

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ,  
ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СУДОВОЖДЕНИЯ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СУДОВ

Научная статья

УДК 533.62.01

**Измерительный комплекс для исследования параметров рабочего процесса  
и радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания судового дизеля**

**Борис Иванович Руднев<sup>1</sup>, Ольга Владимировна Повалихина<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
Владивосток, Россия

<sup>2</sup> povalichina@mail.ru

**Аннотация.** Сокращение сроков доводки новых моделей судовых дизелей по-прежнему остается актуальной проблемой. Основная причина увеличения указанных сроков – это весьма существенное отличие расчетных и экспериментальных данных, полученных на испытательных стендах. В частности, по локальным тепловым потокам, передаваемым от рабочего тела к деталям камеры сгорания, упомянутое отличие составляет 25–50 %. Это не позволяет на стадии проектирования с достаточной точностью задать граничные условия при расчетном анализе теплового и напряженно-деформированного состояния деталей, образующих камеру сгорания и влечет за собой значительное увеличение сроков экспериментальной доводки новых моделей судовых дизелей. Целью данной статьи является представление 12-канального измерительного комплекса, реализующего современные экспериментальные методики по определению параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена и позволяющего получить достоверные экспериментальные данные.

**Ключевые слова:** частицы сажи, проба, осадительная поверхность, камера сгорания, судовой дизель, электронный микроскоп

**Для цитирования:** Руднев Б.И., Повалихина О.В. Измерительный комплекс для исследования параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания судового дизеля// Научные труды Дальрыбвтуза. 2021. Т. 58. № 4. С. 63–71.

SHIP POWER PLANTS, DEVICES AND SYSTEMS, TECHNICAL MEANS OF NAVIGATION,  
ELECTRICAL EQUIPMENT OF SHIPS

Original article

**Measured complex for the investigation of parameters of operation process and radiative  
convection heat transfer in the combustion chamber of a marine diesel**

**Boris I. Rudnev<sup>1</sup>, Olga V. Povalikhina<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia

<sup>2</sup> povalichina@mail.ru

**Abstract.** Reduction of terms of drive new models of marine diesel engines is actual problem as before. The mean reason of increasing this terms in based on difference of calculation and experimental data reseeded in experimental stands. As for local heat fluxes transferred from gases to details of combustion chamber which is 25–50 per cent. This desnot determine boundary conditions in calculative analysis thermal and power deformable condition of details formed the combustion chamber and involves great terms of experimental drive in new models of marine diesel engines. The purpose of this paper is presentation of 12-canal measured complex that realized modern experimental methods in definition of parameters gases and radiative convective heat transfer and given reliable experimental data.

**Keywords** particles of soot, test, precipitately surface, combustion chamber, marine diesel, electronic microscope

**For citation:** Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Measured complex for the investigation of parameters of operation process and radiative convection heat transfer in the combustion chamber of a marine diesel. *Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University*. 2021; 58(4):63–71. (In Russ.).

## Введение

Сокращение сроков процесса доводки новых образцов судовых дизелей все еще остается актуальной проблемой. Такое положение объясняется главным образом несовершенством математических моделей, используемых конструкторами при проектировании. Это приводит к существенным расхождениям расчетных и экспериментальных данных, получаемых на доводочных стендах. Отмеченное, не позволяет на стадии проектирования с достаточной точностью задать граничные условия при расчетном анализе теплового и напряженно-деформированного состояния деталей, образующих КС. Как отмечено в [1] даже при использовании современных программных комплексов, в которых реализуются весьма сложные с физической точки зрения математические модели, требуется задавать некоторые параметры априори или пользоваться существующими экспериментальными данными. В связи с этим использование и совершенствование измерительных комплексов, реализующих современные экспериментальные методики по определению параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена и позволяющих получать достоверные экспериментальные данные представляется весьма актуальной проблемой.

## Двенадцати канальный измерительный комплекс для определения параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена в КС судового дизеля

Принципиальная схема названного выше комплекса представлена на рис.1.

Во время испытаний дизеля на ленте осциллографа Н-115 или на магнитограмме регистрируются следующие параметры [2]: 1 – давление газов в цилиндре; 2 – подъем иглы форсунки; 3 – давление топлива перед форсункой; 4 – интенсивность свечения пламени на длине волны  $\lambda_1 = 0,397$  мкм; 5 – интенсивность свечения пламени на длине волны  $\lambda_2 = 0,634$  мкм; 6 – отметки углов поворота коленчатого вала через 10 градусов и отметка верхней мертвой точки; 7 – частота вращения ротора турбокомпрессора; 8, 9, 10, 11 – колебания температуры на поверхности крышки цилиндров; 12 – отметки времен.

Перечисленные выше параметры регистрируются по следующим каналам: 1 – давление газов в КС измеряется пьезокварцевым датчиком ПД-100 в комплекте с усилителем УНЧ-10У; 2 – подъем иглы форсунки регистрируется дифференциальным датчиком перемещения ИПИ конструкции ЦИТА. Он подключается к тензостанции УТ4-1 через согласующее

устройство; 3 – давление топлива перед форсункой измеряется датчиком ДДИ-20. Сигнал от датчика поступает на тензостанцию УТ 4-1; 4, 5 – по этим каналам регистрируется интенсивность свечения пламени на двух длинах волн ( $\lambda_1=0,397$  мкм и  $\lambda_2=0,634$  мкм), параллельно на длине волны  $\lambda_2=0,630$  мкм производится измерение относительной концентрации сажи в КС с помощью лазера ЛГ-28. Подробно метод определения температуры пламени и концентрации частиц сажи рассмотрен во втором разделе настоящей статьи; 6 – отметки углов поворота коленчатого вала через 10 градусов и отметка верхней мертвой точки (ВМТ) регистрируются фотоэлектрическим датчиком. 7 – частота вращения ротора турбокомпрессора регистрируется индуктивным датчиком оригинальной конструкции, сигнал от которого подается на усилитель УНЧ-3. 8, 9, 10, 11 – по этим каналам сигналы от поверхностных термодатчиков, установленных в крышке восьмого (исследуемого) цилиндра через переключатель П<sub>1</sub> поступают либо на потенциометр ПП-63, либо на усилитель УБП 2-03; 12 – сигналы от генератора звука ГЗ-33 напрямую поступают на шлейфный осциллограф типа Н-115 или на магнитограф.

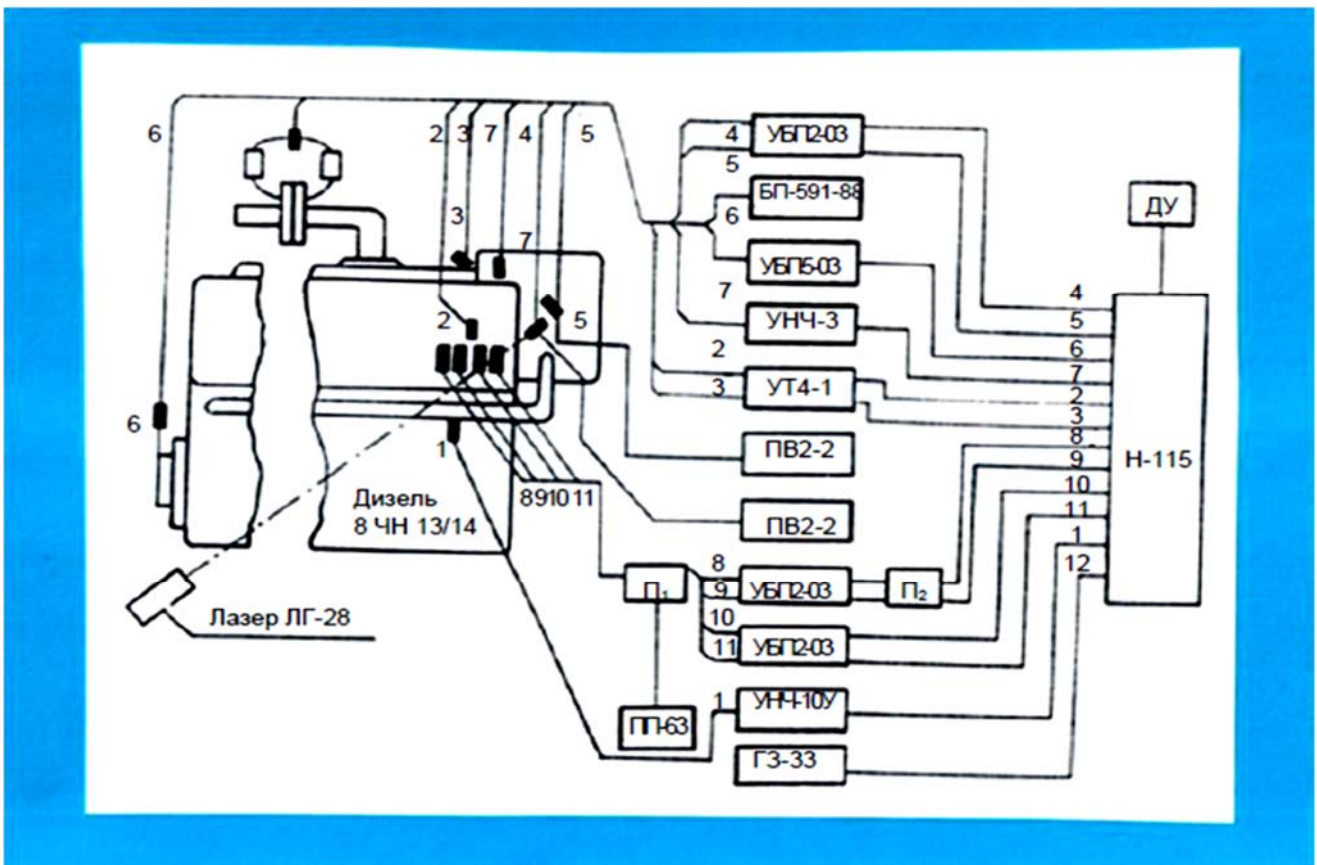


Рис. 1. Принципиальная схема измерительного комплекса для определения параметров рабочего процесса и локального теплообмена в КС судового дизеля

Fig. 1. Principial scheme measured complex for determination parameters of operation process u local heat transfer in marine diesel combustion chamber

Рассмотренная схема измерений (см. рис. 1) позволяет с помощью одного и того же поверхностного термодатчика и на одном режиме работы дизеля регистрировать в исследуемой точке поверхности крышки цилиндров как колебания температуры, так и стационарную (среднюю) температуру. Для этого используется блок переключателей П<sub>1</sub>. Такая схема

измерений обладает важным преимуществом по сравнению со схемами, в которых предусмотрена регистрация только колебаний температуры [3], ибо для обработки осциллограмм необходимо знать среднюю температуру поверхности в месте установки термоприемника [2, 4]. Наличие в составе измерительного комплекса необходимого количества усилителей УБП 2-03 позволяет вести запись температурных колебаний одновременно в течение одного и того же рабочего цикла во всех четырех точках, в которых установлены поверхностные термоприемники.

Применение в системе измерительного комплекса усилителей УБП 2-03 позволяет надежно производить запись колебаний температуры, начиная с 0,08 градуса (при величине термоЭДС железоникелевых термоприемников  $\approx 30 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ ) с погрешностью 5 %, равной погрешности калибровочного напряжения. Основным в системе соединений измерительного комплекса является кабель, содержащий 36 экранированных жил (кабель управления), разведенный на концах в отрезки по 2,5 м, распаянных во вставки 2РМ на 4 контакта. Все датчики снабжены ответными стандартными колодками.

### Элементы измерительного комплекса, реализующие методику двухканального оптического индицирования цилиндра судового дизеля

Принципиальная схема, содержащая элементы измерительного комплекса для реализации этой методики показана на рис. 2.

Представленная на рис. 2 схема реализует методику, позволяющую определять температуру пламени в КС дизеля по величине отношения спектральных интенсивностей его излучения на двух выбранных участках спектра ( $\lambda_1=0,397 \text{ мкм}$  и  $\lambda_2=0,634 \text{ мкм}$ ), т.е. в видимой области спектра. Подробные аналитические соотношения, раскрывающие физическую сущность этой методики представлены в [2, 5–10].

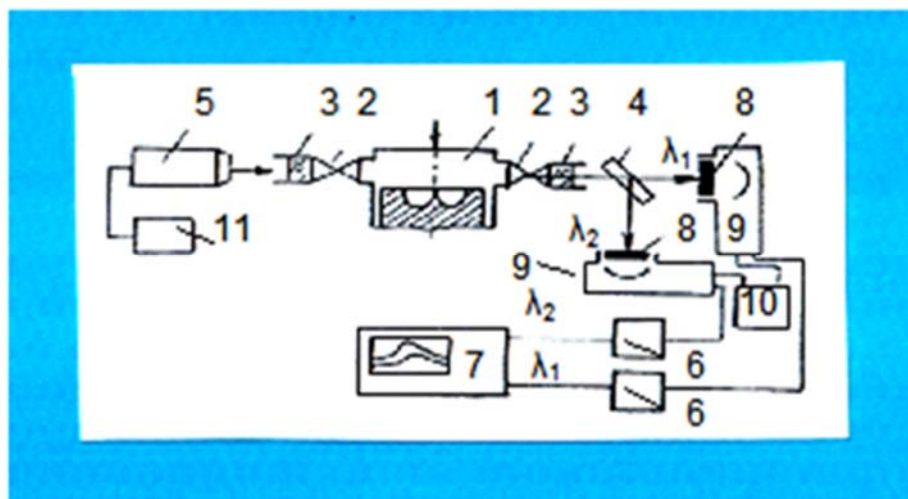


Рис. 2. Принципиальная схема двухканального оптического индицирования цилиндра дизеля:  
 1 – камера сгорания; 2 – разобщающее устройство; 3 – кварцевое окно; 4 – полупрозрачное зеркало;  
 5 – газовый лазер ЛГ-28; 6 – усилители; 7 – шлейфный осциллограф Н-115; 8 – светофильтры;  
 9 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-22 – приемник излучения; 10 – источник питания;  
 11 – стабилизатор тока СПБ-5

Fig. 2. Principial scheme two canal optical indicator of diesel cylinder: 1 – combustion chamber;  
 2- disconnect device; 3 – quartz window; 4 – half clear mirror; 5 – gas lazar LD-28; 6 – boosters;  
 7 – train oscillography N-115; 8 – light filters; 9 – photo electron booster FTB-22;  
 10 – source of feed; 11 – stabilizer of electricity

В основу методики определения концентрации частиц сажи в цилиндре дизеля положена гипотеза Бугера – Беера, которую запишем в виде [11]:

$$J''_{\lambda} / J'_{\lambda} = \exp(-\mu k_{\lambda} L), \quad (1)$$

где  $J'_{\lambda}$ ,  $J''_{\lambda}$  – спектральная интенсивность светового потока от постороннего источника соответственно на входе в пламя и после прохождения им пламени;  $\mu$  – концентрация частиц сажи в цилиндре дизеля;  $k_{\lambda}$  – спектральный коэффициент ослабления;  $L$  – эффективная длина пути луча.

Обозначив через  $M$  величину  $1/(k_{\lambda} L)$  и выполнив в (1) простые преобразования, получим уравнение для относительной безразмерной концентрации сажи в КС дизеля:

$$\bar{\mu} = \ln \frac{J'_{\lambda}}{J''_{\lambda}}. \quad (2)$$

Величина поглощения светового потока от лазера (см. рис. 2) при прохождении его через пламя в КС определяется по результатам регистрации интенсивностей потоков излучения при трех условиях [2]:

1. Двигатель не работает, лазер включен. В этом случае регистрируется интенсивность излучения собственно лазера после прохождения света через два кварцевых окна в КС  $J_{л}$ , ей соответствует ордината на осциллограмме  $h_{л}$ ;
2. Двигатель работает, лазер включен. При этом регистрируется суммарное излучение пламени и частично поглощенное пламенем излучение лазера  $J_{л+п}$ , соответственно на осциллограмме  $h_{л+п}$ ;
3. Двигатель работает, лазер выключен. Производится регистрация интенсивности излучения собственно пламени  $J_{п}$ , ордината на осциллограмме  $h_{п}$ .

Переходя к указанным выше ординатам на осциллограммах в миллиметрах, относительную величину безразмерной концентрации сажи в КС дизеля можно определить по зависимости [2]:

$$\bar{\mu} = \ln \frac{h_{л}}{h_{л+п} - h_{п}}. \quad (3)$$

Проведенная одним из авторов статьи серия градуировочных опытов [2] позволила получить величину  $M = 2,44 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{м}^3 / (\text{ед} \cdot \bar{\mu})$ , которая дает возможность определить действительную концентрацию сажи в КС по формуле:

$$\mu = M \cdot \bar{\mu} \quad (4)$$

### Устройство для отбора частиц сажи из КС судового дизеля

Общий вид устройства и его детали представлены на рис. 3 и 4.

Детали устройства изготовлены из стали 45 [12]. Следует отметить, что большинство судовых дизелей оборудовано каналами для снятия индикаторных диаграмм. Это облегчает доступ в КС и позволяет использовать индикаторный канал как тракт для отбора частиц сажи.

После того как устройство смонтировано на судовом дизеле (это осуществляется с помощью накидной гайки 4, см. рис. 4), непосредственно методика отбора частиц сажи сводится к следующему:

1. Дизель запускается и прогревается до рабочего состояния, при этом индикаторный кран закрыт;

2. Отбор проб частиц сажи производится при работе судового дизеля по стандартной нагрузочной характеристике. На каждой ее «точке» отбор частиц сажи на осадительную поверхность (стеклянную пластинку) осуществляется не менее 5 раз, при этом время открытия индикаторного крана составляет 2 – 3 с.

3. Стеклопластиковые пластинки с осевшими на них частицами сажи используются далее для определения оптических характеристик частиц сажи с помощью сканирующего электронного микроскопа с высокой разрешающей способностью S 5500 Hitachi, Japan [13].



Рис. 3. Общий вид устройства для отбора частиц сажи из камеры сгорания судового дизеля 6ЧН 24/36

Fig. 3. Common look of device for cull soot particles with marine diesel 6 ChN 24/36 combustion chamber



Рис. 4. Детали устройства для отбора проб частиц сажи из камеры сгорания судового дизеля 6ЧН 24/36: 1 – цилиндрическая насадка с отверстием диаметром 1мм; 2 и 3 – сопла (основное и запасное) с входным диаметром 8 мм и выходным диаметром 1,7мм; 4 – накидная гайка для крепления устройства на индикаторный канал дизеля

Fig. 4. Details of device for cull soot particles with marine diesel 6 ChN 24/36 combustion chamber: 1- cylindrical implant with hole of diameter 1mm; 2 and 3 – nozzles (basic and duplicate) with input of diameter 8mm and exit of diameter 1,7 mm; 4 – cap nut for strong of device on indicator canal of diesel

Общий вид указанного микроскопа и его электронной пушки показаны на рис. 5 и 6.

Полученные с его помощью результаты по оптическим характеристикам частиц подробно проанализированы и представлены в [13]. Рассмотренный в статье измерительный комплекс имеет большие возможности для своего дальнейшего совершенствования. В частности, запись, регистрируемых параметров можно вести через соответствующий интерфейс непосредственно на персональный компьютер [14, 15]. Использование в составе указанного комплекса «интеллектуальных» датчиков со встроенными аналого-цифровыми преобразователями [16] также весьма существенно расширяют его возможности, в том числе и в плане дистанционного управления процессами регистрации измеряемых параметров.



Рис. 5 . Общий вид сканирующего электронного микроскопа S 5500 Hitachi, Japan  
Fig. 5. Common look scan electronic of microscope S 5500 Hitachi, Japan



Рис. 6. Общий вид электронной пушки сканирующего микроскопа S 5500  
Fig. 6. Common look electronic of cannon scan of microscope S 5500

### Выводы

Представленный в статье оригинальный измерительный комплекс позволяет в течение одного цикла измерять 12 основных параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена. Эта дает возможность повысить качество проведения экспериментальных исследований и глубину раскрытия физики газодинамических и тепловых процессов, протекающих в КС судовых дизелей.

Отмеченное будет способствовать сокращению сроков доводки новых и модернизации уже существующих моделей судовых дизелей и созданию надежной базы данных для проверки адекватности математических моделей указанных выше процессов.

### Список источников

1. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Зеленцов А.А. Трехмерное моделирование нестационарных теплофизических процессов в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 85 с.
2. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей – Владивосток: Дальнаука, 2000. 221 с.
3. Розенблит Г.Б. Теплопередача в дизелях. М.: Машиностроение, 1977. 216 с.
4. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 472 с.
5. Дьяченко Н.Х., Батулин С.А., Ложкин В.Н. Экспериментальное исследование температуры сажистого пламени четырехтактных дизелей // Исследование рабочего процесса и систем быстроходных дизелей. Барнаул, 1976, вып. 3(58). С. 17–25.

6. Дьяченко Н.Х., Батурин С.А., Ложкин В.Н. Исследование температуры и излучательной способности турбулентного сажистого пламени в циклических процесса сгорания // Труды ЛПИ, 1977, № 358. С. 96–100.
7. Куинн Т. Температура .М.: Мир, 1985. 448 с.
8. Гордов А.Н, Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992. 304 с.
9. Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 460 с.
10. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York: Academic Press, 2003. 822 p.
11. Ключников А.Д., Иванцов Г.П. Теплопередача излучением в огнетехнических установках. М.: Энергия, 1970. 400 с.
12. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Метод осадительной поверхности и устройство для отбора частиц сажи из камеры сгорания судового дизеля// Научные труды Дальрыбвтуза, 2018. Т. 46, № 3. С. 33–41.
13. Руднев Б.И, Курявый В.Г., Повалихина О.В. Экспериментальное исследование оптических параметров и наноструктур частиц сажи дизельного двигателя//Тепловые процессы в технике, 2006. Т. 8, № 9. С. 416–422.
14. Никитюк Н.М. Микропроцессы и микро-ЭВС. Применение в приборостроении и научных исследованиях. М.: Энергоиздат, 1981. 168 с.
15. Како Н., Яманэ Я. Датчики и микро-ЭВМ. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 120 с.
16. Гнатек Ю.Р. Справочник по цифро-аналоговым и аналого-цифровым преобразователям. М.: Радио и связь, 1982. 552 с.

### References

1. Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Zelentsov A.A. Three-dimensional modeling of unsteady thermophysical processes in piston engines. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2012. 85 p.
2. Rudnev B.I. Processes of local heat exchange in the combustion chamber of diesel engines - Vladivostok: Dalnauka, 2000. 221 p.
3. Rosenblit G.B. Heat transfer in diesels. M.: Mechanical Engineering, 1977. 216 p.
4. Kavtaradze R.Z. Local heat transfer in piston engines. M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2007. 472 p.
5. Dyachenko N.H., Baturin S.A., Lozhkin V.N. Experimental study of the temperature of the sooty flame of four-stroke diesels // Investigation of the workflow and systems of high-speed diesels. Barnaul, 1976, Issue 3(58). P. 17-25.
6. Dyachenko N.H., Baturin S.A., Lozhkin V.N. Investigation of the temperature and emissivity of a turbulent sooty flame in cyclic combustion processes // Proceedings of the LPI, 1977, No. 358. P. 96 – 100.
7. Quinn T. Temperature. Moscow: Mir, 1985. 448 p.
8. Gordov A.N., Zhagullo O.M., Ivanova A.G. Fundamentals of temperature measurements. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 304 p.
9. Ivanova G.M., Kuznetsov N.D., Chistyakov V.S. Heat engineering measurements and devices. Moscow: Publishing House of MEI, 2007. 460 p.
10. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York: Academic Press, 2003. 822 p.
11. Klyuchnikov A.D., Ivantsov G.P. Heat transfer by radiation in fire-technical installations. M.: Energiya, 1970. 400 p.
12. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Sedimentation surface method and device for the selection of soot particles from the combustion chamber of marine diesel// Scientific works of Dalrybvtuz, 2018. Vol.46, No. 3. P. 33–41.



13. Rudnev B.I., Kuryavy V.G., Povalikhina O.V. Experimental study of optical parameters and nanostructures of diesel engine soot particles//Thermal processes in engineering, 2006, vol.8, No. 9. pp. 416 – 422.

14. Nikityuk N.M. Microprocesses and micro-EMUS. Application in instrumentation and scientific research. M.: Energoizdat, 1981. 168 p.

15. Kako N., Yamane Ya. Sensors and micro-computers. L.: Energoatomizdat, 1986. 120 p.

16. Gnatek Yu.R. Handbook of digital-analog and analog-to-digital converters. Moscow: Radio and Communications, 1982. 552 p.

### **Информация об авторах**

Б.И.Руднев –доктор технических наук, профессор, SPIN-код: 2797-1790, AuthorID: 423385;

О.В.Повалихина – доцент, SPIN-код: 9956-1129, AuthorID: 875839.

### **Information about the authors**

B.I.Rudnev – doctor of technical sciences, professor, SPIN-code: 2797-1790, AuthorID: 423385;

O.V.Povalichina – associate professor, SPIN-code: 9956-1129, AuthorID: 875839.

Статья поступила в редакцию 02.12.2021, одобрена после рецензирования 12.12.2021, принята к публикации 15.12.2021.

The article was submitted 02.12.2021 approved after reviewing 12.12.2021, accepted for publication 15.12.2021.