

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Научная статья

УДК 621.431.74.016

DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2025-74-20

EDN: ZKVCVX

Анализ конструктивных особенностей термодатчиков для определения параметров теплообмена в камере сгорания судовых дизелей

Борис Иванович Руднев¹, Ольга Владимировна Повалихина²

^{1,2} Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия

^{1,2} povalichina@mail.ru

Аннотация. Показаны конструктивные особенности термодатчиков для определения локальных параметров теплообмена в камере сгорания судовых дизелей. Установлено, что наиболее пригодными для таких исследований являются термодатчики типа Fe–Ni, имеющие линейную характеристику зависимости термоЭДС от температуры.

Ключевые слова: судовой дизель, камера сгорания, параметры теплообмена, поверхностный термодатчик

Для цитирования: Руднев Б. И., Повалихина О. В. Анализ конструктивных особенностей термодатчиков для определения параметров теплообмена в камере сгорания судовых дизелей // Научные труды Дальрыбвтуза. 2025. Т. 74, № 4. С. 193–201.

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2025. Vol. 74, no. 4. P. 193–201.

Original article

SHIP'S POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Analysis designing of features thermocouples for definition local of parameters heat transfer in marine diesel combustion chamber

Boris I. Rudnev¹, Olga V. Povalikhina²

^{1,2} Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia

^{1,2} povalichina@mail.ru

Abstract. Constructive features of thermocouples for definition of local parameters heat transfer in marine diesels combustion chamber are showing. Major useful for thus investigations appear thermocouples of make Fe – Ni hold liner characteristics of dependence thermoEMP from temperature is determined.

Keywords: marine diesel, combustion chamber, parameters of heat transfer, shallow thermocouple

For citation: Rudnev B. I., Povalikhina O. V. Analysis designing of features thermocouples for definition local of parameters heat transfer in marine diesel combustion chamber // *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2025; 74(4): 193–201. (in Russ.).

Введение

Использование современных систем автоматизированного проектирования (САПР) позволило за последние два десятилетия сократить сроки проектирования сложных технических объектов, к которым относятся и судовые дизели, в среднем в 3–5 раз. Вместе с тем время доводки головного образца судового дизеля, особенно большой размерности, предшествующее запуску его в серийное производство, все еще занимает достаточно большой срок (от 3 месяцев до полутора лет и более) [1–4]. Это обусловлено тем, что для оценки теплового и напряженно-деформированного состояния деталей, образующих камеру сгорания (КС) судовых дизелей, в САПР используются недостаточно точные математические модели (ММ). Отличие расчетных и экспериментальных данных по локальным параметрам теплообмена и тепловой напряженности указанных выше деталей составляет от 15 до 50 %. Необходимо также отметить, что количество надежных экспериментальных данных по локальным параметрам теплообмена на поверхностях поршня, крышки и втулки цилиндра судовых дизелей весьма ограничено. Последнее обстоятельство существенно затрудняет верификацию ММ, используемых в САПР, и зачастую конструкторам приходится обращаться к предыдущему опыту и делать попытки экстраполяции экспериментальных данных на вновь создаваемый судовой дизель с повышенными параметрами рабочего процесса, другим видом топлива и т.д. В связи с отмеченным актуальность экспериментальных исследований локальных параметров теплообмена в судовых дизелях в настоящее время существенно возрастает. Целью этой статьи является представление, обсуждение и анализ основных типов термоприёмников, используемых в таких исследованиях.

Основные типы термоприёмников для определения локальных параметров теплообмена в КС судовых дизелей и их конструктивные особенности

В настоящее время известно большое число разнообразных конструкций термоприёмников, используемых для записи колебаний температуры в деталях КС как дизелей различного назначения, так и в других типах тепловых двигателей.

Конструктивно они могут быть разделены на две группы:

1. Пленочные термометры сопротивления (ПТС).
2. Поверхностные термоприёмники (термопары).

ПТС нашли широкое применение при исследованиях теплообмена в ударных трубах и в некоторых других огнетехнических установках. Конструкции различных ПТС достаточно подробно описаны во многих работах [5–7]. Собственно, ПТС включают в себя стеклянную подложку в виде цилиндра малых размеров с нанесенной на торцевую поверхность платиновой (или другой) пленкой толщиной 0,005–0,1 мкм. Принцип измерения температуры поверхности с помощью ПТС сводится к регистрации изменения его сопротивления при изменении температуры поверхности детали под действием рабочего тела.

Большим достоинством ПТС является высокая чувствительность и относительно простая схема измерений с использованием в качестве усилителей серийных тензостанций. Однако, несмотря на отмеченные достоинства, ПТС обладают и рядом существенных недостатков, которые в значительной степени препятствуют применению их при исследованиях колебаний температуры в деталях КС дизелей. К ним относятся:

1. Сложная технология изготовления и относительно большие габариты.
2. Как отмечается в [5–7], при работе ПТС в КС нагар, оседающий на их поверхности, оказывает шунтирующее воздействие и вносит погрешность при обработке полученных температурных кривых. Кроме того, не исключается возможность появления нелинейности сопротивления в функции температуры.
3. Теплофизические характеристики материала подложки и детали сильно отличаются, что не позволяет измерять в процессе опытов среднюю температуру в исследуемых точках поверхности и требует проведения повторного эксперимента с использованием в этих точках

обычных термопар. Отмеченное значительно снижает ценность полученной информации, так как трудно достичь полного соответствия рабочего режима в повторном эксперименте.

4. Поскольку в случае применения ПТС колебания температуры фиксируются на поверхности стекла, то необходим пересчет колебаний температуры.

Рассмотренными выше недостатками ПТС в основном и объясняется их малое применение при исследованиях локального теплообмена в дизелях в настоящий период времени.

Полупроводниковые термопары сопротивления [8] из-за нестабильности своих показаний при воздействии газовой среды с высокими давлениями и температурами не нашли пока в практике исследований широкого распространения.

В сравнении с ПТС и полупроводниковыми термометрами сопротивления поверхностные термоприёмники (термопары) в большинстве случаев имеют простую конструкцию, они более надежны и удобны во время испытаний. Использование современных высокочувствительных усилителей постоянного тока типа УБП2-03 значительно снижают требования к чувствительности поверхностных термоприёмников, так как позволяет усилить и надежно записать сравнительно слабые сигналы [9].

Большое распространение особенно за рубежом получил поверхностный железоникелевый Fe-Ni термоприёмник, предложенный Д. Бендерским [10]. Он представляет собой цилиндрический металлический корпус, выполненный из материала, близкого по своим теплофизическим характеристикам к материалу исследуемой детали. В центральной отверстии корпуса устанавливается никелевая проволока с окисью никеля в качестве поверхностной изоляции. Торец корпуса покрывается слоем никеля толщиной 1–3 мкм. Несколько усовершенствованная конструкция термоприёмника Д. Бендерского использовалась в работе [11]. В источниках [12, 13] приводятся конструкции двух электродных хромель-копелевых поверхностных термоприёмников с эффективной глубиной горячего спая 10–30 мкм. Авторы работ [12, 13] отмечают высокую работоспособность термоприёмников в условиях КС дизелей типа 8 ЧН 13/14 (ЯМЗ-204 и ЯМЗ-238Н). Бесспорным преимуществом двухэлектродных термоприёмников является высокая термоЭДС, что позволяет получить более качественные осциллограммы. К недостаткам подобных термоприёмников следует отнести трудность получения надежной изоляции между электродами и корпусом.

Анализ зарубежных исследований по вопросам теплообмена в дизелях, ракетных двигателях и других энергетических установках [14, 15] показывает, что поверхностные термоприёмники (термопары) имеют преимущественное распространение. В работе Селлера [14] приводятся описания двух конструкций неохлаждаемых термоприёмников, используемых при исследованиях ракетных двигателей. Их конструктивное оформление представлено на рис. 1 и 2. Основным их недостатком является большая сложность изготовления и относительно большие габариты.

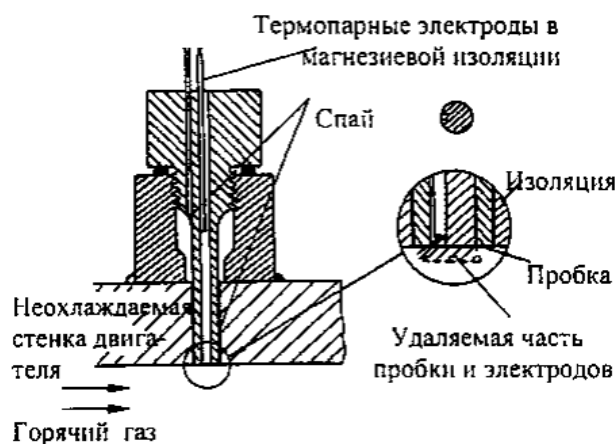


Рис. 1. Конструкция проводящего приёмника теплового потока
Fig. 1. Design of shallow thermocouple thermal flux

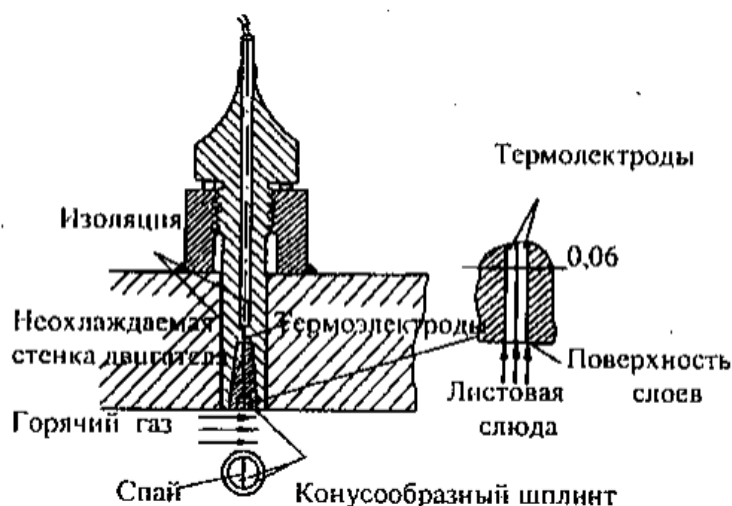


Рис. 2. Термопара фирмы «Нанмак»
Fig. 2. Thermocouple of company “Nanmak”

Последнее препятствует их использованию в деталях КС судовых дизелей, особенно в средне- и высокооборотных. В работе [15] опубликованы результаты исследований теплообмена в дизелях фирмы Caterpillar. Его авторы применили в своих опытах поверхностную железоникелевую термопару Fe–Ni, разработанную Висконсинским университетом. Конструкция этой термопары представлена на рис. 3. Такие термопары были установлены на трех различных по величине среднего эффективного давления дизелях и в процессе опытов показали надежную работу. Единственным недостатком этих термопар является их громоздкость.

Все рассмотренные выше поверхностные термоприёмники содержат в своей конструкции корпус, в котором устанавливается в соответствующей изоляции один (железоникелевый термоприёмник) или два (хромель-копелевые, медно-константановые и другие термоприёмники) термоэлектроды.

Следовательно, такие термоприёмники могут быть установлены лишь в тех местах поверхности деталей, образующих КС, где возможно выполнение сверления под их корпус [16].

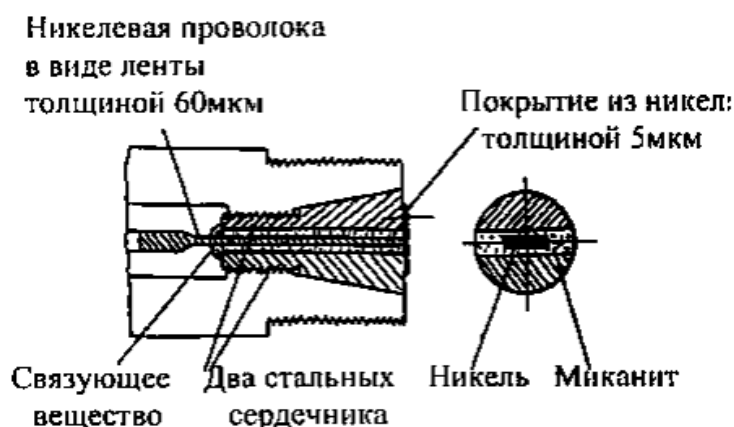


Рис. 3. Конструкция поверхностной термопары Висконсинского университета
Fig. 3. Design of shallow thermocouple of Wisconsin university

Избежать отмеченной трудности позволяет термоприёмник, представленный в работе [17]. Его конструкция показана на рис. 4.

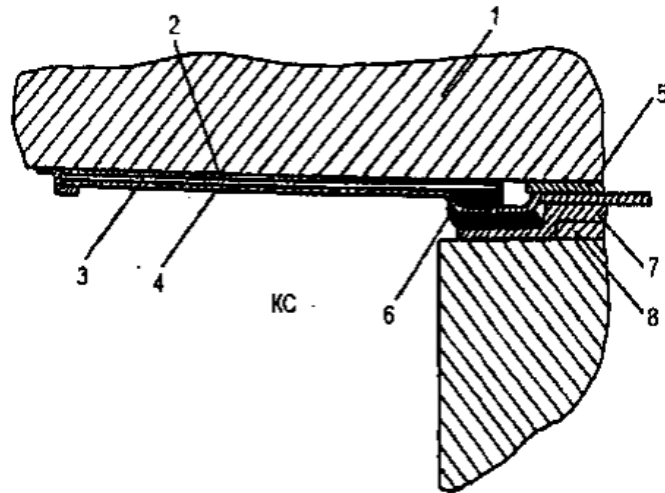


Рис. 4. Поверхностная термопара, использованная в [17]: 1 – чугу́н; 2 – алюми́ний; 3 – фтористый магни́й; 4 – сурьма; 5 – подушка из аралдита; 6 – кремнекаучук; 7 – асбест; 8 – медная прокладка

Fig. 4. Shallow thermocouple employed in [17]: 1 – cast iron; 2 – aluminum; 3 – magnesium; 4 – antimony; 5 – pillow; 6 – rubber; 7 – asbestos; 8 – insert on copper

Особенностью этой термопары является то, что соединение термоэлемента и его проводов может быть приложено непосредственно на поверхности КС. Это позволило установить термоэлементы в любой желаемой точке и обеспечить сравнительно легкую замену вышедшего из строя термоэлемента. Горячий спай этих термопар изготавливается путем вакуумного напыления трех очередных пленок: первая пленка слоя алюминия – для создания связи с поверхностью головки, вторая пленка – слой фтористого магния в качестве изоляции и, наконец, слой сурьмы. Общая толщина трех слоев составляет менее 5 мкм. Описанная поверхностная термопара помимо своих неоспоримых преимуществ имеет и один существенный недостаток. Она очень сложна в изготовлении, ибо требует большую вакуумную камеру, в которой можно было бы разместить головку цилиндров или другую деталь двигателя. В связи с этим такие термопары не нашли пока широкого применения в практике экспериментальных исследований теплообмена в дизельных двигателях.

В работе [18] предложена оригинальная конструкция поверхностного железо-никелевого термоприёмника, который показал высокую степень надежности при длительных моторных испытаниях (80 ч и более) [4]. Его конструкция представлена на рис. 5.

Корпус термоприёмника представляет собой цилиндрическую втулку (диаметром 7 мм) из материала, близкого по своим теплофизическим характеристикам к материалу детали. В коническом отверстии корпуса (конусность 1 : 50) монтируется разрезная втулка, выполненная из железа (стали), которая служит одним из термоэлектродов. Корпус и вставка притираются по поверхности Б. Между двумя частями вставки устанавливается плоский никелевый электрод толщиной 0,2 мм. Важным с точки зрения надежности работы поверхностного термоприёмника является способ изоляции центрального плоского никелевого электрода. В процессе доводки конструкции термоприёмника были экспериментально проверены различные способы изоляции. Во всех вариантах большие боковые поверхности никелевого электрода изолировались с помощью различных видов слюды в виде тонких пластинок, а для изоляции малых боковых поверхностей применялись клей К-300, кремнеорганический клей В-58 и стеклокерамическая изоляция.

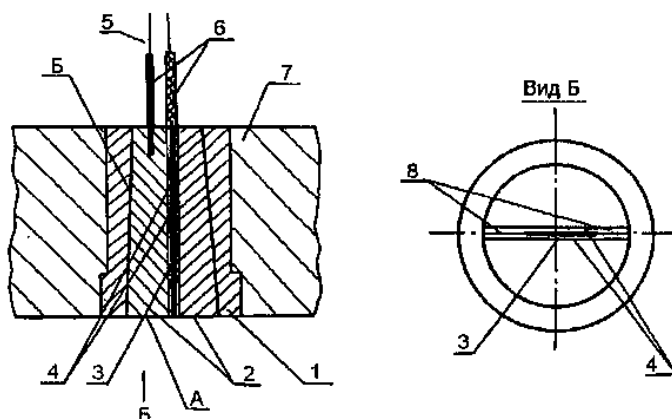


Рис. 5. Поверхностный железо-никелевый термоприёмник: 1 – корпус; 2 – разрезная вставка; 3 – никелевый электрод; 4 – пластинки синтетической слюды; 5 – вывод железного электрода; 6 – изоляция выводов; 7 – термометрируемая деталь; 8 – стеклокерамическая изоляция; А – поверхность с никелевым покрытием; Б – коническая поверхность корпуса и вставки

Fig. 5. Shallow thermocouple Fe–Ni: 1 – corps; 2 – insert on; 3 – Ni-electrode; 4 – mica; 5 – Fe-electrode; 6 – isolation; А – surface with Ni; Б – surface of corps and insert on

Экспериментальная проверка термоприёмников с различной изоляцией малых боковых поверхностей центрального электрода показала, что наибольшей надёжностью обладают термоприёмники со стеклокерамической изоляцией. Последняя разработка в Институте химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН и представляет собой стеклокерамическое покрытие на силикофосфатной растворимой связке. Изоляция больших боковых поверхностей никелевого электрода выполнена с помощью синтетической слюды типа фторфтогонит в виде монокристаллических пластинок толщиной 10 мкм [19]. Сборка корпуса, вставки, центрального никелевого электрода и изоляции осуществляется с помощью клея типа К-300. После сборки термоприёмники подвергаются сушке при температуре 20–40 °С в течение 4–8 ч и проверке качества изоляции. Сопротивление изоляции у выполненных термоприёмников составляет не менее 1 МОм.

Затем поверхность А термоприёмника (см. рис. 5) зашлифовывается заподлицо с корпусом и шлифуется, после чего на нее по специально разработанной технологии наносится электрохимическим способом пленка никеля определенной толщины. Подробное описание указанной технологии приведено в [16].

При заданной средней толщине покрытия 10–20 мкм и катодной плотности тока 2 А/дм³ время электролиза составляет 26–52 мин.

Статическая градуировка разработанных в [18] поверхностных железоникелевых термоприёмников осуществлялась методом сличения в масляном термостате ТС-15. Их градуировочная характеристика показана на рис. 6 и является линейной в исследуемом диапазоне температур. Величина термоЭДС лежит в пределах 28–30 мкВ/°С.

Проведенные одним из авторов настоящей статьи более чем 200-часовые испытания разработанных в [18] термоприёмников на дизеле 8ЧН 13/14 показали их высокую надежность. Последняя определяется тем, что их рабочим «спаем» является вся линия раздела между железной вставкой и никелевым электродом.

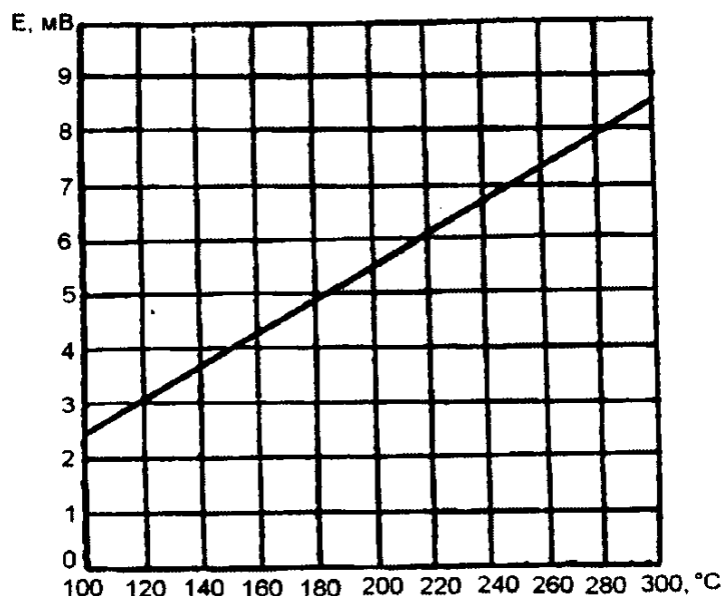


Рис. 6. Градуировочная характеристика поверхностного железоникелевого термоприёмника
Fig. 6. Graduating characteristics shallow Fe-Ni thermocouple

Поэтому их работа не нарушается, пока не удален весь никелевый «мостик» на этой линии. Еще одним преимуществом разработанной конструкции термоприёмника является способ крепления и изоляции центрального электрода, который позволяет создать одновременно высокое сопротивление изоляции и надежное уплотнение. Последнее особенно важно при работе термоприёмников в КС дизелей [16]. В настоящее время для экспериментального определения параметров локального теплообмена в различных энергетических установках, в том числе и в судовых дизелях, исследователями предлагаются и другие конструкции термоприёмников и датчиков теплового потока [20, 21].

Заключение

Проведенный анализ конструктивных особенностей термоприёмников для определения локальных параметров теплообмена в КС судовых дизелей показал, что наиболее пригодными по надежности, метрологическим характеристикам и габаритам для таких исследований являются поверхностные термоприёмники (термопары) типа Fe–Ni и др. Следует также отметить их способность сохранять линейный характер зависимости термоЭДС от температуры во всем диапазоне измеряемых параметров теплообмена.

Список источников

1. Петриченко Р. М., Батурин С. А., Исаков Ю. Н. и др. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС. Алгоритмы прикладных программ. Л. : Машиностроение, 1990. 328 с.
2. Кавтарадзе Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 472 с.
3. Костин А. К., Ларионов В. В., Михайлов Л. И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания : справочное пособие. Л. : Машиностроение, 1979. 222 с.
4. Руднев Б. И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. Владивосток : Дальнаука, 2000. 221 с.
5. Амброк Г. С. Определение инерционности защитных покрытий пленочных термометров сопротивления // Теплофизика высоких температур. 1965. Т. 3, № 2. С. 294–298.

6. Орлин А. С., Чайнов Н. Д., Поляков Ю. А., Сазонов Ю. И. Экспериментальное исследование теплообмена между газом и крышкой цилиндра вихрекамерного дизеля 1С 8,5/11 пленочными термопарами сопротивления // Энергомашиностроение. 1975. № 6. С. 20–22.
7. Поляков Ю. А. Применение пленочных датчиков для изучения теплообмена в диссоциированном потоке газа // Физическая газодинамика, теплообмен и термодинамика газов высоких температур. М. : АН СССР, 1962. С. 251–259.
8. Шефтель И. Т. Термосопротивления. Л. : ЛДНТП, 1957. Вып. 3. 32 с.
9. Руднев Б. И., Повалихина О. В. Контрольно-измерительный комплекс для исследования параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания судового высокооборотного дизеля // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Ч. 1, № 2. С. 73–78.
10. Bendersky D. A special thermocouple for measuring transient temperatures // Mech, Engineering. 1953. Vol. 75. P. 117–120.
11. Whitehouse N. D. Heat transfer in a quiescent chamber Diesel engine // Proc. Inst. Mech. Eng. 1970–1971. Vol. 185, Part 1. P. 963–975.
12. Баранов Ю. Е. Исследование теплоотдачи в стенке внутрицилиндровой полости быстроходного дизеля, форсированного наддувом : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л. : Военная академия тыла и транспорта, 1974. 22 с.
13. Храпов Б. И., Шишков В. М. Измерение нестационарных температурных полей в деталях ДВС // Двигатели внутреннего сгорания. М. : НИИ ИНФОРМТЯМАШ, 1969. 4-69-10. С. 41–44.
14. Селлерс Д. П. Термопарные приемники для оценки локальных коэффициентов теплоотдачи в ракетных двигателях // Измерение нестационарных температур и тепловых потоков. М. : Мир, 1966. С. 127–137.
15. Oguri T., Inaba S. Radiant heat transfer in diesel engines // SAE Preprints. 1972. No 720023. P. 1–19.
16. Руднев Б. И., Повалихина О. В. Процессы теплообмена в камере сгорания дизельных двигателей. Эксперимент и математическое моделирование. LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, Germany, 2013. 112 с.
17. Annand W. J. D., Ma T. H. Instantaneous heat transfer rates to the cylinder heat surface of a small compression- ignition engine // Proc. Inst. Mech. Eng. 1970–1971. Vol. 185, Part 1. P. 976–987.
18. Костин А. К, Михайлов Л. И., Руднев Б. И. Термоприемник для исследования колебаний температуры в деталях ДВС // Двигатели внутреннего сгорания. М. : НИИ ИНФОРМТЯМАШ, 1977. 4-77-16. С. 16–19.
19. Лейзорзон М. С. Синтетическая слюда. М.; Л. : Госэнергоиздат, 1962. 192 с.
20. Chang J., Fillipi Z., Assanis D. et al. Characterizing the thermal sensitivity of gasoline homogeneous charge compression ignition engine measurements of instantaneous wall temperature and heat flux // Int. J. Engine. Res. 2005. Vol. 6. P. 289–309.
21. Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В. Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте. СПб. : СПбГПУ, 2007. 203 с.

Сведения об авторах

Б. И. Руднев – доктор технических наук, профессор кафедры «Холодильная техника и инженерные системы».

О. В. Повалихина – доцент кафедры «Холодильная техника и инженерные системы».

Information about the authors

B. I. Rudnev – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Refrigeration and Engineering Systems.

O. V. Povalikhina – Associate Professor of the Department of Refrigeration and Engineering Systems.

Статья поступила в редакцию 29.11.2025; одобрена после рецензирования 02.12.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 29.11.2025; approved after reviewing 02.12.2025; accepted for publication 02.12.2025.