

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Научная статья

УДК 621.431.74.016

**Эффективные потоки излучения и их влияние на параметры
радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля**

Борис Иванович Руднев¹, Ольга Владимировна Повалихина²

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

^{1, 2}rovalichina@mail.ru

Аннотация. При создании новых и совершенствовании уже существующих математических моделей локального радиационного теплообмена в камере сгорания судовых дизелей в настоящее время широко используется зональный метод, хорошо развитый в теплофизике. Вместе с тем использование зонального метода применительно камере сгорания судового дизеля имеет ряд существенных особенностей по сравнению с другими энергетическими установками (газотурбинные установки, паровые котлы и др.). К ним относятся циклический процесс сгорания топлива, переменная геометрия камеры сгорания и, как следствие, изменяющиеся по времени угловые и другие коэффициенты излучения, температура пламени и концентрация частиц сажи. Это значительно усложняет разработку новых математических моделей локального радиационного теплообмена и заставляет исследователей детально анализировать наиболее существенные стороны этого вида переноса теплоты в камере сгорания судовых дизелей. Целью настоящей статьи является представление и обсуждение результатов анализа взаимодействия различных потоков излучения, количественной оценки эффективных потоков и их влияние на параметры радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля типа 6 ЧН 24/36. Представленные в статье аналитические выражения, отражающие взаимодействие различных потоков излучения, и оценка эффективных потоков, выполненная с привлечением современных опытных данных, позволяют вполне обоснованно упростить математическую модель локального радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля. Это дает возможность повысить уровень их проектирования и значительно сократить сроки экспериментальной доводки новых образцов.

Ключевые слова: судовый дизель, локальный радиационный теплообмен, камера сгорания, эффективные потоки излучения

Для цитирования: Руднев Б.И., Повалихина О.В. Эффективные потоки излучения и их влияние на параметры радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля // Научные труды Дальрыбвтуза. 2022. Т. 62, № 4. С. 102–111.

MARINE POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Original article

**Effective radiative fluxes and their influence on parameters radiative 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. For creation of modern and improvement the existing mathematical models of local radiative heat transfer in marine diesel combustion chamber, now zonal method mainly developed in thermo-physics is used. Thus, use zonal method with adaptation to marine diesel combustion chamber has a rank of essential features with comparison other power devices (gas turbines, steam boilers and etc.). Cycle process of combustion fuel, variable geometry of combustion chamber is concerned to them and as consequence to time variation angular coefficients and another radiation coefficients the temperature of flame and concentration soot particles. It heavily complicates the development of modern mathematical models of local radiative heat transfer and makes researchers to analysis detail existing sides the aspect of heat transfer in marine diesel combustion chamber. The purpose of this article is presentation and discussion of results analysis for cooperation different radiation fluxes and quantity evaluation of effective fluxes and their influence on parameters radiative heat transfer in marine diesel combustion chamber 6 ChN 24/36. Analytical formulas that reflects cooperation different radiative fluxes and evaluation effective fluxes made with modern experimental data represents to simplify the mathematical model of local radiative heat transfer in marine diesel combustion chamber are given. It gives possibility to elevate level of their design and reduce mainly the terms of experimental operational development of modern test specimens.

Keywords: marine diesel, local radiative heat transfer, combustion chamber, effective radiative fluxes

For citation: Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Effective radiative fluxes and their influence on parameters radiative heat transfer in marine diesel combustion chamber. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2022; 62(4):102–111. (in Russ).

Введение

В процессе создания современных математических моделей (ММ) локального радиационного теплообмена в камере сгорания (КС) судовых дизелей широко используется зональный метод [1–3], хорошо развитый в теплофизике. Однако использование зонального метода применительно к КС судового дизеля имеет ряд существенных особенностей по сравнению с другими энергетическими установками, например, газотурбинными, паровыми котлами и др. К ним относятся циклический процесс сгорания топлива, переменная геометрия камеры сгорания и, как следствие, изменяющиеся по углу поворота коленчатого вала (ПКВ) коэффициенты излучения, температура пламени и концентрация частиц сажи. Отмеченное значительно усложняет разработку новых ММ локального радиационного теплообмена и заставляет исследователей детально анализировать наиболее существенные стороны этого вида переноса теплоты в КС судовых дизелей. Целью настоящей статьи является представление и обсуждение результатов анализа взаимодействия различных потоков излучения, количествен-

ной оценки эффективных потоков и их влияние на параметры радиационного теплообмена в КС судового дизеля типа 6 ЧН 24/36.

Схема взаимодействия и аналитические связи различных потоков излучения в КС судового дизеля

В теории радиационного теплообмена [1–3] различают следующие потоки излучения:

$$\text{собственный} \quad E_{\text{соб}} = \varepsilon \sigma_0 T^4, \quad (1)$$

где ε , T – степень черноты и температура тела; σ_0 – постоянная Больцмана;

$$\text{поглощенный} \quad E_{\text{погл}} = A E_{\text{пад}}, \quad (2)$$

где A – поглощательная способность; $E_{\text{пад}}$ – падающий поток излучения;

$$\text{отраженный} \quad E_{\text{отр}} = R E_{\text{пад}}, \quad (3)$$

где R – коэффициент отражения.

Учитывая, что для непрозрачных тел коэффициент пропускания $D=0$, получим следующую связь между отраженной и поглощательной способностями:

$$R = 1 - A. \quad (4)$$

В связи с отмеченным отраженный поток излучения можно представить в виде

$$E_{\text{отр}} = (1 - A) E_{\text{пад}}, \quad (5)$$

$$\text{эффективный или исходящий} \quad E_{\text{эф}} = E_{\text{соб}} + E_{\text{отр}}, \quad (6)$$

$$\text{результатирующий} \quad E_{\text{рез}} = E_{\text{пад}} - E_{\text{эф}}. \quad (7)$$

Следует заметить, что для условий КС судового дизеля падающий поток излучения $E_{\text{пад}}$ равен сумме потока излучения пламени и эффективного потока излучения соответствующих поверхностей (поверхности крышки цилиндров F_1 , втулки F_2 и поршня F_3). Схема взаимодействия различных потоков излучения в КС судового дизеля типа 6 ЧН 24/36 представлена на рис. 1.

Рассмотрим более подробно взаимодействие потоков излучения для точки M_2 , принадлежащей поверхности втулки цилиндров F_2 . В каждую точку поверхностей F_1 , F_2 и F_3 , образующих КС судового дизеля, от объемной зоны (пламени) $M_i(V)$ приходит собственный поток излучения $E_{\text{соб}i}(M_i)$, а также эффективный поток от F_1 (крышки цилиндров) $E_{\text{эф}1}(M_1)$ и от F_3 (поршня) $E_{\text{эф}3}(M_3)$, кроме того, в точку M_2 (на втулке цилиндра) приходит эффективный поток от точки M_2 $E_{\text{эф}2}(M_2)$, учитывающий факт самооблучения втулки цилиндра.

Таким образом, величину падающего потока излучения для точки M_2 можно представить в виде

$$E_{\text{пад}}(M_2) = E_{\text{соб}i}(M_i) + E_{\text{эф}1}(M_1) + E_{\text{эф}2}(M_2) - E_{\text{эф}2}(M_2) + E_{\text{эф}3}(M_3). \quad (8)$$

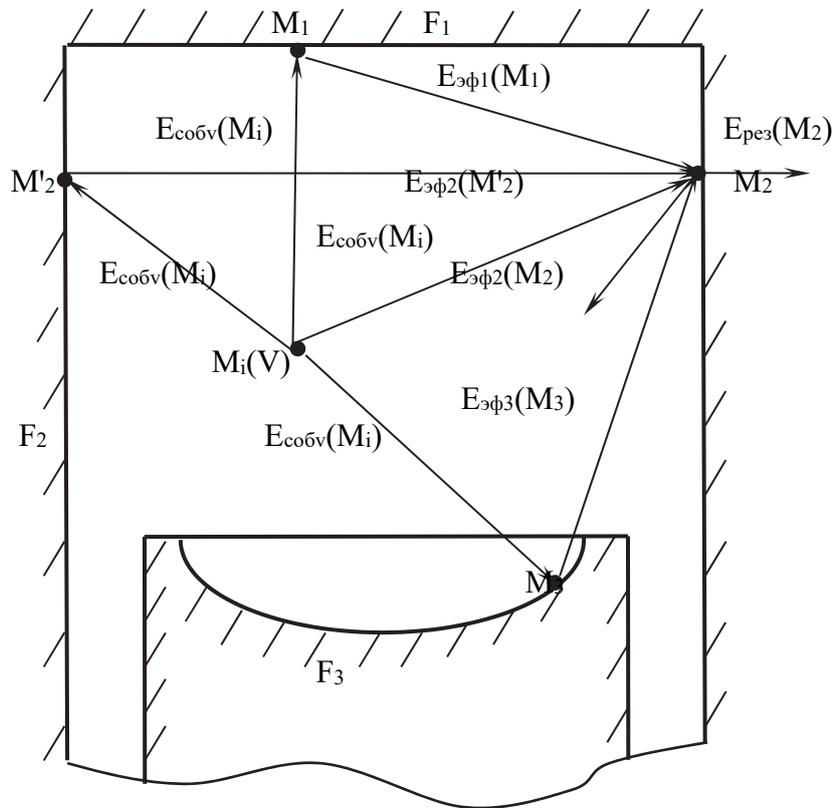


Рис. 1. Расположение термоприемников и термопар в крышке цилиндров дизеля
Fig.1. Scheme cooperation of radiative fluxes in marine diesel combustion chamber

В свою очередь эффективные потоки излучения, входящие в выражение (8) согласно (6) могут быть записаны следующим образом:

$$E_{эф1}(M_1) = E_{соб1}(M_1) + E_{отр1}(M_1). \quad (9)$$

$$E_{эф2}(M'_2) = E_{соб2}(M'_2) + E_{отр2}(M'_2). \quad (10)$$

$$E_{эф3}(M_3) = E_{соб3}(M_3) + E_{отр3}(M_3). \quad (11)$$

Отраженные потоки излучения в выражениях (9–11) с учетом (5) можно представить в виде

$$E_{отр1}(M_1) = (1 - A)E_{пад}. \quad (12)$$

Для поверхностей F_1 , F_2 и F_3 коэффициент поглощения A равен степени черноты соответствующей поверхности ε_1 , ε_2 и ε_3 , и выражение (12) переходит в (13):

$$E_{отр1}(M_1) = (1 - \varepsilon_1) E_{пад}. \quad (13)$$

Падающим потоком излучения для поверхностей F_1 , F_2 и F_3 являются собственный поток излучения пламени $E_{собv}(M_i)$. С учетом этого отраженный поток излучения для поверхности F_1 (крышки цилиндра) примет вид

$$E_{\text{отр}1}(M_1) = (1 - \varepsilon_1)E_{\text{соб}v}(M_i). \quad (14)$$

Аналогично для поверхностей F_2 и F_3

$$E_{\text{отр}2}(M'_2) = (1 - \varepsilon_2)E_{\text{соб}v}(M_i). \quad (15)$$

$$E_{\text{отр}3}(M_3) = (1 - \varepsilon_3)E_{\text{соб}v}(M_i). \quad (16)$$

Подставляя в (8) выражения (9–11) и (14–16), окончательно для точки M_2 получим зависимость для падающего потока излучения

$$E_{\text{пад}}(M_2) = E_{\text{соб}v}(M_i) + E_{\text{соб}1}(M_1) + (1 - \varepsilon_1)E_{\text{соб}v}(M_i) + E_{\text{соб}2}(M'_2) + (1 - \varepsilon_2)E_{\text{соб}v}(M_i) + E_{\text{соб}3}(M_3) + (1 - \varepsilon_3)E_{\text{соб}v}(M_i) - E_{\text{соб}2}(M_2) - (1 - \varepsilon_3)E_{\text{соб}v}(M_i). \quad (17)$$

Преобразуя (17) и учитывая, что эффективные потоки излучения для точек M_2 и M'_2 имеют противоположные знаки, имеем

$$E_{\text{пад}}(M_2) = E_{\text{соб}v}(M_i) + E_{\text{соб}1}(M_1) + (1 - \varepsilon_1)E_{\text{соб}v}(M_i) + E_{\text{соб}3}(M_3) + (1 - \varepsilon_3)E_{\text{соб}v}(M_i). \quad (18)$$

Таким образом, на основании (18) можно заключить, что величина падающего потока излучения для точки M_2 формируется при взаимодействии собственного потока излучения пламени $E_{\text{соб}v}(M_i)$ и собственных потоков излучения от поверхностей крышки цилиндра $E_{\text{эф}1}(M_1)$ и поршня $E_{\text{эф}3}(M_3)$. Члены вида $(1 - \varepsilon_1)E_{\text{соб}v}(M_i)$ и $(1 - \varepsilon_3)E_{\text{соб}v}(M_i)$, входящие в (18), выражают величины отраженных от поверхностей крышки цилиндра и поршня потоков излучения. В количественном отношении, как будет показано ниже, они составляют весьма малую долю от величины собственного потока излучения пламени $E_{\text{соб}v}(M_i)$.

Количественная оценка эффективных потоков излучения и их влияние на параметры радиационного теплообмена в КС судового дизеля

В соответствии с выражением (6) эффективный поток излучения для каждой из поверхностей, образующих КС судового дизеля, представляет собой сумму их собственного и отраженного потоков излучения, например, для крышки цилиндра (см. рис. 1) $E_{\text{соб}1}(M_1)$ и $(1 - \varepsilon_1)E_{\text{соб}v}(M_i)$ аналогично для поршня $E_{\text{соб}3}(M_3)$ и $(1 - \varepsilon_3)E_{\text{соб}v}(M_i)$. Оценим величины отраженных от поверхностей крышки цилиндра и поршня потоков излучения. На основании экспериментальных данных [4] величины степени черноты для поверхностей деталей КС имеют следующие значения: для днища поршня из алюминиевого сплава, покрытого нагаром толщиной 0,1–0,2 мм, $\varepsilon=0,91–0,95$, а при толщине нагара 0,2–0,6 мм $\varepsilon=0,94–0,97$; для крышки цилиндра из чугуна, покрытой нагаром $\varepsilon=0,90–0,95$; для втулки цилиндра с тонким слоем масла $\varepsilon=0,3–0,4$. Почти аналогичные данные по степени черноты поверхностей деталей КС приводятся и для судовых дизелей, в частности, для крышки цилиндра $\varepsilon=0,94–0,96$; стальной головки поршня $\varepsilon=0,93–0,97$ [5]. Учитывая приведенные выше значения степени черноты деталей КС, следует отметить, что члены вида $(1 - \varepsilon_1)E_{\text{соб}v}(M_i)$ и $(1 - \varepsilon_3)E_{\text{соб}v}(M_i)$, входящие в выражение (18), важны в определенной мере лишь для поверхности втулки цилиндра. Для поверхностей крышки цилиндра и поршня их значения укладываются в погрешность определения температуры пламени в КС дизеля, которая составляет 12–15 % [6, 7]. Однако даже и для втулки цилиндра величина отраженного потока излучения не может быть значительной, так как в период активного процесса радиационного теплообмена в КС (от ВМТ до 80–90° ПКВ после

ВМТ) большая часть втулки цилиндра перекрыта поршнем. Особенно это относится к высоко- и среднеоборотным судовым дизелям с глубокими КС типа Гессельман, Дейц и др.

Определим теперь величины собственных потоков излучения крышки цилиндра $E_{\text{соб1}}(M_1)$ и поршня $E_{\text{соб3}}(M_3)$. На рис. 2–6 представлены температурные поля деталей, образующих КС, современных форсированных судовых дизелей [8, 9].

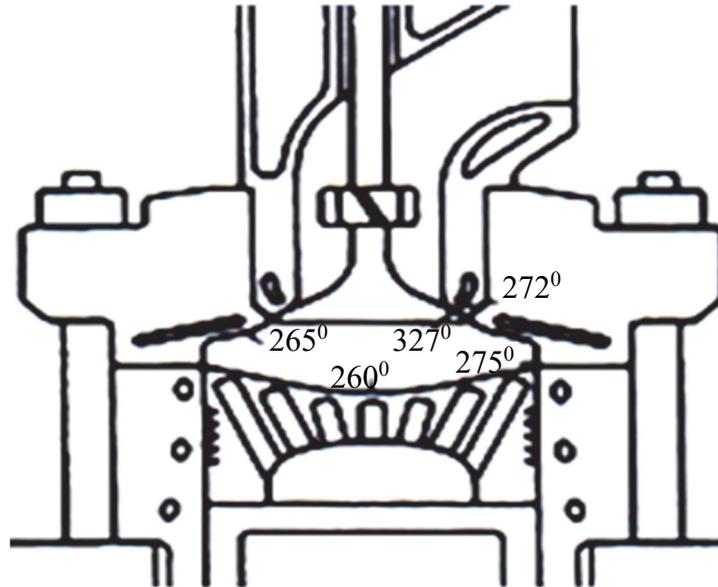


Рис. 2. Поле температур, °С, цилиндропоршневой группы дизеля RTA фирмы Sulzer
Fig. 2. Field of temperatures, °С, details of diesel combustion chamber RTA Sulzer

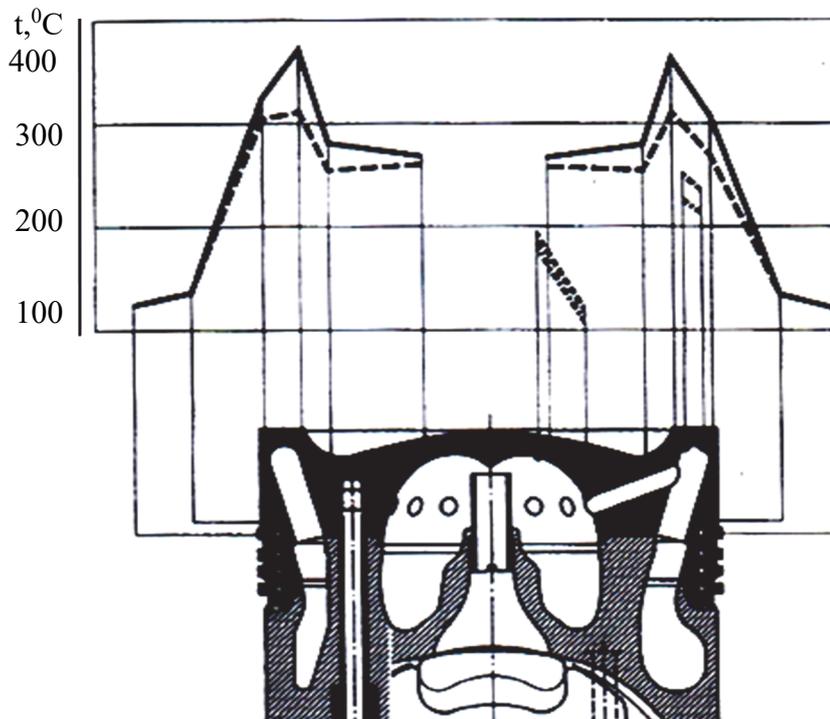


Рис. 3. Поле температур поршня дизеля L40/54
Fig. 3. Field of temperatures of diesel piston L40/54

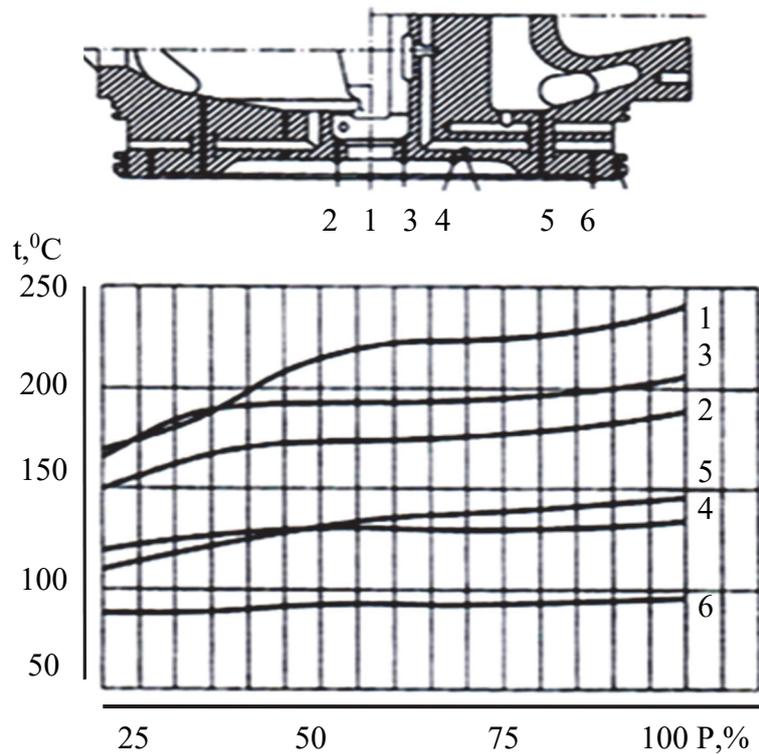


Рис. 4. Поле температур крышки цилиндра дизеля L40/54: $P_{me}=2,29 \text{ МПа}$, $n=514 \text{ мин}^{-1}$
 Fig. 4. Field of temperatures of cylinder cap of details L40/54: $P_{me}=2,29 \text{ МПа}$, $n=514 \text{ мин}^{-1}$

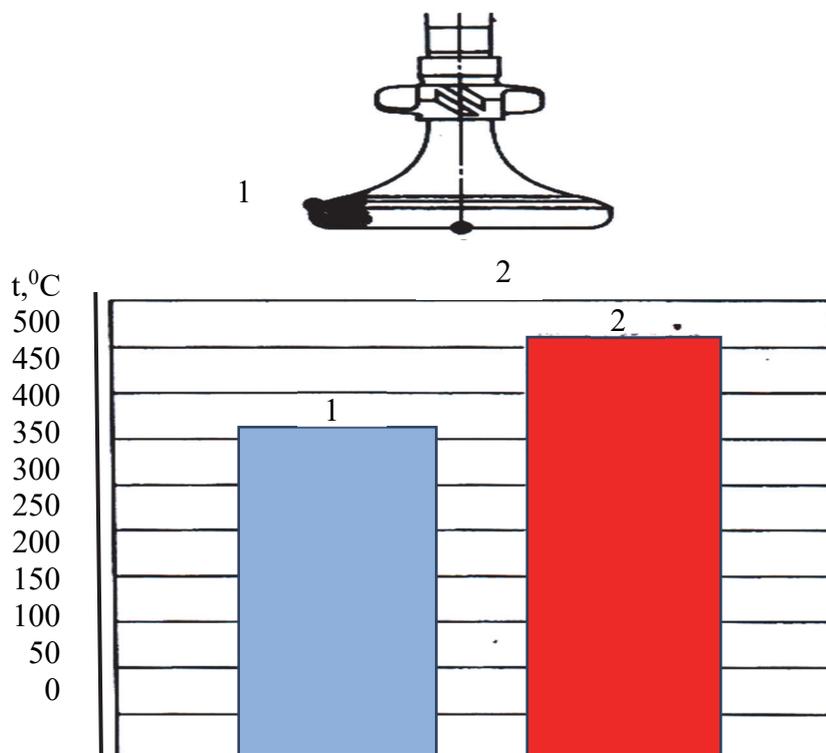


Рис. 5. Поле температур выпускного клапана дизеля L40/54
 Fig. 5. Field of temperatures of valve exhaust of diesel L40/54

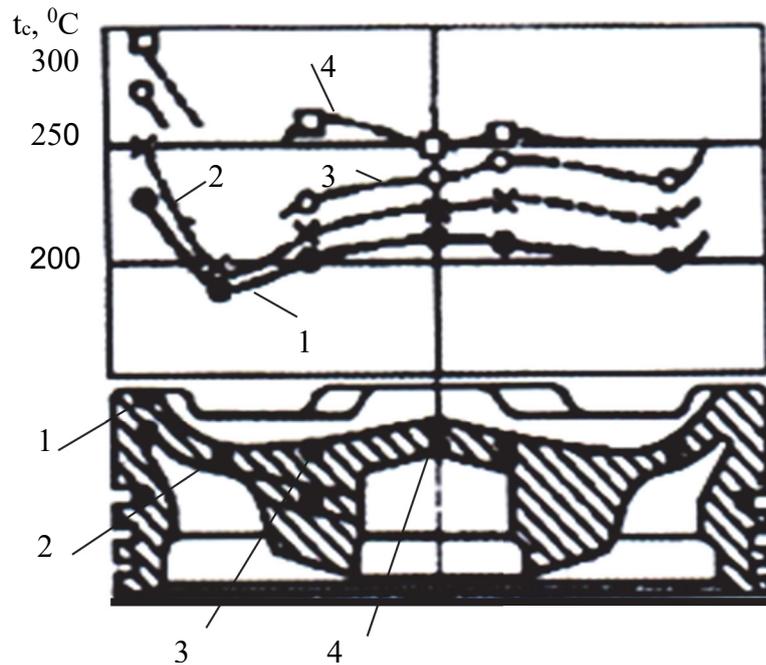


Рис. 6. Температуры поршня высокооборотного дизеля фирмы Richardo с повышенной форсировкой параметров рабочего процесса
Fig. 6. Temperatures of piston of high speed diesel Richardo with elevated of force parameters work of process

Анализ представленных на них данных показывает, что температуры крышки цилиндра современных форсированных дизелей на номинальном режиме работы лежат в пределах 240–270 °С, поршня – 235–380 °С и выпускного клапана – 360–460 °С. Интересно отметить, что даже для высокофорсированного дизеля фирмы Richardo со средним эффективным давлением, равным 3,9 МПа (39 бар), при соответствующем конструктивном исполнении максимальная температура поршня не превысила 360 °С. Определенные с учетом указанных выше температур собственные потоки излучения поверхности крышки цилиндра и поршня на два порядка меньше собственного потока излучения пламени (при температуре пламени в пределах 2100–2300 °С [10, 11]). Это позволяет при расчетах результирующих потоков излучения, воспринимаемых деталями КС, пренебречь эффективными потоками и считать, что выполняется равенство $E_{рез}(M_2) \approx E_{пад}(M_2)$. Поскольку $E_{пад}(M_2)$ согласно (18) равен $E_{собв}(M_i)$, окончательно получим

$$E_{рез}(M_2) \approx E_{собв}(M_i) \quad (19)$$

Выражение (19) дает возможность в математической модели локального радиационного теплообмена в КС судового дизеля сделать весьма существенное упрощение и перейти к решению только одного (вместо трех в ранее предложенных моделях [12]) интегрального уравнения, описывающего результирующие потоки излучения на поверхностях деталей КС.

Заключение

Представленные в статье аналитические выражения, отражающие взаимодействие различных потоков излучения, и выполненная на основе современных экспериментальных данных оценка эффективных потоков позволяют вполне обоснованно упростить ММ локального радиационного теплообмена в КС судового дизеля. Это дает возможность повысить уровень их проектирования и значительно сократить сроки экспериментальной доводки новых образцов

Список источников

1. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
3. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York: Academic Press, 2003. 822 p.
4. Волков А.Н. Экспериментальное определение степени черноты поверхностей, образующих полость цилиндра автомобильного двигателя // Технические науки. Алма-Ата. 1969. Вып. 8–9. С. 91–94.
5. Камкин С.В., Возницкий И.В., Большаков В.Ф. и др. Эксплуатация судовых дизельных энергетических установок. М.: Транспорт, 1996. 432 с.
6. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. Владивосток: Дальнаука, 2000. 221 с.
7. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Расчетно-экспериментальное определение параметров излучения пламени в камере сгорания судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т. 1, № 4. С. 98–102.
8. Конкс Г.А., Лашко В.А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта. М.: Машиностроение, 2005. 512 с.
9. Конкс Г.А., Лашко В.А. Современные подходы к конструированию поршневых двигателей. М.: Моркнига, 2009. 388 с.
10. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Оптические параметры частиц сажи и энергетические характеристики радиационного теплообмена в камере сгорания дизельного двигателя // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5, № 10. С. 476–480.
11. Mohammad Sarny I., Borman G.L. Measurement of soot and flume temperature along three directions in the cylinder of a D.I. diesel // SAE Techn. Pap. Ser. 1991. № 910728. P. 1–15.
12. Петриченко Р.М., Батулин С.А., Исаков Ю.Н. и др. Элементы автоматизированного проектирования ДВС. Алгоритмы прикладных программ. Л.: Машиностроение, 1990. 328 с.

References

1. Bloch A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. Heat exchange by radiation. Reference book. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 432 p.
2. Siegel R., Howell J. Heat exchange by radiation. Moscow: Mir, 1975. 934 p.
3. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York: Academic Press, 2003. 822 p.
4. Volkov A.N. Experimental determination of the degree of blackness of the surfaces forming the cylinder cavity of an automobile engine // Technical sciences. Alma-Ata. 1969. Issues 8-9. P. 91–94.
5. Kamkin S.V., Voznitsky I.V., Bolshakov V.F., etc. Operation of marine diesel power plants. M.: Transport, 1996. 432 p.
6. Rudnev B.I. Processes of local heat exchange in the combustion chamber of diesel engines. Vladivostok: Dalnauka, 2000. 221 p.
7. 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. Vol. 1, No. 4. P. 98 – 102.
8. Konks G.A., Lashko V.A. World marine diesel engineering. Design concepts, analysis of international experience. Moscow: Mashinostroenie, 2005. 512 p.
9. Konks G.A., Lashko V.A. Modern approaches to the design of piston engines. Moscow: Morkniga, 2009. 388 p.
10. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Optical parameters of soot particles and energy characteristics of radiation heat exchange in the combustion chamber of a diesel engine // Thermal processes in Engineering, 2013, Vol. 5, No. 10. P. 476–480.

11. Mohammad Sarny I., Borman G.L. Measurement of soot and flume temperature along three directions in the cylinder of a D.I. diesel // SAE Techn. Pap. Ser. 1991. № 910728. P. 1–15.

12. Petrichenko R.M., Baturin S.A., Isakov Yu.N. et al. Elements of automated design of internal combustion engines. Algorithms of applied programs. L.: Mechanical Engineering, 1990. 328 p.

Информация об авторах

Б.И. Руднев – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, заслуженный работник рыбного хозяйства России, W-3274-2017, SPIN-код: 2797-1790, AuthorID: 423385;

О.В. Повалихина – доцент, доцент кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, SPIN-код: 9956-1129, AuthorID: 875839.

Information about the authors

B.I. Rudnev – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Refrigeration, Air Condition and Heat Engineering, Honored Worker of Fisheries of Russia, W-3274-2017, SPIN-code: 2797-1790, AuthorID: 423385;

O.V. Povalichina – Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Refrigeration, Air Condition and Heat Engineering, SPIN-code: 9956-1129, AuthorID: 875839.

Статья поступила в редакцию 08.12.2022, одобрена после рецензирования 09.12.2022, принята к публикации 12.12.2022.

The article was submitted 08.12.2022, approved after reviewing 09.12.2022, accepted for publication 12.12.2022.