

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-304-314

THERMAL EFFICIENCY OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CLOSED COOLING SYSTEMS OF MARINE POWER PLANTS

K. Yu. Fedorovsky, N. K. Grinenko

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

The issues of heat removal efficiency of cladding heat exchangers of closed cooling systems of ship power plants are considered. The use of such systems allows obtaining technical and environmental advantages in the operation of the vessel. The latter ensures the conservation of fish resources of the seas and continental waters. It is shown that the worst conditions for heat removal take place when the vessel is parked. In this case, heat transfer to outboard water is carried out with free convection. This mode is the main calculation mode. In the case of vessel movement, heat removal increases significantly, since it is carried out with forced convection. For the case of the ship berthing, the results of experimental thermal engineering studies on a model of 1m² are presented. It is shown that the efficiency of heat removal significantly depends on the orientation of the ship's plating of the temperature difference in the apparatus. The transition from the bottom location of the apparatus to the side, as well as an increase in the temperature difference, provide greater thermal efficiency. Generalizing similarity equations are obtained for the case of the ship berthing. Based on them, a method for the calculation has been developed. The reliability of this technique is fully confirmed by the results of testing such a heat exchanger, with an area of 100 m², on a self-propelled floating crane of project 15201. It is shown that the obtained generalizing similarity equations have their own characteristics compared to the known ones. This is a consequence of the peculiarities of the processes taking place in such devices. For the case of vessel movement, generalizing similarity equations are also obtained. In this case, the authors have used the results of their own tests of such devices on the floating crane of project 15201, as well as the tests results of other researchers on various ships.

Keywords: ecology, ship power plant, cooling system, heat transfer, ship berthing, vessel movement.

For citation:

Fedorovskiy, Konstantin Yu., and Nadezhda K. Grinenko. "Thermal efficiency of environmentally friendly closed cooling systems of marine power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.2 (2023): 304–314. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-304-314.

УДК: 629.12(075.4)

ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СЭУ

К. Ю. Федоровский, Н. К. Гриненко

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Россия

Рассмотрены вопросы эффективности теплоотвода обшивочных теплообменных аппаратов замкнутых систем охлаждения судовых энергетических установок. Использование таких систем позволяет получить технические и экологические преимущества при эксплуатации судна. Последнее обеспечивает сохранение рыбных ресурсов морей и континентальных водоемов. Показано, что наилучшие условия теплоотвода имеют место при стоянке судна. При этом теплоотдача от наружной поверхности судовой обшивки к забортной воде осуществляется при свободной конвекции. Данный режим является основным расчетным. В случае движения судна теплоотвод существенно возрастает, поскольку выполняется при вынужденной конвекции. Для случая стоянки судна представлены результаты экспериментальных теплотехнических исследований на модели

площадью 1 м². Показано, что эффективность теплоотвода существенно зависит от ориентации судовой обшивки температурного напора в аппарате. Переход от днищевого расположения аппарата к бортовому, а также увеличение температурного напора обеспечивают большую тепловую эффективность. На основе полученных обобщающих уравнений подобия для случая стоянки судна разработана методика теплотехнического расчета. Достоверность данной методики полностью подтверждена результатами испытания теплообменника площадью 100 м² на самоходном плавкране пр. 15201. При этом показано, что полученные обобщающие уравнения подобия имеют особенности по сравнению с известными вследствие особенности происходящих процессов в таких аппаратах. В случае движения судна также определены обобщающие уравнения подобия. При этом использованы полученные результаты собственных испытаний таких аппаратов на плавкране пр. 15201, а также результаты испытаний других исследователей на различных судах.

Ключевые слова: экология, судовая энергетическая установка, система охлаждения, теплоотдача, теплопередача, стоянка и движение судна.

Для цитирования:

Федоровский К. Ю. Тепловая эффективность экологически безопасных замкнутых систем охлаждения СЭУ / К. Ю. Федоровский, Н. К. Гриненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 304–314. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-304-314.

Введение (introduction)

В настоящее время все большее распространение получают замкнутые системы охлаждения (ЗСО) судовых энергетических установок (СЭУ), что подтверждено данными Российского морского регистра судоходства [1]. Такие системы исключают прием судном забортной воды, используемой для охлаждения. По сравнению с широко распространенными двухконтурными разомкнутыми системами охлаждения, потребляющими забортную воду, ЗСО имеют ряд преимуществ. С технической точки зрения такие системы обеспечивают большую надежность эксплуатации СЭУ и судна в целом, особенно в загрязненной акватории. Также имеется возможность сокращения количества контуров системы, что приводит к уменьшению протяженности трубопроводов и количества насосов. Последнее является весьма важным с позиции выполнения требований гл. 4 прил. 6 Международной морской конвенции МАРПОЛ 73/78 в отношении энергоэффективности судов [2], так как обеспечивает снижение энергопотребления.

С экологической точки зрения замкнутые системы охлаждения, по сравнению с разомкнутыми, полностью исключают негативное воздействие на морские ресурсы, проявляющееся в том, что попадающие в систему охлаждения из окружающей акватории планктон, икринки рыб и рыбная молодь практически полностью погибают [3]. В конечном счете это приводит к сокращению рыбных ресурсов морей и континентальных водоемов. В ЗСО отвод теплоты в окружающую судно акваторию может осуществляться с помощью устройств теплоотвода (УТ), имеющих различную конструкцию. Так, в качестве примера на рис. 1 показаны устройства блочного типа, расположенные снаружи судовой обшивки или в специальных выгородках корпуса [4], [5]. Однако такие устройства нарушают обводы корпуса судна, создавая дополнительное сопротивление, и сравнительно легко повреждаемы. Кроме того, существуют сложности с очисткой от загрязнения и обрастания. Указанных недостатков лишены УТ, обеспечивающие передачу теплоты через судовую обшивку [6] — обшивочные теплообменные аппараты (ОТОА) — рис. 2.

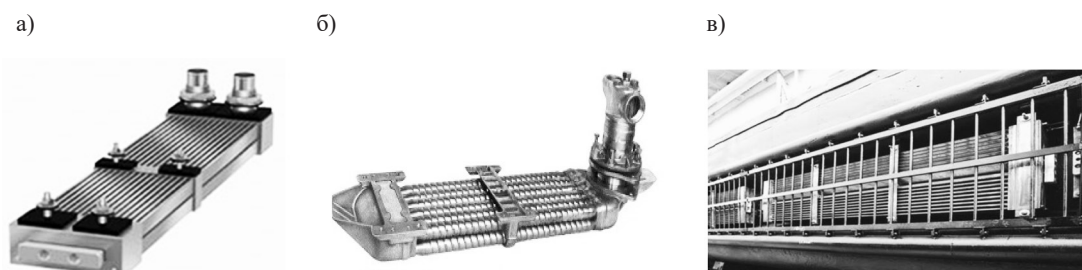


Рис. 1. Устройства теплоотвода блочного типа: с плоскими (а) и круглыми трубками (б), а также их размещение в выгородках корпуса судна (в)

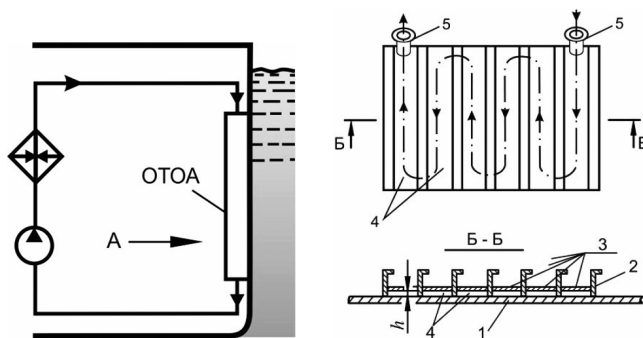


Рис. 2. Обшивочный теплообменный аппарат:
1 — судовая обшивка; 2 — элементы набора корпуса судна; 3 — дополнительные листы;
4 — лабиринтный канал; 5 — патрубки подвода и отвода теплоносителя

В данном случае ОТОА представляет собой лабиринтный канал, размещенный на внутренней поверхности судовой обшивки, сформированный штатными элементами набора, а также дополнительно наваренными параллельно судовой обшивке металлическими листами. Обычно зазор между обшивкой и дополнительными листами составляет примерно 12–25 мм. По данному лабиринтному каналу движется пресная охлаждаемая вода. Изготовление ОТОА не требует использования особых технологий и оборудования и может быть выполнено практически на всех судостроительных и судоремонтных предприятиях. Однако для таких УТ возникают вопросы, связанные с их тепловой эффективностью, соответствующими расчетными зависимостями, методикой расчета и подтверждением ее достоверности результатами натурных испытаний ОТОА на судах. Именно совокупность этих вопросов является предметом дальнейшего рассмотрения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В ОТОА предусмотрено два режима работы. Первый наиболее неблагоприятный режим работы имеет место в случае стоянки судна. При этом теплоотдача от наружной поверхности обшивки корпуса суда к забортной воде происходит при свободной конвекции [7]. Второй режим работы имеет место при движении судна. При этом теплоотдача к забортной воде осуществляется при вынужденной конвекции [8]. Из теории теплопередачи [9] известно, что теплоотдача при свободной конвекции существенно ниже теплоотдачи при вынужденной конвекции. Поэтому основным расчетным режимом работы таких аппаратов является случай, когда судно неподвижно по отношению к забортной воде.

Для случая теплоотдачи при свободной конвекции были проведены экспериментальные теплотехнические исследования на модели ОТОА площадью 1 м². Обеспечивались параметры работы модели, максимально приближенные к реальным. На каждой из сторон теплопередающей стенки модели было зачеканено по шестнадцать термопар, что позволяло определить среднюю температуру стенки. Модель, размещенная в емкости с неподвижной морской водой, имела возможность изменять наклон теплопередающей поверхности, моделируя размещение ОТОА на днище, борту судна и др.

Результаты (Results)

В результате проведенных экспериментальных исследований было определено уравнение подобия, описывающее теплоотдачу в лабиринтном канале. Число Нуссельта определяется по формуле

$$\overline{Nu}_1 = 46 Re^{0.4} Pr_{ж}^{0.4} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{c_1}} \right)^{0.25} \left(\frac{d_{эк}}{l_{п}} \right)^{0.9} \left(\frac{t_{ж}}{t_{c_1}} \right)^{-3.0}, \quad (1)$$

где Re — число Рейнольдса;

Pr — число Прандтля;

$d_{эк}$ — эквивалентный диаметр проходного сечения лабиринтного канала;

$l_{\text{п}}$ — длина прямого участка лабиринтного канала;
 $\bar{t}_{\text{ж}}$ — средняя температура жидкости (охлаждаемой пресной воды);
 $\bar{t}_{\text{с1}}$ — средняя температура внутренней поверхности судовой обшивки в районе размещения ОТОА.

Зависимость справедлива при $8000 < \text{Re}_{\text{ж}} < 330\,000$; $2,1 < \text{Pr}_{\text{ж}} < 3,9$; $1,9 \cdot 10^{-2} < d_{\text{эк}}/l_{\text{п}} < 7,8 \cdot 10^{-2}$; $0,8 < \text{Pr}_{\text{ж}}/\text{Pr}_{\text{с1}} < 0,94$; $1,0 < \bar{t}_{\text{ж}}/\bar{t}_{\text{с1}} < 1,2$.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}_2$ от наружной поверхности судовой обшивки к забортной воде в условиях свободной конвекции существенно зависит от температурного напора между поверхностью стенки $t_{\text{с2}}$ и забортной водой t_3 (рис. 3) и мало зависит от скорости v пресной воды в лабиринтном канале.

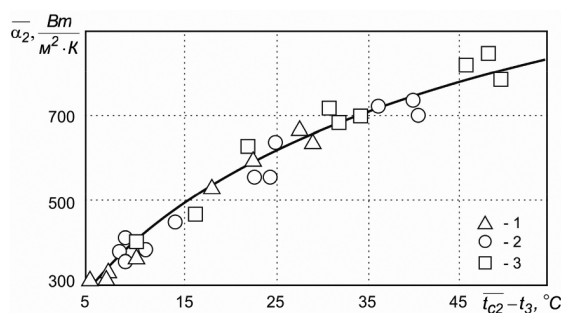


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_2$ от температурного напора $t_{\text{с2}} - t_3$ для вертикального борта судна:
 1 — $v = 0,3-0,35$ м/с; 2 — 1,1–1,2 м/с; 3 — 1,8–1,9 м/с

Другим важнейшим фактором, влияющим на эффективность теплоотвода, является ориентация поверхности судовой обшивки (рис. 4).

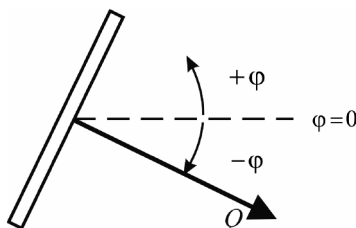


Рис. 4. Изменение ориентации теплоотдающей поверхности относительно горизонтали

Влияние данного фактора, исследованное на экспериментальной модели ОТОА, показано на рис. 5.

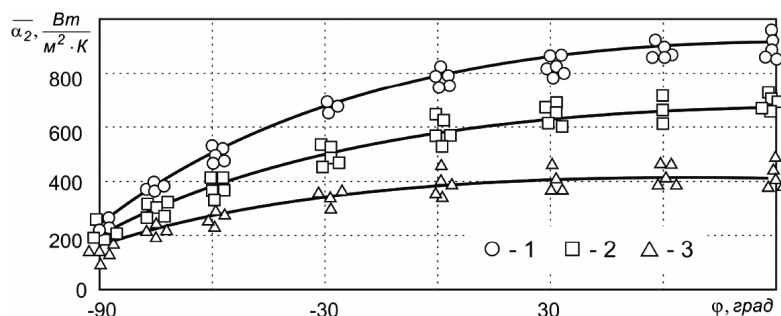


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_2$ от угла наклона аппарата φ ($v = 0,35 - 1,9$ м/с):
 1 — $t_{\text{с2}} - t_3 = 45$ °С; 2 — 23 °С; 3 — 7 °С

Наихудшие условия теплоотдачи достигаются при размещении ОТОА на горизонтальном днище корпуса судна (-90°). Увеличение значения φ способствует увеличению $\overline{\alpha}_2$. При стоянке судна значение коэффициента теплопередачи K решающим образом определяется достигаемым значением $\overline{\alpha}_2$, которое, как известно из теории теплопередачи, существенно меньше коэффициента теплоотдачи $\overline{\alpha}_1$ при вынужденной конвекции на внутренней поверхности судовой обшивки. Результаты проведенных экспериментальных теплотехнических исследований на модели ОТОА показаны на рис. 6.

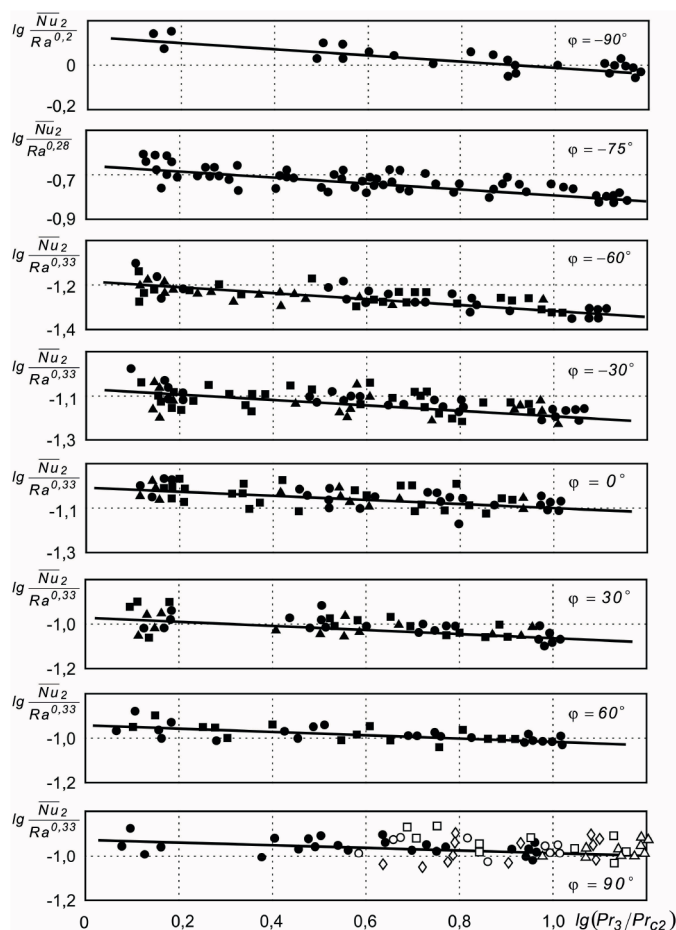


Рис. 6. Зависимость $\lg(\overline{Nu}_2 / Ra^n)$ от $\lg(Pr_3 / Pr_{c2})$

Обработка экспериментальных данных позволила определить уравнения подобия для различных углов наклона φ . Зависимости для расчета числа $\overline{Nu}_2$ приведены в таблице.

Зависимости теплопередачи забортной воды при свободной конвекции

Угол φ , град	Общий вид зависимости
-90	$\overline{Nu}_2 = 1,4Ra^{0,2}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$
-75	$\overline{Nu}_2 = 0,22Ra^{0,28}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$
-60	$\overline{Nu}_2 = 0,065Ra^{0,33}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$
-30	$\overline{Nu}_2 = 0,087Ra^{0,33}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$
0	$\overline{Nu}_2 = 0,1Ra^{0,33}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$
30	$\overline{Nu}_2 = 0,11Ra^{0,33}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$
60	$\overline{Nu}_2 = 0,12Ra^{0,33}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$

Приведенные зависимости могут быть использованы для расчета коэффициента теплопередачи ОТОА — K , Вт/(м²·К):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_k}{\lambda_k}}, \quad (2)$$

где δ_c и δ_k — соответственно толщина теплопередающей части судовой обшивки и слоя краски, м;
 λ_c и λ_k — соответственно коэффициенты теплопроводности материала судовой обшивки и краски, Вт/(м·К).

Влияние покраски судовой обшивки на теплопередачу достаточно подробно рассмотрено в [10]. На основании зависимостей (1) и (2), а также уравнений подобия, указанных в приведенной на с. 308, таблице разработана методика расчета коэффициента теплопередачи и требуемой площади ОТОА, которая была применена при проектировании замкнутой системы охлаждения самоходного плавкрана пр. 15201 грузоподъемностью 500 т.

ОТОА размещался на горизонтальном днище, его фотография на заключительном этапе сборки приведена на рис. 7. Следует обратить внимание, что такое расположение ОТОА является наиболее неблагоприятным, однако оно обусловлено тем, что корпус плавкрана представляет собой понтон с небольшой высотой борта и большой площадью практически горизонтального днища, для которого $\varphi = -90^\circ$ (см. рис. 4).

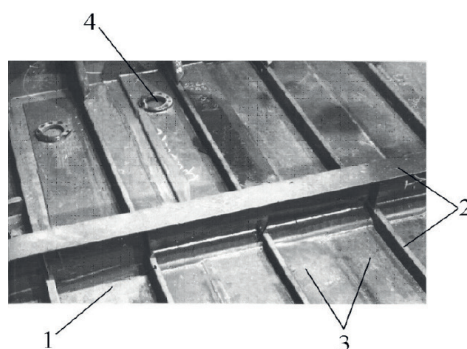


Рис. 7. ОТОА плавкрана пр. 15201:

1 — судовая обшивка; 2 — элементы набора корпуса судна;
3 — дополнительно наваренные листы;

4 — фланец присоединения патрубка подвода (отвода) охлаждаемого теплоносителя

В ходе ходовых испытаний плавкрана была исследована тепловая эффективность ЗСО. На рис. 8 показана зависимость теплопередачи окрашенного ОТОА $K_{кр}$ от температурного напора Δt между пресной и забортной водой.

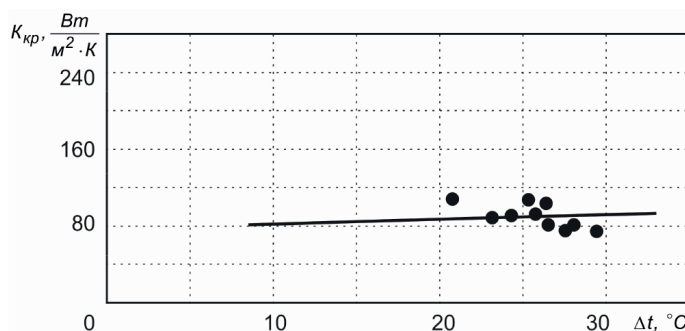


Рис. 8. Результаты натурных испытаний ОТОА плавкрана пр. 15201:

• — результаты, полученные на ходовых испытаниях плавкрана;
— — результаты расчета

В работе [11] представлены результаты натурных испытаний судна Ludwig Franzius, у которого ОТОА размещался на бортовой части судовой обшивки с углом наклона $\varphi = -30^\circ$ (см. рис. 4). При этом в лабиринтном канале теплообменного аппарата обеспечивались скорости пресной воды $v_{\text{ПВ}} = 0,21\text{--}0,35$ м/с и $1,4\text{--}1,5$ м/с. Там же показаны результаты расчета для указанных условий коэффициента теплопередачи с использованием приведенных зависимостей (1), (2) — рис. 9.

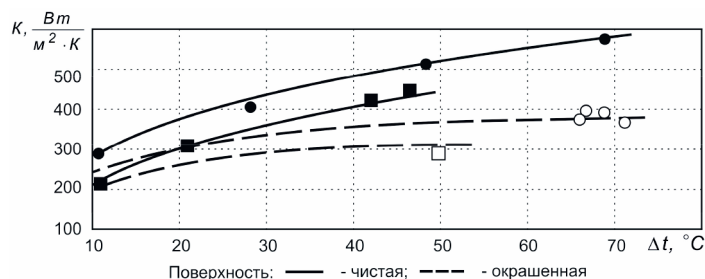


Рис. 9. Сравнение коэффициентов теплопередачи ОТОА при испытаниях судна Ludwig Franzius ($\square, \square$) с результатами расчета (— —) при различных скоростях ($\square$ и $\blacksquare$ — при $v_{\text{ПВ}} = 0,24\text{--}0,35$ м/с; $\circ$ и $\bullet$ — при $v_{\text{ПВ}} = 1,4\text{--}1,5$ м/с)

Приведенные графики соответствуют случаю нахождения судов в неподвижной воде. При этом теплоотдача от наружной обшивки корпуса судна в окружающую акваторию осуществляется при свободной конвекции. Это наихудший режим работы ОТОА, а коэффициент теплоотдачи существенно зависит от ориентации поверхности по углу φ (рис. 4) и температурного напора Δt . Возникает вопрос относительной эффективности теплоотвода в случае движения судна. При этом теплоотдача осуществляется при вынужденной конвекции, а решающее влияние на эффективность теплоотвода оказывает скорость движения судна v_s .

Для ряда судов (землечерпалка Ludwig Franzius, судно BM-500, буксир 190Z, ледокол Josef Langen) для плавкрана пр. 15201 имеются точечные данные эффективности теплоотвода ОТОА при движении судна, обработанные в каждом конкретном случае с учетом существующей специфики. Полученные результаты относительно коэффициента теплопередачи окрашенного ОТОА приведены на рис. 10 ($v_{\text{ПВ}} = 0,5\text{--}1,5$ м/с, количество слоев краски — шесть).

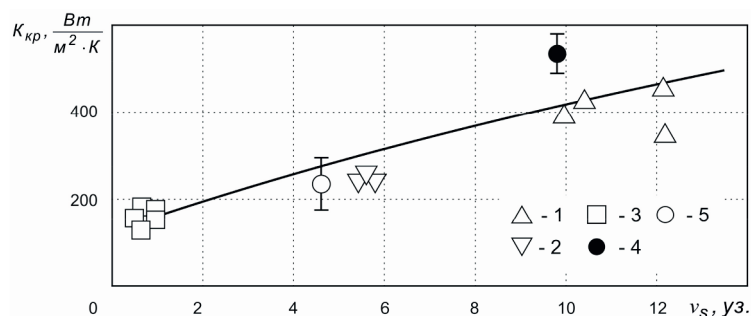


Рис. 10. Зависимость коэффициента теплопередачи $K_{\text{кр}}$ окрашенного ОТОА от скорости движения судна v_s :
1 — судно Ludwig Franzius (Германия); 2 — плавкран пр. 15201;
3 — судно BM-500 (Польша); 4 — ледокол Josef Landen (Германия);
5 — буксир KSB-190 (Германия)

Методика теплотехнического расчета ОТОА позволяет с использованием известных уравнений подобия определить коэффициент теплоотдачи в лабиринтном канале, а также влияние теплопередающей стенки судовой обшивки и нанесенной на поверхность краски. Кроме того, известно, что при вынужденной конвекции теплоотдача забортной воде практически не зависит от ориентации поверхности по углу φ (см. рис. 4). Таким образом, зная коэффициенты теплопередачи $K_{\text{кр}}$

(рис. 11) и температурные напоры, можно определить коэффициенты теплоотдачи заборной воды. С учетом размеров ОТОА на рассматриваемых в работе судах можно задаться численным значением характерного линейного размера, входящего в числа Нуссельта и Рейнольдса. Теплофизические свойства морской воды известны. В ходе выполненных таким образом расчетов определены числа подобия и, в конечном счете, уравнение подобия (рис. 11), описывающее теплоотдачу заборной воде при движении судна.

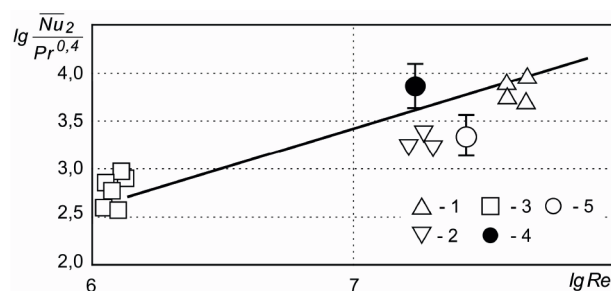


Рис. 11. Зависимость от $\lg(\overline{Nu}_2 / Pr^{0,4})$ от $\lg Re$ чистой неокрашенной поверхности ОТОА:

- 1 — судно Ludwig Franzius (Германия); 2 — плавкран Пр. 15201;
3 — судно «ВМ-500» (Польша); 4 — ледокол Jasef Landen (Германия);
5 — буксир «KSB-190» (Германия)

Искомое уравнение подобия, описывающее теплоотдачу неокрашенной наружной поверхности ОТОА при движении судна, имеет вид

$$\overline{Nu}_2 = 0,007 Re^{0,8} Pr^{0,4}. \quad (3)$$

Уравнение справедливо при $Re = 2 \cdot 10^6 - 4,5 \cdot 10^7$ и $Pr = 3,5 - 10$.

Обсуждение (Discussion)

Экспериментальные исследования, выполненные на модели ОТОА, которые могут работать в режимах стоянки и движения судна, указывают на существенное влияние на коэффициент теплоотдачи $\overline{\alpha}_2$ ориентации поверхности φ и температурного напора Δt . Так, например, при вертикальном расположении ОТОА (см. рис. 4) увеличение температурного напора Δt с 5 до 35 °С увеличивает $\overline{\alpha}_2$ с 300 до 700 Вт/(м²·К). Такое же сильное влияние на коэффициент теплоотдачи $\overline{\alpha}_2$ оказывает ориентация поверхности. Как видно из рис. 5, при $\Delta t = 45$ °С переход от горизонтального положения ОТОА ($\varphi = -90^\circ$) к вертикальному ($\varphi = 0^\circ$) увеличивает $\overline{\alpha}_2$ с 300 до 800 Вт/(м²·К), что указывает на необходимость при проектировании ЗСО в максимально возможной степени использовать бортовые поверхности судна, а также подавать в ОТОА охлаждаемый теплоноситель с максимально возможной температурой.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что показатель степени при числе Ra и углах $\varphi < -75^\circ$ оказывается менее 0,33. Из теории тепломассообмена известно, что это указывает на отсутствие автомодельности процесса по отношению к характерному линейному размеру (размеру ОТОА). Это означает, что коэффициент теплоотдачи зависит от размеров поверхности, уменьшаясь с их увеличением. Для вертикальной поверхности ($\varphi = 0^\circ$) уравнение подобия имеет показатель степени при числе Ra, равный 0,1. Данное значение отличается от известного уравнения подобия, описывающего теплоотдачу вертикальной изотермической поверхности при свободной конвекции, в котором этот коэффициент равен 0,15. Указанное отличие объясняется различными граничными условиями теплоотдающей поверхности. В последнем случае это поверхность с постоянной температурой, известная в теории как поверхность с граничными условиями первого рода. В данном случае имеет место неизотермическая поверхность, сформированная вследствие лабиринтного характера движения охлаждаемой пресной воды вдоль судовой обшивки с ее внутренней стороны и возникающих температурных градиентов и перетечек теплоты непосредственно в обшивке.

Существуют также особенности уравнения подобия, описывающего теплоотдачу в лабиринтном канале. В теории теплопередачи хорошо известна зависимость для расчета числа Нуссельта для прямых каналов, в которой показатель степени числа Рейнольдса равен 0,8. В данном случае указанный показатель существенно меньше и равен 0,4, что является следствием лабиринтной формы канала и приводит к дополнительной периодической турбулизации потока. В результате снижается темп прироста теплоотдачи вследствие увеличения скорости показателя степени числа $Re_{ж}$ по сравнению с прямым каналом.

Экспериментальные теплотехнические исследования эффективности ОТОА проводились на модели площадью 1 м². Полученные результаты обобщены уравнениями подобия, описывающими теплоотдачу в лабиринтном канале аппарата и от наружной поверхности к забортной воде. На их основе разработана методика теплотехнического расчета таких аппаратов, а полученные при этом результаты хорошо согласуются с результатами натурных испытаний ЗСО (рис. 8) на плавкране пр. 15201 с площадью ОТОА 100 м². При движении судна ориентация поверхности и температурный напор практически не влияют на коэффициент теплопередачи. Решающим является увеличение скорости. Так, например, для ОТОА с окрашенной поверхностью увеличение v_s с 1 до 9 уз приводит к увеличению $K_{кр}$ примерно в два раза.

Полученное на основании данных рис. 11 уравнение подобия (3) указывает на показатель степени числа Re , равный 0,8. Это хорошо согласуется с известным из теории теплопередачи соответствующим показателем при обтекании плоских поверхностей, что подтверждает достоверность результатов.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Определена тепловая эффективность замкнутых систем охлаждения с ОТОА при стоянке и движении судна. В первом случае обеспечиваются наилучшие условия теплоотдачи от наружной поверхности судовой обшивки к неподвижной забортной воде. Процесс проходит посредством свободной конвекции. Данный случай следует считать основным расчетным режимом таких аппаратов, поскольку при движении судна теплоотдача забортной воде осуществляется при вынужденной конвекции, что приводит к существенному увеличению теплоотвода.

2. Для случая стоянки судна проведены экспериментальные исследования на модели ОТОА и получены необходимые зависимости для расчета теплоотвода, а также разработана соответствующая методика теплотехнического расчета, с использованием которой для плавкрана пр. 15201 спроектирована замкнутая система охлаждения с ОТОА. Результаты натурных испытаний данного устройства теплоотвода полностью подтвердили достоверность разработанной методики, что позволяет рекомендовать ее для широкого практического использования.

3. С использованием результатов испытаний ОТОА плавкрана пр. 15201, а также других судов получены соответствующие обобщающие зависимости, позволяющие выполнить расчет при различных скоростях движения судна.

4. Таким образом, обеспечена возможность определения тепловой эффективности и требуемые площади ОТОА замкнутых систем охлаждения СЭУ при различных условиях эксплуатации судна. Создаются условия для широкого внедрения указанных систем в практику судостроения, поскольку для их создания не требуется применение специальных технологий и оборудования.

5. Оснащение судов замкнутыми системами охлаждения СЭУ обеспечит сохранение рыбных ресурсов морей и континентальных водоемов Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шурпак В. К. Учет особенностей систем охлаждения при оценке энергетической эффективности судов / В. К. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2014. — № 37. — С. 51–55.

2. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов. — СПб.: ЦНИИМФ, 2009. — 28 с.
3. How power plants kill fish&damage our water ways [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://blogs.sierraclub.org/compass/2011/08/how-power-plants-kill-fish-damage-our-waterways-.html> (дата обращения: 11.11.2020).
4. Specifying a Trawler [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://bluewater-trawlers.blogspot.com/2008/11/hull-construction.html> (дата обращения 21.12.2021).
5. Specialty Gridcooler Keel Coolers [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.fernstrum.com/products/gridcooler-keel-cooler/specialty-coolers/> (дата обращения 21.12.2021).
6. Федоровский К. Ю. Теплопередача через обшивку корпуса судна и особенности происходящих процессов / К. Ю. Федоровский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2018. — № 4–2 (330). — С. 168–172.
7. Клеверова В. Теплообмен при свободной конвекции / В. Клеверова, А. Бакиржанкызы // Global Science and Innovations: Central Asia. — 2021. — Т. 7. — № 1 (12). — С. 111–115.
8. Саньков В. И. Исследование теплообмена при вынужденной конвекции / В. И. Саньков, С. Ж. Иманалиева // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. — 2021. — № 4 (60). — С. 87–91.
9. Барышева О. Б. Тепломассообмен в теории и на практике / О. Б. Барышева, Е. В. Варсегова. — Казань: ООО «Бук», 2021. — 234 с.
10. Федоровский К. Ю. Влияние покраски и биообрастания корпуса судна на теплоотвод замкнутой системы охлаждения энергоустановки / К. Ю. Федоровский, Н. К. Федоровская, В. В. Ениватов, Д. В. Бурков // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. — 2021. — № 1. — С. 61–70. DOI: 10.47404/2619-0605_2021_1_6.
11. Федоровский К. Ю. Замкнутые системы охлаждения судовых энергетических установок / К. Ю. Федоровский, Н. К. Федоровская. — М.: Вузовский учебник, 2017. — 160 с.

REFERENCES

1. Shurpyak, V. K. “Uchet osobennostei sistem okhlazhdeniya pri otsenke energeticheskoi effektivnosti sudov.” *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 37 (2014): 51–55.
2. *International convention for prevention of pollution from ships*. SPb.: TsNIIMF, 2009.
3. How power plants kill fish&damage our water ways. Web. 11 Nov. 2020 <<https://blogs.sierraclub.org/compass/2011/08/how-power-plants-kill-fish-damage-our-waterways-.html>>.
4. Specifying a Trawler. Web. 21 Dec. 2021 <<http://bluewater-trawlers.blogspot.com/2008/11/hull-construction.html>>.
5. Specialty Gridcooler Keel Coolers. Web. 21 Dec. 2021 <<http://www.fernstrum.com/products/gridcooler-keel-cooler/specialty-coolers/>>.
6. Fedorovskiy, K. Yu. “Heat transfer through ship’s shell plating and peculiarities of the processes.” *Fundamental’nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* 4–2(330) (2018): 168–172.
7. Kleverova, V., and A. Bakirzhankyzy. “Teploobmen pri svobodnoi konveksii.” *Global Science and Innovations: Central Asia (sm. v knigakh)* 7.1(12) (2021): 111–115.
8. Sankov, Vyacheslav Ivanovich, and Saltanat Zhumamudunovna Imanalieva. “Study of heat exchange with forced convection.” *Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov* 4(60) (2021): 87–91.
9. Barysheva, O.B., and E. V. Varsegova. *Teplomassoobmen v teorii i na praktike*. Kazan’: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost’yu “Buk”, 2021.
10. Fedorovskiy, K. Yu., N. K. Fedorovskaya, V. V. Enivatov, and D. V. Burkov. “The influence of painting and ships hull biofouling on heat sink of the close cooling systems of power plants.” *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University* 1 (2021): 61–70.
11. Fedorovskii, K. Yu., and N. K. Fedorovskaya. *Zamknutyie sistemy okhlazhdeniya sudovykh energeticheskikh ustanovok*. M.: Vuzovskii Uchebnik, 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федоровский Константин Юрьевич —
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: fedkonst@rambler.ru
Гриненко Надежда Константиновна —
кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedorovskiy, Konstantin Yu. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: fedkonst@rambler.ru
Grinenko, Nadezhda K. —
PhD
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 23 декабря 2022 г.
Received: December 23, 2022.*