

УДК 662.994

Бевза Денис Игоревич¹, ведущий инженер
e-mail: bvz.denis@yandex.ru

¹ООО «ГЦКБ Речфлота», г. Нижний Новгород, Россия.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СУДОВОМ КОМПАКТНОМ КОТЛЕ-УТИЛИЗАТОРЕ

Аннотация. Работа посвящена исследованию тепловых и газодинамических процессов в каналах судового котла утилизатора новой, компактной конструкции. Проведена серия численных экспериментов в разработанной модели тепловых и газодинамических процессов в газовых полостях нового котла-утилизатора. Получена информация о полях скорости, давления и температуры в каналах котла-утилизатора. Анализ опытных данных установил, что сложный характер течения теплоносителя в полостях котла-утилизатора не является основной и единственной причиной, способной влиять на эффективность аппарата, а также подготовил основу для дальнейшего оптимизационного исследования. Спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд для проведения натурных испытаний с целью верификации результатов численных исследований. Проведен предварительный натурный эксперимент, позволивший убедиться в исправном состоянии стенда, апробировать систему термометрии и обеспечить возможность подготовки и проведения натурального исследования на экспериментальном стенде после ряда монтажных и наладочных работ.

Ключевые слова: котел-утилизатор, численный эксперимент, натурный эксперимент, поле скорости, поле давления, поле температуры, экспериментальный стенд, опытный образец.

Введение.

Ограниченность пространства машинного отделения на новых и модернизируемых судах и тенденция к сокращению численности судового экипажа заставляют проектанта уделять особое внимание массогабаритным характеристикам подбираемого оборудования. С учетом этого разработан судовой котел-утилизатор (КУ) новой конструкции (рисунок 1), отличающийся от аналогов [1] улучшенными массогабаритными показателями (таблица 1).

Цели и задачи исследования.

Сложная траектория движения «горячего» теплоносителя (т/н) в каналах нового КУ вызвала интерес к исследованию процессов в полостях аппарата для оценки тепловой и газодинамической эффективности нового КУ. Для достижения обозначенной цели на первом этапе исследовательской работы ставился ряд задач. Во-первых, проведение в разработанной компьютерной модели тепловых и газодинамических процессов в каналах КУ серии численных экспериментов с последующим анализом полученных результатов. Во-вторых, подготовка к натурному эксперименту для верификации результатов численного исследования.

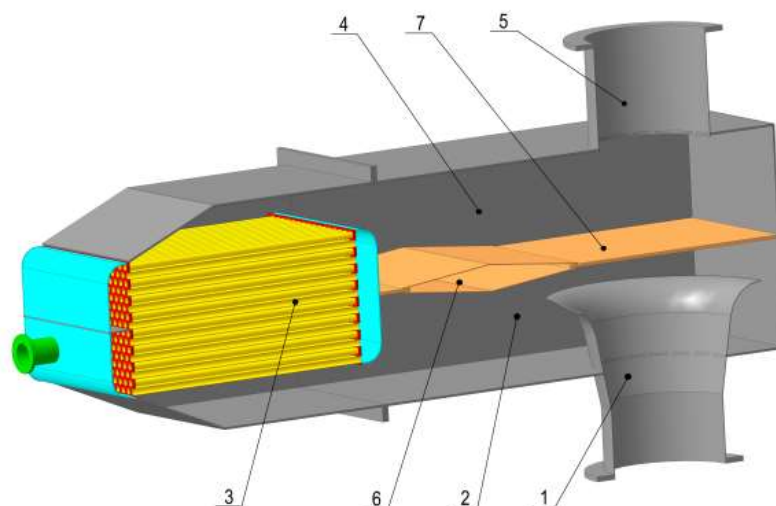


Рисунок 1 – Судовой компактный котел-утилизатор новой конструкции: 1 – входной диффузорный патрубок; 2 – проточный канал подвода теплоносителя; 3 – теплообменная секция; 4 – проточный канал отвода теплоносителя; 5 – выходной патрубок; 6 – газовая заслонка; 7 – перегородка-экран

Таблица 1

Сравнительные характеристики нового КУ и аналогов

Название	Удельная масса*, кг/кВт	Коэффициент компактности**, м ² /м ³
Новый КУ	2	19,6
КУВ-100	12,1	2,3
КАУ-4,5	9,3	6,4
КУВИв	2,6	18,1

* отношение массы аппарата к передаваемому в теплообменной секции тепловому потоку;

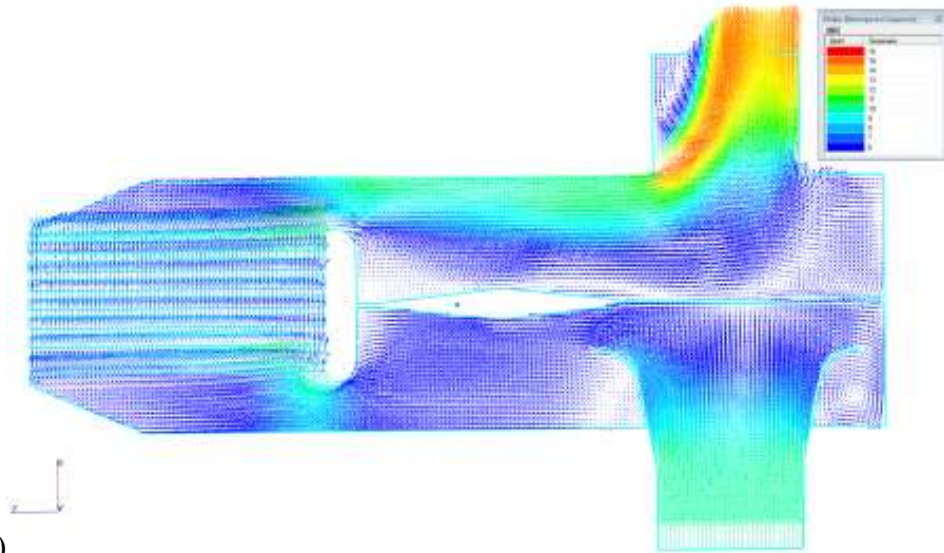
** отношение площади теплообменной поверхности аппарата к его объему.

Предварительное численное исследование.

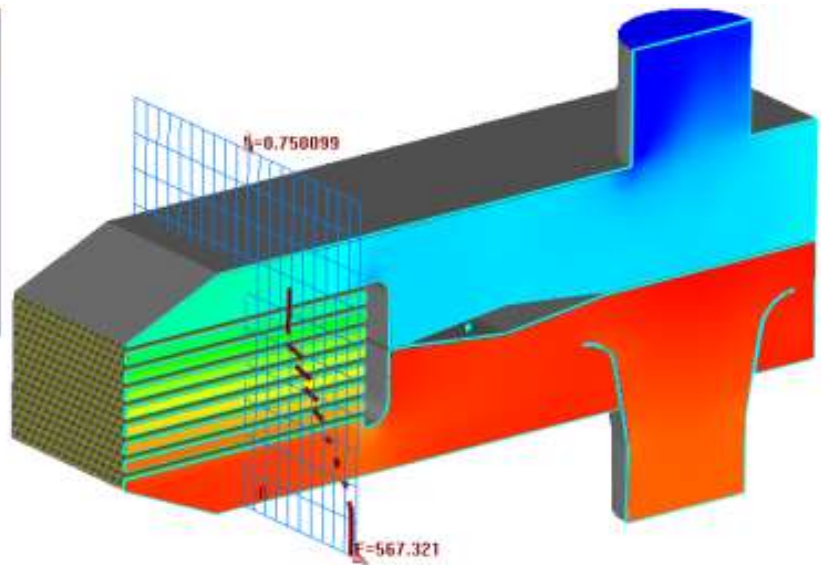
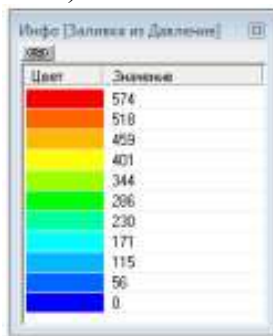
Численное исследование проводилось в среде программы Flow Vision, возможности которой [2] позволили визуализировать результат в виде полей скорости (векторное поле), давления и температуры (рисунок 2).

Подготовка расчетного исследования включала: предварительный тепловой расчет нового КУ, создание геометрической модели его газового пространства, наложение расчетной сетки, выбор соответствующего решателя системы дифференциальных уравнений и задание условий однозначности [3].

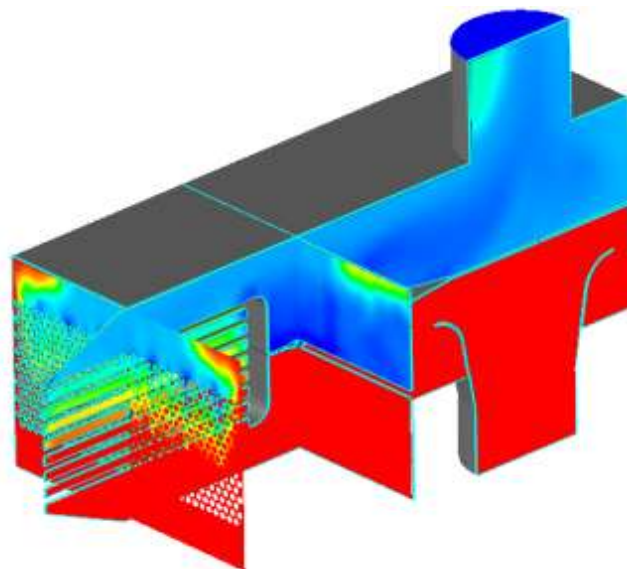
Результаты предварительного теплового расчета КУ открыли возможность задания только газовой расчетной области ввиду незначительного изменения температуры «холодного» теплоносителя.



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Поля в сечениях котла-утилизатора: скорости (а); давления (б); температуры (в)

Анализ векторного поля и поля давления (см. рисунок 2, а, б):

– подтвердил эффективность ряда технических решений, направленных на упорядочение потока т/н и на снижение потерь давления – комбинации входного диффузорного патрубка с перегородкой-экраном, сужения корпуса в районе подводящего канала у передней трубной доски теплообменной секции (ТС);

– обнаружил эффект выравнивания скоростного поля перед фронтом теплообменной поверхности благодаря ускорению потока после сужения подводящего канала в районе задней водяной камеры;

– выявил элементы конструкции КУ, требующие доработки из-за формирования вихревых зон и зон с возвратным течением в проточных полостях и в выходном патрубке аппарата.

Если до ТС КУ наблюдается изотермичное температурное поле (см. рисунок 2, в) ввиду заданных граничных условий, то в самом объеме ТС заметна неравномерность распределения температуры т/н в продольном и поперечном направлениях (оси z , y) горизонтальных сечений. Упомянутая неравномерность предположительно может быть вызвана как асимметрией турбулентного течения т/н, так и асимметрией контрольных линий относительно ячеек расчетной сетки. Однако основной причиной неравномерного распределения температуры в ТС КУ являются обводные, «паразитные» течения у боковых стенок корпуса ТС. Данная проблема легко решается установкой вытеснителей между трубным пучком ТС и корпусом КУ.

Неоднородность температурного поля в горизонтальных сечениях ТС, в целом, вызвана причинами, не зависящими от особенностей расположения ТС в КУ, поскольку колебания температуры преобладают не в продольном (ось z), а в поперечном направлении (ось y) (см. поперечное сечение ТС на рисунке 2, в).

Численное исследование по плану отсеивающего эксперимента.

Успешно апробированная численная модель тепловых и газодинамических процессов в каналах нового КУ подготовила «почву» для проведения серии отсеивающих численных экспериментов по плану Плакетта-Бермана [4, 5] с целью продолжения исследования процессов в новом КУ и, в перспективе, для подготовки к оптимизационному эксперименту.

При подготовке к отсеивающему эксперименту [6]:

– назначались отклики, характеризующие газодинамическую эффективность компактного КУ – перепад давления во всем КУ Δp и перепад давления в ТС Δp_c – и, косвенно, тепловую эффективность КУ по температуре газов на выходе ТС $T_{\text{вых}}$.

– задавался ряд факторов, предположительно оказывающих наибольшее влияние на отклики объекта исследования: начальная скорость V_n , количество рядов Z и длина пучка L ТС.

Итогом дисперсионного анализа результатов отсеивающего эксперимента (таблица 2) стало подтверждение значимости всех выбранных факторов с доверительной вероятностью 0,95.

Таблица 2

Результаты отсеивающего эксперимента

№ опыта	V_n , м/с	Z	L , м	Δp , Па	Δp_c , Па	T_7 , °С
1	15	16	0,6	576	328	326
2	10	16	1,2	176	51	219
3	15	12	1,2	362	67	290
4	10	12	0,6	215	97	338

Сравнение значений потерь давления в ТС и во всем аппарате указывает на заметную (а в опыте №1 преобладающую) долю потерь давления именно в трубном пучке.

Анализ массива значений температуры остывшего газа, выходящего из ТС, выявил допустимость (при максимально возможном отклонении в 1,5%) принятия однородным температурного поля в выходном сечении ТС в тепловом расчете нового КУ.

Экспериментальный стенд.

Для верификации результатов численного исследования разработан и изготовлен экспериментальный стенд, состоящий из максимально разборного опытного образца нового КУ, дизеля малых мощностей и габаритов 2Ч 10.5/13, газохода и рамы (рис. 3).



Рисунок 3 – Экспериментальный стенд на базе двигателя 2Ч 10.5/13

Ведутся работы по оснащению стенда системой мониторинга, состоящей из систем измерения температуры теплоносителей (термометрии), давления теплоносителей (манометрии), частоты вращения коленчатого вала двигателя (тахометрии), измерения расхода топлива (весометрии).

Предварительное натурное исследование.

Первоочередно смонтирована самая объемная (по электронному насыщению) и самая информативная (по числу контрольных точек) из всех подсистем – система термометрии газового пространства опытного КУ.

С целью тестирования установленной системы термометрии, накопления и анализа опытных данных и с целью проверки исправности элементов и систем стенда проведен предварительный натурный эксперимент. Поставлены следующие задачи: измерение значений температуры в 12 контрольных точках диаметрального сечения опытного образца КУ и визуальная проверка состояния элементов и систем стенда.

Эксперимент проведен в штатном режиме. Повреждений, неисправностей и выхода из строя оборудования и систем стенда не зафиксировано.

Плавность температурных линий графика на рисунке 4 свидетельствует об отсутствии значимых колебаний значений температуры в контролируемых точках аппарата. Этот факт позволяет говорить об адекватном соотношении «сигнал-шум» в системе термометрии.

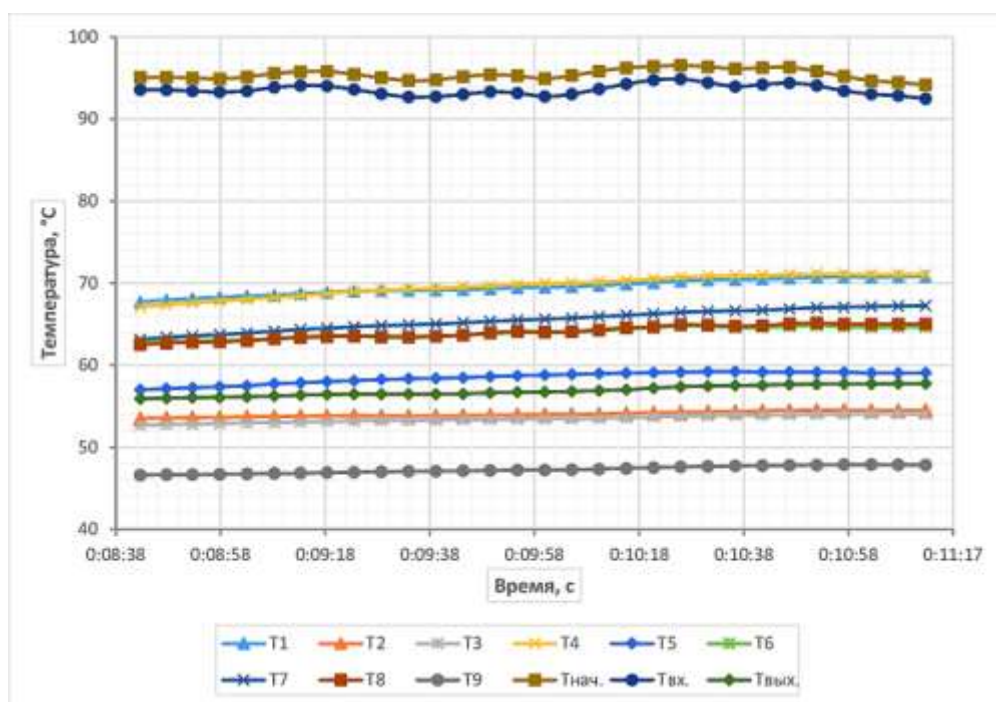


Рисунок 4 – График изменения температуры в контрольных точках газовой полости котла-утилизатора

Сравнение средних значений температуры газа, полученных в одноименных контрольных точках для трех произвольных временных интервалов, свидетельствует о незначительных, в пределах 5%, расхождениях этих значений. Расхождения могут быть связаны как с погрешностью системы термометрии ($\pm 3^{\circ}\text{C}$), так и с постепенным прогревом КУ, продолжающимся даже после стабилизации теплового режима двигателя.

По усредненным значениям температуры в каждой контрольной точке котла-утилизатора сформировано температурное поле в его газовой полости (рис. 5). Динамика изменения температуры потока газа по мере его движения по внутренним каналам аппарата, в целом, качественно соответствует ожидаемой. Лишь в нескольких контрольных точках значение температуры выбивается из логичного ряда. Этому могут служить как технические причины, связанные с монтажом системы термометрии, так и причины, связанные с особенностями протекающих в КУ процессов. Накопление статистической информации и реакция на тестовые воздействия способны прояснить сложившуюся ситуацию.

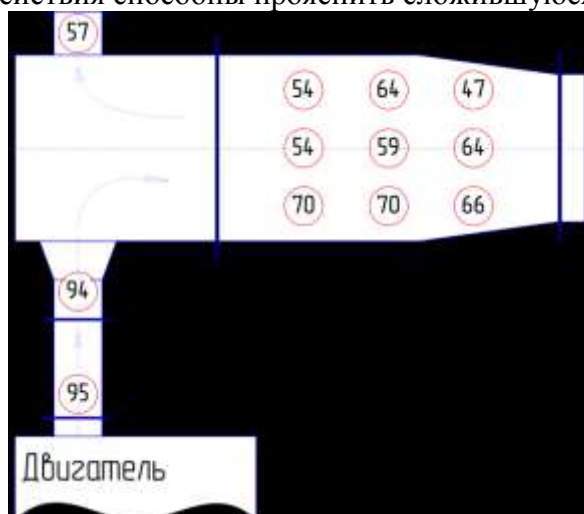


Рисунок 5 – Температурное поле в газовой полости котла-утилизатора

Выводы.

Проведенная серия численных исследований позволила апробировать разработанную численную модель тепловых и газодинамических процессов в каналах нового КУ и получить весомый массив данных о полях скорости, давления и температуры в газовых полостях аппарата. Анализ собранных данных:

– во-первых, подтвердил, что характер поведения моделируемого потока т/н в каналах нового КУ не противоречит законам гидродинамики и теплотехники [7, 8];

– во-вторых, показал, что сложная организация движения т/н в каналах нового КУ не является главной и единственной причиной неоднородности температурного поля в ТС КУ, а газодинамическое сопротивление, создаваемое КУ, находится в разумных пределах;

– в-третьих, упростил дальнейшую оптимизационную задачу, установив круг факторов, способных влиять на эффективность КУ, и локализовав области конструкции, требующие доработки;

– в-четвертых, подтвердил и выявил ряд эффективных технических решений.

Итогом предварительного натурного эксперимента стало подтверждение корректной работы системы термометрии газового пространства опытного КУ. Удалось убедиться в исправном состоянии элементов дизеля, опытного КУ, заново смонтированных или доработанных систем стенда.

На втором этапе исследовательской работы планируется:

– использовать накопленный объем данных о физике процессов в новом КУ для корректировки известных уравнений подобия с целью создания модели теплового расчета подобных аппаратов;

– завершить работы по дооснащению стенда оставшимися элементами системы мониторинга и провести натурный эксперимент с целью окончательного подтверждения достоверности результатов разработанной численной модели тепловых и газодинамических процессов в каналах нового КУ.

Список литературы:

1. Хряпченков, А.С. Судовые вспомогательные и утилизационные котлы: учебное пособие / А.С. Хряпченков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1988. – 296 с.

2. Шураев, О.П. Сравнительный анализ влияния скорости газа на температурное поле и гидродинамические потери в теплообменной секции компактного котла-утилизатора / О.П. Шураев, Д.И. Бевза, С.Н. Валиулин // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2017. – № 2. – С. 77 – 85.

3. Шураев, О.П. Результаты численного моделирования движения газа в каналах компактного котла-утилизатора / О.П. Шураев, Д.И. Бевза, С.Н. Валиулин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2017. – № 50. – С. 268 – 276.

4. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов - М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. - 304 с.

5. Зуйков, Д.В. Отсевание факторов при планировании эксперимента / Д.В. Зуйков, А.Е. Крупин // Вестник НГИЭИ. - 2014. - №4 (35). - С. 62–70.

6. Бевза, Д.И. Влияние конструкционных и режимных параметров на тепловые и газодинамические характеристики судового компактного котла-утилизатора / Д.И. Бевза, О. П. Шураев // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – №2 часть 1. – С. 88 – 96.

7. Селиверстов, В.М. Термодинамика, теплопередача и теплообменные аппараты: учебное пособие / В.М. Селиверстов, П.И. Бажан. – М.: Транспорт, 1988. – 288 с.

8. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик, под ред. М.О Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.



THE RESEARCH OF THE THERMAL AND GAS-DYNAMIC PROCESSES IN A SHIP'S COMPACT EXHAUST BOILER

Denis I. Bevza

Abstract. The work is devoted to the study of thermal and gas-dynamic processes in the channels of the ship's exhaust boiler of a new, compact design. A series of numerical experiments has been carried out in the developed model of thermal and gas-dynamic processes in the gas cavities of a new exhaust boiler. Information was obtained on the fields of velocity, pressure and temperature in the channels of the exhaust boiler. The analysis of experimental data established that the complex nature of the coolant flow in the exhaust boiler's cavities is not the main and only reason that can affect the efficiency of the apparatus, and also prepared the basis for further optimization research. An experimental stand has been designed and manufactured for conducting field tests in order to verify the results of numerical studies. A preliminary full-scale experiment was carried out, which made it possible to verify the serviceable condition of the stand, to test the thermometry system and to ensure the possibility of preparing and conducting a full-scale study on an experimental stand after a number of installation and restorative works.

Keywords: exhaust boiler, numerical modeling, full-scale experiment, velocity field, pressure field, temperature field, experimental stand, prototype.

