

УДК 620.92
EDN IHWAOE

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЗАБОРТНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

В.К. Шурпьяк, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

А.В. Рогозин, ст. преп., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008 Россия, Санкт-Петербург, Лощманская ул., 3, e-mail: rock66@mail.ru

А.А. Михеева, вед. специалист по НИР, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А; аспирант, Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

Целью статьи является рассмотрение проблем двухконтурных и одноконтурных систем охлаждения для повышения их надежности. В статье рассматриваются причины аварий на судах, связанные с затоплением машинных отделений из-за коррозионных разрушений труб и элементов в двухконтурных системах охлаждения. Указывается, что, несмотря на нормативные требования Регистра, направленные на повышение надежности таких систем, проблемы коррозионного износа трубопроводов остаются актуальными и влияют на эксплуатацию судов. Для полного исключения опасностей затопления предлагается более широко применять одноконтурные системы с забортными охладителями. Отмечается главное ограничение для более широкого применения забортных теплообменных аппаратов: низкий коэффициент теплообмена, обусловленный естественной циркуляцией забортной воды в теплом ящике и ограничениями в Правилах Регистра по применению килевых охладителей для судов ледового класса. Для расширения практики применения забортных охладителей на судах предлагается ввести в Правила Регистра определение «обшивочный охладитель». Это позволит применять к таким охладителям требования менее строгие по сравнению с килевыми охладителями, что позволит расширить их применение на судах ледового плавания. Для интенсификации теплообмена в забортных охладителях предлагается оптимизировать конструкцию тепловых и кингстонных ящиков следующим путем: организовать в них естественную циркуляцию или создать принудительную циркуляцию забортной воды через охладитель с помощью водоструйного эжектора, используя водопожарную систему.

Ключевые слова: система охлаждения, замкнутая система охлаждения, теплообменные аппараты, забортные теплообменные аппараты.

Для цитирования: Шурпьяк В.К. Применение различных схем охлаждения забортных теплообменных аппаратов / В.К. Шурпьяк, А.В. Рогозин, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 155 — 171. — EDN IHWAOE.

APPLICATION OF VARIOUS COOLING SCHEMES FOR OUTBOARD HEAT EXCHANGERS

V.K. Shurpyak, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

A.V. Rogozin, Assistant Professor, Saint Petersburg State Maritime Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: rock66@mail.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 purpose of the article is to consider the problems of dual-circuit and single-circuit cooling systems to improve reliability. The article discusses the causes of accidents on ships related to flooding of engine rooms due to corrosion damage to pipes and elements in two-circuit cooling systems. It is pointed out that, despite the regulatory requirements of the Register aimed at improving the reliability of such systems, the problems of corrosion wear of pipelines remain relevant and affect the operation of ships. To completely eliminate the dangers of flooding, it is proposed to use single-circuit systems with outboard coolers more widely. The main limitation for the wider use of outboard heat exchangers is noted: a low heat transfer coefficient due to the natural circulation of outboard water in a warm box and restrictions in the Register Rules for the use of keel coolers for ice-class vessels. To expand the use of outboard coolers on ships, it is proposed to introduce a new type of cooler in the Register Rules, the definition of which is proposed to be added to the Register Rules. This will make it possible to apply less stringent requirements to such coolers compared to keel coolers, which will expand their use on ice navigation vessels. To intensify heat exchange in outboard coolers, measures are proposed to optimize the design of thermal and kingston boxes by organizing natural circulation in them or creating forced circulation of outboard water through the cooler using a water jet ejector using a fire protection system.

Keywords: cooling system, closed cooling system, heat exchangers, outboard heat exchangers.

For citation: Shurpyak V.K., Rogozin A.V., Mikheeva A.A. Application of various cooling schemes for outboard heat exchangers. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 155 — 171. EDN IHWAOE. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным об аварийности мирового торгового флота [1 — 3], за последние десятилетия произошло значительное уменьшение числа аварийных случаев при одновременном увеличении количества судов и суммарного тоннажа. Согласно приведенной статистике, наиболее часто встречающейся причиной аварий (55 % и более случаев) была потеря плавучести в результате затопления помещений судна. К сожалению, в упомянутых источниках не указаны причины затопления и источники поступления воды — в результате течи в корпусных конструкциях или в результате отказа в системах забортной воды. Данное наблюдение хорошо перекликается с анализом аварийности на судах с классом Регистра, выполненным еще в 2005 году [4], где в качестве одного из выводов особо указано: «все виды механического оборудования (за исключением систем забортной воды) не вырабатывают свой ресурс за время эксплуатации судна, т.е. ресурс судна в целом определяется износом корпуса».

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ ЗАБОРТНОЙ ВОДЫ

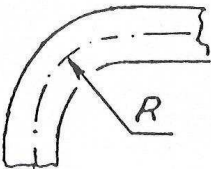
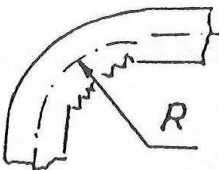
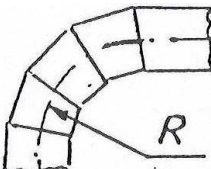
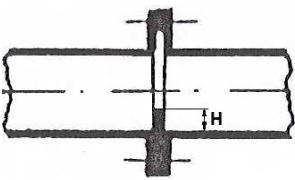
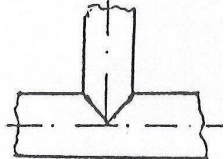
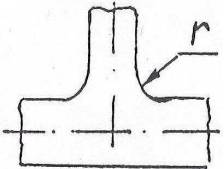
Одной из наиболее ответственных систем на судне, выход из строя которой приводит к потере хода судна и серьезным авариям, является система охлаждения СЭУ. Неоднократные случаи затопления машинных отделений на судах вследствие коррозионного разрушения труб и приемных патрубков систем охлаждения забортной водой потребовали принятия многочисленных срочных изменений в нормативных документах Регистра. После затоплений машинных отделений на судах «Аскания Нова» и «Dream», гибели судна «Авиор» и других серьезных происшествий на судах в начале 2000-х годов были приняты дополнительные требования Регистра к системам забортной воды. Изменения включали в себя требования по ограничению скорости потока в системах забортной воды, защите от контактной коррозии, горячему цинковому покрытию стальных труб и конструктивному исполнению приемных и отливных патрубков. Перечисленные конструктивные требования были внедрены в часть VIII «Системы и трубопроводы» Правил классификации и постройки морских судов (далее — Правила Регистра) и применяются для судов, построенных после 1999 года. Кроме этого, для контроля текущего износа элементов систем охлаждения забортной водой были введены требования о периодических измерениях остаточной толщины стенок приемных патрубков и межкингстонных перемычек после 10 лет эксплуатации (начиная со второго очередного освидетельствования). Все перечисленные меры положительно сказались на надежности систем охлаждения, и случаи затопления машинных отделений в настоящее время не фиксируются, но тем не менее опасность затопления помещений на судах в результате коррозионных повреждений трубопроводов систем охлаждения забортной водой по-прежнему остается актуальной и будет оставаться таковой, пока существуют трубопроводы забортной воды.

Безопасная эксплуатация трубопроводов забортной воды требует дополнительных затрат на проведение периодической диагностики и замены изношенных труб, так как ресурс трубопроводов забортной воды по-прежнему значительно меньше ресурса механизмов и судна в целом. В табл. 1 [5] приведены результаты расчета показателей безотказности и долговечности для некоторых элементов трубопроводов из медно-никелевого сплава МНЖ5-1 при средней скорости потока 2,5 м/с и толщине стенки труб 2,5 мм; расчет выполнен согласно РД5.5104-79 «Методика расчёта безотказности и долговечности элементов и допустимые скорости потока морской воды» [6]. В качестве показателя безотказности принята средняя наработка до отказа $T_{ср}$, а долговечности — средний ресурс до списания T_p . Из таблицы следует, что среднее значение жизни такой трубы, изготовленной из медно-никелевого сплава, составляет всего порядка 11 лет, но есть элементы трубопроводов, которые уменьшают среднюю наработку до отказа $T_{ср}$ до 5 лет.

Рассчитанная по той же методике средняя наработка до отказа трубопроводов, изготовленных из оцинкованной стали с толщиной покрытия 50 мкм в зависимости от диаметра трубопровода для различных значений средней скорости потока, показана на диаграмме на рис. 1 [7]. Расчет показателей долговечности производился для всего сортамента стальных труб при минимальной требуемой толщине стенки согласно части VIII Правил Регистра. Расчеты показывают, что средняя наработка до отказа составляет от 4 до 14 лет для труб номинальным диаметром до 200 мм.

Таблица 1

Определение показателей безотказности и долговечности (годы)

Трубопроводный элемент	Характеристики*	Охлаждение забортной водой		Водяное пожаротушение	
		$T_{ср}$	T_p	$T_{ср}$	T_p
Отвод гнутый 	$R/D = 1,5$	11,9	10,2	18,3	15,7
	$R/D = 2,0$	18,4	15,7	25,8	22,0
	$R/D = 2,5$	29,3	25,1	35,7	30,5
Отвод гнутый с гофрами 	$R/D = 1,5; h/D = 0,09$	7,41	6,33	12,2	10,5
Отвод, сваренный из секторов 	$R/D = 1,5$	7,40	6,3	12,2	10,4
	$R/D = 2,0$	9,35	7,99	15,0	12,8
Фланцевое соединение с выступающей внутрь прокладкой 	$H/D = 0,2$	4,34	3,72	7,54	6,44
	$H/D = 0,1$	5,01	4,28	8,60	7,35
Тройник прямой сварной 	$r/D = 0$	5,0	4,3	8,5	7,4
Тройник прямой со скругленными кромками 	$r/D = 0,1$	9,40	8,03	15,0	12,8
	$r/D = 0,3$	12,8	10,9	19,4	16,6

* D — диаметр трубы; R — средний радиусгиба; h — высота гофров; r — радиус скругления кромки; H — высота выступающей внутрь прокладки.

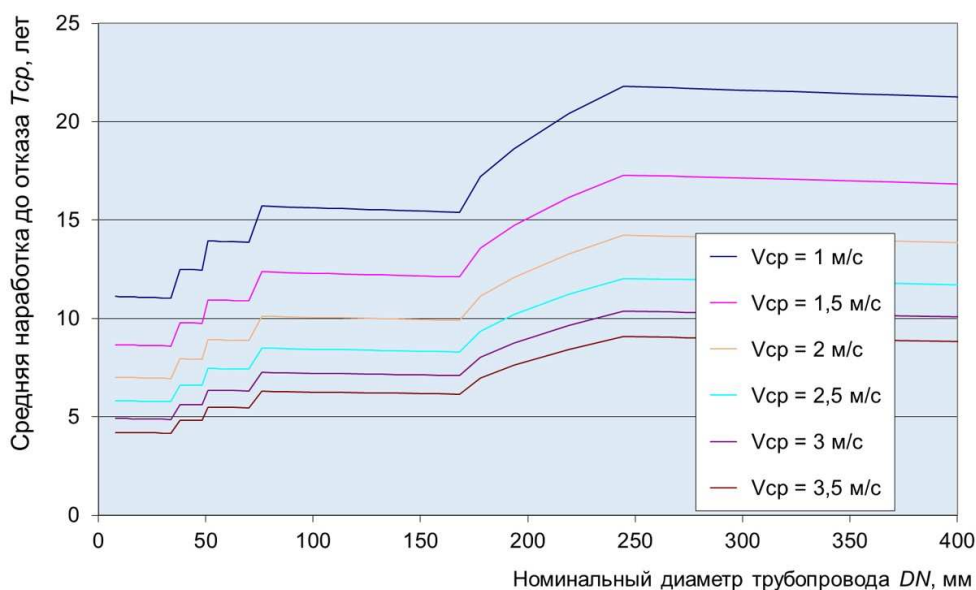


Рис. 1. Средняя наработка до отказа стальных труб морской воды с толщиной стенки согласно части VIII Правил Регистра и УТ МАКО URP2

Здесь можно сделать первый промежуточный вывод: повышение надежности судовых систем охлаждения забортной водой за счет повышения надежности трубопроводов либо связано с применением дорогостоящих материалов (титановых сплавов, пластмасс, дорогостоящих покрытий труб), либо требует значительного снижения скорости потока в трубах при увеличении диаметров трубопроводов. Последнее зачастую невозможно в судовых условиях из-за ограниченного пространства в машинном отделении.

Более радикальный способ обеспечения безопасности от затопления машинного отделения связан с отказом от трубопроводов забортной воды в системах охлаждения и применением замкнутой одноконтурной системы, преимущества и недостатки которых рассмотрим далее с целью определения пробелов в действующих нормативных документах.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СЭУ

Известно, что основное назначение системы охлаждения — это обеспечение отвода тепла от различных механизмов, устройств, приборов через теплообменные аппараты (ТА). В дизельных установках система охлаждения применяется для охлаждения рабочих цилиндров двигателей, ТА циркуляционной масляной системы, наддувочного воздуха, газовыпускного коллектора.

По своему конструктивному исполнению системы охлаждения, как и другие судовые системы, делятся на проточные (одноконтурные) и циркуляционные (замкнутые). В проточных системах холодоноситель берется из внешней среды вне системы и после охлаждения работающего оборудования возвращается в окружающую среду. На судах в качестве холодоносителя в проточных системах охлаждения может быть использована забортная вода или наружный воздух. Применение воздуха в одноконтурных проточных системах на судах не находит применения из-за низкой теплоемкости воздуха, но применяется для охлаждения некоторых видов электрического и электронного оборудования. Главным ограничением применения одноконтурных систем, использующих забортную воду в качестве холодоносителя, является температура ее нагрева, так как в случае охлаждения проточной системой забортной воды при температурах выше 45°C из соленой воды начинают выделяться растворенные соли. В результате отложения солей уменьшается теплообмен от деталей двигателя воде, что приводит к повышенным тепловым напряжениям, снижению надежности и экономичности двигателя. На современных судах примерами проточных одноконтурных систем охлаждения забортной водой могут быть системы охлаждения дейдвудного устройства, подшипников валопровода и некоторых шлюпочных двигателей.

В циркуляционных системах по замкнутому контуру многократно проходит постоянное количество охлаждающего вещества, а тепло от него отводится через ТА к охлаждающему рабочему телу второго контура, который выполняется в виде проточной системы. В этом случае в охлаждении принимают участие

два потока, а системы называют двухконтурными. Применяемые в судовых дизельных энергоустановках замкнутые системы охлаждения позволяют использовать пресную воду в качестве холодоносителя в замкнутом контуре охлаждения, что сохраняет от отложений полости охлаждения двигателя и позволяет поддерживать наиболее благоприятную температуру воды охлаждения, регулируя ее в соответствии с режимом работы двигателя. До конца прошлого столетия системы охлаждения дизельных энергетических установок почти всегда двухконтурные: двигатели охлаждаются пресной водой замкнутого контура, которая, в свою очередь, охлаждается забортной водой в специальном холодильнике. В качестве циркуляционных насосов пресной и забортной воды используются центробежные насосы.

При этом в качестве теплоносителя во втором внешнем контуре охлаждения в таких системах могут использоваться вода или воздух. Применение воздушного охлаждения имеет целый ряд преимуществ, прежде всего это отсутствие труб забортной воды, приемных фильтров и кингстонных ящиков. Но так как вода обладает гораздо большей теплоемкостью по сравнению с воздухом и в связи с доступностью на судне забортной воды для охлаждения, воздушные системы не получили широкого применения на морских судах, воздушные системы охлаждения нашли применение в судовых аварийных дизель-генераторах небольшой мощности, обычно до 200 кВт.

В настоящее время на судах наибольшее распространение получили двухконтурные системы охлаждения, внутренний контур предусматривает циркуляцию пресной воды по замкнутому контуру с помощью специальных насосов охлаждения, которые могут быть навешенными на главный двигатель (ГД) или иметь электрический привод. Второй внешний контур таких систем предусматривает использование забортной охлаждающей воды, прием которой происходит в кингстонном или ледовом ящике. Для циркуляции в контуре забортной воды обычно предусматривается не менее двух независимых насосов с приводом от электродвигателя. Пример двухконтурной системы охлаждения показан на рис. 2, где на схеме синим цветом показана система охлаждения забортной водой с двумя кингстонными ящиками, межкингстонной перемычкой с приемными фильтрами, циркуляционными насосами, ТА контура охлаждения двигателя пресной водой. Несмотря на то, что контур забортной воды обычно изготавливается из дорогостоящих цветных металлов, трубы систем охлаждения забортной водой остаются одним из наиболее ненадежных элементов СЭУ [8]. Кроме того, работа двухконтурной системы охлаждения связана с дополнительными затратами энергии на привод насоса охлаждения забортной водой, что сказывается на показателях энергоэффективности судна [9].

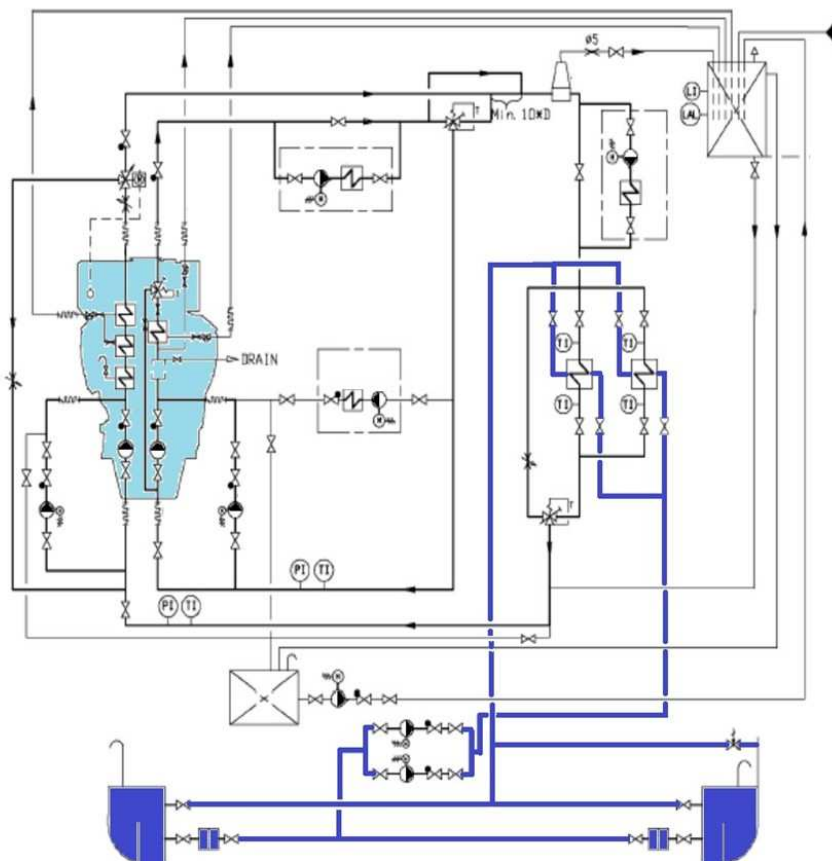


Рис. 2. Схема двухконтурной системы охлаждения

ОДНОКОНТУРНЫЕ ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Начиная с конца прошлого века на морских судах и судах типа «река-море» наметилась новая тенденция развития систем охлаждения. Кратко ее можно изложить следующим образом: при отказе от применения двухконтурных систем охлаждения вместо системы охлаждения забортной водой используются либо охладители пресной воды, расположенные в кингстонных ящиках, либо корпусные конструкции, охлаждаемые непосредственно забортной водой. Обычная типовая схема работы системы охлаждения с расположенными в кингстонном ящике охладителями показана на рис. 3.

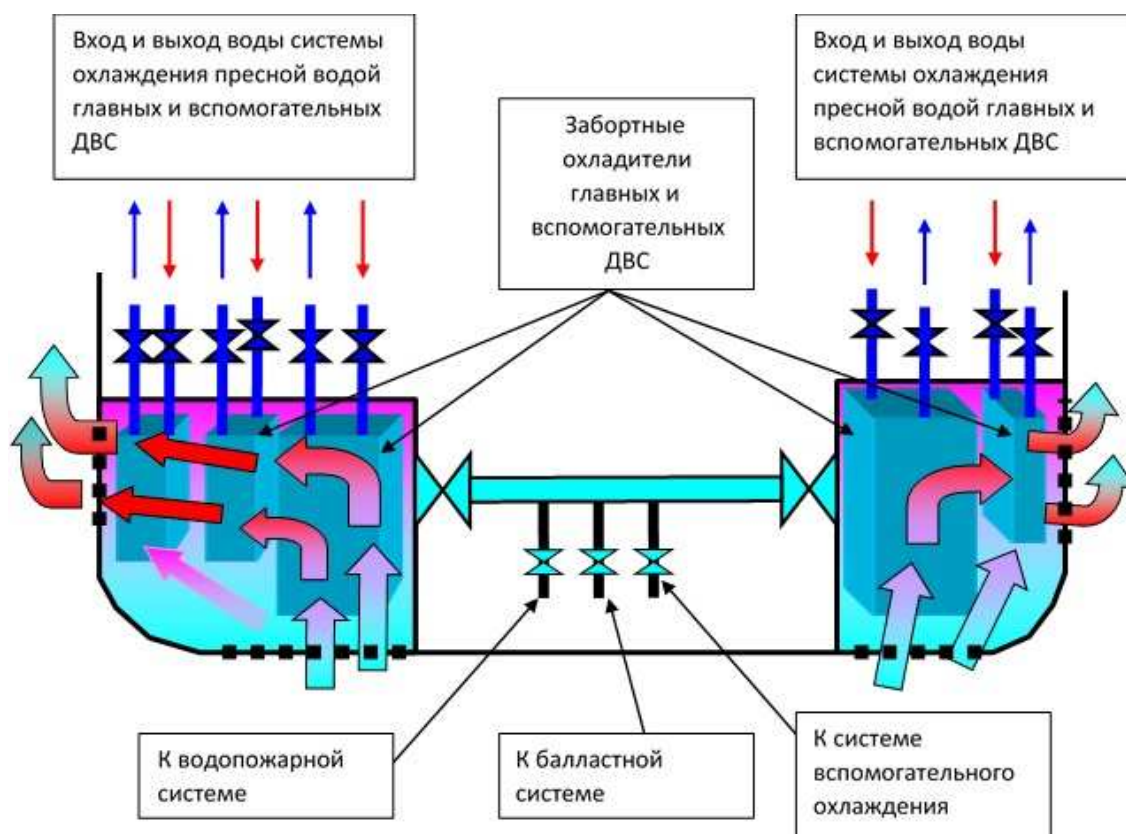


Рис. 3. Принцип работы системы охлаждения с проточными забортными охладителями

В настоящее время на судах наибольшее распространение получили забортные охладители проточного типа, расположенные в специальных выгородках, которым в Правилах Регистра дается определение «ящик проточного охладителя» и которые одновременно могут выполнять функцию кингстонных или ледовых ящиков. В качестве проточных охладителей используются ТА с горизонтально расположенной трубной доской и U-образными трубками из медных сплавов, обычно скрепленными несколькими горизонтальными промежуточными диафрагмами, предотвращающие вибрацию тонкостенных труб. Пример такого охладителя показан на рис. 4, где показан забортный ТА фирмы BLOXMA. На рис. 5 показан пример расположения проточного забортного охладителя в машинном отделении буксира.

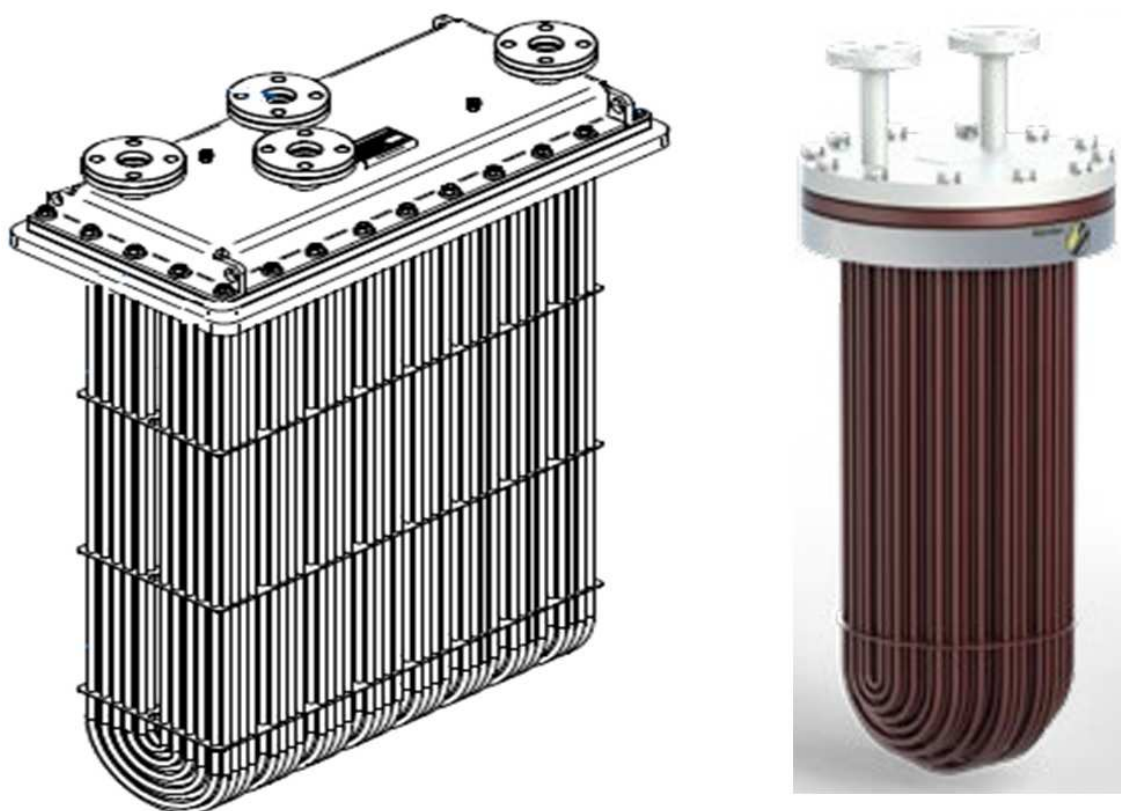


Рис. 4. Забортный охладитель проточного типа для главного двигателя (слева) фирмы BLOKLAND и для вспомогательного дизель-генератора (справа) фирмы KELVION

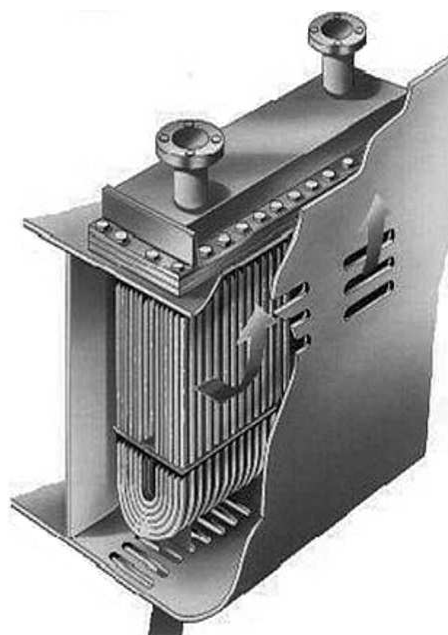


Рис. 5. Расположение забортного охладителя проточного типа в машинном отделении буксира «CASTOR» (слева) и расположение теплообменного аппарата в выгородке теплообменного ящика (справа) по материалам фирмы BLOXMA

Другой способ организации теплообмена в системе охлаждения без использования трубопроводов забортной воды предусматривает использование забортных килевых охладителей, то есть специальных ТА или каналов, вынесенных за пределы наружной обшивки. Килевой охладитель — это подвесной ТА, прикрепленный к подводной части корпуса судна. Килевые охладители могут быть выполнены в виде труб (рис. 6 справа), змеевиков, каналов (рис. 7) или специально изготовленного ТА (рис. 6 слева), материал которого должен быть совместим с материалом корпуса судна для предотвращения гальванической коррозии. На рис. 7 показан буксир с килевым забортным охладителем, выполненным в виде каналов, приваренных к корпусу судна.



Рис. 6. Килевые забортные охладители фирмы Duramax Marine: забортные аппараты (слева) и пучки труб (справа)

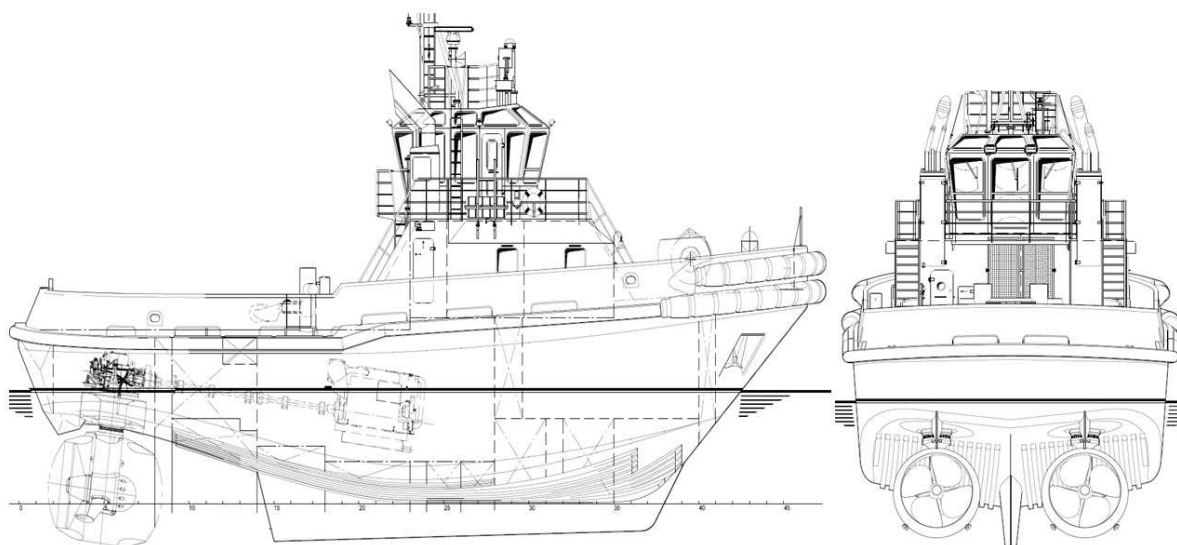


Рис. 7. Буксир с килевым забортным охладителем, выполненным в виде каналов, приваренных к корпусу судна

Отличительной чертой всех килевых охладителей являются поверхности теплообмена, выступающие за пределы наружной обшивки, в результате чего велика вероятность их повреждения при столкновении с препятствиями, плавающими в воде предметами и льдом. Поэтому Правилами Регистра по применению таких систем накладывается несколько дополнительных ограничений для судов с ледовым классом, о чем будет рассказано далее.

Один из возможных вариантов использования корпусных конструкций в качестве охладителей показан на рис. 8, подробные исследования таких систем приведены в [10]. В конструкциях этого типа нет выступающих за пределы корпуса поверхностей теплообмена, в качестве них выступает наружная обшивка, повреждение которой значительно менее вероятно по сравнению с ТА и трубами, расположенными вне корпуса судна. Тем не менее Правила Регистра не разделяют теплообменные системы такого типа и килевые, поэтому все ограничения, накладываемые на килевые охладители, в настоящее время применимы к таким системам.

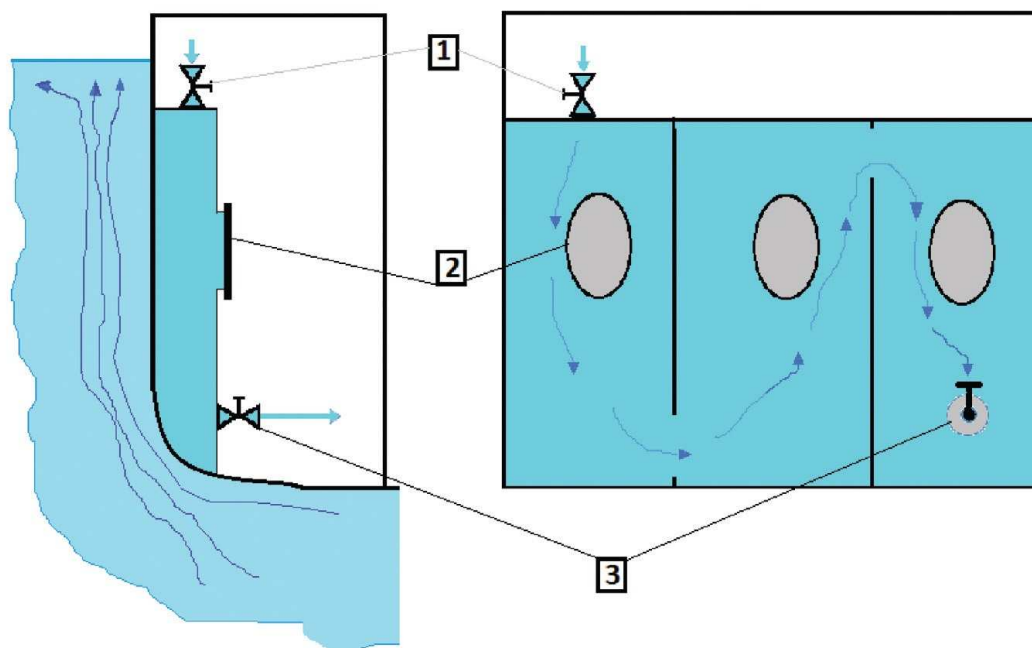


Рис. 8. Схема работы забортного охладителя, использующего наружную обшивку в качестве поверхности теплообмена:
1 — приемный клапан; 2 — горловина лаза одного из каналов охлаждения; 3 — отливной клапан

ТРЕБОВАНИЯ ПРАВИЛ РЕГИСТРА К СИСТЕМАМ С ЗАБОРТНЫМИ ОХЛАДИТЕЛЯМИ

Требования к системам с килевыми охладителями появились в Правилах Регистра в 1999 году. Определение килевого охладителя тогда в Правилах дано не было, поэтому первоначально все забортные охладители рассматривались как килевые и к ним применялись одинаковые ограничения без учета особенностей конструкции: не допускалось применение на ледоколах и судах ледового плавания категорий ЛУ4 — ЛУ9 (Arc 4 и Arc 9 в современной классификации). Кроме того, в системе, помимо основного охладителя, присутствовал резервный забортный охладитель, который может быть общим для нескольких главных двигателей. В Правилах 2016 года, в разделе 15.6 части VIII, содержащем требования к системам с килевыми охладителями, появилось допущение, позволяющее использовать такие системы для судов с классом Arc 4 в случае, если толщина стенок каналов теплообменника имеет величину не менее толщины бортовой обшивки судна. При этом допущено не устанавливать резервный охладитель для двух главных двигателей, если система позволяет работать двум двигателям с использованием одного охладителя. Кроме того, для судов с ограниченным районом плавания резервирование охладителей не требуется вообще.

Правила Регистра начиная с издания 2017 года существенно расширили допускаяемую область применения таких систем: в части VIII были введены определения проточных охладителей (теплообменные аппараты, расположенные в специальных выгородках) и килевых (поверхностями теплообмена служат корпусные конструкции, через которые прокачивается охлаждающаяся среда). Для каждой из этих групп были определены ограничения в зависимости от ледового класса судна. В результате появления в Правилах 2017 года определений килевых и проточных охладителей ограничения по применению проточных забортных охладителей на судах ледового плавания были сняты.

Для дальнейшего расширения применения забортных охладителей предлагается рассмотреть разделение килевых охладителей на находящиеся за бортом и примыкающие к наружной обшивке, с использованием корпуса судна в качестве поверхности охлаждения. Для более широкого применения таких систем необходимо сформулировать их определение в части VIII Правил Регистра и указать допустимую область применения. Наиболее разумным представляется назвать такие ТА обшивочными охладителями (sidecoolers) и дать следующее определение: обшивочный охладитель — теплообменный аппарат, выполненный в виде цистерны, примыкающей к наружной обшивке судна, через которую происходит теплообмен между охлаждаемой жидкостью и забортной водой.

В результате введения такого определения в Правила Регистра появится возможность применять обшивочные охладители без ограничений по ледовому классу.

Можно предложить классификацию забортных охладителей, как показано на рис. 9. Для каждой из этих групп были определены ограничения в зависимости от ледового класса судна.



Рис. 9. Классификация забортных охладителей

ПРЕИМУЩЕСТВА ОДНОКОНТУРНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Преимущества одноконтурных систем охлаждения с забортными охладителями очевидны.

1. Существенно уменьшается потребление электроэнергии в процессе эксплуатации судна, так как нет затрат на работу насосов охлаждения забортной водой. На работу насосов охлаждения забортной водой приходится приблизительно 20 % всей вырабатываемой на ходу судна электроэнергии или примерно 0,4 — 1,0 % мощности главного двигателя (меньшее значение для двигателей большей мощности), то есть для среднетоннажного судна мощность привода насоса охлаждения забортной водой составляет 15 — 20 кВт. Если учесть, что для привода насоса мощностью 15 кВт требуется приблизительно 3 литра топлива в час, то можно подсчитать, что годовая экономия топлива для судна с коэффициентом ходового времени 0,5 составит 13 — 15 т [9].

2. Значительно упрощается система охлаждения, и, как следствие, повышается ее надежность. Наименее надежными элементами систем охлаждения забортной водой являются трубы, затем в порядке возрастания надежности следуют запорная арматура, насосы, ТА, контрольно-измерительные приборы. Отсутствие основных элементов системы охлаждения забортной водой значительно повышает надежность механической установки. При этом опасности, связанные с потерей хода судна, значительно уменьшаются, а опасность затопления машинного отделения в результате разрыва трубы охлаждения забортной водой исключается.

3. Существенно снижаются затраты при постройке, за счет отказа от закупок насосов забортной воды и арматуры. При этом необходимо учесть, что для уменьшения коррозионного износа в системах охлаждения забортной водой часто используют трубы и арматуру из цветных сплавов, а если используются стальные трубы, то они, согласно требованиям Регистра, должны иметь горячее цинковое покрытие. Существенно снижается общая трудоемкость постройки судна за счет уменьшения затрат на монтаж оборудования и изготовление труб.

4. Отсутствие труб забортной воды уменьшает образование конденсата в машинном отделении; как следствие, уменьшаются количество льяльных вод, связанная с этим коррозия корпусных конструкций в машинном отделении и затраты на утилизацию нефтесодержащих льяльных вод.

5. Существенно уменьшается количество донно-бортовой арматуры (ДБА) и донно-бортовых приварных приемных и отливных патрубков, что существенно уменьшает вероятность затопления машинного отделения. Не случайно, проанализировав аварии, связанные с затоплением машинных отделений, и рассмотрев опасности, связанные с отказами трубопроводов, Регистр определил [11] два наиболее опасных объекта на судне: донно-бортовые патрубки и межкингстонные переключки, к которым в настоящее время предъявляются требования по обязательным периодическим замерам толщин стенок.

6. Уменьшается объем замеров толщин стенок элементов системы охлаждения для судов в эксплуатации. Требование о замерах толщин стенок донно-бортовых патрубков появилось в связи с большой опасностью затопления помещений после их выхода из строя, так как в этом случае невозможно остановить поступление воды путем закрытия донно-бортовой арматуры. С учетом большого диаметра донно-бортовых патрубков и расположения их значительно ниже ватерлинии вероятность затопления машинного отделения (МО) после аварии патрубка практически 100 %. Примером может служить затопление МО на теплоходе «Аскания Нова», когда приемный патрубок был изношен до толщины бумаги. Требование о замерах толщин стенок межкингстонных переключек также появилось в связи с большой опасностью затопления МО, хотя в данном случае поступление воды можно остановить путем закрытия приемной донно-бортовой арматуры. Но в этом случае происходит неизбежная остановка главных и вспомогательных двигателей и, как следствие, на время ремонта потеря хода, управляемости, электропитания от всех источников, кроме аварийного дизель-генератора (АДГ), то есть судно попадает в ситуацию, когда до катастрофы остается один шаг. Для того чтобы произошла потеря судна, достаточно еще одного опасного события, например плохой погоды или появления другого судна, с которым невозможно избежать столкновения из-за отсутствия хода.

Хотя при использовании забортных охладителей на судне зачастую сохраняются донно-бортовые патрубки и межкингстонная переключка для балластной и пожарной систем, учитывая их назначение и кратковременный режим работы, последствия и вероятность наступления такого отказа значительно меньше. В табл. 2 приводятся типовые отказы системы охлаждения и связанные с ними опасности, дается оценка вероятности реализации этих опасностей для двух вариантов систем охлаждения.

Таблица 2

Сравнение последствий и вероятности типовых отказов двухконтурной системы охлаждения и одноконтурной с забортным охладителем

Описание отказа	Следствия отказа	Описание опасности	Оценка вероятности	
			Схема с системой охлаждения забортной водой	Схема с забортным охладителем
Выход из строя труб системы охлаждения забортной воды	1. Прием воды в МО в течение времени, необходимого на закрытие ДБА	1. Затопление машинно-котельного отделения (МКО)	1. Возможно при неверных действиях экипажа	1. Исключено
	2. Остановка ГД или дизель-генераторов	2. Потеря хода на время ремонта	2. Весьма вероятно	2. Исключено
Выход из строя межкингстонной магистрали	1. Прием воды в МО в течение времени, необходимого на закрытие ДБА	1. Затопление МКО	1. Возможно при неверных действиях экипажа. Весьма вероятно при одновременном отказе ДБА	1. Исключено
	2. Остановка ГД и дизель-генераторов (кроме АДГ)	2. Потеря хода и электропитания на время ремонта и осушения МКО	2. Неизбежно	2. Исключено
Выход из строя приемного или отливного патрубка	1. Прием воды в МО	1. Затопление МКО	1. Весьма вероятно	1. Исключено
	2. Остановка ГД и дизель-генераторов (кроме АДГ)	2. Потеря хода и электропитания	2. Весьма вероятно	2. Исключено
		3. Потеря судна	3. Возможно при неблагоприятных обстоятельствах	3. Исключено
Забивание кингстонных ящиков битым льдом и шугой	1. Нарушение охлаждения	1. Потеря хода на время очистки фильтров и обогрева кингстонных ящиков	1. Возможно при плавании в весеннем битом льду	1. Маловероятно. Возможно при производстве балластных операций

Продолжение — табл. 2

Описание отказа	Следствия отказа	Описание опасности	Оценка вероятности	
			Схема с системой охлаждения забортной водой	Схема с забортным охладителем
Выход из строя теплообменного аппарата (ТА) охлаждения пресной воды	1. Потери пресной воды	1. Переход на резервный ТА. Ремонт ТА	1. Возможен ремонт в рейсе или порту путем заглушки или подвальцовки трубок ТА. Возможна замена трубных элементов на плаву	1. Возможен ремонт в рейсе или порту путем заглушки поврежденных трубок ТА. Замена ТА возможна только в доке
	2. Попадание забортной воды в контур охлаждения пресной водой	2. Сокращение ресурса дизеля. Внеплановое техобслуживание	2. Возможно при неверных действиях экипажа	2. Возможно при неверных действиях экипажа
Обрастание ТА морскими организмами	1. Перегрев главных и вспомогательных двигателей	1. Уменьшение мощности двигателей	1. Уменьшение скорости хода. Очистка во время рейса	1. Уменьшение скорости хода. Очистка возможна только в доке

Как следует из табл. 2, большинство наиболее опасных событий, связанных с отказами системы забортной воды, при применении схемы с забортными охладителями либо полностью исключаются, либо значительно уменьшается вероятность их наступления и тяжести последствий. Только в последнем случае последствия аварии для систем охлаждения с забортными охладителями могут быть более тяжелыми, чем для двухконтурных систем охлаждения. Учитывая, что характер отказа, возникающего в результате обрастания ТА, является постепенным, необходимо периодически контролировать эффективность его работы в процессе эксплуатации.

Однако системы охлаждения с забортными охладителями не лишены недостатков. Применение забортных охладителей имеет ряд особенностей, в настоящее время ограничивающих использование таких систем, несмотря на все их преимущества. Если в обычном ТА с обеих сторон стенки, разделяющей две среды, происходит принудительный (а это значит, и регулируемый) массообмен теплоносителя, то в случае с забортным охладителем циркуляция теплоносителя естественная, а значит, и надежно рассчитать ее интенсивность гораздо сложнее. При создании замкнутых систем охлаждения разработчики сталкиваются с проблемой отсутствия необходимых, в достаточной степени достоверных методик расчета теплоотвода в забортных ТА, обеспечивающих естественную циркуляцию охлаждаемого теплоносителя с необходимой кратностью. Как известно, интенсивность теплообмена, характеризуемая коэффициентом теплоотдачи с поверхности, зависит от скорости движения жидкости, а она, в свою очередь, при естественной циркуляции зависит только от объемного температурного расширения и соответствующего повышения температуры и имеет сравнительно низкие значения коэффициентов теплопередачи, что определяет значительные площади требуемой поверхности и габариты ТА.

При этом классический прием, который широко используется при проектировании ТА, — увеличение площади поверхности теплообмена со стороны меньшего коэффициента теплоотдачи с поверхности путем оребрения труб — в данном случае практически не применим, так как значительно увеличивает интенсивность обрастания поверхностей теплообмена морскими организмами.

Таким образом для забортных охладителей, несмотря на все их преимущества, есть главное естественное ограничение по применению — низкий коэффициент теплообмена внутри теплообменного ящика, обусловленный естественной циркуляцией. Это ограничивает применение таких систем охлаждения судами с мощностью главных двигателей в несколько тысяч киловатт.

При таких условиях весьма актуальной становится разработка методов интенсификации теплообмена между поверхностью теплообмена и забортной водой.

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ЗАБОРТНЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ

С целью интенсификации теплопередачи ТА со стороны цистерны целесообразно использовать различные доступные средства организации принудительного движения внутри теплообменного ящика (ТЯ). Авторам представляется перспективным рассмотреть следующие варианты.

1. Организация естественной циркуляции в ТЯ.

Анализ применяемых конструкций ТЯ, в которых располагают забортные охладители, говорит о том, что в настоящее время производители ТА, равно как и проектировщики судовых конструкций, не занимаются их оптимизацией, и здесь существует большое поле деятельности. В частности, установка простых направляющих конструкций внутри ТЯ обещает значительное увеличение коэффициента теплоотдачи с поверхности. При этом можно сформулировать простой принцип организации естественной циркуляции в ТЯ: необходимо стремиться к отсутствию циркуляции теплоносителя внутри ТЯ при максимальной циркуляции внешнего теплоносителя (через приемную и выпускную решетки). При такой организации циркуляции теплоносителя наиболее холодная свежая забортная вода должна поступать к поверхностям нагрева и затем, осуществив теплосъем, уходить за борт, не смешиваясь с прочей водой в ТЯ. В подтверждение этого предположения ранее [12] было показано, что в условиях естественной циркуляции за счет изменения плотности нагретой воды для увеличения скорости циркуляции и массообмена большое значение имеет высота ТЯ.

2. Подача в ТЯ сжатого воздуха (барботирование).

Такой способ весьма эффективен и, по данным проведенных исследований [13], позволяет повысить коэффициент теплоотдачи в 6 — 8 раз. Однако он не применим при длительной непрерывной эксплуатации в этом режиме из-за большого расхода сжатого воздуха, запас которого должен храниться на судне для пуска главного двигателя.

3. Организация искусственной циркуляции в ТЯ.

Конструкция системы охлаждения, позволяющая работать в двух режимах, то есть без затрат энергии на прокачку воды через кингстонный ящик для обычного режима работы и с принудительной прокачкой забортной воды в режиме форсажного охлаждения, при нехватке естественной циркуляции. Эти системы можно назвать гибридными. Такая схема может быть реализована для особых режимов повышенной мощности при малых скоростях судна (например, режим буксировки) или для работы при температуре забортной воды 32 °С, что встречается довольно редко в российских широтах. Возможны следующие варианты гибридных схем.

3.1. Предусмотреть в системе отдельный резервный насос забортной воды с пластинчатым ТА в машинном отделении. Такую схему охлаждения можно назвать «смешанной», то есть работающей по обычной схеме с охлаждением через забортный охладитель и с подачей воды от кингстонного ящика с охлаждением в резервном пластинчатом ТА в случае недостатка охлаждения от забортного охладителя или его отказа. Хотя в этом случае все затраты на систему охлаждения сохраняются, расходы энергии на привод насоса охлаждения будут практически нулевыми.

3.2. Для организации искусственной циркуляции в ТЯ можно задействовать один из насосов забортной воды общесудового назначения, например пожарный, охлаждения кондиционеров, санитарный и т.п. Такой насос может забирать воду из ТЯ, увеличивая приток более холодной забортной воды. Безусловным преимуществом такой схемы является возможность реализовать ее практически без изменений в системе охлаждения. Единственное, о чем необходимо позаботиться, — это чтобы забор воды из кингстонного ящика производился из его более нагретой части, чтобы вода, попадающая в межкингстонную магистраль, прошла через охладитель, например, как это показано на рис. 10. Однако использование для этого пожарного насоса нельзя назвать энергоэффективным решением, так как пожарный насос создает высокий напор, в данном случае ненужный, а это приводит к дополнительным потерям энергии.

3.3. Использовать напор, теряемый в предыдущей схеме, возможно с помощью водоводяного эжектора, как это показано на рис. 11. Предусмотреть внутри ТЯ специальный эжектор с приводом от пожарного насоса с откачкой воды за борт. Если пожарный насос забирает уже нагретую воду, то эффективность такой работы будет повышена, по сравнению с вариантом 3.2, не менее чем в два раза.

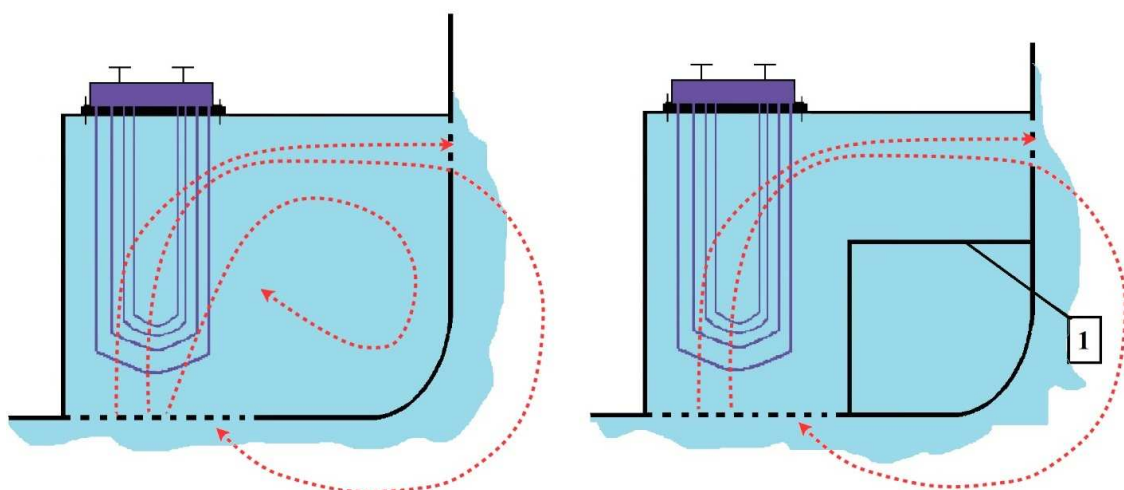


Рис. 10. Схема естественной циркуляции в теплообменном ящике:
1 — конструкции для организации потока в кингстонном ящике

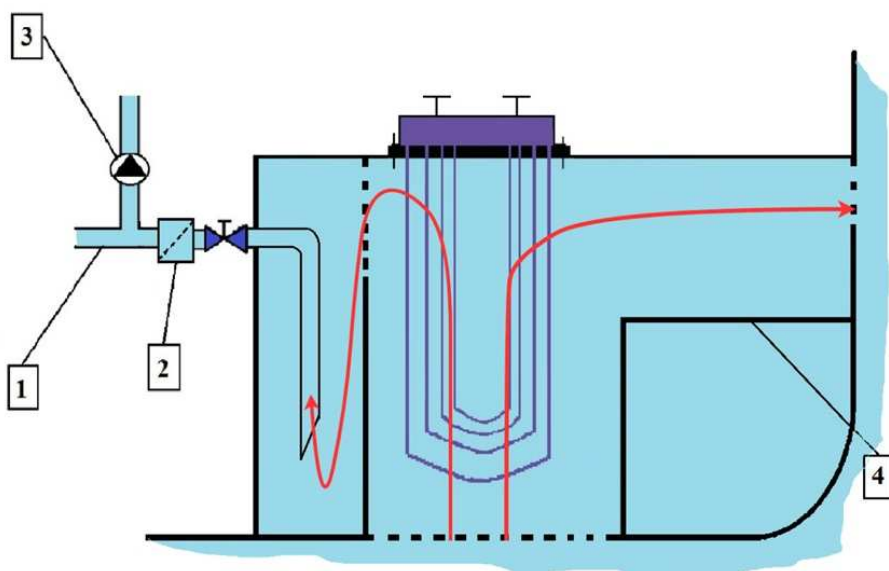


Рис. 11. Схема работы забортного охладителя с использованием пожарного насоса или другого насоса общесудового назначения:
1 — межкингстонная перегородка; 2 — фильтр забортной воды; 3 — пожарный насос;
4 — конструкции для организации потока в кингстонном ящике

Таким образом, помимо одноконтурных и двухконтурных схем системы охлаждения, появляется третий тип — гибридные схемы, использующие принудительную прокачку через теплообменный ящик. С учетом этого классификация систем охлаждения примет вид, показанный на рис. 13.

Гибридные схемы охлаждения являются более надежными, так как в случае недостаточного охлаждения и появления угрозы перегрева главного двигателя появляется возможность воспользоваться дополнительными возможностями схемы без необходимости понижения мощности. Осмысленная разработка конструктивных мер по организации массо- и теплообмена в ТЯ требует математической модели этих процессов и, возможно, модельного и натурного моделирования. При использовании гибридной схемы точность таких расчетов менее значима, работа системы возможна в двух режимах: с естественной циркуляцией (основной режим) и с принудительной циркуляцией (режим форсированного охлаждения).

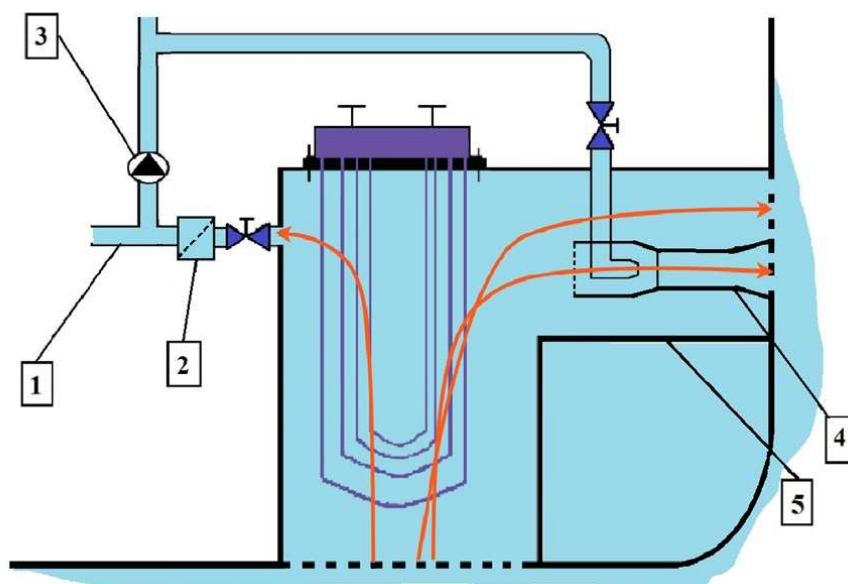


Рис. 12. Схема работы забортного охладителя с использованием водоструйного эжектора с приводом от пожарного насоса:

1 — межкингстонная перегородка; 2 — фильтр забортной воды; 3 — пожарный насос;
4 — водоструйный эжектор; 5 — конструкции для организации потока в кингстонном ящике

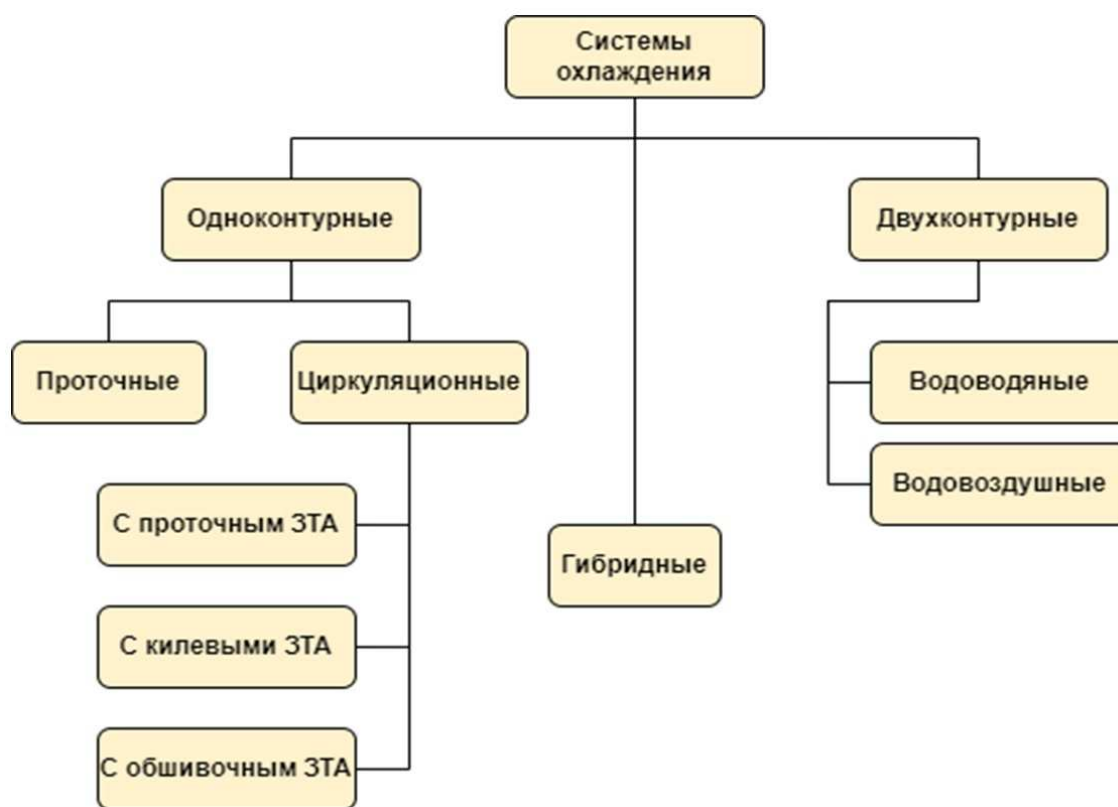


Рис. 13. Классификация систем охлаждения

ВЫВОДЫ

1. Развитие замкнутых систем охлаждения судовых энергетических установок является чрезвычайно перспективным направлением совершенствования судов. При этом, по сравнению с широко используемыми в настоящее время разомкнутыми системами, повышается надежность эксплуатации, снижается стоимость системы, обеспечивается экономия энергии и исключается уничтожение рыбных ресурсов морей и океанов.

2. Для более широкого применения забортных охладителей требуется разработать эффективные меры по интенсификации теплообмена в проточных охладителях. В качестве эффективного способа обеспечения интенсивности теплообмена в забортных ТА проточного типа предлагается использовать гибридные схемы охлаждения, которые в особо тяжелых условиях эксплуатации могут работать в режиме принудительной циркуляции воды в кингстонном ящике.

3. В процессе разбора возможных вариантов систем охлаждения сделано предложение выделить обшивочные ТА в отдельный класс, отграничив их от килевых охладителей с целью расширения области применения для систем охлаждения судов ледового плавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганнесен В.В. Аварийность морских судов и методология поиска причинно-следственных связей, приведших к аварии / В.В. Ганнесен, Е.Е. Соловьёва // Научные труды Дальрыбвтуза. — 2022. — Т. 61, № 3. — С. 70 — 76.
2. Мотрич В.Н. 2022 год: аварийность морского флота / В.Н. Мотрич // Морские вести России. — 27.10.2023. [Электронный ресурс] URL: <https://morvesti.ru/themes/1693/105728/> (дата обращения 04.02.2025).
3. Мотрич В.Н. Аварийность морского флота / В.Н. Мотрич // Морские вести России. — 24.09.2024. [Электронный ресурс] URL: <https://morvesti.ru/themes/1693/111604/> (дата обращения 04.02.2025).
4. Шурпяк В.К. Анализ аварийности на судах с классом регистра / В.К. Шурпяк, А.А. Сергеев // Научно-технический сборник / Российский морской регистр судоходства. — 2005. — № 28. — С. 32 — 46.
5. Макаров В.Г. Новые требования Регистра к защите от коррозии судовых трубопроводов / В.Г. Макаров, В.К. Шурпяк // Научно-технический сборник / Российский морской регистр судоходства. — 1999. — № 22. — С. 194 — 206.
6. РД5.5104-79 Методика расчёта безотказности и долговечности элементов и допустимые скорости потока морской воды.
7. Голуб Е.С. Оценка технического состояния трубопроводов забортной воды согласно новым документам Регистра / Е.С. Голуб, В.К. Шурпяк // Научно-технический сборник / Российский морской регистр судоходства. — 2000. — № 23. — С. 216 — 227.
8. Харламова А.Э. Анализ аварийности судов, вызванной ненадежной работой системы охлаждения судовых энергетических установок / А.Э. Харламова, М.Н. Покусаев, А.В. Трифонов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2023. — № 2. — С. 30 — 40. — DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-30-40. EDN QCWWRO.
9. Шурпяк В.К. Оценка влияния основных судовых систем на показатели энергетической эффективности судна / В.К. Шурпяк, А.А. Серов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2017. — № 48/49. — С. 95 — 103.
10. Федоровский К.Ю. Замкнутые системы охлаждения судовых энергетических установок / К.Ю. Федоровский, Н.К. Федоровская. — М.: Вузовский учебник; ИНФРА-М, 2017. — 164 с.
11. Горелик Б.А. Идентификация опасностей и оценка риска судовых трубопроводов / Б.А. Горелик, В.К. Шурпяк // Научно-технический сборник / Российский морской регистр судоходства. — 2009. — № 32. — С. 156 — 170.
12. Орлова Е.Г. Проблема оценки эффективности судовых систем охлаждения с забортными охладителями / Е.Г. Орлова, В.К. Шурпяк // Научно-технический сборник / Российский морской регистр судоходства. — 2008. — № 31. — С. 245 — 259.
13. Ткач С.Н. Экспериментальные исследования теплоотдачи забортного охладителя в условиях свободно-конвективного и газожидкостного течения морской воды / С.Н. Ткач, И.И. Свириденко, Е.С. Ткач // Вісник СевНТУ. — 2013. — № 137. — С. 351 — 354. — EDN RBIDIH.

REFERENCES

1. Gannesen V.V., Solov'eva E.E. The accident rate of sea vessels and the methodology for searching for the accident causes. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2022. Vol. 61. No 3. P. 70 — 76. (In Russ.)
2. Motrich V.N. 2022 god: avariinost' morskogo flota [2022: Maritime fleet accident rate]. *Morskie vesti Rossii [Maritime News of Russia]*. 27.10.2023. URL: <https://morvesti.ru/themes/1693/105728/> (accessed 04.02.2025).
3. Motrich V.N. Avariinost' morskogo flota [Maritime fleet accident rate]. *Morskie vesti Rossii [Maritime News of Russia]*. 24.09.2024. URL: <https://morvesti.ru/themes/1693/111604/> (accessed 04.02.2025).
4. Shurpyak V.K., Sergeev A.A. Analysis of the average accident rate of RS classed ships. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2005. Issue 28. P. 32 — 46.
5. Makarov V.G., Shurpyak V.K. Novye trebovaniia Registra k zashchite ot korrozii sudovykh truboprovodov [New Register requirements for corrosion protection of ship pipelines]. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 1999. Issue 22. P. 194 — 206.
6. RD5.5104-79 Metodika rascheta bezotkaznosti i dolgovechnosti elementov i dopustimye skorosti potoka morskoi vody [Methodology for calculation of reliability and durability of elements and allowable seawater flow rates].

7. Golub E.S., Shurpyak V.K. Otsenka tekhnicheskogo sostoiianiia truboprovodov zabortnoi vody soglasno novym dokumentam Registra [Assessment of the technical condition of seawater pipelines according to the new Register documents]. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2000. Issue 23. P. 216 — 227.
8. Harlamova A.E., Pokusaev M.N., Trifonov A.V. Analysis of ship accidents caused by unreliable operation of cooling systems of ship power plants. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2023. Vol. 2. P. 30 — 40. DOI 10.24143/2073-1574-2023-2-30-40. EDN QCWWRO. (In Russ.)
9. Shurpyak V.K., Serov A.A. Evaluation of influence of main ship systems on the ship energy efficiency indices. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2017. No. 48/49. P. 95 — 103. (In Russ.)
10. Fedorovskii K.Yu., Fedorovskaia N.K. Zamknutyie sistemy okhlazhdeniia sudovykh energeticheskikh ustanovok [Closed-circuit cooling systems for ship power plants]. Moscow: Vuzovskii uchebnik; INFRA-M, 2017. 164 p. (In Russ.)
11. Gorelik B.A., Shurpyak V.K. Hazards identification and risk assessment of ship piping. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2009. Issue 32. P. 156 — 170. (In Russ.)
12. Orlova E.G., Shurpyak V.K. Efficiency assessment of ship cooling systems equipped with box coolers. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2008. Issue 31. P. 245 — 259. (In Russ.)
13. Tkach S., Sviridenko I., Tkach O. Experimental researches of heat emission of outboard cooler in the conditions of free-convective and gas-liquid flow of sea water. *Visnik SevNTU*. 2013. Vol. 137. P. 351 — 354. EDN RBIDIH. (In Russ.)