

УДК 662.994

**ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В КАНАЛАХ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА СУДОВОГО
КОМПАКТНОГО КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ДИЗЕЛЕМ 4Ч 8,5/11**

Бевза Денис Игоревич¹, начальник сектора механического отдела механических и общесудовых систем

e-mail: bvz.denis@yandex.ru

Шураев Олег Петрович², доцент, к.т.н.

e-mail: solwrk@inbox.ru

¹ ООО «Р-Флот Проектирование», Нижний Новгород, Россия

² Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Работа является продолжением серии натурных экспериментов на многофункциональном испытательном стенде, проводимая с целью исследования температурного поля в газовых каналах опытного образца судового компактного котла-утилизатора. Температурное поле формируется отработавшими газами дизеля 4Ч 8,5/11, работающего на генератор. Анализ результатов свидетельствует о качественной достоверности показаний системы термометрирования газовой полости опытного котла-утилизатора. Наблюдаются схожие характерные особенности температурных полей, полученных в опытном котле-утилизаторе и в его численной модели, что является аргументом в пользу адекватности результатов численного эксперимента, проведенного ранее. Отмечены направления доработки опытного образца судового компактного котла-утилизатора и испытательного стенда в рамках подготовки к проведению серии натурных экспериментов для формирования методики теплового расчета нового котла-утилизатора.

Ключевые слова: котел-утилизатор, натурный эксперимент, температурное поле, испытательный стенд, опытный образец, системы термометрирования.

**TEMPERATURE FIELD IN THE CHANNELS OF THE PROTOTYPE OF THE SHIP'S
COMPACT EXHAUST BOILER BASED ON THE RESULTS OF THE PRELIMINARY
FULL-SCALE EXPERIMENT WITH 4Ч 8,5/11 DIESEL ENGINE**

Denis I. Bevza¹, Head of the Mechanical Sector of the Department of mechanical and vessel's general systems

e-mail: bvz.denis@yandex.ru

Oleg P. Shurayev², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-mail: solwrk@inbox.ru

Abstract. The work is a continuation of a series of full-scale experiments on a multifunctional test bench, carried out in order to study the temperature field in the gas channels of a prototype of a ship's compact exhaust boiler. The temperature field is formed by the exhaust gases of a 4Ч 8.5/11 diesel engine operating on a generator. The analysis of the results indicates the qualitative reliability of the gas cavities thermometry system of the prototype exhaust boiler. There are similar characteristic

features of the temperature fields obtained in a prototype exhaust boiler and in its numerical model, which is an argument in favor of the adequacy of the results of the numerical experiment conducted earlier. The directions of refinement of the prototype of a ship's compact exhaust boiler and the test bench are noted in preparation for a series of full-scale experiments to form a methodology for thermal calculation of a new exhaust boiler.

Keywords: exhaust boiler, full-scale experiment, temperature field, test bench, prototype, thermometry system.

Введение

Продолжает быть актуальным вопрос развития судоходства на малых реках [1, 2, 3, 4]. Строительство судов малого водоизмещения требует создания оборудования, наилучшим образом отвечающего критериям компактности и ремонтпригодности в условиях ограниченности рабочего пространства на судне и численности судового экипажа. К слову, данная проблема «ограниченности» свойственна и остальному строящемуся и эксплуатируемому гражданскому флоту.

С учетом обозначенной проблемы разработан судовой котел-утилизатор (КУ) новой компактной конструкции (рис. 1). Центральной идеей разработки является компактная трансформация ключевых элементов теплоутилизационной установки в один максимально разборный аппарат с минимизированным количеством обслуживаемых элементов.

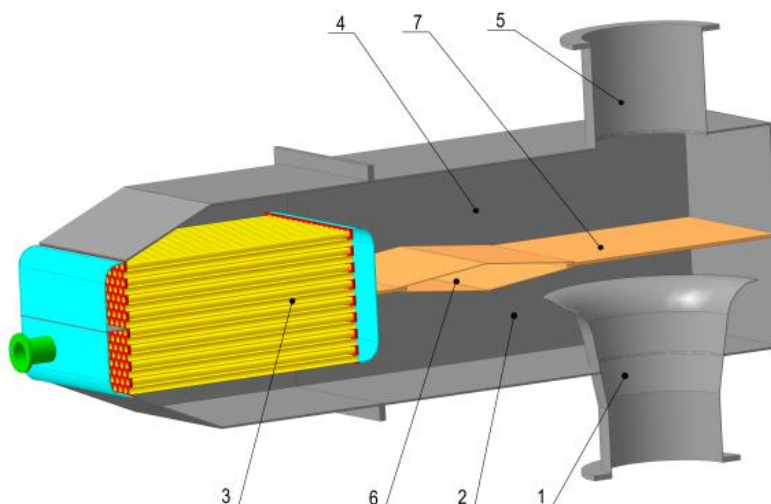


Рисунок 1 – Судовой компактный котел-утилизатор новой конструкции: 1 – входной диффузорный патрубок; 2 – проточный канал подвода теплоносителя; 3 – теплообменная секция; 4 – проточный канал отвода теплоносителя; 5 – выходной патрубок; 6 – газовая заслонка; 7 – перегородка-экран

Для упрощения исследования процессов в новом котле-утилизаторе в CFD среде разработана численная модель движения и теплообмена в газовом пространстве аппарата. Подробнее процесс подготовки численного эксперимента и его результаты изложены в статье [5].

Цели и задачи исследования

Для формирования методики теплового расчета нового котла-утилизатора идет подготовка к интерполяционному эксперименту, в рамках которой запланирована и уже частично проведена серия предварительных натурных экспериментов для доработки

стенда, апробации его системы мониторинга и получения данных для верификации численной модели.

Качественная верификация результатов численного моделирования, формирование направлений модернизации стенда, подтверждение корректной работы системы термометрирования газового пространства опытного КУ и накопление опытных данных являлись целями данной работы.

Ставилась задача измерения в контрольных точках опытного образца КУ температурного поля, формируемого «горячими» газами двигателя.

Экспериментальный стенд

Разработанный как под текущие, так и под перспективные задачи многофункциональный испытательный стенд [6] имеет в своем составе два дизеля: 2Ч 10.5/13 [7] и 4Ч 8,5/11 [8] (рис. 2).

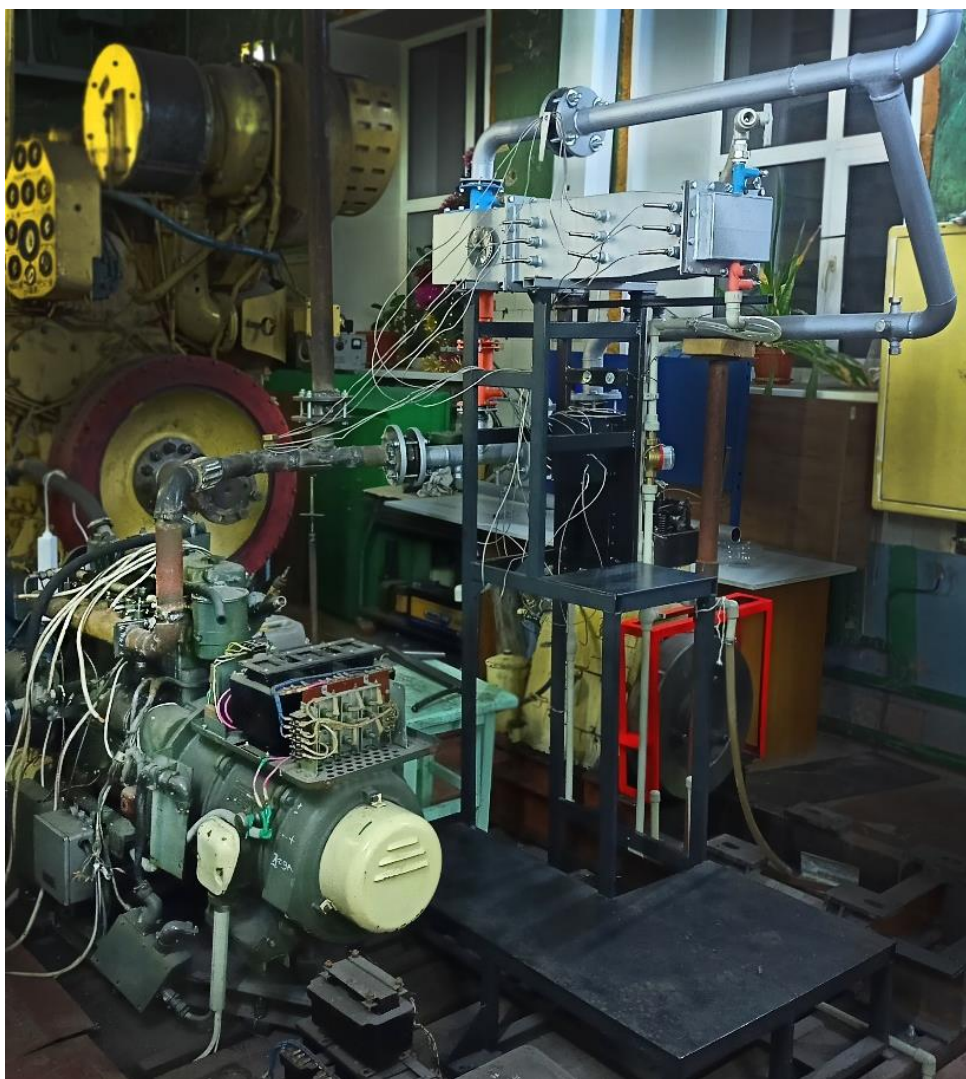


Рисунок 2 – Испытательный стенд

Ранее проведен и описан в технической литературе [9] предварительный натурный эксперимент на дизеле 2Ч 10.5/13, особенностью которого являлось температурное поле, сформированное «холодными» газами из-за отсутствия нагрузки на двигателе. Наличие в составе испытательного стенда двигателя 4Ч 8,5/11 с генераторной нагрузкой [10] позволило сформировать температурное поле нового КУ, образованное «горячими» газами.

В процессе эксперимента показания снимались на трех режимах нагрузки: 100%, 75%, 50%, – с 11 термопар, распределенных в газовых полостях опытного образца КУ на входе, выходе и в 9-ти точках диаметральной плоскости его теплообменной части (рис.3).

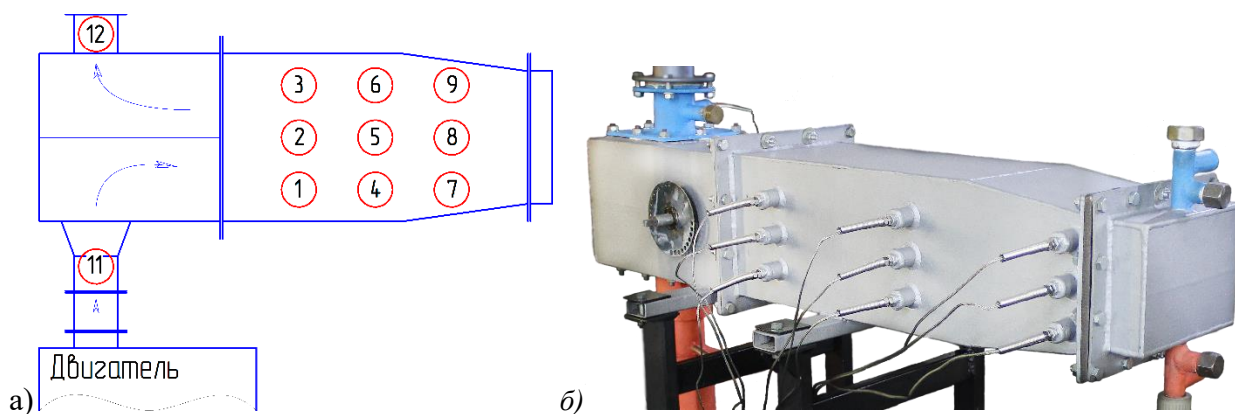


Рисунок 3 – Распределение точек замера температуры в газовых полостях опытного образца КУ: схематично (а) и на опытном образце (б)

Температурное поле

По усредненным значениям температуры в контрольных точках газового пространства КУ для режима 100% сформировано температурное поле (рис.4, а).

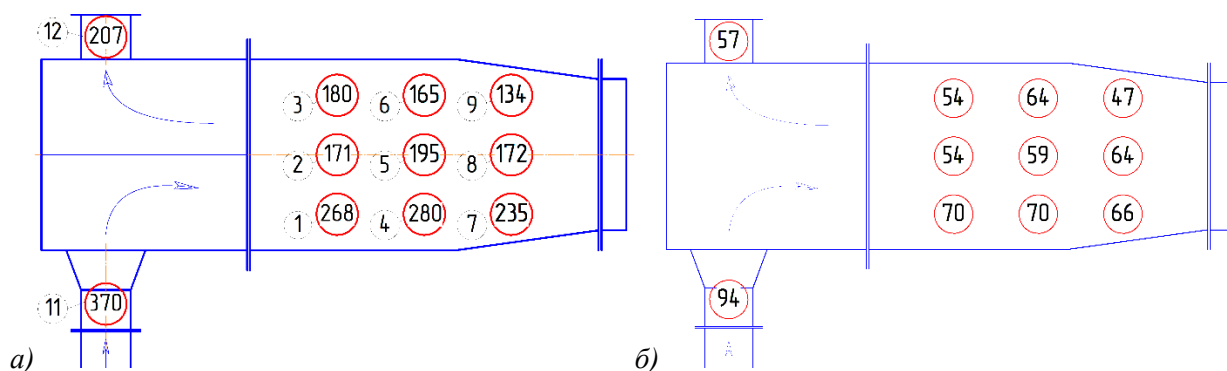


Рисунок 4 – Температурное поле опытного КУ: «горячее» (а) и «холодное» (б)

Явно прослеживается в точке 3 выходного сечения теплообменной секции (ТС) и в точке 12 выходного патрубка КУ некоторый рост температуры газа из-за наличия «паразитных» течений в ТС, не участвующих в теплообмене и подогревающих отходящий от ТС поток газа. Это же явления было ранее отмечено результатами предварительного натурного и численного экспериментов [5, 9]. Данный факт качественно подтверждает достоверность результатов компьютерного моделирования.

Аномальное увеличение температуры в точке 12 также может быть связано с наличием теплообмена через перегородку-экран (поз. 7 на рис. 1) между входной и выходной зонами перепускной части КУ. Для создания адиабатных условий на поверхности раздела требуется изоляция.

В сравнении с «холодным» температурным полем (рис. 4, б) на «горячем» температурном поле более заметно ослабление циркуляции газа в точках 7 и 9 возле передней трубной доски ТС. Улучшить ситуацию при текущем расходе газов способно укорочение ТС при сохранении площади т/о поверхности. Убедиться в этом позволит укороченный вариант ТС [6], заранее предусмотренный и изготовленный на этапе создания испытательного стенда.

Зоны «ослабления» циркуляции газа и «подогрева» отводимого теплоносителя демонстрирует и тепловизионная съемка проточных и теплообменных областей опытного КУ (рис.5, а и б).

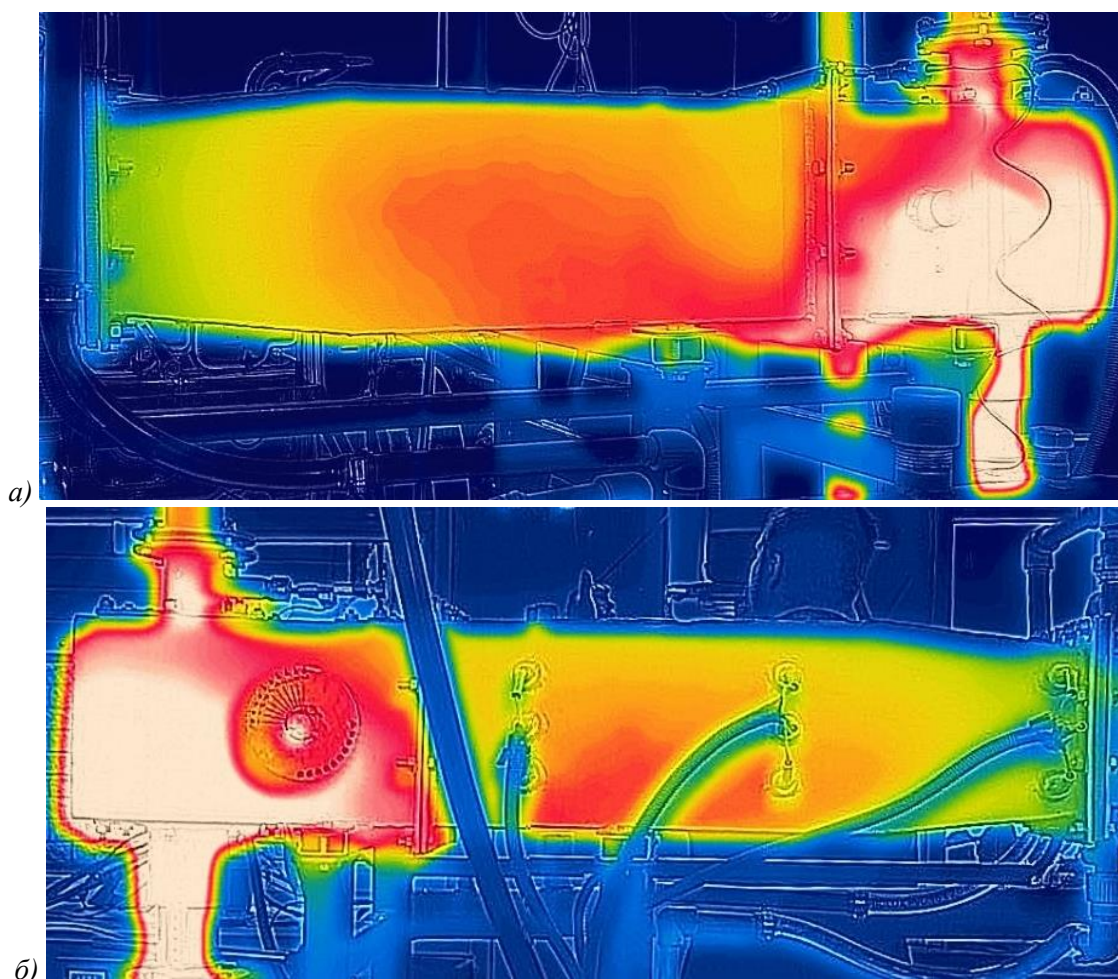


Рисунок 5 – Тепловизионная картина проточных и теплообменных областей опытного котла-утилизатора

Кроме того, на рисунке 5,б по однотонному белому пятну, заполняющему входной патрубок аппарата, можно отметить равномерность распределения потока на этом участке. Что согласуется с результатами компьютерного моделирования.

За исключением описанных выше аномалий, картина температурного поля соответствует ожидаемой – по мере прохождения через аппарат газ остывает.

Дополнит визуальную картину график температурных кривых (рис. 6), построенных для каждой контрольной точки по средним значениям температуры, полученным для трех режимов работы двигателя.

Зафиксированные выше аномалии свойственны всем трем режимам нагрузки.

Кривая T12 первой обращает на себя внимание. Она должна проходить ниже всех остальных кривых, поскольку отображает температуру в выходном патрубке КУ. Но из-за описанного выше эффекта «подогрева» потока проходит «в толще» пучка кривых. Эффект «подогрева» прослеживается и во взаимном расположении кривых T2 и T3.

Заметно отстают от предполагаемого положения кривые T7 и T9, отражающие температурное поле в районе передней трубной доски ТС, до которой поток газа долетает, по всей видимости, с меньшей скоростью.

Все кривые демонстрируют остывание газа по мере снижения нагрузки. Соответственно можно говорить о качественно корректной работе системы термометрирования газового пространства КУ.

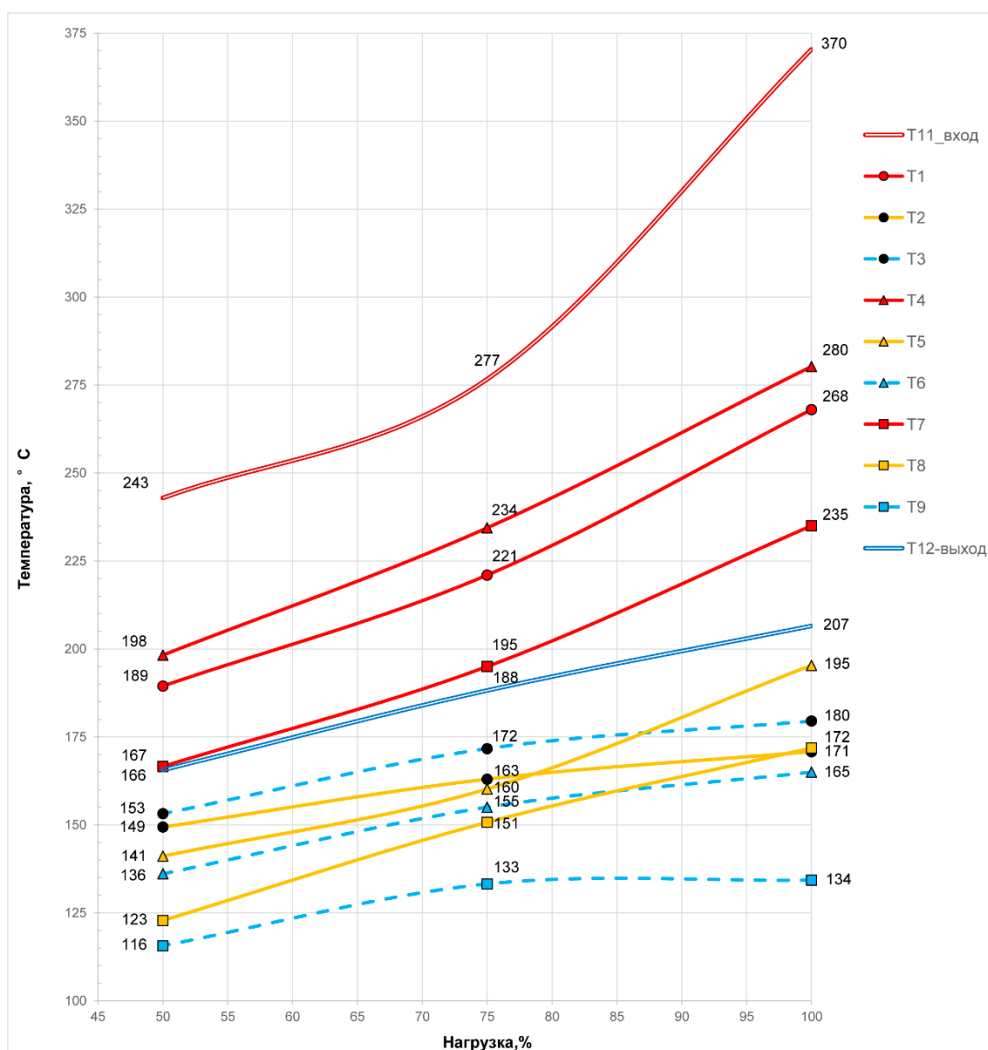


Рисунок 6 – График изменения температуры в контрольных точках опытного КУ

Количественное подтверждение корректной работы системы термометрирования стенда представлено в таблице 1.

Таблица 1. Отклонения значений температуры газа в контрольных точках

Контрольная точка	Средняя температура по интервалам, °C			Среднеквадратическое отклонение, °C	Коэффициент вариации температуры
	1	2	3		
Твх. (Т11)	371	370	370	0.9	0.002
T1	266	269	269	1.2	0.004
T2	170	171	171	0.7	0.004
T3	179	180	180	0.7	0.004
T4	279	281	281	1.1	0.004
T5	197	198	191	3.7	0.019
T6	165	166	165	0.5	0.003

T7	233	236	236	1.4	0.006
T8	171	173	171	1.2	0.007
T9	134	135	134	0.6	0.004
T _{вых.} (T12)	205	207	207	1.1	0.006

Из полученного массива экспериментальных данных, полученных на установившемся режиме работы двигателя, выбирались данные для трех произвольных временных интервалов. Для каждой контрольной точки по средним значениям температуры для каждого интервала оценивался разброс значений температуры через абсолютные (среднеквадратическое отклонение (СКО)) и относительные показатели (коэффициент вариации (КВ)). Анализ СКО показал, что за исключением точки T5 (3,7°C) величина разброса значений температуры не превышает 1,4°C. А анализ разброса в относительных единицах (КВ) позволяет говорить о слабой вариации [11], максимальное значение которой для точки T5 (1,9%).

Выводы

Проведенный эксперимент помог сформировать «горячее» температурное поле опытного КУ, на котором явно прослеживаются аномалии, фактически только угадывающиеся при анализе «холодного» поля.

Качественным натурным подтверждением достоверности некоторых результатов численного моделирования КУ удалось приблизиться к решению одной из ключевых задач диссертационной работы (верификационная задача). Зафиксированы наличие обводных «подогревающих» течений в ТС и равномерное распределение потока во входном участке КУ.

Определены направления доработки стенда (изоляция элементов проточной области КУ) и уточнен план предстоящего натурального эксперимента (включение в план опытов с ТС уменьшенной длины).

Собрана информация для статистического анализа.

Подтверждена корректная работа системы термометрирования газовой полости опытного КУ.

По окончании работ по модернизации стенда и доработке оставшихся элементов его измерительной системы планируется проведение интерполяционного натурального эксперимента для формирования методики теплового расчета нового КУ и верификации результатов численного эксперимента.

Список литературы:

1. Сергеев, С. Н. Концептуальная модель оценки целесообразности развития воднотранспортных систем на водных путях местного значения / С. Н. Сергеев, Ю. Н. Уртминцев, С. В. Железнов, А. Г. Малышкин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2019. – № 60. – С. 159 – 172. - EDN SSSFTG
2. Зачесов, А. В. Организация перевозок и работы флота на малых реках Сибири в условиях формирования рыночных отношений: дис. ... канд. тех. наук: 05.22.19 / Зачёсов Александр Венедиктович. – Новосибирск, 2009. – 146 с. – EDN QEIGUP.
3. Гарибин, П. А. Воднотранспортное использование малых водотоков: дис. ... док. тех. наук: 05.23.07 / Гарибин Павел Андреевич. – Санкт-Петербург, 2003. – 304 с. – EDN NMQVST.

4. Минаева, И. А. Экологические аспекты судоходства на малых реках / И.А. Минаева, Е.А. Абрамова // География: развитие науки и образования. – 2015. – С. 312 – 314. – EDN PJYSUB.
5. Бевза, Д. И. Моделирование в пакете FlowVision движения газа и теплообмена в компактном котле-утилизаторе: постановка задачи и некоторые результаты / Д. И. Бевза, О. П. Шураев // Труды международного форума: Инженерные системы-2017. – 2017. – С. 8 – 16. – EDN XNYRCJ.
6. Шураев, О. П. Котел-утилизатор в составе многоцелевого испытательного стенда на базе двигателя 2Ч 10,5/13 / О. П. Шураев, Д. И. Бевза // Научные проблемы водного транспорта. – 2022. – № 71 (2). – С. 85 – 97. – DOI 10.37890/jwt.vi71.263. – EDN TXKWCF.
7. Вайнер, М. А., Стационарные двигатели и дизель-генераторы 1Ч-2Ч 10,5/13-2, 1ЧА-2ЧА 10,5/13-2 и судовые двигатели 1ЧСП-2ЧСП 10,5/13-1. Описание конструкции и руководство по уходу / М. А. Вайнер, Е. С. Камахин // М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1950. – 128 с.
8. Дизели Ч 8,5/11. Руководство по эксплуатации 1Р2-6-1000 РЭ // Владивосток:Дальрыбтехцентр, 2000. – 238 с.
9. Бевза, Д. И. Предварительный натурный эксперимент на опытном образце судового компактного котла-утилизатора / Д. И. Бевза, О. П. Шураев // Научные проблемы водного транспорта. – 2022. – № 72 (3). – С. 70 – 77. – DOI 10.37890/jwt.vi72.283. – EDN TVYUVQ.
10. Лаптев, Н. А. Эффективная утилизация газового конденсата из питательного резервуара в экспериментальной установке с дизелем типа 4Ч 8,5/11 / Н. А. Лаптев, Ю. И. Матвеев // Транспорт. Горизонты развития. – 2024. – С. 1 – 4. – EDN IVQIJN.
11. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – 12-е изд. – Москва : Издательство Юрайт, 2020. – 479 с. – ISBN 978-5-534-00859-3. – EDN DIXQIX.

