

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУДОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

### **OPERATION OF SHIP POWER EQUIPMENT**

УДК 662.994

DOI: 10.37890/jwt.vi72.283

#### **Предварительный натурный эксперимент на опытном образце судового компактного котла-утилизатора**

**Д.И. Бевза<sup>1</sup>**

**О.П. Шураев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

**Аннотация.** Статья посвящена предварительному натурному эксперименту на теплоутилизационном стенде, являющемуся начальным этапом натурного исследования судового компактного котла-утилизатора новой конструкции. На данном этапе эксперимент проводится с целью апробации смонтированной системы термометрирования и получения первых данных о распределении температуры в каналах опытного котла-утилизатора. Анализ результатов подтверждает адекватность показаний системы термометрирования, позволяет говорить о ее корректной работе, но, в то же время, указывает на ряд нелогичных показаний, требующих объяснения. В дальнейшем планируется накопление экспериментальных данных и их сопоставление с имеющимися результатами компьютерного моделирования.

**Ключевые слова:** компактный котел-утилизатор, система измерения температуры, опытный образец, натурный эксперимент, температурное поле.

#### **The preliminary full-scale experiment on the vessel's compact exhaust boiler's prototype**

**Denis I. Bevza<sup>1</sup>**

**Oleg P. Shurayev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The article is devoted to a preliminary full-scale experiment on a heat recovery stand, which is the initial stage of a full-scale study of the vessel's compact exhaust boiler of a new design. The experiment is carried out in order to test the mounted thermometry system and obtain the first data about the temperature distribution in the channels of an experimental exhaust boiler. The analysis of the results confirms the adequacy of the readings of the thermometry system, allows to talk about its correct operation, but, at the same time, it points to a number of illogical indications that require explanation.

**Keywords:** compact exhaust boiler, temperature measurement system, prototype, full-scale experiment, temperature field.

#### **Введение**

Ограниченность пространства машинного отделения на новых и модернизируемых судах и сокращение численности судового экипажа заставляют

проектанта уделять особое внимание массогабаритным характеристикам подбираемого оборудования. Поэтому развитие в сфере судового теплообменного оборудования по пути улучшения его массогабаритных показателей является одним из приоритетных направлений развития отрасли наряду со стремлением к улучшению энергоэффективности. Приняв это во внимание, специалисты ФГБОУ ВО «ВГУВТ» и ООО «Гидротермаль» разработали судовой котел-утилизатор новой конструкции, выгодно отличающийся от известных аналогов [1, 2, 3, 4]: компактным размещением основных элементов теплоутилизационной установки в едином корпусе, сокращенным числом обслуживаемых элементов и уместной заменой неразъемных соединений разъемными. О технических решениях, примененных в компактном котле-утилизаторе, подробно изложено в ранее опубликованных работах авторов [5, 6].

С целью исследования закономерностей и последствий сложного течения потока горячего теплоносителя (газа) в каналах нового котла-утилизатора созданы: в CAD среде – геометрическая модель нового котла-утилизатора, – и в CFD среде, на основе твердотельной геометрической модели газового пространства разработанного аппарата и предварительного теплового расчета, – компьютерная численная модель движения газа и теплообмена в его полостях.

Теплогидродинамическая картина поведения потока газа в каналах котла-утилизатора описана и проанализирована в ряде работ (см. [5, 6]).

Для верификации результатов численного моделирования и возможности замены множества натуральных экспериментов менее ресурсозатратными компьютерными экспериментами спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд (рис. 1). Стенд состоит из опытного образца разработанного котла-утилизатора, дизеля 2 Ч 10.5/13, газохода, рамы. Контроль параметров работы двигателя и котла-утилизатора осуществляется в автоматизированном режиме спроектированной системой мониторинга. Временные решения по контролю параметров работы стенда, как, например, в работе [7], не подходят, потому как планируется использование стенда для испытаний в различных областях судовой эксплуатационной тематики. К тому же автоматизация испытаний делает их менее ресурсозатратными и снижает вероятность субъективных ошибок [8]. Учитывая многоцелевое назначение стенда, комплекс параметров, контролируемых системой мониторинга, будет включать температуру, давление горячего и холодного теплоносителей, температуру топлива, температуру воздуха, подаваемого в цилиндры двигателя, расход топлива и холодного теплоносителя, а также частоту вращения коленчатого вала двигателя.

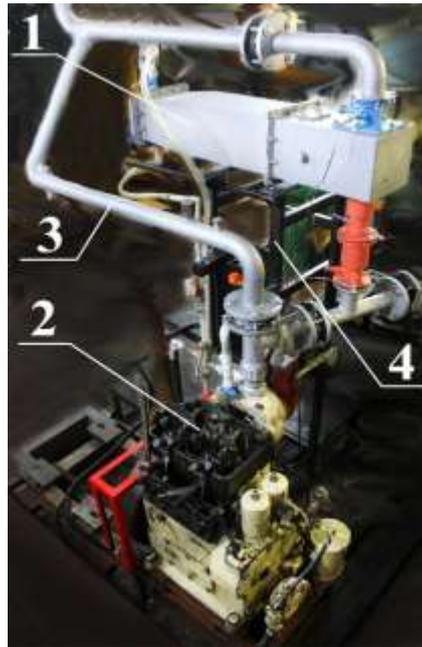


Рис. 1. Экспериментальная теплоутилизационная установка: 1 – котел-утилизатор; 2 - дизель 2 Ч 10.5/13; 3 – газоход; 4 – рама

Возможность измерения температуры газа в наиболее информативных для дальнейшего анализа точках опытного образца котла-утилизатора способна помочь сформировать представление о действительном температурном поле во всем аппарате. Сравнение экспериментальных данных с результатами численного расчета в компьютерной модели в перспективе позволит оценить адекватность полученного численного решения. По этой причине в первую очередь смонтирована система термометрирования газовых полостей котла-утилизатора, состоящая из группы термопар, модуля сбора температурных данных МТ-12 и блока регистрации измерений БРИЗ-Т.

Таким образом, на данном этапе стенд в указанной конфигурации позволяет провести экспериментальные исследования, направленные на верификацию результатов численного моделирования.

#### **Цель и задачи**

С целью тестирования установленной системы термометрирования на предмет возможности получения показаний, не противоречащих законам термо- и гидродинамики, а также с целью получения опытных данных было решено провести предварительный натурный эксперимент.

Были поставлены следующие задачи эксперимента: измерение значений температуры в контрольных точках опытного образца котла-утилизатора и визуальная проверка исправности и работоспособности элементов и систем стенда.

#### **Материалы и методы**

В процессе эксперимента показания снимались с 12 термопар типа К, размещенных в газовых полостях опытного котла-утилизатора на входе, выходе и в 9-

ти точках диаметрального сечения его теплообменной части (рис. 2). Термопары были предварительно откалиброваны по эталонному термометру ТТЖ-1П №4, при этом максимальная погрешность измерения составила  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ . Запись данных с термопар на карту памяти осуществлялась в блоке регистрации измерений БРИЗ-Т с интервалом 2 с. С этим же интервалом значения температуры отображались на дисплее этого блока.

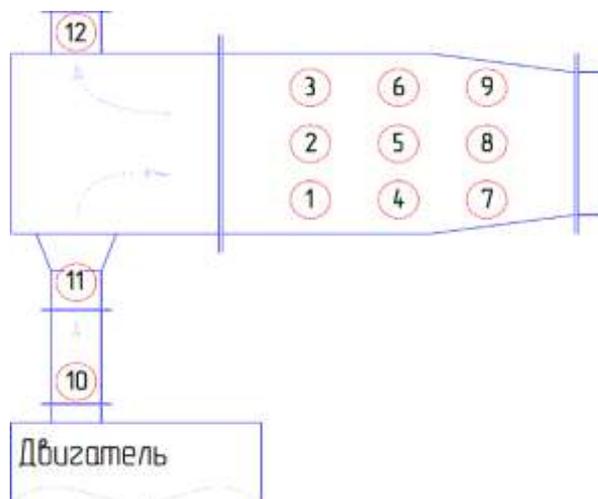


Рис. 2. Распределение контрольных точек в газовых полостях опытного образца котла-утилизатора

Испытания проводились в течение 11 мин, из них 8,5 мин было затрачено на выход системы «двигатель – газоход – котел-утилизатор» на установившийся температурный режим.

Частота вращения коленчатого вала дизеля поддерживалась на уровне  $1200 \pm 50$  об./мин и контролировалась по дисплею электронного тахометра на раме стенда рядом с постом управления.

### Результаты и анализ

Из общего массива полученных экспериментальных данных была сделана выборка, состоящая из значений температуры в контрольных точках опытного котла-утилизатора, снятых в период установившегося температурного режима работы двигателя.

Плавность температурных линий графика рисунка 3 свидетельствует об отсутствии значимых колебаний (выбросов) значений температуры в контролируемых областях аппарата, что позволяет говорить об адекватном соотношении «сигнал/шум» в системе термометрирования.

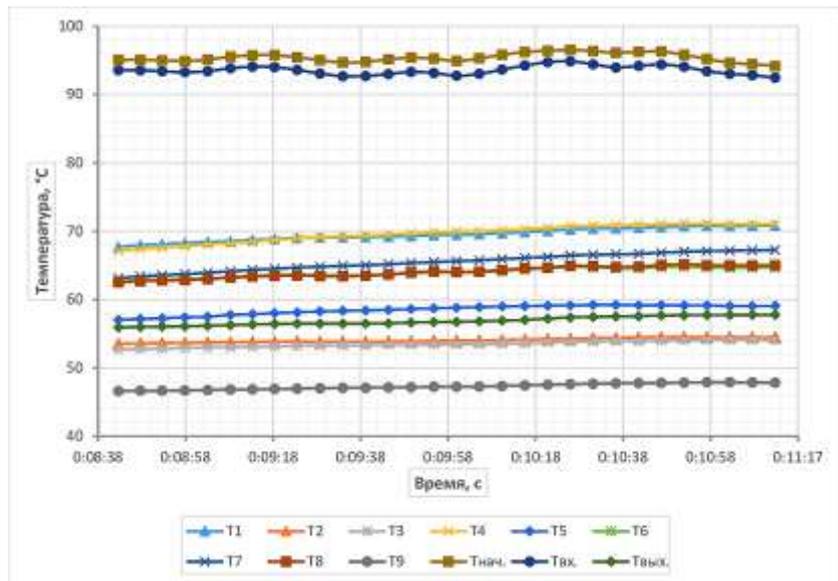


Рис. 3. Изменение температуры в контрольных точках газового пространства опытного котла-утилизатора

Сравнение средних значений температуры газа (таблица 1), полученных в указанных контрольных точках для трех временных интервалов, свидетельствует о незначительном, в пределах 5%, расхождении этих значений. Расхождения связаны с постепенным прогревом котла-утилизатора, продолжающимся даже после того, как, по оценке сотрудников испытательной группы, был достигнут стабильный тепловой режим, характеризующийся отсутствием значимого роста температуры при постоянстве частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Таблица 1

Температура газа (°C) в контрольных точках опытного образца котла-утилизатора

Термопара	Временной интервал			Средние значения
	1	2	3	
Тнач. (Т10)	95.3	95.4	95.6	95
Твх. (Т11)	93.6	93.3	93.8	94
T1	68.5	69.5	70.6	70
T2	53.7	54.0	54.5	54
T3	53.0	53.5	54.0	54
T4	68.2	69.9	71.0	70
T5	57.6	58.7	59.1	59
T6	63.2	64.0	64.7	64
T7	64.0	65.6	66.9	66
T8	63.1	64.0	65.0	64
T9	46.8	47.3	47.8	47
Твых. (Т12)	56.2	56.8	57.6	57

По усредненным значениям температуры за весь контрольный период для каждой контрольной точки опытного котла-утилизатора было сформировано температурное поле в его газовых полостях (рис. 4). Динамика изменения температуры потока газа по мере его прохождения по внутренним каналам аппарата, в целом, качественно соответствует ожидаемой.

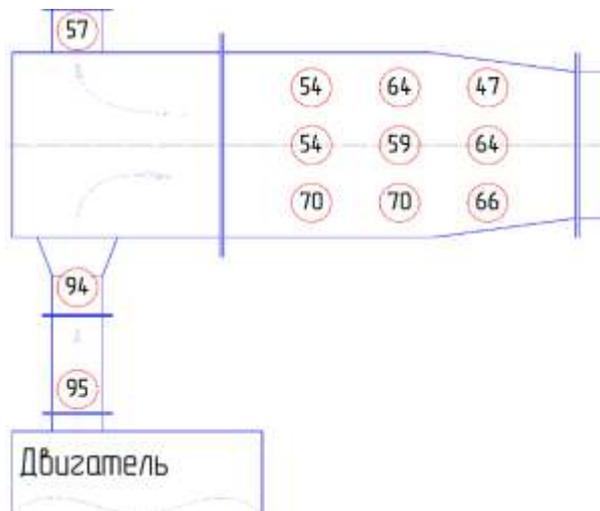


Рис. 4. Распределение средних значений температуры по контрольным точкам газовой полости опытного котла-утилизатора

Качественно схожую с рисунком 4 картину демонстрируют и результаты тепловизионной съемки прибором Fluke Ti 300+ проточной области котла-утилизатора в районе входного и выходного участков аппарата.

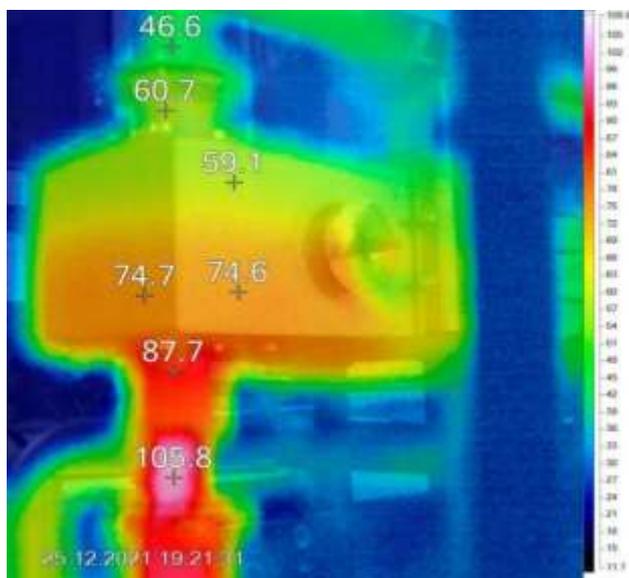


Рис. 5. Температурное поле в районе проточной области котла-утилизатора, снятое тепловизором Fluke Ti 300+

Однако при адекватности общей тепловой картины в каналах опытного образца наблюдаются несостыковки в нескольких контрольных точках его теплообменной области. А именно, выбивается из логичного ряда полученных показаний среднее значение температуры в контрольной точке «б» опытного образца (см. рис. 2 и рис. 4). Данные с контрольных точек «3» и «9», несмотря на видимую правдоподобность, также могут быть поставлены под сомнение. Возможными причинами могут быть установка термопар с неправильным подключением их выводов к модулю термометрирования, касание измерительной частью хвостовика термопары трубного пучка, наличие обводных «паразитных» течений и пр. Накопление статистической информации и реакция на тестовые воздействия способны в дальнейшем прояснить ситуацию.

### **Заключение**

Главным итогом предварительного натурального эксперимента на описанном экспериментальном стенде стало подтверждение в целом корректной работы системы термометрирования газового пространства опытного образца нового котла-утилизатора. Получены первые результаты распределения температуры в контрольных точках опытного котла-утилизатора. Анализ полученных результатов помог определить недочеты в работе системы термометрирования и, после их исправления, позволит продолжить работу по накоплению данных.

Параллельно с решением поставленных задач эксперимента удалось убедиться в исправном состоянии узлов и деталей дизеля, опытного котла-утилизатора, в работоспособном состоянии заново смонтированных или доработанных систем охлаждения, смазывания, топливной, газопуска и их основных элементов, в отсутствие необходимости в значительных ресурсах на доработку стенда.

По завершению работ по дооснащению стенда оставшимися измерительными системами планируется проведение полномасштабного эксперимента для подтверждения достоверности результатов разработанной численной модели нового котла-утилизатора и, возможно, корректировки условий однозначности, задаваемых при подготовке модели.

### **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. Енин В. И., Судовые котельные установки: учебное пособие / В. И. Енин, Н. И. Денисенко, И. И. Костылев // М.: Транспорт, 1993. – 216 с.
3. Лысенко В. К., Судовые паровые котлы. Устройство и эксплуатация: учебное пособие / В. К. Лысенко, Б. И. Лубочкин // 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1975. – 320 с.
4. Корнилов Э. В., Вспомогательные и утилизационные котлы морских судов: учебное пособие / Э. В. Корнилов, В. Н. Афанашенко, П. В. Бойко // Одесса: Феникс, 2004. – 167 с.
5. Шураев О. П., Исследование полей скорости и температуры в каналах котла-утилизатора методом численного моделирования / О. П. Шураев, Д. И. Бевза, С. Н. Валиулин // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2016. № 3. С. 49 - 56.
6. 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.
7. Дорохов А. Ф., Обработка информации и управление температурным режимом рабочего цилиндра двигателя внутреннего сгорания судового дизеля / А. Ф. Дорохов, Н. В. Пахомова, Г. А. Попов // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. 2015. № 2. С. 137 - 150.
8. Безюков О. К., Стенды, программы и методики для испытаний высокооборотных судовых дизелей / О. К. Безюков, Е. В. Макарьев, М. М. Махфуд // Сборник научных

трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова», 2017. – С. 32-40. – EDN ZXDWVZ.

#### References

1. Hrjapchenkov A. S., Sudovye vspomogatel'nye i utilizacionnye kotly: uchebnoe posobie / A. S. Hrjapchenkov // 2-e izd., pererab. i dop. – L.: Sudostroenie, 1988. – 296 s.
2. Enin V. I., Sudovye kotel'nye ustanovki: uchebnoe posobie / V. I. Enin, N. I. Denisenko, I. I. Kostylev // M.: Transport, 1993. – 216 s.
3. Lysenko V. K., Sudovye parovye kotly. Ustrojstvo i jekspluatacija: uchebnoe posobie / V. K. Lysenko, B. I. Lubochkin // 3-e izd., pererab. i dop. – M.: Transport, 1975. – 320 s.
4. Kornilov Je. V., Vspomogatel'nye i utilizacionnye kotly morskikh sudov: uchebnoe posobie / Je. V. Kornilov, V. N. Afanashhenko, P.V. Bojko // Odessa: Feniks, 2004. – 167 s.
5. Shurayev O. P., Issledovanie poley skorosti i temperatury v kanalakh kotla-utilizatora metodom chislennogo modelirovaniya [The research of the speed and temperature fields in the flow passages of the exhaust heat boiler by the numerical experiment method] / O. P. Shurayev, D. I. Bevza, S. N. Valiulin // Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2016. № 3. pp. 49-56.
6. Shurayev O. P., Rezul'taty chislennogo modelirovaniya dvizheniya gaza v kanalakh kompakt-nogo kotla-utilizatora [The results of numerical modeling of gas dynamics in the ducts of a compact exhaust boiler] / O. P. Shurayev, D. I. Bevza, S. N. Valiulin // Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transport. 2017. № 50. pp. 268 - 276.
7. Dorohov A. F., Obrabotka informacii i upravlenie temperaturnym rezhimom rabocheho cilindra dvigatelja vnutrennego sgoranija sudovogo dizelja / A. F. Dorohov, N. V. Pahomova, G. A. Popov // Prikaspijskij zhurnal: Upravlenie i vysokie tehnologii. – 2015. – № 2. – S. 137 - 150.
8. Bezyukov, O. K. Stendy, programmy i metodiki dlya ispytaniy vysokooborotnykh sudovykh dizeley [Stands, programs and procedures for testing high-speed marine diesel engines] / O. K. Bezyukov, E. V. Makar'ev, M. M. Makhfud // Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. – Sankt-Peterburg: FGBOU VO «Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S .O. Makarova». 2017. – pp. 32-40. – EDN ZXDWVZ.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Шураев Олег Петрович**, к.т.н., доцент кафедры ЭСЭУ (Эксплуатации судовых энергетических установок) Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, ауд. 667, e-mail: solwrk@inbox.ru

**Oleg P. Shurayev**, Candidate of Technical Science, Assistant Professor, The Department «Operation of Ship Power Plants», Volga state university of water transport, 5, Nesterova str., Nizhny Novgorod, Russia

**Бевза Денис Игоревич**, аспирант кафедры ЭСЭУ (Эксплуатации судовых энергетических установок) Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, ауд. 667, e-mail: bvz.denis@yandex.ru

**Denis I. Bevza**, postgraduate, The Department «Operation of Ship Power Plants», Volga state university of water transport, 5, Nesterova str., Nizhny Novgorod, Russia

Статья поступила в редакцию 29.06.2022; опубликована онлайн 20.09.2022.  
Received 29.06.2022; published online 20.09.2022.