

EXPERIMENTAL METHODS FOR ASSESSING THE MATERIALS QUALITY OF LINING FOR THE SHIP BOILERS COMBUSTION CHAMBERS

V. A. Zhukov¹, I. V. Ershova²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

² — Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russian Federation

Autonomous boilers, the most important element of which is the combustion chamber, are widely used in ship power plants. A necessary condition for a high resource of boilers and their trouble-free operation is the high quality of the lining of the furnace space, operating under variable thermal conditions. The quality of the material from which it is made has a decisive influence on the reliability of the lining. The methods of experimental research that can be used to assess the quality of materials for lining the furnace spaces of autonomous boilers are described in the paper. The methodology of conducting research using the method of equivalent materials is presented, laboratory installations for conducting vibroacoustic studies and modal analysis of spectrograms and thermal imaging studies of samples of lining materials are described. As a result of the research, information on the influence of conditions for the formation of equivalent materials samples on their thermophysical properties, spectrograms of the state of brickwork bricks made of various materials, thermal images of lining elements in a stationary temperature field at different locations on the heater is obtained. The results obtained indicate the expediency of using the proposed methods at all stages of the life cycle of autonomous boilers: when designing for a rational choice of lining materials taking into account operational factors, during manufacture and repair during operation to control the quality of materials used and detect hidden defects. In order to increase the effectiveness of the proposed experimental methods for assessing the quality of lining materials of boiler combustion chambers, it is necessary to expand the practice of their use, the accumulation of the results obtained and their statistical processing, which allows us to determine the error of the methods and improve laboratory installations.

Keywords: autonomous boilers, combustion chambers, lining material, equivalent materials, experimental methods, modal analysis, non-destructive thermal imaging control, recommendations for use.

For citation:

Zhukov, Vladimir A., and Irina V. Ershova. "Experimental methods for assessing the materials quality of lining for the ship boilers combustion chambers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 126–134. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-126-134.

УДК 621.18

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ ФУТЕРОВКИ ТОПОЧНЫХ КАМЕР СУДОВЫХ КОТЛОВ

В. А. Жуков¹, И. В. Ершова²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», Архангельск, Российская Федерация

Предметом исследования являются автономные котлы, важнейшим элементом которых служит топочная камера, получившие широкое применение в судовых и корабельных энергетических установках. Подчеркивается, что необходимым условием высокого ресурса эксплуатации котлов и их безаварийной эксплуатации является высокое качество футеровки топочного пространства, работающей в условиях переменных тепловых режимов, а также отмечается, что определяющее влияние на надежность футеровки оказывает качество материала, из которого она изготовлена. В статье описаны методы экспериментальных исследований, которые могут быть использованы для оценки качества материалов обмуровки топочных пространств автономных котлов. Представлена методика проведения исследований с использованием эквивалентных материалов, описаны лабораторные установки для проведения виброакустических исследований и проведения модального анализа спектрограмм и тепловизионных исследований образцов

материалов футеровки. В результате проведенных исследований получены сведения о влиянии условий формирования образцов эквивалентных материалов на их теплофизические свойства, спектрограммы состояния кирпичей обмуровки из различных материалов, тепловые изображения элементов футеровки в условиях стационарного температурного поля при их различном расположении на нагревателе. Полученные результаты исследования свидетельствуют о целесообразности применения предложенных методов на всех этапах жизненного цикла автономных котлов: от проектирования в целях рационального выбора материалов футеровки с учетом эксплуатационных факторов до изготовления и ремонта в процессе эксплуатации в целях контроля качества используемых материалов и обнаружения скрытых дефектов. С целью повышения эффективности применения предложенных экспериментальных методов оценки качества материалов футеровки топочных камер котлов необходимо увеличение практики их использования, накопление полученных результатов и их статистическая обработка, позволяющая определить погрешность методов и усовершенствовать лабораторные установки.

Ключевые слова: автономные котлы, топочные камеры, материал футеровки, эквивалентные материалы, экспериментальные методы, модальный анализ, неразрушающий тепловизионный контроль, рекомендации по применению.

Для цитирования:

Жуков В. А. Экспериментальные методы оценки качества материалов футеровки топочных камер судовых котлов / В. А. Жуков, И. В. Ершова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 126–134. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-126-134.

Введение (Introduction)

В состав энергетических установок судов и кораблей различного назначения в качестве главных и вспомогательных элементов входят *автономные котлы* — первые тепловые машины, появившиеся на флоте [1]. Несмотря на более чем двухсотлетнюю историю применения котлов в судовой и корабельной энергетике задачи, связанные с их модернизацией, остаются актуальными. Непрерывное увеличение энерговооруженности судов и кораблей приводит к форсированию основных элементов энергетических установок, в том числе котлов. Наиболее теплонагруженным элементом автономных котлов являются топочные устройства, нарушения в работе которых приводят к выходу котлов из строя и серьезным авариям [2]–[4]. Условия работы судовых котлов осложняются также быстрой и частой сменой нагрузки. Для продолжительной и надежной работы котлов необходимо обеспечить прочность их конструкций, в частности футеровки.

Судовые котельные агрегаты футеруются огнеупорными материалами, во многом определяющими срок службы котла. При тепловом воздействии на теплоизоляционные материалы футеровки возникают термические напряжения, приводящие к деформации, растрескиванию и разрушению кирпичной кладки. Кроме того, многолетняя практика эксплуатации судовых паровых котлов показывает, что разрушение обмуровочных поверхностей топок остается одной из наиболее распространенных причин аварий, сопровождающихся выходом котлов из строя. В настоящее время уровень аварийности котлов продолжает оставаться существенно выше аварийности остального судового энергетического оборудования [5].

При выборе материалов для футеровки котла и технологии кладки необходимо учитывать как эксплуатационные воздействия на футеровку [6]–[8], так и свойства материалов [9]. К основным из них относятся теплопроводность, огнестойкость, термостойкость и механическая прочность. Наиболее достоверные сведения о свойствах материалов можно получить, используя сочетание различных методов исследования. Результаты, полученные с использованием методов численного моделирования процессов теплообмена в футеровке котла, описаны в работах [10], [11]. Дополнительная информация о свойствах материалов футеровки может быть получена в результате проведения физических экспериментов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При проведении экспериментальных исследований свойств футеровочных материалов, используемых в автономных котлах, применялись три метода: метод эквивалентных материалов (МЭМ),

метод модального анализа спектрограмм и тепловизионный метод. Сущность МЭМ заключается в том, что на физических моделях при соблюдении условий подобия изучаются зависимости физических свойств материалов от различных факторов с целью разработки рекомендаций по использованию материалов. Корректность выбора эквивалентного материала (ЭМ) оказывает существенное влияние на результат решения конкретной задачи моделирования. Эквивалентные материалы представляют собой разновидность широкого класса композитных материалов (КМ) многокомпонентных систем на основе наполнителя и связующего.

Существует несколько способов представления и описания структуры КМ. Одним из наиболее общих является рассмотрение ее как частного случая структур дисперсных систем. П. А. Ребиндером выделено три типа структур: коагуляционная, конденсационная и кристаллизационная. Для моделирования кирпичной кладки наиболее предпочтительной является *конденсационная структура*, характеризующаяся наличием непосредственного контакта между частицами, обеспечивающего высокую прочность. Одновременно существует *жидкая фаза* в виде тончайших прослоек. При выборе эквивалентного материала рекомендуется использовать соотношение [12]:

$$R_m = \frac{L_m \rho_m}{L_n \rho_n} R_n, \quad (1)$$

где R_m, R_n — соответственно предел прочности на сжатие материала модели и натуре;

L_m, L_n — линейные размеры материала модели и натуре;

ρ_m, ρ_n — соответственно плотности материала модели и натуре.

Для соблюдения подобия при моделировании упругих систем необходимо выполнение следующих условий:

$$E_m = \frac{L_m \rho_m}{L_n \rho_n} E_n; \quad (2)$$

$$\mu_m = \mu_n, \quad (3)$$

где E_m, E_n — модули упругости материалов модели и натуре соответственно;

μ_m, μ_n — коэффициенты Пуассона.

На основании указанных рекомендаций предложены ЭМ для изучения влияния условий формирования материала на его теплофизические свойства. В качестве ЭМ при проведении исследований использовались *композитные материалы* на основе древесной стружки, имитирующие футеровочные материалы. Эквивалентный материал помещался в матрицу диаметром 104 мм, высотой 50 мм (рис. 1) и подвергался *сжатию гидравлическим прессом* П6334 (рис. 2). Давление, создаваемое прессом в опытных образцах, изменялось в диапазоне от 25 МПа до 100 МПа.

Определение теплопроводности исходных материалов и образцов ЭМ осуществлялось с помощью прибора МИТ-1, определение теплоемкости исходных материалов и образцов — с помощью прибора ИТ-С-400.



Рис. 1. Матрица для формирования опытных образцов



Рис. 2. Гидравлический пресс П6334

Модальный анализ является эффективным экспериментальным методом определения динамических характеристик конструкций и материалов на основе результатов измерений и анализа вынужденных механических колебаний. Соединенные с анализатором датчик силы и акселерометр позволяют проводить одновременные измерения вынуждающей динамической силы и результирующих механических колебаний исследуемой конструкции. В результате обработки данных, осуществляемой анализатором, может быть получена информация, необходимая для определения динамических характеристик исследуемой конструкции или материала.

Существует два метода модального анализа: традиционный и операционный. В случае использования *традиционного модального метода* создается контролируемое входное возбуждение и проводится анализ между выходным откликом и входным возбуждением. Источником входного возбуждения является ударный молоток или электродинамический возбудитель со встроенным датчиком силы. В реальных условиях эксплуатации для сложных конструкций с многомодальными колебаниями не существует возможности проведения традиционного модального анализа. *Операционный модальный метод* позволяет выполнить анализ с использованием только выходного отклика конструкции. Частотный анализ кирпича, изготовленного из футеровочного материала, проводился на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 3 [13].

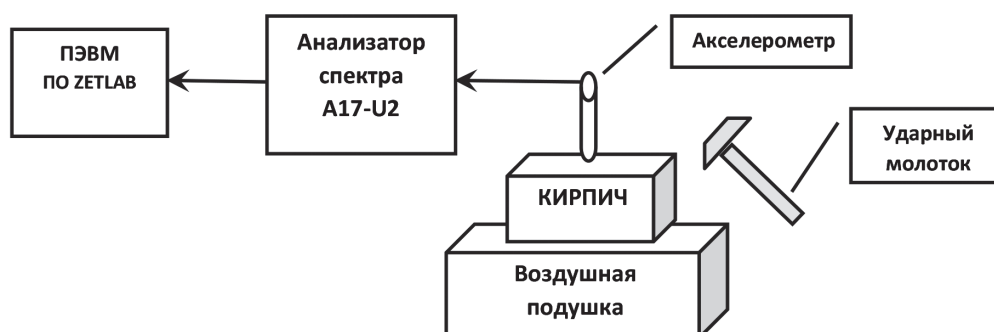


Рис. 3. Функциональная схема экспериментальной установки для модального анализа материала

Для предотвращения повреждений обмуровки котлоагрегатов рекомендуется тщательно проверять поступающие огнеупоры. При внешнем осмотре изделий они должны иметь чистый и однородный вид, минимальное количество темных пятен, правильные размеры и звонкость.

Не допускаются слоистость, кривизна, перекосы и трещины. Обычная система контроля качества обмуровки основана на отборе изделий и последующем испытании выпиленных из изделий образцов. Стремление сохранить готовую продукцию от разрушения и одновременно повысить оперативность контроля привело к разработке *методов неразрушающего контроля*. В огнеупорной промышленности нашли применение методы звукового и радиометрического (изотопного) контроля, при применении которых изделия не разрушаются. Первый метод применяют при паспортизации готовых изделий, второй — преимущественно при контроле технологического процесса.

Возможности неразрушающих методов могут быть расширены за счет применения *тепловизионного контроля*. Методы неразрушающего контроля тепловизионного вида используют при исследовании тепловых процессов в изделии, причем в большинстве случаев регистрируют поверхностное тепловое или температурное поле объекта контроля, в пространственно-временной структуре которого содержатся «отпечатки» внутренних геометрических или теплофизических аномалий [14]. Методы теплового контроля основаны на взаимодействии теплового поля объекта с термометрическими чувствительными элементами (термопарой, фотопремником и др.), преобразовании параметров поля (интенсивности, температурного градиента и др.) в электрический или другой сигнал и передаче его на регистрирующий прибор. Необходимым условием применения теплового контроля является отличие интегральной или локальной температуры изделий от температуры окружающей среды, которое создается либо искусственно с помощью внешних источников теплового нагружения, либо в силу естественных причин при изготовлении или функционировании изделий.

Стендовые и промышленные испытания обмуровок котлов рекомендуются стандартами, однако для формованных изделий при стендовом тепловом контроле следует учесть их конструктивные особенности и способы теплового воздействия. Схема разработанного и использованного в экспериментальных исследованиях стенда приведена на рис. 4.

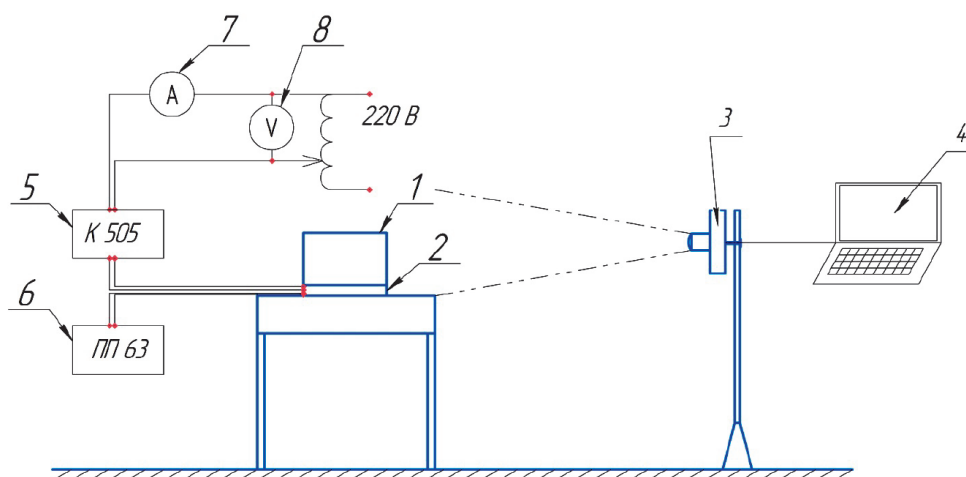


Рис. 4. Схема экспериментального стенда тепловизионного контроля:
1 — образец; 2 — источник теплового нагружения; 3 — тепловизор;
4 — персональный компьютер; 5 — измерительный комплект K-505;
6 — потенциометр ПП-63; 7 — амперметр; 8 — вольтметр

Мощность теплового электрического нагревателя (ТЭН) составила 500 Вт, время нагрева образца — 5 мин. Температурное поле при проведении эксперимента регистрировалось тепловизором с одной стороны ложковой и постельной граней образца. Образцами при проведении виброакустических и тепловизионных исследований являлись кирпичи наиболее распространенных марок, используемых при изготовлении футеровки: кирпич шамотный ША-5, кирпич шамотный ША-8, кирпич пенодиатомитовый КПД-400, а также кирпич силикатный М-150 и кирпич строительный красный.

Результаты (Results)

В результате применения МЭМ установлено, что давление, оказываемое при формировании опытных образцов, влияет на их теплофизические характеристики: плотность и теплопроводность материала возрастают практически линейно, а его теплоемкость меняется менее значительно. Изменение коэффициента температуропроводности a (рис. 5) рассчитывается по формуле

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho},$$

где λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

c_p — удельная изобарная теплоемкость материала, кДж/(кг·К);

ρ — плотность материала, кг/м³.

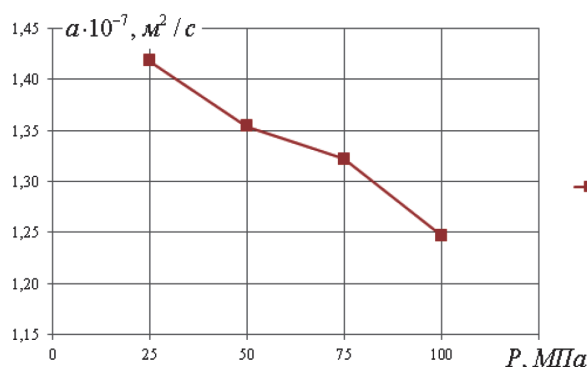


Рис. 5. Изменение коэффициента температуропроводности эквивалентных материалов в зависимости от давления сжатия образца

В результате применения *модального метода исследований* была получена серия спектрограмм для футеровочных кирпичей, изготовленных из различных материалов. Пример спектрограммы приведен на рис. 6.

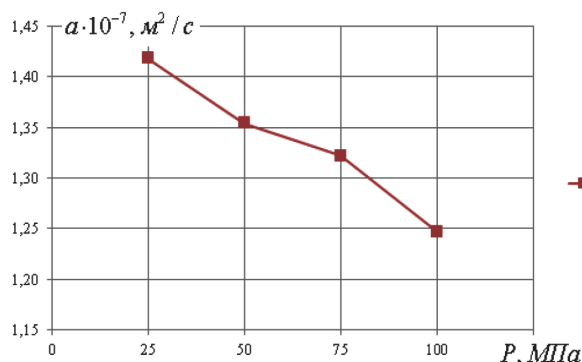


Рис. 6. Спектрограмма состояния кирпича шамотного марки ША-5, расположенного постельной гранью после входного возбуждения (удара)

Обработка модальных характеристик различных футеровочных материалов позволяет сделать вывод о том, что применение данного метода целесообразно при выборе материала футеровки и определении расположения кирпича в кладке. Спектрограммы позволяют также выявлять внутренние дефекты в элементах футеровки. Результатами тепловизионного контроля являются тепловые изображения, которые характеризуют распределение температур в кирпичах, изготовленных из различных материалов. Пример такого изображения приведен на рис. 7.

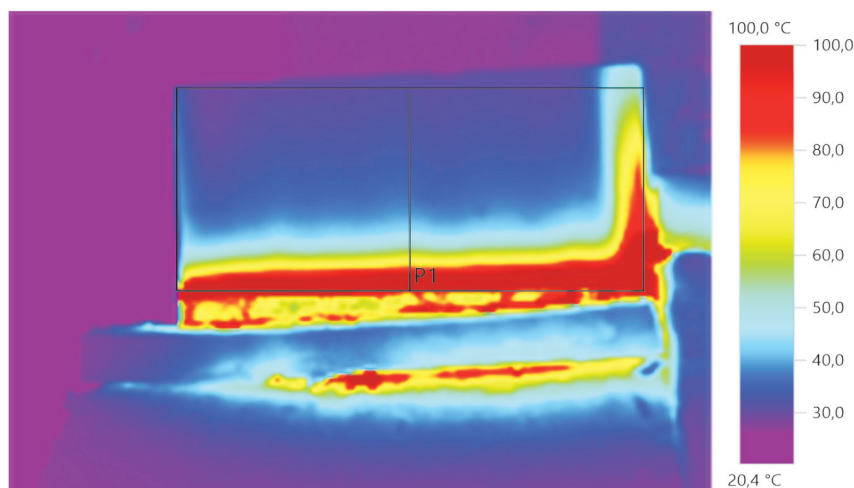


Рис. 7. Тепловое изображение кирпича пенодиатомитового КПД-400

Вид теплового изображения элемента футеровки позволяет определить *зоны тепловых неоднородностей*, которые могут быть связаны с изменением плотности, теплоемкости или теплопроводности структурных элементов огнеупора. Изломы изотермических поверхностей неоднозначно свидетельствуют о внутренних геометрических или теплофизических аномалиях изделия, снижающих его качество.

Обсуждение (Discussion)

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что применение физических методов различной природы позволяет получать информацию о качестве материалов футеровки топочных камер автономных котлов и достоверно с высокой точностью определять расположение внутренних дефектов. Рассмотренные экспериментальные методы позволяют осуществлять рациональный выбор материала при проектировании котлов в зависимости от эксплуатационных факторов, выполнять входной контроль качества материалов футеровки, а также разрабатывать мероприятия по совершенствованию технологии изготовления футеровочных материалов и монтажа обмуровки топочных камер.

Разработанные экспериментальные установки могут быть использованы как на предприятиях, выпускающих футеровочные материалы, так и на предприятиях, осуществляющих проектирование, производство и ремонт судовых и корабельных автономных котлов на всех этапах жизненного цикла изделий. Для более эффективного использования предложенных методов необходимо расширение их практического применения, анализ накопленного опыта и статистическая обработка полученных результатов, позволяющая определить погрешность методов и усовершенствовать лабораторные установки.

Выводы (Summary)

На основании проведенных исследований и полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Использование метода эквивалентных материалов целесообразно использовать для предварительного определения теплофизических свойств материалов (теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности) в зависимости от структуры материала и способов его получения, а также оценки возможных температурных напряжений в футеровках энергетических котлов, работающих в условиях переменных температурных режимов.

2. Применение виброметрических исследований обмуровочных материалов котельных агрегатов является перспективным для выявления некачественных материалов на стадии подготовки производства, а также в процессе изготовления и ремонта судовых и корабельных автономных котлов.

3. Полученные результаты тепловой диагностики опытных образцов обмуровки, изготовленных из различных материалов, свидетельствуют о перспективности данного метода для оперативного неразрушающего контроля изоляционных и обмуровочных материалов энергетических котлов с целью выявления скрытых дефектов и аномалий плотности и теплопроводности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казенов С. В. Паровая турбина — главный двигатель надводных кораблей ВМФ / С. В. Казенов, В. С. Казенов. — СПб.: Фонд «Отечество», 2016. — 400 с.
2. Денисенко Н. И. Идентификация повреждений элементов судовых котельных установок / Н. И. Денисенко, И. И. Костылев. — СПб.: Элмор, 2007. — 152 с.
3. Петров А. И. Оценка причин повреждений обмуровок в топках судовых паровых котлов / А. И. Петров // Вестник МГТУ: труды Мурманского гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 17–19.
4. Жуков В. А. Характерные повреждения судовых автономных котлов в процессе эксплуатации / В. А. Жуков, И. В. Ершова // Сборник тезисов докладов национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2022. — С. 30–31.
5. Епихин А. И. Безопасность эксплуатации судовых котлов / А. И. Епихин // Global science. Development and novelty. Collection of scientific papers, on materials of the VI International Scientific Conference. — Geneva: Ed. SPC “LJournal”, 2017. — Vol. Part 3. — Pp. 33–36. DOI: 10.18411/gdsn-25-12-2017-39.
6. Бразновский В. К. Анализ качества эксплуатации вспомогательных котельных установок судов флота рыбной промышленности / В. К. Бразновский, В. Т. Томилко // Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии: материалы IV Междунар. науч. конф. — Калининград: Калининградский гос. техн. ун-т, 2018. — С. 262–268.
7. Яковлев П. В. Безопасная эксплуатация судовых паровых котлов, отработавших нормативный срок службы / П. В. Яковлев, Н. Н. Панасенко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: морская техника и технология. — 2010. — № 2. — С. 119–124.
8. Жуков В. А. Анализ эксплуатационных воздействий на стенки камер сгорания судовых котлов / В. А. Жуков, И. В. Ершова // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы одиннадцатой междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2022. — С. 200–202. DOI: 10.52899/9785883036322_200_202.
9. Петров А. И. Применение огнеупорных материалов при ремонте топок судовых котлов и инсинераторов / А. И. Петров, А. А. Егоров // Наука производству: материалы междунар. науч.-практ. конф. — Мурманск: Мурманский гос. техн. ун-т, 2016. — С. 285–290.
10. Bşhan V. Application of Fuzzy Dematel Technique to Assess Most Common Critical Operational Faults of Marine Boilers / V. Bşhan, H. Demirel // Politeknik Dergisi. — 2019. — Vol. 22. — Is. 3. — Pp. 545–555.
11. Стенин В. А. Моделирование тепловых процессов в футеровке судового котла / В. А. Стенин, И. В. Ершова, В. А. Жуков // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 4–1 (54). — С. 112–116. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.040.
12. Стенин В. А. Метод эквивалентных материалов в исследовании деформаций футеровки котла / В. А. Стенин, И. В. Ершова, И. С. Светлов // Наука и инновации — современные концепции: сборник научных статей по итогам работы междунар. науч. форума / Отв. ред. Д. Р. Хисматуллин. — М.: Изд-во «Инфинити», 2020. — С. 105–111.
13. Стенин В. А. Модальный анализ в диагностике кирпичной кладки / В. А. Стенин, И. В. Ершова, Е. А. Хорохонов // Там же / Отв. ред. Д. Р. Хисматуллин. — М.: Изд-во «Инфинити», 2019. — С. 141–149.
14. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. — М.: ИД «Спектр», 2009. — 544 с.

REFERENCES

1. Kazenov, S. V., and V. S. Kazenov. *Parovaya turbina — glavnyi dvigatel' nadvodnykh korablei VMF*. SPb.: Fond «Otechestvo», 2016.
2. Denisenko, N. I., and I. I. Kostylev. *Identifikatsiya povrezhdenii elementov sudovykh kotel'nykh ustanovok*. SPb.: «Elmor», 2007.

3. Petrov, A. I. "Estimation of reasons of refractory damage in ship steam boilers" furnaces." *Vestnik of MSTU* 18.1 (2015): 17–19.
4. Zhukov, V. A., and I. V. Ershova. "Kharakternye povrezhdeniya sudovykh avtonomnykh kotlov v protsesse ekspluatatsii." *Sbornik tezisev dokladov natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova»*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2022. 30–31.
5. Epikhin, A. I. "Operational safety of marine boilers." *Global science. Development and novelty. Collection of scientific papers, on materials of the VI International Scientific Conference*. Part 3. Geneva: Ed. SPC "LJournal", 2017. 33–36.
6. Braznovsky, Victor Krishevich, and Vladimir Timofeevich Tomilko. "Analysis of the quality of operation of auxiliary boilers vessels of the fishing industry fleet." *BALTIISKII MORSKOI FORUM. Materialy VI Mezhdunarodnogo Baltiiskogo morskogo foruma*. Kaliningrad: Kaliningradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2018. 262–268.
7. Yakovlev, Pavel Viktorovich, and Nickolay Nickitovich Panasenko. "Safe exploitation of ship steam-boilers worked for normative service term." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2010): 119–124.
8. Zhukov, V. A., and I. V. Ershova. "Analysis of operational impacts on the walls of combustion chambers of marine boilers." *Aktual'nye problemy morskoi energetiki: materialy odinnadtsatoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2022. 200–202. DOI: 10.52899/9785883036322_200_202.
9. Petrov, A. I., and A. A. Egorov. "Primenenie ognepurnykh materialov pri remonte topok sudovykh kotlov i insineratorov." *Nauka — proizvodstvu: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Murmansk: Murmanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016. 285–290.
10. Başhan, Veysi, and Hakan Demirel. "Application of fuzzy dematel technique to assess most common critical operational faults of marine boilers." *Politeknik Dergisi* 22.3 (2019): 545–555.
11. Stenin, Valery A., Irina V. Ershova, and Vladimir A. Zhukov. "Simulation of thermal processes in the lining of the ship's boiler." *Marine intellectual technologies* 4–1(54) (2021): 112–116. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.040
12. Stenin, V. A., I. V. Ershova, and I. S. Svetlov. "Metod ekvivalentnykh materialov v issledovanii deformatsii futerovki kotla." *NAUKA I INNOVATsII — SOVREMENNYE KONTSEPTsII. Sbornik nauchnykh statei po itogam raboty Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma*. Edited by D. R. Khismatullin. M.: Izdatel'stvo Infiniti, 2020. 105–111.
13. Stenin, V. A., I. V. Ershova, and E. A. Khorokhonov. "Modal'nyi analiz v diagnostike kirpichnoi kladki." *Nauka i innovatsii — sovremennye kontseptsii. Sbornik nauchnykh statei po itogam raboty Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma*. Edited by D. R. Khismatullin. M.: Izdatel'stvo Infiniti, 2019. 141–149.
14. Vavilov, V. P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoi kontrol'*. M.: ID Spektr, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: zhukovva@gumrf.ru
Ershova Ирина Валерьевна — соискатель
ФГАОУ ВО «Северный (Арктический)
федеральный университет им. М. В. Ломоносова»
163002, Российская Федерация, г. Архангельск,
наб. Северной Двины, 17
e-mail: iv.ershova@nafu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhukov, Vladimir A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: zhukovva@gumrf.ru
Ershova, Irina V. — Applicant
Lomonosov Northern (Arctic) Federal University
17 Severnaya Dvina embankment,
Arkhangelsk, 163002,
Russian Federation
e-mail: iv.ershova@nafu.ru

Статья поступила в редакцию 8 января 2023 г.
Received: January 8, 2023.