующим условием теплового равновесия каждого расчетного отсека:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0, \tag{3.1.2}$$

где Q_i — i -тый тепловой поток в расчетный отсек корпуса судна, величина которого определяется в соответствии с [2.1](#);

n — количество тепловых потоков в расчетный отсек корпуса судна, см. [рис. 3.1.2](#).

При определении количества тепловых потоков следует учитывать входящие и исходящие из расчетного отсека потоки, как указано на примерах на [рис. 3.1.2](#).

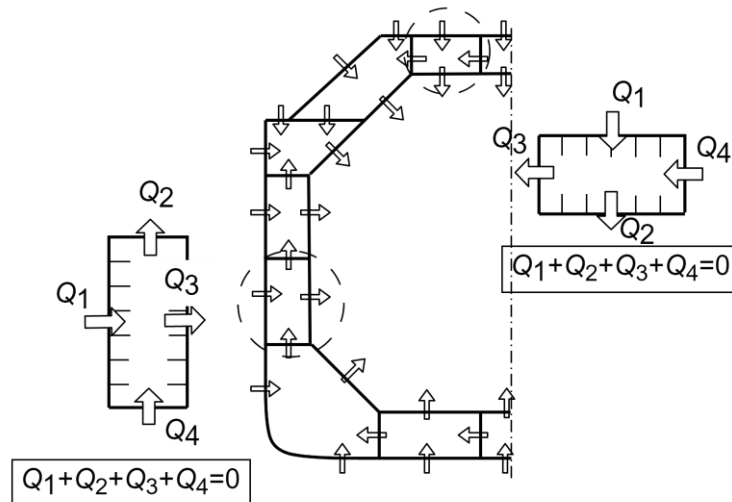


Рис. 3.1.2

3.1.3 Расчет температуры корпусных конструкций в соответствии с [3.1.2](#) следует проводить методом последовательных приближений с учетом зависимости величины теплового потока и величины коэффициентов теплопроводности (см. [2.1](#)) от температуры конструкций корпуса и температуры тепловой изоляции емкости.

3.1.4 Величина максимально возможной в нормальной эксплуатации интенсивности образования отпарного газа BOR определяется по формуле

$$BOR = \frac{Q_{max}}{\rho \cdot V \cdot H} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 100 \%, \quad (3.1.4-1)$$

где Q_{max} — максимально возможный при нормальной эксплуатации суммарный тепловой поток в емкость для груза, см. формулу (3.1.4-2), Вт;

ρ — значение плотности груза, определенное при расчетной температуре груза и расчетном значении давления паров груза в емкости, кг/м³;

V — максимально допустимый объем груза в емкости с учетом 3.22 части VI «Системы и трубопроводы», м³;

H — теплота парообразования груза, определенная при расчетной температуре груза и расчетном значении давления паров груза в емкости, Дж/кг;

$$Q_{max} = \sum_{i=1}^m Q_i, \quad (3.1.4-2)$$

где Q_i — i -тый тепловой поток в емкость для груза, величина которого определяется в соответствии с 2.1;

m — количество тепловых потоков в емкость для груза при нормальной эксплуатации судна (см. [рис. 3.1.4](#)).

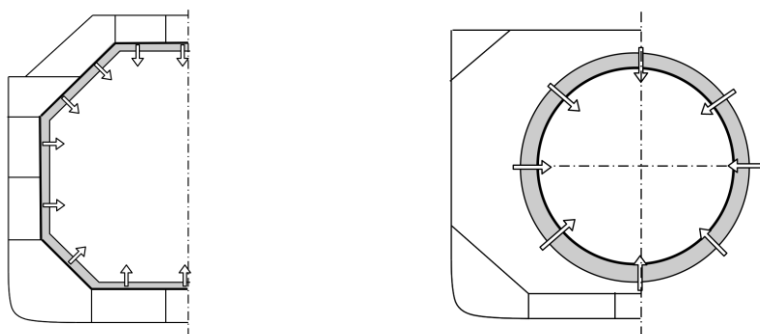


Рис. 3.1.4

3.2 Численный метод расчета.

3.2.1 Настоящим Руководством предусмотрено использование метода конечных элементов как численного метода расчета температуры корпусных конструкций. Результатом расчета являются значения температуры в узлах конечно-элементной модели.

3.2.2 При выборе типа применяемых для расчетов конечных элементов следует руководствоваться нижеследующим:

листы и ребра жесткости корпусных конструкций судна должны моделироваться оболочечными конечными элементами;

ребра жесткости на листовых элементах должны моделироваться без учета свободного пояса;

тепловая изоляция грузовой емкости должна моделироваться объемными конечными элементами;

если тепловая изоляция емкостей изготовлена из теплоизоляционных коробок, стенки и переборки коробки должны моделироваться оболочечными конечными элементами.

3.2.3 Допускается не включать ребра жесткости в состав конечно-элементной модели при условии учета коэффициента оребрения листовых конструкций в соответствии с [2.3.2](#).

3.2.4 Значения коэффициентов теплопроводности материалов должны приниматься в соответствии с требованиями [2.2](#).

3.2.5 Настоящим Руководством предусмотрена необходимость приложения следующих граничных условий к конечно-элементной модели:

граничных условий заданной температуры;

граничных условий заданной конвекции.

3.2.6 Граничные условия заданной температуры должны быть приложены к узлам конечно-элементной модели в тех районах, где температура конструкций может считаться известной, с учетом нижеследующего:

температура на границах конечно-элементной модели должна приниматься в соответствии с результатами расчета аналитическим методом в соответствии с [3.1](#);

температура в узлах на конечных элементах, соприкасающихся с грузом, должна приниматься равной расчетной температуре груза.

3.2.7 Граничные условия заданной конвекции должны быть приложены к поверхности конечных элементов, которые соприкасаются с воздушной или водной средой, с учетом нижеследующего:

величина коэффициента конвективной теплоотдачи должна приниматься равной значению U , полученному по формуле (2.1.3);

коэффициент оребрения $\Phi = 1$ в том случае, если ребра жесткости включаются в конечно-элементную модель. Коэффициент оребрения $\Phi > 1$ в соответствии с требованиями [2.5](#), если ребра жесткости не включаются в конечно-элементную модель;

температура окружающей среды для элементов должна приниматься в соответствии с результатами расчета аналитическим методом в соответствии с [3.1](#) в зависимости от расположения рассматриваемой конструкции;

для элементов, соприкасающихся с наружным воздухом и морской водой, температура окружающей среды принимается в соответствии с [1.3.6](#).

Российский морской регистр судоходства

**Приложения к Правилам классификации и постройки судов
для перевозки сжиженных газов наливом**

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
191181, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 7, литера А
www.rs-class.org/ru/