

УДК 62.91

DOI: 10.37890/jwt.vi86.668

Расчет и проектирование судовых бокскулеров

С.Н. Валиулин

М.Ю. Храмов

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. На судах применяют различные способы и системы отведения теплоты от эксплуатирующихся энергетических установок. В процессе эксплуатации судов эксплуатационниками был отмечен быстрый износ механизмов и устройств, охлаждаемых забортной водой, что приводило к частым ремонтам особенно при их работе в прибрежных и морских районах. Судовладельцы несли убытки, связанные с дорогостоящим техническим обслуживанием. В результате сформировалась потребность в уменьшении вредного воздействия солёной воды. Одним из решений - установка теплообменного аппарата в забортный ящик. Целью его монтажа является уменьшение вредного коррозионного воздействия воды на ответственные конструкции и механизмы системы охлаждения главных и вспомогательных двигателей, а также снижению вредного воздействия электрохимической коррозии на ответственные узлы и механизмы, повышая при этом экологическую безопасность. Именно этот фактор и обуславливает использование на современных судах бокскулеров в качестве системы охлаждения. При производстве отечественных изделий взамен импортных необходимо учитывать особенности работы судна и движения среды в теплообменном пространстве. В статье рассмотрены особенности расчета и проектирования судовых бокскулеров. Предложены методы предварительного определения гидравлических характеристик канала, в котором установлен свободно-омываемый теплообменный аппарат. Приведены результаты расчета судового бокскулера.

Ключевые слова: двигатель, теплообменный аппарат, бокскулер, кингстонный ящик, трубный пучок.

Calculation and design of marine box coolers

Sergey N. Valiulin

Michael Y. Khramov

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Various methods and systems are used on ships to remove heat from operating power plants. During the operation of ships, it was observed that the mechanisms and devices cooled by seawater experienced rapid wear and tear, leading to frequent repairs, especially in coastal and marine areas. This resulted in significant costs for shipowners due to the need for expensive maintenance. As a result, there was a need to reduce the harmful effects of saltwater. One solution is to install a heat exchanger in the outboard box. The purpose of its installation is to reduce the harmful corrosive effect of water on critical structures and mechanisms of the cooling system of the main and auxiliary engines, as well as to reduce the harmful effect of electrochemical corrosion on critical components and mechanisms, while improving environmental safety. This is the main reason for using box coolers as a cooling system on modern ships. When producing domestic products to replace imported ones, it is necessary to consider the specific features of the ship's operation and the movement of the medium in the heat exchange space. The article discusses the features of calculating and designing ship box coolers. It proposes methods for preliminary determination of the hydraulic characteristics of a channel in which a free-flowing heat exchanger is installed. The results of calculating a ship box cooler are presented.

Keywords: engine, heat exchanger, box cooler, Kingston box, and tube bundle.

Введение

Встроенные бортовые охладители дизелей в зарубежном и российском судостроении применяются достаточно широко. Причем на российские суда до последнего времени устанавливались, как правило, бокскулеры иностранных фирм. Среди них отметили WEKA, GEA, BLOKSMA, DURAMAX и другие.

В настоящее время поставки зарубежных охладителей резко сократились и возникла задача замены этих аппаратов отечественными. Поскольку расчет и проектирование бокскулеров выполняется самими изготовителями, которые не раскрывают своих методик, необходимо восполнить этот пробел.

Методы

С точки зрения организации процесса теплообмена основная особенность — бокскулеров-это свободное обмывание забортной водой межтрубного пространства.

На рис. 1 схематически показан бокскулер в кингстонном ящике судна. Условно стрелками отмечено направление течения забортной воды.

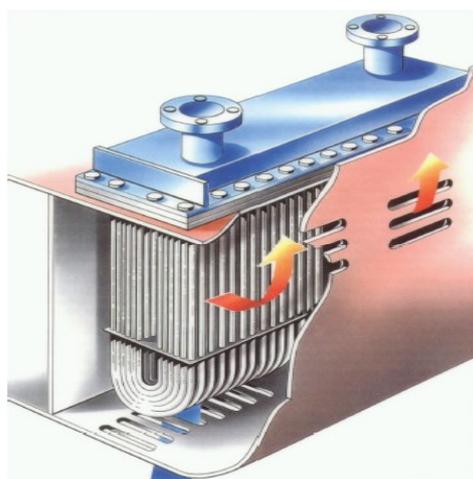


Рис 1. Схема установки бокскулера фирмы WEKA в кингстонном ящике судна

При средней скорости движения судна 20 км/час вода натекает на прорези в днище и борту со скоростью 5,5 м/с, что соответствует скоростному напору 15 кПа. При правильном использовании этого скоростного напора энергии забортной воды более, чем достаточно для организации движения среды в межтрубном пространстве, где скорость поперечного обтекания труб должна составлять 0,3...0,9 м/с. Однако, если прорези в борту и днище не имеют специальной профилировки для создания областей повышенного и пониженного давления, зоны перфорации в области цилиндрической части корпуса судна в днище и борту находятся в практически идентичных условиях. Имеется ввиду стабилизированное течение с примерно одинаковым пограничным слоем, одинаковой турбулентностью и др.

К расчету в этом случае можно принимать волнение, качку судна продольную и поперечную, влияние близкого дна и др. Воздействие этих факторов на порядок ниже скоростного напора. Так же нельзя признать значительными влияние направления прорезей в борту и днище, на что, кстати, обращают внимание производители бокскулеров.

В целом можно рассчитывать на полезное использование только небольшой части скоростного напора. То есть необходимо обеспечивать некоторые очень низкие

значения гидравлического сопротивления проточной части кингстонного ящика для свободного обтекания трубного пучка бокскулера.

На рис. 2 приведено схематическое изображение течения забортной воды в области бокскулеров в кингстонном ящике по данным фирмы BLOKLAND.

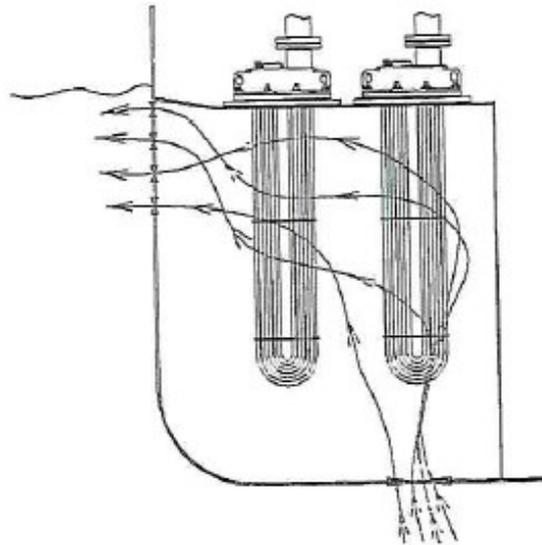


Рис. 2. Схематическое изображение течения забортной воды в канале бокскулеров

Видно, что течение организовано значительно хуже, чем в кожухотрубных аппаратах. Нет четкого поперечного тока. Очень большие обводные течения.

Еще хуже обстоят дела с организацией протока воды на стоянке судна. В этом случае можно рассчитывать только на естественную циркуляцию из-за различных плотностей нагретой в кингстонном ящике и забортной воды. В подтверждение можно привести факты перегрева воды внутреннего контура охлаждения дизель-генераторов на стоянках [1,2]. Хотя, в этом случае движение воды за бортом все-таки есть из-за течения реки.

Переходя к задаче теплового расчета бокскулера, отметим, что в числе условий должны быть известны не менее трех температур теплоносителей и массовые расходы протекающих через трубную систему сред и влияние на экологические показатели двигателя [3,4,5,6,7].

Что касается расхода охлаждаемой среды, то она определяется работой циркуляционного насоса. По части расхода забортной воды через бокскулер отметим – это отдельная задача гидродинамики. Это же и относится к температуре забортной воды в трубной системе.

Задача совместного решения системы уравнений гидродинамики и теплопередачи в данной сложной системе проточной части канала кингстонного ящика и трубного пучка бокскулера требует вычислительных средств чрезвычайно большой мощности и быстродействия.

На первом этапе определим параметры режимов и граничных условий, чтобы на этой базе выполнить ориентировочные расчеты без 3D моделирования.

Схематически представим систему проточной части кингстонного ящика в виде канала, в котором расположен бокскулер, занимающий долю сечения проточной части рис. 3.

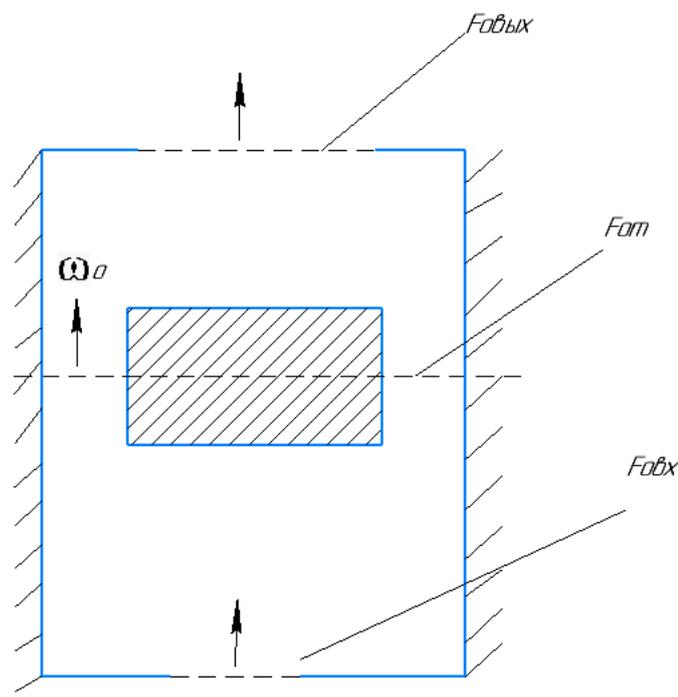


Рис. 3. Расчетная схема проточной части кингстонного ящика

$F_{овх}$ - площадь входных окон на днище

$F_{от}$ – площадь сечения между стенками ящика бокскулером

$F_{овых}$ - площадь выходных окон на борту

Сопротивление течения вокруг бокскулера пренебрежимо мало в сравнении с гидравлическим сопротивлением пучка труб в 15...40 рядов. Скорость течения вокруг бокскулера $\omega\sigma$ в сечении площадью. На входе в канал система щелей с площадью $F_{овх}$ на выходе $F_{овых}$.

Зададим часто встречающиеся соотношения площадей:

$$F_{овых}/F_o=0,4; F_{овых}/F_o=0,2; F_{овых}/F_o=0,5$$

где F_o -сечение свободного канала. Рассчитаем коэффициенты сопротивления диафрагм в канале по данным [8,9].

Сопротивление бокскулера так же определим как сопротивление тела в канале [1,2].

На данном этапе неизвестно значение средней температуры в кингстонном ящике, соответственно, не известен напор естественной циркуляции.

Примем по известным образцам разность высот выходных и входных щелей 2,0 м.

Рассмотрим три варианта разности температур забортно й воды и воды в кингстонном ящике: 20,40,60°C.

$$\Delta P = gH(Q_{зб} - Q_{кя}), \tag{1}$$

Рассчитываем напор циркуляции для этих разностей по формуле (1):

где $g=9.81 \text{ м/с}^2$ -ускорение силы тяжести;

H , м-разность высот;

$Q_{зб}$, $Q_{кя}$ - кг/м³-плотность воды за бортом и в кингстонном ящике соответственно.

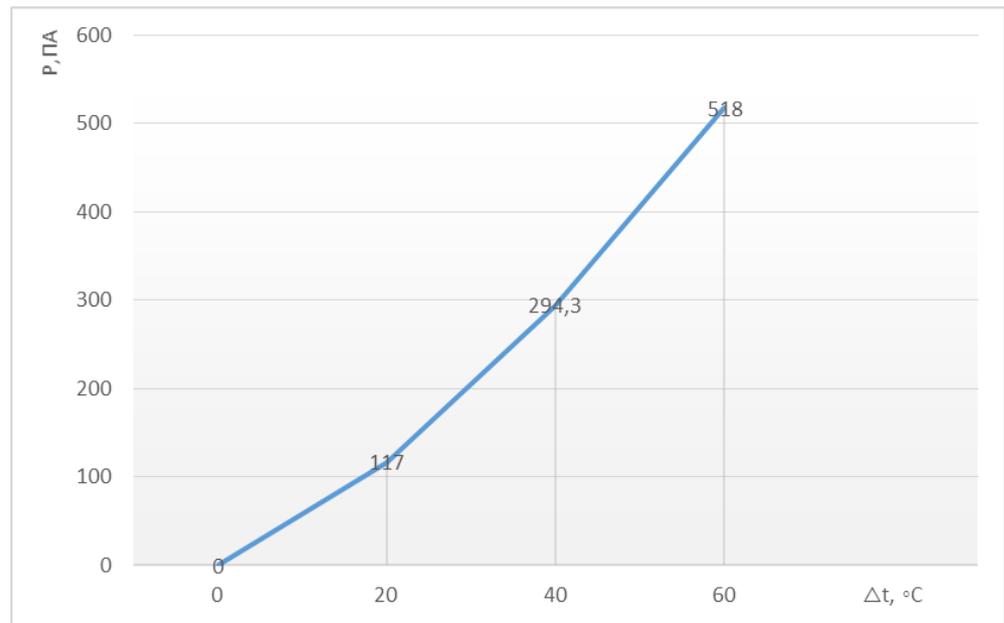


Рис. 4. Напор циркуляции в канале кингстонного ящика

Для этих напоров циркуляции подсчитаны скорости обтекания бокскулера рис. 5.

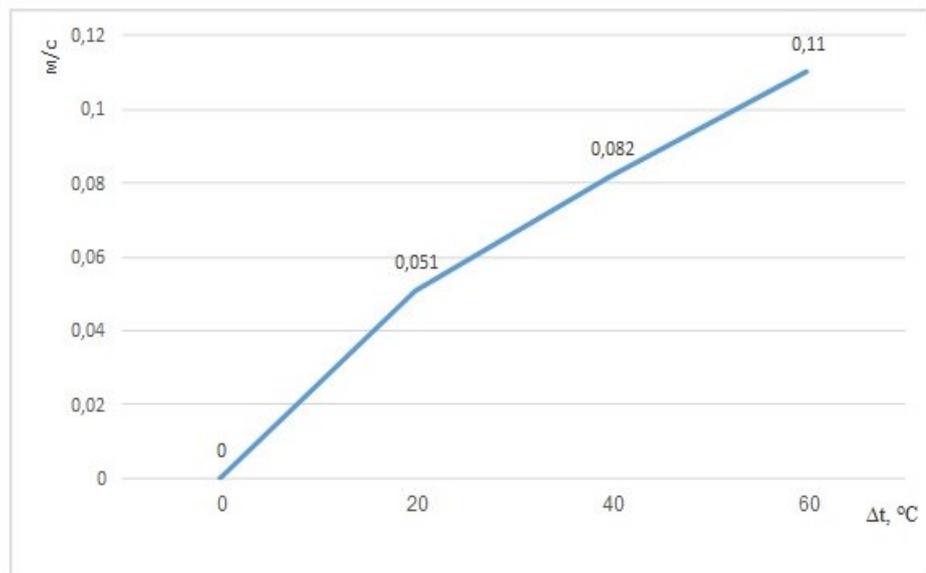


Рис. 5. Скорость течений забортной воды при естественной циркуляции в свободном сечении вокруг бокскулера

Таким образом, для самого неблагоприятного режима эксплуатации бокскулера на стоянке при организации течения только благодаря естественной циркуляции можно ожидать скоростей восходящих потоков вне бокскулера в соответствии с данными графика рис. 5.

На практике значения температуры воды в кингстонном ящике находятся в пределах 35...45°C. При средней величине 40°C и температуре забортной воды 20°C разность температур равна 20°C. Соответственно, скорость свободной циркуляции вне пучка труб не больше 0,05 м/с.

Без численного моделирования течения внутри трубной системы говорить о скорости движения воды между трубками невозможно. Но можно считать, что эта скорость будет не выше 0,05 м/с.

Для бокскулеров GEA Bloksma B.V. произведен обратный тепловой расчет с определением проектного значения скорости поперечного обтекания трубных пучков, обеспечивающего паспортный теплосъем.

Расчет выполнялся по методике, изложенной в справочнике [10].

Получены значения минимальной расчетной скорости поперечного обтекания пучков труб в пределах 0,02...0,08 м/с. Этот результат коррелируется с данными рис. 5.

Понятно, что скорость поперечного тока в трубном пучке зависит от множества факторов, в том числе густоты пучка, количества рядов труб, режима течения и т.д. Но она однозначно меньше 0,05 м/с.

Мы условно приняли среднюю скорость обтекания труб 0,02 м/с. Это дает уверенность, что спроектированный под такую низкую скорость бокскулер не будет недоразмерен.

Проектный расчет выполнялся по формулам [10,11,12]. Средний температурный напор $\Delta t_{ср}$ определялся по формуле 4,2-6 справочника [10].

Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

Типоразмер		Охладитель проточный одноконтурный ОП.К-6.10.27.1500	
Теплоноситель		Горячий	Холодный
Условный диаметр патрубков, мм		100	—
Вид теплоносителя		Вода пресная	Вода морская
Расход		47904,0 кг/ч (48,0 м ³ /ч при 20 °С)	—
Температура на входе	°С	56,0	32,0
Температура на выходе	°С	38,0	—
Гидравлическое сопротивление	кПа	26,50	—
Расчетная мощность	кВт	1000	
Запас площади теплообменной поверхности на загрязнения		27...30 % (в зависимости от материала теплообменных труб)	
Площадь теплообменной поверхности по наружному диаметру теплообменных труб	м ²	83,7	
Скорость судна	узел	не менее 3,0	
Расчетная температура	°С	95,0	
Расчетное/пробное давление	МПа	0,35 / 0,53	
Масса теплообменника без жидкостей	кг	950	
Вместимость полостей	л	207	—
Материалы доска трубная трубки теплообменные перегородки камера водяная		латунь ЛО62-1 Мельхиор МНЖМц10-1-1 (заменитель – CuNi90-10, CuNi10Fe1Mn) медь М3 сталь углеродистая	

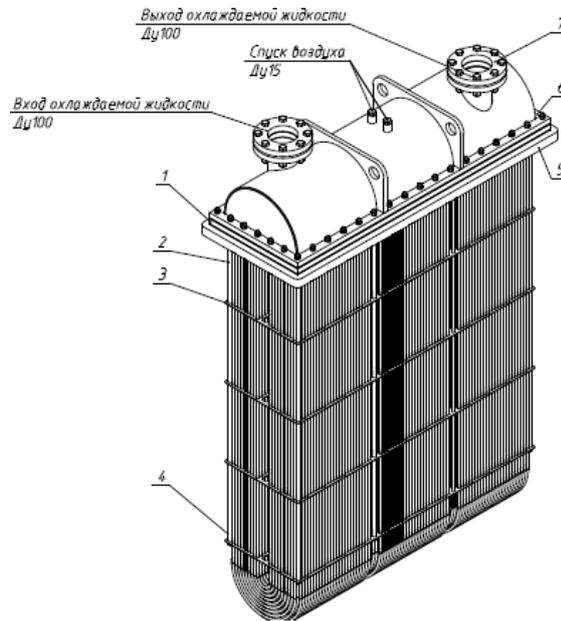


Рис. 6. Чертеж общего вида судового охладителя погружного типа

Фото изготовленного охладителя перед испытаниями приведено на рис 7.



Рис. 7. Общий вид погружного охладителя

Результаты

По результатам работы сделаны следующие выводы:

- массогабаритные характеристики бокскулера на 50...100% превышают эти же показатели кожухотрубных аппаратов;
- основная причина переразмеривания бокскулеров-низкие скорости охлаждающей воды по межтрубному пространству в сочетании со значительной неравномерностью течения воды по фронту теплообменного аппарата;

– для значительного повышения точности тепловых и гидравлических расчетов бокскулеров необходимо использование численных методов расчета с решением систем управлений гидродинамики и теплопередачи в 3D постановке для трубной системы и канала кингстонного ящика в комплексе.

Список литературы

1. Рыжков А.В. О работе «ледовых ящиков» ледоколов на мелководье [Текст] / А.В.Рыжков, К.Е. Сазонов // Избр. докл. 4-й Сахалинской НТК Мореходство и морские науки — 2012 — Южно-Сахалинск, 2013 — С. 223-226.
2. Харламова, А.Э., Покусаев М.Н., Трифонов А.В. (2023). Вестник астраханского государственного технического университета. серия: Морская техника и технология. судостроение, судоремонт и эксплуатация флота № 2,2023, 30-40. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-2-30-40>
3. ГОСТ 19439.3-74 Судовые эксплуатационные документы. Типовая номенклатура документов для морских судов и судов внутреннего плавания
4. (с Изменениями N 1, 2, 3).
5. ГОСТ 24166-80 Система технического обслуживания и ремонта судов. Ремонт судов. Термины и определения.
6. Матвеев, Ю.И. Особенности напесовки облицовок гребных валов / Ю.И. Матвеев, В.А. Орехво, М.Ю. Храмов, А.В. Орехво // Вестник ВГАВТ. 2019. № 60. С. 232–237.
7. Российское Классификационное Общество. Правила классификации и постройки судов - Москва: 2024. – 1726 с.
8. Медведев, Г.В., Храмов, М.Ю. Воздействие температуры отработавших газов судовых энергетических установок на качество их очистки с использованием метода каталитической нейтрализации / Медведев, Г.В., Храмов, М.Ю.// Научные проблемы водного транспорта, (62), 167-174. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.47>
9. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям Т.1.М: Машиностроение 1992г. С 165-166.
10. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям Т2. М; Машиностроение, 1992. С 254.
11. Бажан, П.И. Проектирования и расчет теплообменных аппаратов/ Бажан П.И., Исваев С.Е., Сорокин О.Г.- Н. Новгород: Изд-во 2 Печатный дом Василия Миронова; 2017г- 438с.
12. Лаптев, А.Г. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике: Пособие к расчету аппаратов / Лаптев А.Г., Фарахов М.И.-Казань: Изд-во Казанского гос. Ун-та, 2008-729с.
13. Гринев, Е. В., Валиулин, С. Н., Хлыбов, А. А., & Матвеев, Ю. И. (2023). Вопросы технологии лазерной сварки концов теплообменных труб в трубных решетках. Научные проблемы водного транспорта, (77), 79-90. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi77.416>

References

1. Ryzhkov A.V. O rabote «ledovykh yashchikov» ledokolov na melkovod'e [Tekst] / A.V. Ryzhkov, K.E. Sazonov // Izbr. dokl. 4-i Sakhalinskoi NTK Morekhodstvo i morskije nauki — 2012 — Yuzhno-Sakhalinsk, 2013 — S. 223-226.
2. Kharlamova, A.Eh., Pokusaev M.N., Trifonov A.V. (2023). Vestnik astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. sudostroenie, sudoremont i ehkspluatatsiya flota № 2,2023, 30-40. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-2-30-40>
3. GOST 19439.3-74 Sudovye ehkspluatatsionnye dokumenty. Tipovaya nomenklatura dokumentov dlya morskikh sudov i sudov vnutrennego plavaniya (s Izmeneniyami N 1, 2, 3).
4. GOST 24166-80 Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta sudov. Remont sudov. Terminy i opredeleniya.
5. Matveev, YU.I. Osobennosti napressovki oblitsovok grebnykh valov / YU.I. Matveev, V.A. Orekhvo, M.YU. Khramov, A.V. Orekhvo // Vestnik VГАVТ. 2019. № 60. S. 232–237.

6. Rossiiskoe Klassifikatsionnoe Obshchestvo. Pravila klassifikatsii i postroiki sudov Moskva: 2024. – 1726 s.
7. Medvedev, G.V., Khramov, M.YU. Vozdeistvie temperatury otrabotavshikh gazov sudovykh ehnergeticheskikh ustanovok na kachestvo ikh oчитки s ispol'zovaniem metoda kataliticheskoi neitralizatsii / Medvedev, G.V., Khramov, M.YU.// Nauchnye problemy vodnogo transporta, (62), 167-174. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.47>
8. Idel'chik, I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam T.1.M: Mashinostroenie 1992g. S 165-166.
9. Idel'chik, I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam T2. M; Mashinostroenie, 1992. S 254.
10. Bazhan, P.I. Proektirovaniya i raschet teploobmennykh apparatov/ Bazhan P.I., Isvaev S.E., Sorokin O.G.- N. Novgorod: Izd-vo 2 Pечатnyi dom Vasiliya Mironova; 2017g-438s.
11. Laptev, A.G. Gidromekhanicheskie protsessy v neftekhimii i ehnergetike: Posobie k raschetu apparatov / Laptev A.G., Farakhov M.I.-Kazan': Izd-vo Kazanskogo gos. Un-ta, 2008-729s.
12. Grinev, E. V., Valiulin, S. N., Khlybov, A. A., & Matveev, YU. I. (2023). Voprosy tekhnologii lazernoй svarki kontsov teploobmennykh trub v trubnykh reshetkakh. Nauchnye problemy vodnogo transporta, (77), 79-90. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi77.416>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валиулин Сергей Николаевич, ООО «Гидротермаль» г. Нижний Новгород, Россия к.т.н., технический директор ООО «Гидротермаль» 603163, Нижний Новгород, ул. Набережная Гребного Канала, 6, e-mail: snval.54@yandex.ru

Храмов Михаил Юрьевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры Эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: m.u.hramov@yandex.ru

Sergey N. Valiulin, Hydrothermal LLC, Nizhny Novgorod, Russia PhD., Technical Director of Hydrothermal LLC 603163, Nizhny Novgorod, Naberezhnaya Grebnogo Kanala, 6, e-mail: snval.54@yandex.ru

Mikhail Y. Khramov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: m.u.hramov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2025; принята к публикации 22.12.2025; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 27.06.2025; published online 20.03.2026.