

УДК 629.123
EDN LSHMYE

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СУДОВЫХ СИСТЕМ ОБОГРЕВА БАЛЛАСТНЫХ ТАНКОВ

Е.Н. Алексин, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: aleksinevg@yandex.ru
Д.О. Глазырина, ассистент кафедры, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: d_glazyrina@bk.ru
А.А. Михеева, вед. специалист по НИР, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, 7А; аспирант, Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

В статье рассмотрены вопросы расчетного обеспечения проектирования судовых систем обогрева балласта. Балластные цистерны судна, в которые принимается забортная вода, для предотвращения замерзания воды должны быть оборудованы системой обогрева. Обогрев выполняется теплоносителями, циркулирующими по змеевикам, установленным в цистернах. Определение длин змеевиков и расходов теплоносителей является актуальной задачей с учетом недостаточности информации по данному вопросу, содержащейся в отраслевой нормативно-технической документации. В настоящее время для решения указанной расчетной задачи отсутствует соответствующее программное обеспечение, что приводит к необходимости проведения расчетов аналитическим путем. В работе приводятся общие сведения об устройстве и принципе работы судовых систем обогрева балласта и рекомендуемый типовой алгоритм расчета. Также в статье содержится пример расчета для условной цистерны известных размеров.

Ключевые слова: балластные системы, цистерна, обогрев, змеевик, теплоноситель, теплопередача, критериальное уравнение, тепловой поток.

Для цитирования: Алексин Е.Н. Методика расчета судовых систем обогрева балластных танков / Е.Н. Алексин, Д.О. Глазырина, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 134 — 142. — EDN LSHMYE.

METHODS OF CALCULATION OF SHIP'S BALLAST HEATING SYSTEMS

E.N. Aleksin, PhD, St. Petersburg State Maritime Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: aleksinevg@yandex.ru
D.O. Glazyrina, Teaching Assistant, St. Petersburg State Maritime Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: d_glazyrina@bk.ru
A.A. Mikheeva, Lead R&D Specialist, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A; PhD student, A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the RAS, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

The article discusses the issues of computational support for the design of shipboard ballast heating systems. The ballast tanks of the vessel, which receive seawater, must be equipped with a heating system to prevent freezing of the water. Heating is carried out by heat carriers circulating through coils installed in tanks. Determining the lengths of coils and the flow rates of heat carriers is an urgent task, given the lack of information on this issue contained in the industry regulatory and technical documentation. Currently, there is no appropriate software available to solve this computational problem, which leads to the need for analytical calculations. The paper provides general information about the design and principle of operation of ship's ballast heating systems and a recommended standard calculation algorithm. The article also contains an example of calculation for a conventional tank of known dimensions.

Keywords: Ballast systems, tank, heating, coil, heat carrier, heat transfer, criterion equation, heat flow.

For citation: Aleksin E.N., Glazyrina D.O., Mikheeva A.A. Methods of calculation of ship's ballast heating systems. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 134 — 142. EDN LSHMYE. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Важной составляющей водоизмещения судов являются различные жидкие среды: вода в балластных цистернах, топливо, смазочное масло, шлам, нефтесодержащие воды, растворы химических реагентов и пр.

При этом в большинстве случаев указанные вещества имеют определенные температурные интервалы хранения, и в зависимости от условий эксплуатации судна требуют или подогрева, или охлаждения. Для судов, эксплуатируемых в арктических и антарктических районах, актуальной задачей является подогрев жидких сред для предотвращения замерзания, снижения вязкости при перекачке, обеспечения корректной работы оборудования и (или) поддержания необходимой реакционной способности.

Целью расчета системы обогрева является определение поверхности теплообмена (фактически — длины змеевика в цистерне) и расхода теплоносителя.

В практике отечественных судостроительных КБ такие расчеты производились в соответствии с отраслевыми руководящими документами [1] и [2], содержащими эмпирические зависимости и номограммы. Однако в указанных РД отсутствуют современные виды теплоносителей и подогреваемых сред, что не позволяет в полной мере применять данные документы в проектировании, увеличивает погрешность вычислений и повышает трудоемкость расчетов.

В данной работе представлены общие сведения о системах обогрева балластных цистерн, методология проведения расчетов, приведен пример расчета на основе вышеупомянутых нормативных документов, практики проектирования и основных положений теплопередачи. Целью работы является разработка упрощенной методики расчета, позволяющей сократить трудозатраты на проектирование систем обогрева.

1. СОСТАВ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СУДОВЫХ СИСТЕМ ОБОГРЕВА

1.1. В состав типовой системы обогрева входят:

- трубы (включая змеевики обогрева внутри цистерн);
- запорная и регулирующая арматура;
- контрольно-измерительные приборы;
- насосы теплоносителя;
- емкости с теплоносителем (цистерны);
- подогреваемые цистерны;
- теплообменные аппараты;
- судовые котлы.

Подогрев жидкостей производится по двум основным схемам: одноконтурной (рис. 1) и двухконтурной (рис. 2).

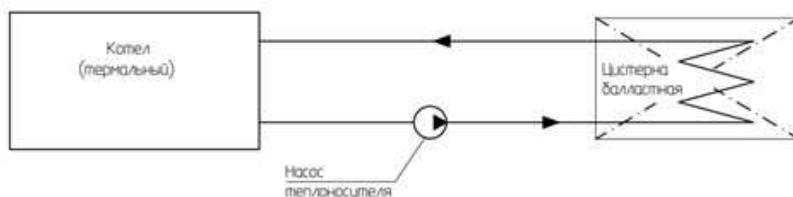


Рис. 1. Одноконтурная система обогрева

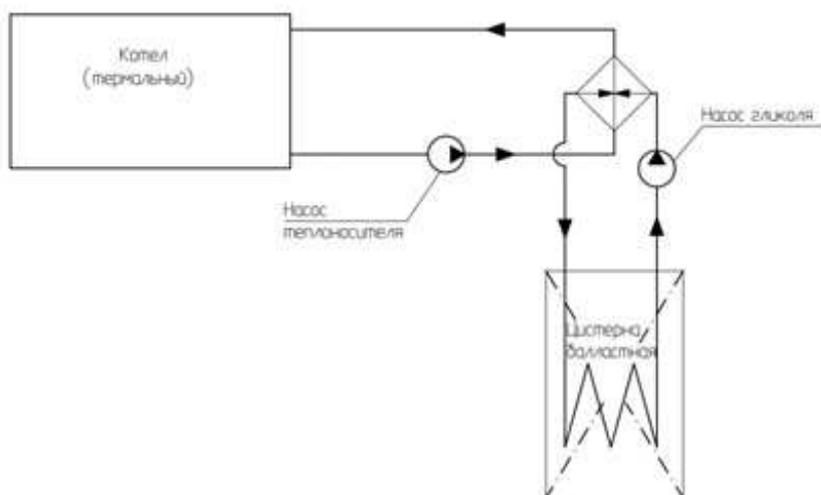


Рис. 2. Двухконтурная система обогрева

1.2. В качестве теплоносителей могут использоваться пар, горячая вода и различные органические вещества.

Благодаря незначительной коррозионной активности и высоким рабочим температурам (до 200 °С) при относительно низких давлениях в системе (4 — 6 бар) в настоящее время наибольшее распространение получили органические теплоносители: термальные масла и водно-гликолевые смеси.

Пример термального котла представлен на рис. 3.



Рис. 3. Термальный котел на органическом топливе [3]

Отметим, что на системы обогрева жидкостей может расходоваться до 20 — 25 % от мощности судовой котельной установки. Распределение тепловой мощности котельной установки по потребителям для двух типов судов ледового плавания, строящихся в настоящее время на отечественных верфях, приведено на рис. 4.

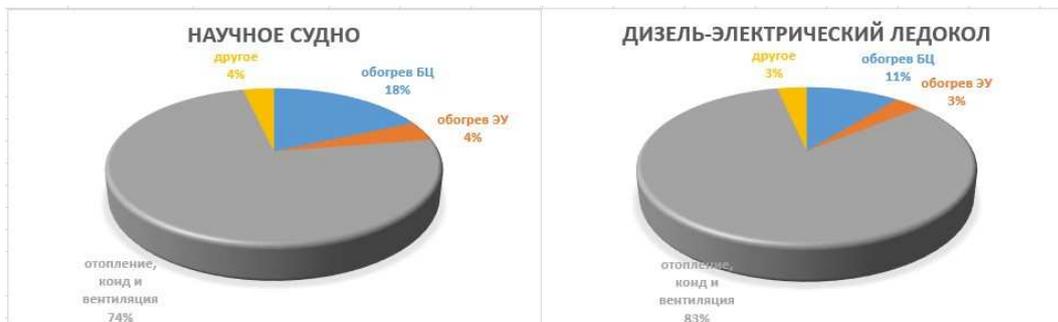


Рис. 4. Потребители тепла котельной установки

— не учитывается геометрия змеевика (возможно увеличение теплоотдачи от теплоносителя к змеевику из-за вторичной циркуляции, возникающей вследствие центробежного эффекта в поперечном сечении трубы).

Расчет произведем для цистерны, представленной на рис. 6.

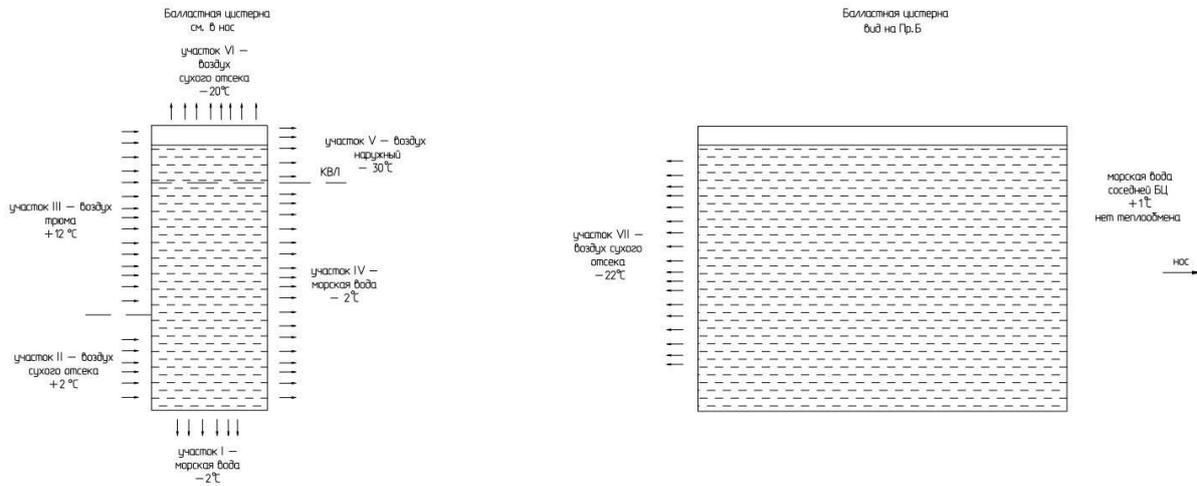


Рис. 6. Схема цистерны

Исходные данные для расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Обозначение параметра	Наименование параметра	Размерность	Значение
$t_{в}^{нач}$	начальная температура воды в балластной цистерне	°С	-2
$t_{в}^{кон}$	конечная температура воды в балластной цистерне	°С	1
$t_{зв}$	температура забортной воды	°С	-2
$t_{нар}^{\beta}$	температура наружного воздуха	°С	-30
$\rho_{в}$	плотность забортной воды	кг/м ³	1025
$\rho_{тн}$	плотность теплоносителя	кг/м ³	1015
$t_{тн}^{вх}$	температура теплоносителя на входе в змеевик	°С	70
$t_{тн}^{вых}$	температура теплоносителя на выходе из змеевика	°С	50
$C_{в}$	теплоемкость воды	кДж/(кг·К)	3,89
$C_{тн}$	теплоемкость теплоносителя	кДж/(кг·К)	3,76
$\nu_{в}$	Кинематическая вязкость воды	сСт	1,78
$\nu_{тн}$	Кинематическая вязкость теплоносителя	сСт	1,60
μ	Динамическая вязкость теплоносителя	мПа·с	1,624
w	Скорость теплоносителя в змеевике	м/с	2
$\lambda_{тн}$	Теплопроводность теплоносителя	Вт/(м·К)	0,392
$\lambda_{в}$	Теплопроводность воды	Вт/(м·К)	0,56
$\lambda_{зм}$	Теплопроводность материала змеевика	Вт/(м·К)	16
	Время нагрева	ч (с)	3 (10800)

2.3. Последовательность расчета:

- 1) составление схемы расположения цистерны;
- 2) определение температур сред «снаружи», в окружающих помещениях;
- 3) определение температур стенок цистерны;
- 4) расчет коэффициента теплопередачи;
- 5) расчет длин змеевика;
- 6) поверочный расчет толщины стенки змеевика.

Для представленной в примере цистерны получено шесть участков. Количество таких участков индивидуально и может составлять 10 и более; в практике проектирования, как правило, число участков не превышает восьми.

2.4. Расчет коэффициента теплопередачи для змеевика обогрева.

Тепловая мощность змеевика, $Q_{зм}$, Вт, представляет собой количество теплоты, передаваемое от горячего теплоносителя к среде цистерны за требуемое время нагрева, и определяется в соответствии с уравнением теплопередачи:

$$Q_{зм} = k \cdot F \cdot \Delta t_{ср}, \quad (3)$$

где k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);
 F — площадь поверхности змеевика, м²;
 $\Delta t_{ср}$ — температурный напор, °С.

Среднелогарифмический температурный напор в теплообменных аппаратах определяется через наибольшую и наименьшую разности температур теплоносителей [7]:

$$\Delta t_{ср} = \frac{(t_{гн}^{вх} - t_{в}^{нач}) - (t_{гн}^{вых} - t_{в}^{кон})}{\ln(t_{гн}^{вх} - t_{в}^{нач}) / (t_{гн}^{вых} - t_{в}^{кон})}. \quad (4)$$

В расчете системы обогрева в качестве температурного напора достаточно принять среднеарифметическое от средней температуры теплоносителя в змеевике и температуры воды в цистерне. Учитывая, что нагрев воды, как правило, производится на 1 — 2 °С, в уравнение теплопередачи можно в качестве температурного напора подставлять среднюю температуру теплоносителя внутри змеевика:

$$\Delta t_{ср} = \frac{t_{гн}^{вх} + t_{гн}^{вых}}{2}. \quad (5)$$

Поскольку в РД присутствует только информация о коэффициенте теплопередачи для парового змеевика, для системы, использующей термальные масла, находить k следует аналитически.

Для цилиндрической стенки рассчитывается линейный (в расчете на 1 м трубы) коэффициент теплопередачи k_l , Вт/(м·К), через коэффициенты теплоотдачи горячей и холодной сред и коэффициент теплопроводности материала змеевика:

$$k_l = \frac{1}{1/(\alpha_1 \cdot d_{зм}^{вн}) + 1/2\lambda \ln(d_{зм}^{нар}/d_{зм}^{вн}) + 1/(\alpha_2 \cdot d_{зм}^{нар})}, \quad (6)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи от теплоносителя к стенке змеевика и от стенки змеевика к воде цистерны соответственно, Вт/(м²·К), определяются через критерии подобия;
 $d_{зм}^{вн}$ и $d_{зм}^{нар}$ — соответственно внутренний и наружный диаметры змеевика, м;
 λ — теплопроводность материала стенки змеевика, Вт/(м·К).

Линейная плотность теплового потока (тепловая мощность 1 м змеевика) составит:

$$q_l = k_l \cdot \pi \cdot \Delta t_{ср}. \quad (7)$$

Внутри труб (змеевиков) имеет место вынужденное турбулентное движение теплоносителя, в цистернах — свободная конвекция нагреваемой среды, ламинарный режим.

Для расчета свободной конвекции вдоль вертикальных стенок цистерны возможно использовать формулу, предложенную академиком М.А. Михеевым:

$$Nu = 0,63 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}. \quad (8)$$

Для расчета теплоотдачи при свободной конвекции у горизонтальных труб и вдоль горизонтальных стенок цистерны используется формула, полученная И.М. Михеевой:

$$Nu = 0,5 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}. \quad (9)$$

При расчетах по формуле выше полученное значение умножается на коэффициент 1,3 для горизонтальной поверхности, обращенной вверх, и на коэффициент 0,7 для поверхности, обращенной вниз.

Течение теплоносителя внутри змеевика для термальных масел при скоростях около 2 м/с во всех случаях будет турбулентным, поэтому для определения следует использовать формулу:

$$Nu = 0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}. \quad (10)$$

Расчет коэффициента теплопередачи от теплоносителя внутри змеевика к воде в цистерне представлен в табл. 2.

Для БЦ в первом приближении приняты трубы 44,5 × 4,5 мм из нержавеющей стали.

Таблица 2

Расчет коэффициента теплопередачи для змеевика обогрева

Параметр	Наименование	Размерность	Источник	Значение
$d_{3м}^{вн}$	Внутренний диаметр трубы змеевика	м	Принято	0,036
$d_{3м}^{нар}$	Наружный диаметр трубы змеевика	м	Принято	0,045
Re_1	Число Рейнольдса для теплоносителя	—	$w \cdot d_{3м}^{вн} / \nu_{тн}$	45000
Pr_1	Число Прандтля для теплоносителя	—	$M_{тн} \cdot c_{тн} / \lambda_{тн}$	15,58
Nu_1	Число Нуссельта для теплоносителя	—	$0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} (Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25}$	361
α_1	Коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к змеевику	Вт/(м ² ·К)	$Nu_1 \cdot \lambda_{тн} / d_{3м}^{вн}$	3931,4
β	Коэффициент объемного расширения воды	1/°С	справочное	0,0007
Pr_2	Число Прандтля для воды	—	справочное	12,67
Gr_2	Число Грасгофа для воды	—	$g \cdot d_{3м}^{нар 3} \cdot \beta \cdot \Delta t_{ср} / \nu_{в}^2$	11791327
Nu_2	Число Нуссельта для воды	—	$0,5 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} (Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25}$	55,28
α_2	Коэффициент теплоотдачи от змеевика к воде	Вт/(м ² ·К)	$Nu_2 \cdot \lambda_{в} / d_{3м}^{нар}$	687,95
k_l	Линейный коэффициент теплопередачи от теплоносителя к воде	Вт/(м·К)	п. 2.2	21,58
q_l	Линейная плотность теплового потока	Вт/м	$k_l \cdot \pi \cdot \Delta t_{ср}$	4049,6

2.5. Расчет длины змеевика.

Для расчета длины змеевиков определяется общее количество теплоты, передаваемое от змеевика к балластной воде за требуемое время нагрева, $Q_{3м}$, кВт:

$$Q_{3м} = Q_{пол} + Q_{пот} \quad (11)$$

где $Q_{пол}$ — полезное количество теплоты, необходимое для подогрева соответствующего объема жидкости до требуемой температуры за заданный промежуток времени, кВт;

$Q_{пот}$ — потери тепла от воды в БЦ в окружающую среду, кВт (морскую воду, наружный воздух, среду смежных помещений).

Полезная тепловая мощность рассчитывается через массу нагреваемой жидкости G , ее теплоемкость c и температурный перепад Δt с учетом времени нагрева τ :

$$Q_{пол} = \frac{G \cdot c \cdot \Delta t}{\tau} \quad (12)$$

Тепловые потоки через ограждающие цистерну поверхности (потери тепла) определяются в соответствии с законом Ньютона — Рихмана через коэффициент теплоотдачи от среды к стенке α , площадь стенки F и перепад температур между средней температурой нагреваемой среды и температурой стенки ΔT :

$$Q_{пот} = \alpha \cdot F \cdot \Delta T \quad (13)$$

Потери тепла для участков, контактирующих с водой, практически полностью определяются теплоотдачей конвекцией.

Для участков, граничащих с наружным воздухом, РД, помимо конвекционной, рекомендует учитывать лучистую составляющую теплообмена. Ввиду сложности соответствующих расчетов рекомендуется принять потери излучением в размере 10 % от потерь конвекцией.

Таким образом, потери тепла на том или ином участке стенки танка определяются как сумма конвекционной и лучистой составляющих, при этом лучистой в большинстве случаев можно пренебречь:

$$Q_{пот} = Q_{к} + Q_{л} \quad (14)$$

Коэффициенты теплоотдачи α определяются через критерии Прандтля и Грасгофа с учетом температуры стенки на каждом участке по формулам табл. 2, при этом в качестве характерного линейного размера принимается длина участка.

Длина змеевика определяется как отношение тепловой мощности змеевика $Q_{зм}$ к линейной плотности теплового потока q_l :

$$L = Q_{зм}/q_l. \quad (15)$$

Результаты расчета для рассматриваемого примера приведены в табл. 3.

Знак (—) в значении тепловых потерь указывает на теплоприток в цистерну (температура стенки на соответствующем участке выше расчетной температуры воды в цистерне).

Таблица 3

Результаты расчета										
Параметр	Наименование	Размерность	Формула	Значение параметра						
				Уч. 1	Уч. 2	Уч. 3	Уч. 4	Уч. 5	Уч. 6	Уч. 7
$V_{ц}$	Объем цистерны	м ³		172						
$G_{в}$	Масса воды в цистерне	кг	$V_{ц} \cdot \rho_{в}/1000$	176300						
α	Коэффициент теплоотдачи конвекцией	Вт/(м ² ·К)	$Nu_1 \cdot \lambda_{воды}/L_{уч}$	39,0	116,3	138,6	79,2	259,8	152,6	161,4
$t_{ст}^{уч}$	Температура стенки	°С	принята	−0,5	1	4	−0,5	−15	−10	−11
$t_{нар}^в$	Температура наружного воздуха	°С	ТЗ					−30	−20	
$t_{пом}^в$	Температура воздуха в помещении	°С	принята		+2	+12				−22
t_k	Конечная температура воды в цистерне	°С	принята	+1						
$F_{уч}$	Площадь участка	м ²	По чертежу	24,9	20,5	40,9	48,9	12,5	24,9	19,3
$Q_k^{уч}$	Потери тепла от воды в цистерне в окружающую среду конвекцией	кВт	$\alpha \cdot F \cdot \Delta T$	0,5	−2,4	−22,6	2,0	48,6	38,1	34,3
Q_l	Потери тепла от воды в цистерне излучением в окружающую среду	кВт	$0,1 \cdot Q_{конв}$	—	−0,2	−2,3	—	4,9	3,8	3,4
$Q_{пот}$	Общие теплопотери	кВт	$Q_k + Q_l$	108,1						
τ	Время нагрева	с	принято	10800						
$Q_{пол}$	Полезная мощность нагрева	кВт	$G_{в} \cdot c_{в} \cdot \Delta T_{в}/\tau$	190,5						
$Q_{зм}$	Тепловая мощность змеевика	кВт	$Q_{пол} + Q_{пот}$	298,6						
$G_{тн}$	Расход теплоносителя	кг/с	$Q_{зм}/(c_{тн} \cdot \Delta T_{тн})$	3,97						
$l_{зм}$	Длина змеевика	м	$Q_{зм}/q_l$	73,7						

Для бортовых балластных цистерн расчет производится для одной из симметричных цистерн.

Отметим, что полученные значения тепловой мощности соответствуют режиму подогрева воды в цистерне. Для подогретой цистерны используется режим поддержания температуры, на котором подводимое количество теплоты равно тепловым потерям в окружающую среду.

ВЫВОДЫ

Проектирование судовых систем обогрева балластных танков — сложная инженерная задача, включающая нахождение тепловых потерь от цистерны в окружающую среду, определение длины змеевиков и расхода теплоносителя. От правильности расчетов указанных систем зависит функционирование балластной системы судна, трассировка трубопроводов и выбор судовой котельной установки. При расчетах мощности судовых систем обогрева балласта основной проблемой остается нахождение коэффициентов теплоотдачи. Использование для определения указанных коэффициентов действующей отраслевой НТД затруднено в связи с недостаточной определенностью в части применения расчетных зависимостей к конкретным условиям и отсутствием данных по используемым в настоящее время теплоносителям. Расчет рекомендуется

проводить с использованием стандартных критериальных уравнений по методике, представленной в настоящей работе. Коэффициенты, входящие в основные расчетные зависимости, подлежат уточнению после проведения экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД5Р.5524-82 Системы подогрева жидких грузов морских нефтеналивных судов. Правила и нормы проектирования.
2. РД5Р.113-85 Система подогрева жидкостей в судовых цистернах. Правила проектирования.
3. Котлы // Bel-Okna.ru. [Электронный ресурс] URL: <https://bel-okna.ru/foto/maslyanyj-kotel> (дата обращения: 12.02.2025).
4. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. VIII. Системы и трубопроводы / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
5. Дубинкина А.Д. Расчет системы обогрева балластных цистерн / А.Д. Дубинкина, Н.В. Дятлов, Е.Н. Алексин // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2022. — № 3-2.
6. Алексин Е.Н. Неатомные ледоколы нового поколения / Е. Н. Алексин // Наука и технологии — 2023: сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., Петрозаводск, 5 декабря 2023 г. — Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2023. — С. 13 — 17.
7. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: уч. пос. / В.В. Нащокин. М.: Высшая школа, 1975. — 496 с.

REFERENCES

1. RD5R.5524-82 Sistemy podogreva zhidkikh грузов morskikh neftenalivnykh sudov. Pravila i normy proektirovaniya [Heating systems for liquid cargoes of marine oil-loading vessels. Design rules and regulations].
2. RD5R.113-85 Sistema podogreva zhidkosti v sudovykh tsisternakh. Pravila proektirovaniya [The system of heating liquids in ship tanks. Design rules].
3. Kotly [Boilers]. Bel-Okna.ru. URL: <https://bel-okna.ru/foto/maslyanyj-kotel> (accessed 12.02.2025).
4. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part VIII. Systems and Pipelines / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
5. Dubinkina A.D., Dyatlov N.V., Aleksin E.N. Raschet sistemy obogreva ballastnykh tsistern [Calculation of the ballast tank heating system]. *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta [Science Week of St. Petersburg State Maritime Technical University]*. 2022. No. 3-2.
6. Aleksin E.N. Neatomnye ledokoly novogo pokoleniya [New generation non-nuclear icebreakers]. *Nauka i tekhnologii — 2023 [Science and Technology — 2023: coll. of articles of the III International research and practice conf., Petrozavodsk, December 5, 2023]*. Petrozavodsk: Mezhdunarodnyi tsentr nauchnogo partnerstva “Novaya Nauka”, 2023. P. 13 — 17.
7. Nashchokin V.V. Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha [Technical thermodynamics and heat transfer: textbook]. Moscow: Vysshaya shkola, 1975. 496 p.