

Научные труды Дальрыбвтуза. 2021. Т. 58. № 4. С. 54–62.
Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University. 2021. Vol. 58, no. 4. P. 54–62.

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

Научная статья

УДК 533.62.01

Оптические характеристики частиц сажи и параметры радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля

Борис Иванович Руднев¹, Ольга Владимировна Повалихина²

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

² povalichina@mail.ru

Аннотация. Высокий уровень тепловых нагрузок деталей камеры сгорания судовых дизелей является одной из основных причин снижения их эксплуатационной надежности. Ошибки в расчетных оценках теплового и напряженно-деформированного состояния деталей камеры сгорания на стадии проектирования в настоящий период достигают 30–80 %. Экспериментально доказано, что частицы сажи, образующиеся в камере сгорания судового дизеля, могут быть отнесены к малым с оптической точки зрения. Значения средних по поверхности результирующих потоков излучения для крышки цилиндра, поршня и втулки, представленные в статье, позволяют еще на стадии проектирования определить в них величину переменных температурных напряжений. Это очень важно для оценки надежности работы деталей камеры сгорания в эксплуатации.

Ключевые слова: судовый дизель, частицы сажи, спектральный анализ, результирующий поток излучения

Для цитирования: Руднев Б.И., Повалихина О.В. Оптические характеристики частиц сажи и параметры радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля // Научные труды Дальрыбвтуза. 2021. Т. 58. № 4. С. 54–62.

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

Original article

Optical characteristics particles of soot and parameters of radiative heat transfer in marine diesel combustion chamber

Boris I. Rudnev¹, Olga V. Povalikhina²

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

² povalichina@mail.ru

Abstract. High loads level of thermal this details in marine diesels is on of basic reason in descent their exploitation security. Errors in calculation estimations of thermal and power deform-

able condition in details of combustion chamber in designing gets 30–80 % now. It demonstrate experimental that soot particles getting in marine diesel combustion chamber appear to small for optical aspect. Data mean surface resulting radiation heat transfer fluxes for head of cylinder, piston and liner of cylinder surfaces, represented in the paper, makes in designing to estimate value variable temperature intensity. It is very important for estimation of security combustion chamber details during exploitation.

Keywords: marine diesel, particles of soot, spectral analysis, resulting radiation heat transfer fluxes

For citation: Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Optical characteristics particles of soot and parameters of radiative heat transfer in marine diesel combustion chamber. *Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University*. 2021; 58(4):54–62. (In Russ.).

Введение

Тенденции развития современных дизельных двигателей, в том числе и судовых, связаны прежде всего с увеличением их удельной мощности, улучшением параметров экономичности и экологических характеристик. Это обуславливает появление ряда проблем, важнейшей из которых является проблема тепловой напряженности деталей, образующих камеру сгорания (КС). Высокий уровень тепловых нагрузок деталей цилиндропоршневой группы современных судовых дизелей является одной из основных причин снижения их эксплуатационной надежности. Состояние математических моделей (ММ), описывающих процессы переноса теплоты в КС дизельных двигателей в настоящее время таково, что ошибки в расчетных оценках теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы на стадии проектирования достигают 30–80 %. Последнее вызывает необходимость совершенствования как уже существующих ММ, так и разработку новых, которые могли бы более адекватно описывать упомянутые выше процессы. Целями данной статьи являются представление и обсуждение результатов расчетных и экспериментальных исследований, проведенных авторами. Тематика этих исследований охватывает весьма обширный круг вопросов, связанных с определением оптических характеристик частиц сажи и радиационного теплообмена в КС судового дизеля [1, 2, 3].

Оптические характеристики частиц сажи и результаты их спектрального анализа

Испытания судового дизеля 6 ЧН 24/36 проводились по стандартной нагрузочной характеристике [4] с регистрацией параметров рабочего процесса и отбором проб частиц сажи на пяти основных режимах: холостой ход, нагрузка 0 % от номинальной мощности $N_{eном}$, а также 25, 50, 75 и 100 % при частоте вращения коленчатого вала $n=500 \text{ мин}^{-1}$. В результате обработки отобранных в процессе испытаний проб частиц сажи на сканирующем микроскопе с высокой разрешающей способностью S-5500 Hitachi (Japan) был получен массив электронно-микроскопических снимков, позволяющий выполнить количественный анализ оптических характеристик как самих частиц сажи, так и их наноструктур.

На рис. 1 представлен электронно-микроскопический снимок частиц сажи и их наноструктур, относящихся к режиму холостого хода (0 % нагрузки от $N_{eном}$) судового дизеля 6 ЧН 24/36 при увеличении соответственно в 100 000 раз.

Размерная шкала электронного микроскопа, показанная на приведенных снимках, позволяет оценить как размеры наноструктур, в которые объединяются отдельные частицы сажи, так и размеры самих отдельных частиц. Частицы сажи и их наноструктуры, соответствующие нагрузке судового дизеля 6 ЧН 24/36 50 % от $N_{eном}$ при увеличении в 200 000 раз пока-

заны на рис. 2, а на рис. 3 представлены аналогичные экспериментальные данные при нагрузке указанного выше дизеля 100 % от $N_{e_{ном}}$ при увеличении в 500 000 раз.

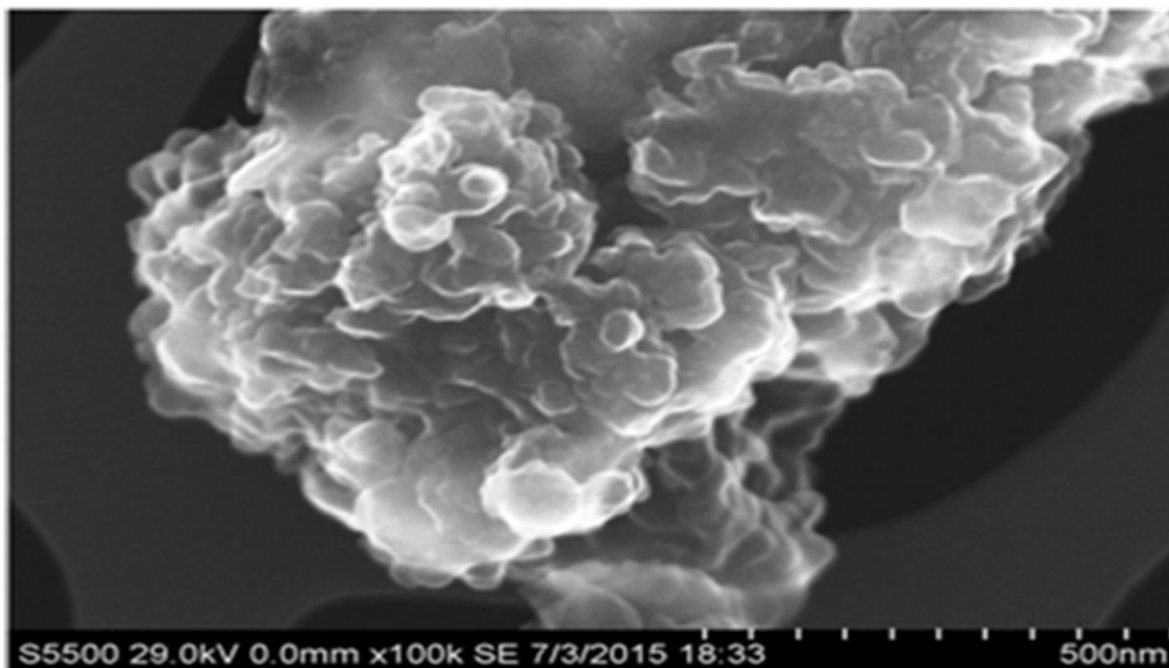


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 0 % от $N_{e_{ном}}$, увеличение 100 000 раз

Fig. 1. Electronic microscope snapshot soot particles of marine diesel 6 ChN 24/36 by power 0 % from $N_{e_{ном}}$, increase 100 000 once

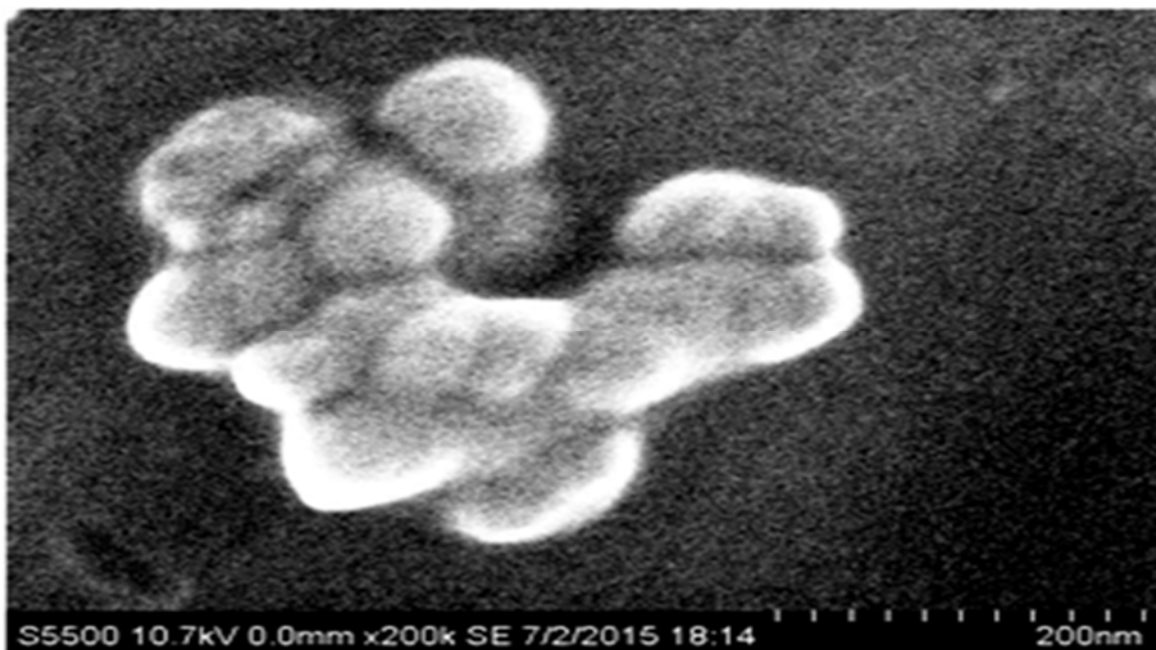


Рис. 2. Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 50 % от $N_{e_{ном}}$, увеличение 200 000 раз

Fig. 2. Electronic microscope snapshot soot particles of marine diesel 6 ChN 24/36 by power 50 % from $N_{e_{ном}}$, increase 200 000 once

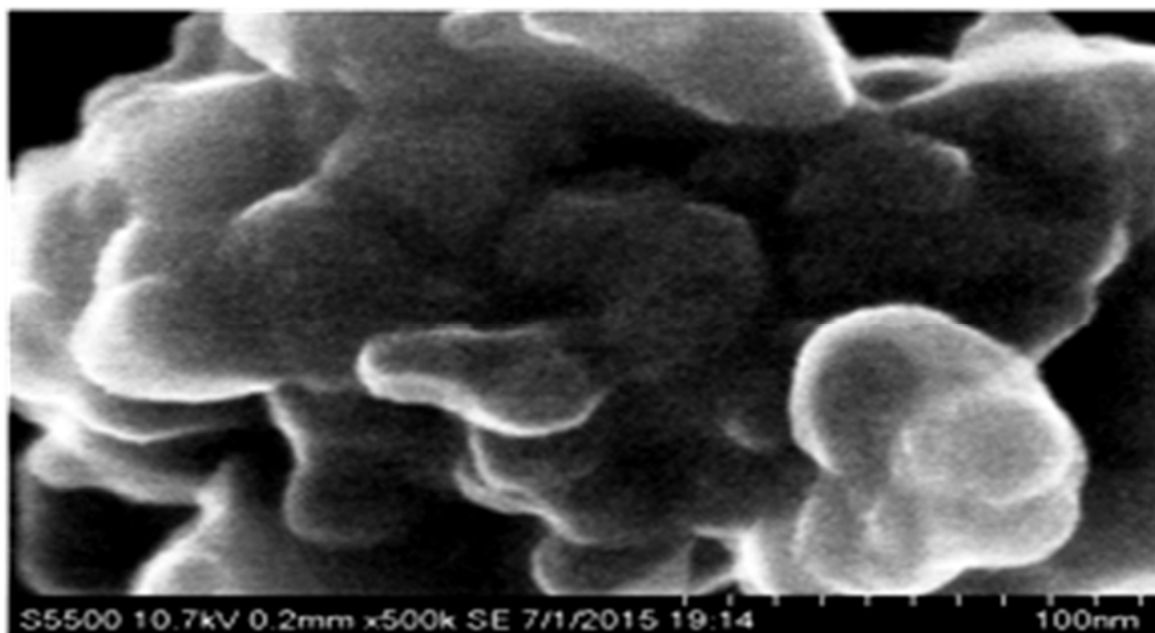


Рис. 3. Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6 ЧН 24/36 при нагрузке 100 % от $N_{e_{ном}}$, увеличение 500 000 раз
Fig. 3. Electronic microscope snapshot soot particles of marine diesel 6 ChN 24/36 by power 100 % from $N_{e_{ном}}$, increase 500 000 once

Анализ представленных на рис. 1–3 экспериментальных данных показывает, что по форме большинство частиц сажи близки к сфере, средний диаметр частиц сажи, образующихся в КС судового дизеля 6 ЧН 24/36, составляет 35 нм (0,035 мкм) и практически не зависит от нагрузки дизеля. Это положение подтверждается и другими исследователями [5–9]. При этом параметр дифракции для частиц сажи

$$\rho = \pi d / \lambda ,$$

где d – средний диаметр частиц сажи, мкм; λ – длина волны излучения, мкм; ρ в области ближнего инфракрасного спектра ($\lambda=0,5–6,0$ мкм) лежит в пределах $\rho = 0,2–0,018$. Среднее его значение для указанного спектрального диапазона составляет $\rho_{ср} = 0,07$, т.е. условие $\rho \leq 0,1$ выполняется. Это позволяет считать экспериментально доказанным факт отнесения частиц дизельной сажи к малым с оптической точки зрения [10]. Последнее является принципиально важным фактом, так как известно, что аналитические выражения для спектрального коэффициента ослабления излучения для малых и больших частиц не совпадают [11, 12].

Сканирующий электронный микроскоп S-5500 позволяет проводить спектральный анализ исследуемых проб частиц сажи. На рис. 6 и 7 в качестве примера представлены результаты такого анализа для проб частиц сажи, полученные при работе судового дизеля 6 ЧН 24/36 на нагрузке 100% от $N_{e_{ном}}$.

Анализ представленных на рис. 4 и 5 данных показывает, что в пробах однозначно присутствует именно углерод С (сажа). При изменении нагрузки в диапазоне от 0 % до 100 % от номинальной мощности $N_{e_{ном}}$ содержание (весовое) углерода С (сажи) в пробах увеличивается от 69,48 % до 97,55 %. Содержание кислорода О в пробах, как и следовало ожидать, с

ростом нагрузки уменьшается с 28,11 % при 0 % от $N_{e_{ном}}$ до 2,45 % при 100 % от $N_{e_{ном}}$, что связано с интенсификацией процесса сгорания топлива в цилиндре судового дизеля. Содержание других химических элементов в пробах, в частности, железа Fe (как продукта износа деталей цилиндропоршневой группы), кремния Si и серы S незначительно и лежит в пределах от 1,03 % до 7 %. Распределение частиц сажи по размерам, как было показано ранее [13], существенно отличается от нормального.

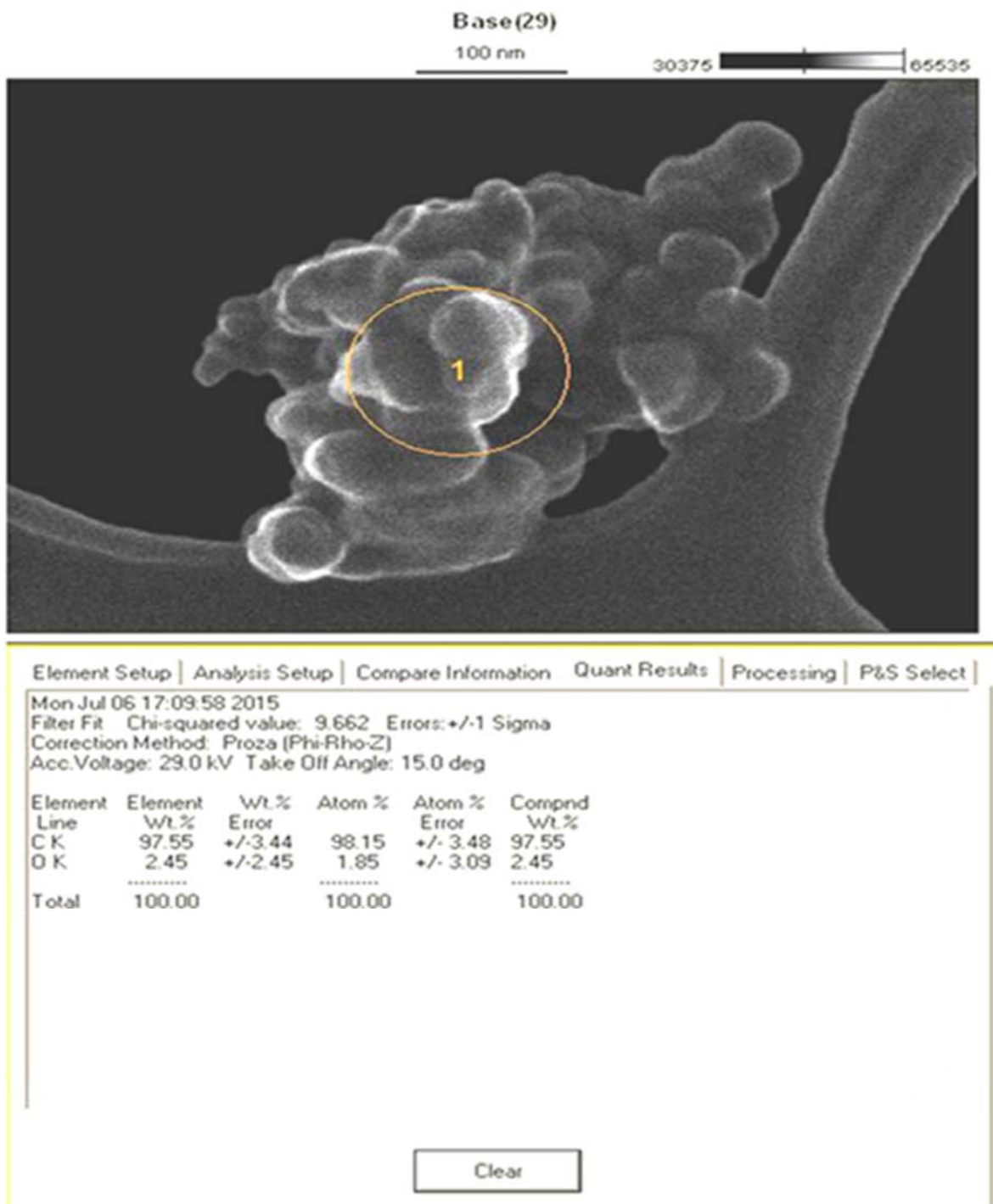


Рис. 4. Спектральный анализ частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 100 % от $N_{e_{ном}}$
 Fig. 4. Spectral analysis soot particles of marine diesel 6 ChN 24/36 by power 100 % from $N_{e_{ном}}$

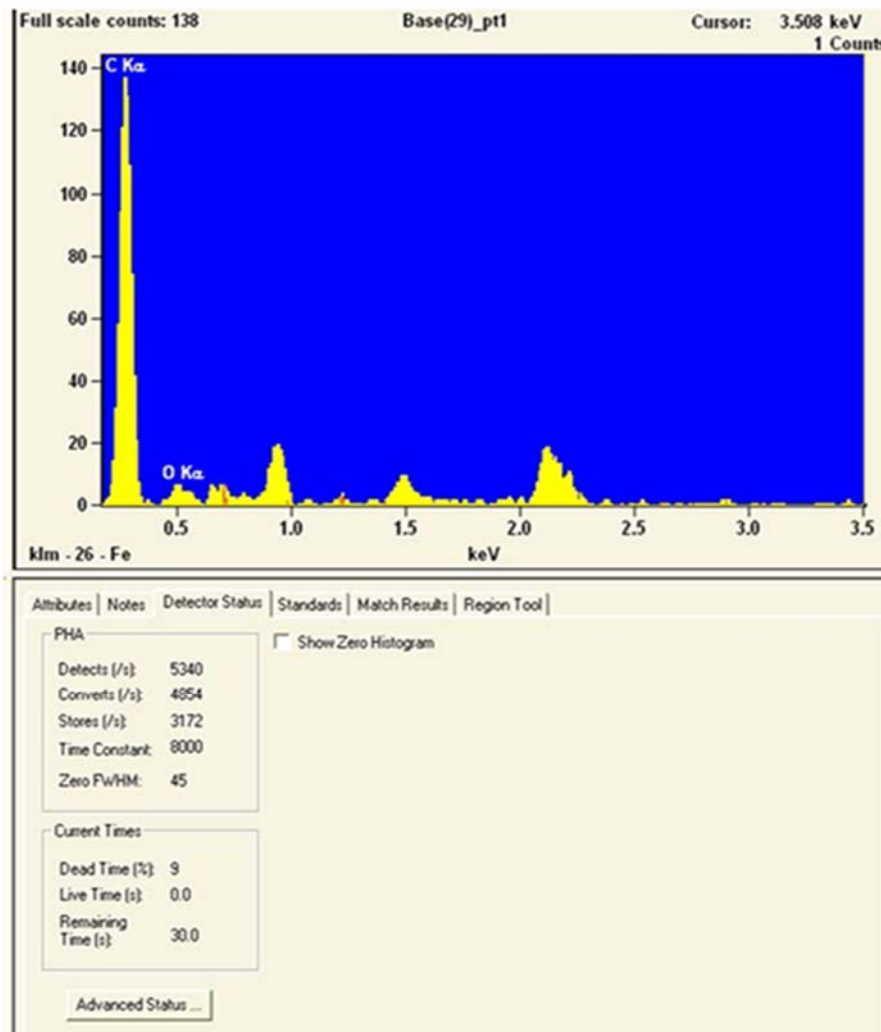


Рис. 5. Гистограмма распределения химических элементов в пробах, отобранных из камеры сгорания судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 100 % от $N_{e_{ном}}$
Fig. 5. Gistogram of dispensation chemical elements in teats cull out of marine diesel 6 ChN 24/36 combustion chamber by power 100 % from $N_{e_{ном}}$

Локальные результирующие потоки излучения в камере сгорания судового дизеля

Точность расчетной оценки теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы практически полностью зависит от правильного задания граничных условий по теплообмену [14, 15]. При этом в составе граничных условий необходимо достаточно корректно учитывать и составляющую, обусловленную теплообменом излучением в КС судового дизеля. Последнее обусловлено тем, что в период активного тепловыделения в цилиндре судового дизеля доля теплообмена излучением в суммарном тепловом потоке, передаваемом от рабочего тела к поверхностям деталей КС, составляет 45–55 % и более. Учитывая сложную геометрию КС современных судовых дизелей, а зачастую и наличие двух источников излучения (имеются в виду судовые малооборотные дизели с двумя форсунками в КС) значимость расчетной оценки локальных результирующих потоков излучения существенно возрастает. Отмеченное подтверждается и другими исследованиями в области радиационного теплообмена [16].

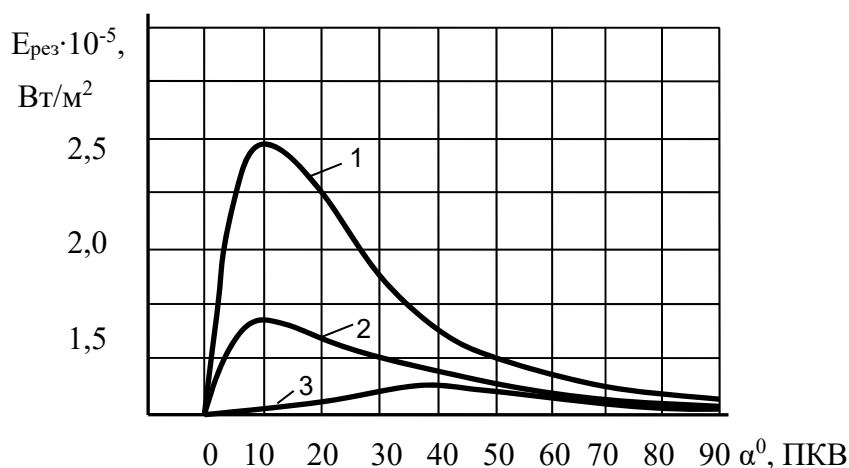


Рис. 6. Результирующие потоки излучения для поверхностей деталей, образующих камеру сгорания судового дизеля 6 ЧН 24/36 при нагрузке 100 % от $N_{e_{ном}}$: 1 – поршень; 2 – крышка; 3 – втулки
 Fig. 6. Resulting radiation fluxes for surfaces of details formative combustion chamber of marine diesel 6 ChN 24/36 by power 100 % from $N_{e_{ном}}$: 1 – piston; 2 – head of cylinder; 3 – plug of cylinder

Заключение

Представленные в статье результаты исследований оптических параметров частиц сажи, отобранных из КС судового дизеля 6 ЧН 24/36, экспериментально подтвердили факт возможности их отнесения к малым с оптической точки зрения. Это дало возможность в ММ локального радиационного теплообмена в КС судового дизеля пренебречь рассеиванием и считать, что ослабление излучения происходит лишь за счет поглощения. Приведенные значения средних за рабочий цикл локальных результирующих потоков излучения для поверхностей деталей, образующих КС, позволяет еще на стадии проектирования определить в них величину переменных температурных напряжений. Последнее очень важно для общей оценки теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы судового дизеля и надежности их работы в процессе эксплуатации

Список источников

1. Израильский Ю.Г., Повалихина О.В., Руднев Б.И. Математическая модель локального радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии. 2016, № 3(33). Т. 1. С. 146–151.
2. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Локальные оптико-геометрические характеристики и результирующие потоки излучения в камере сгорания судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии. 2018, № 4(42). Т. 5. С. 90–94.
3. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Расчетно-экспериментальное определение параметров излучения пламени в камере сгорания судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии. 2020, № 4(50). Т. 1. С. 98–102.
4. ГОСТ Р ИСО 3046-1-99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Ч. 1. Стандартные исходные условия, объявленные мощность, расходы топлива и смазочного масла. Методы испытаний. Введ. 2001-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1999. 23 с.
5. Вихерт М.М., Кратко А.П., Рафалькес И.С. и др. Влияние типа рабочего процесса и режима работы быстроходного дизеля на свойства сажи и отработавшие газы // Автомобильная промышленность, 1975, №10. С. 8–14.
6. Милликен Р.К. Размеры, оптические свойства и температура частиц сажи // Измерение температур в объемах новой техники. М.: Мир, 1965. С. 152–172.

7. Бакиров Ф.Г., Захаров В.М., Полещук И.З. и др. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив. М.: Машиностроение, 1989. 128 с.
8. Carpenter K., Johnson J.H. Analysis of the physical characteristics of diesel particulate matter using transmission electron microscope techniques // SAE Preprints. 1979, № 790815. 17 p.
9. Mohammad Sarny I., Borman G.L. Measurement of soot and flame temperature along three directions in the cylinder of a D.I. diesel // SAE Techn. Pap, Ser. 1991, № 910728. P. 1–15.
10. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
11. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
12. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York. Academic Press, 2003. 822 p.
13. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Оценки спектральной оптической толщины пламени в камере сгорания судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии. 2020, № 1(47), Т. 2. С. 91–94.
14. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах тепловых двигателей. Л.: Машиностроение, 1983. 212 с.
15. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. Численный анализ элементов конструкции машин и приборов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 480 с.
16. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 396 с.
17. Dent J.C., Siluaman S.I. Convective and radiative heat transfer in a high swirl direct injection Diesel engine // SAE Preprints. 1977, № 770407. 26 p.

References

1. Israelsky Yu.G., Povalikhina O.V., Rudnev B.I. Mathematical model of local radiative heat transfer in the combustion chamber of a marine diesel engine // Marine Intelligent Technologies, 2016, No. 3 (33), Vol. 1. P. 146–151.
2. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Local optical-geometric characteristics and resulting radiation fluxes in the combustion chamber of a marine diesel engine // Marine Intelligent Technologies, 2018, No. 4(42), vol. 5. P. 90–94.
3. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Computational and experimental determination of flame emission parameters in the combustion chamber of a marine diesel engine // Marine Intelligent Technologies, 2020, No. 4(50), vol. 1. P. 98–102.
4. GOST R ISO 3046-1-99. Internal combustion engines are reciprocating. Specifications. Part1. Standard baseline conditions, declared power, fuel and lubricating oil consumption. Test methods. - Introduction. 2001-01-01. Moscow: Publishing House of Standards, 1999. 23 p.
5. Vihert M.M., Briefly A.P., Rafalkes I.S. and others. The influence of the workflow type and mode of operation of high-speed diesel on the properties of soot and exhaust // the Automotive industry, 1975, № 10. P. 8–14.
6. Milliken, R. K. Dimensions, optical properties and temperature of soot particles // Measure temperature in the volume of new equipment. М.: Mir, 1965. P. 152–172.
7. Bakirov F. G., Zakharov V. M., Polishchuk I. Z. etc. Formation and burnout of soot during the combustion of hydrocarbon fuels. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 128 p.
8. Carpenter K., Johnson J. H. Analysis of the physical characteristics of diesel solid particles using transmission electron microscope methods// SAE Preprints. 1979, No. 790815. 17 p.
9. Mohammad Sarny I., Borman G.L. Measuring the temperature of soot and flame in three directions in a diesel cylinder D.I. // SAE Tech. Pap, Ser. 1991, No. 910728. P. 1–15.
10. Bloch A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. Heat exchange by radiation. Reference book. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 432 p.

11. Siegel R., Howell J. Heat exchange by radiation. Moscow: Mir, 1975. 934 p.
12. Modest M.F. Radiation heat transfer. New York. Academic Press, 2003. 822 p.
13. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Estimates of the spectral optical thickness of the flame in the combustion chamber of a marine diesel engine // Marine Intelligent Technologies. 2020, No. 1(47), Vol. 2. P. 91–94.
14. Shabrov N.N. Finite element method in calculations of heat engines. L.: Mechanical Engineering, 1983. 212 p.
15. Gavryushin S.S., Baryshnikova O.O., Boriskin O.F. Numerical analysis of structural elements of machines and devices. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2014. 480 p.
16. Eliseev V.N., Tovstonog V.A. Heat exchange and thermal tests of materials and structures of aerospace equipment under radiation heating. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2014. 396 p.
17. Dent J.S., Siluaman S.I. Convective and radiative heat transfer in a diesel engine with direct injection with high rotational speed// SAE Preprints, 1977, No. 770407. 26 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 10.12.2021, принята к публикации 15.12.2021.

The article was submitted 02.12.2021 approved after reviewing 10.12.2021, accepted for publication 15.12.2021.