

УДК 621.431.74.016

Б.И. Руднев, О.В. ПовалихинаДальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б**ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА
ИЗЛУЧЕНИЕМ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Проанализированы особенности расчета оптико-геометрических характеристик излучения применительно к полуразделенной камере сгорания (КС) дизельного двигателя типа 8ЧН 13/14, представлены расчетные значения угловых коэффициентов излучения, полученные с учетом переменной геометрии излучающей системы. Отмечается, что между характером излучения угловых коэффициентов в функции относительного радиуса цилиндра и распределением радиационных тепловых потоков по поверхностям КС имеется четкая корреляция.

Ключевые слова: дизельный двигатель, камера сгорания, оптико-геометрические характеристики излучения, локальный радиационный тепловой поток.

B.I. Rudnev, O.V. Povalikhina**OPTICAL-GEOMETRICAL DATA RADIATIVE HEAT TRANSFER IN DIESEL
ENGINE COMBUSTION CHAMBER**

Features of calculation optical-geometrical data radiative heat transfer applied to diesel engine combustion chamber are analyzed. Calculation data of angle coefficients radiation applied to diesel engine combustion chamber of type 8 CHN 13/14 are presented. Correlation between of variation angle coefficients and radiative heat transfer considered in the article.

Key words: diesel engine, combustion chamber, optical-geometrical data radiative heat transfer, local radiative heat flux.

Введение

Достоверное определение теплонапряженного состояния деталей, образующих КС дизельных двигателей, на стадии проектирования все еще вызывает у конструкторов значительные трудности. Это объясняется сложностью процесса локального радиационного теплообмена между рабочим телом и стенками КС и несовершенством существующих математических моделей (ММ), использующихся для его описания. Последнее заставляет исследователей искать новые подходы, направленные на совершенствование существующих ММ и включение в их состав элементов, позволяющих более детально описывать различные аспекты локального радиационного теплообмена в КС современных дизельных двигателей.

Геометрия излучающей системы дизельного двигателя с полуразделенной камерой сгорания и ее особенности

В настоящей работе рассматриваются элементы модифицированной ММ локального радиационного теплообмена в КС дизельного двигателя типа 8ЧН 13/14, в которой учитывается взаимодействие только собственного потока излучения объемной зоны V и соответствующих граничных (поверхностных) зон F_1 , F_2 и F_3 (рис. 1). ВМТ – верхняя мертвая точка; НМТ – нижняя мертвая точка. Основные положения этой ММ сводится к следующему. Процесс радиационного теплообмена в цилиндре дизельного двигателя с полуразделенной КС на установившемся режиме работы рассматривается нами на адекватной физической модели. Она представляет из себя замкнутую осесимметричную цилиндрическую излучающую систему.

Первая особенность этой системы в том, что она состоит из трех граничных (поверхностных) зон: 1 – крышка цилиндра – F_1 , 2 – боковая поверхность втулки цилиндра – F_2 , 3 – днище поршня – F_3 и нескольких объемных зон. Вторая особенность излучающей системы заключается в нестационарном положении зоны 3 вдоль координаты Z .

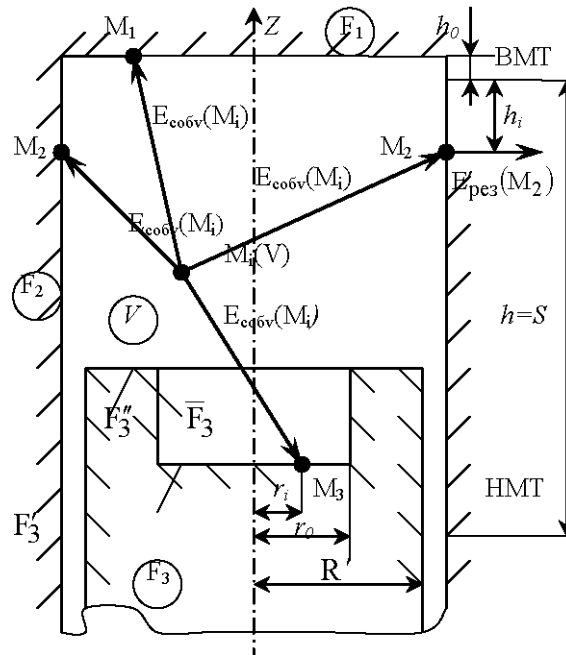


Рис. 1. Зональная модель излучающей системы в цилиндре дизеля с полуразделенной КС
Fig. 1. Zonal model radiative system in diesel engine combustion chamber

Это обуславливает нестационарность всех угловых коэффициентов излучения, характеризующих взаимодействие потоков излучения в КС и значительно усложняет решение задачи. Вместе с тем необходимо отметить, что поскольку время распространения электромагнитной волны излучения при ее скорости, равной $3 \cdot 10^8$ м/с, намного меньше времени перемещения зоны 3, обусловленной скоростью движения поршня (порядка 7-12 м/с), то условие квазистационарности $t_{np} \gg t_r$ гарантированно выполняется. Последнее позволяет решать задачу локального радиационного теплообмена в КС дизельного двигателя применительно к непрерывно-дискретному случаю как квазистационарную для фиксированного момента времени (угла ПКВ) [1]. При этом предполагается, что все оптические и энергетические характеристики излучающей системы в течение времени Δt неизменны и изменяются скачком при переходе к следующему интервалу времени. Объемные зоны V_i представляют собой группу коаксиальных цилиндров, отличающихся радиусом r_i , имеющих одинаковую высоту h и единую ось Z , совпадающую с осью цилиндра дизеля. Эта особенность излучающей системы является одним из принципиальных отличий предлагаемой ММ локального радиационного теплообмена в КС дизельного двигателя от ранее рассмотренной в [2]. Как известно [3], при фундаментальной постановке задачи локального радиационного теплообмена задаются оптические и энергетические характеристики всех зон, т.е. их степени черноты и температуры. Модификация фундаментальной постановки задачи, предложенная в настоящей работе, состоит в том, что эффективные потоки излучения от поверхностных зон F_1 , F_2 и F_3 не учитываются в силу ранее отмеченных в [4, 5] положений. Современные экспериментальные дан-

ные и расчетные методы [6, 7] позволяют задавать локальные значения оптических и энергетических характеристик объемных зон V_i .

Полное решение задачи должно включать распределение радиационных тепловых потоков по поверхностям днища поршня, крышки и втулки цилиндра, т.е.

$$\begin{aligned} E_{над1,2,3} &= f(R, h, t), \\ E_{эф1,2,3} &= f(R, h, t), \\ E_{рез1,2,3} &= f(R, h, t). \end{aligned} \tag{1}$$

где $E_{над}$ – падающий поток излучения, Вт/м²; $E_{эф}$ – эффективный поток излучения, Вт/м²; $E_{рез}$ – результирующий поток излучения, Вт/м²; t – текущее время рабочего процесса, с; R – радиус цилиндра двигателя, м; h – текущий ход поршня, м.

Однако в нашем случае эффективное излучение от поверхности крышки цилиндра, поршня и втулки не учитывается, и решение задачи сводится к нахождению результирующего потока $E_{рез1,2,3} = f(R, h, t)$, который будет приближенно равен падающему потоку $E_{над1,2,3} = f(R, h, t)$. Из алгебраической аппроксимации точного решения исходных интегральных уравнений излучения [4] для падающего потока имеем

$$E_{над}(M_k) = \sum_{\gamma=1}^n E_{соб}(M_\gamma) \Phi(M_\gamma, F_k) + \sum_{v=1}^m E_{соб}(M_v) \Phi(M_v, F_k), \tag{2}$$

где $E_{соб}$ – собственный поток излучения, Вт/м²; $\Phi(M_v, F_k)$ – разрешающий угловой коэффициент; v – объемная зона в КС; k – номер поверхностной зоны; m – номер объемной зоны.

В уравнении (2) первым слагаемым учитывается собственное излучение поверхностей F_1, F_2 и F_3 (см. рис. 1) и, как показано в [4], его вкладом в $E_{над}(M_k)$ можно пренебречь, т.е. положить

$$\sum_{\gamma=1}^n E_{соб}(M_\gamma) \Phi(M_\gamma, M_k) = 0. \tag{3}$$

Тогда падающий поток излучения можно определить по уравнению

$$E_{над}(M_k) = \sum_{v=1}^m E_{соб}(M_v) \Phi(M_v, F_k). \tag{4}$$

В рассматриваемой нами ММ радиационного теплообмена в КС дизельного двигателя принято, что излучающая система не отражает излучение границами и не рассеивает его в объеме. В [8] была показана возможность отнесения частиц дизельной сажи к малым, вследствие этого рассеиванием излучения можно пренебречь. Отмеченные условия, как показано в [9], приводят к тому, что значение разрешающих угловых коэффициентов вырождается в соответствующее значение углового коэффициента излучения:

$$\Phi(M_v, F_k) = \varphi(M_v, F_k). \tag{5}$$

Подставляя (5) в (4), получим

$$E_{\text{над}}(M_k) = \sum_{v=1}^m E_{\text{собо}}(M_v) \varphi(M_v, F_k), \quad (6)$$

где $\varphi(M_v, F_k)$ – геометрический угловой коэффициент.

Переход к системе с поглощающей средой может быть осуществлен с использованием зависимости

$$\psi(M_v, F_k) = \varphi(M_v, F_k) \exp(-kL), \quad (7)$$

где $\psi(M_v, F_k)$ – обобщенный угловой коэффициент; k – показатель ослабления излучения, м^{-1} ; L – эффективная длина пути луча, м.

С учетом (7) уравнение для падающего потока излучения от объемной зоны V на граничные поверхностные зоны F_1 , F_2 и F_3 запишется следующим образом:

$$E_{\text{над}}(M_k) = \sum_{v=1}^m E_{\text{собо}}(M_v) \psi(M_v, F_k) \exp(-kL). \quad (8)$$

Определение геометрических и обобщенных угловых коэффициентов излучения

Для расчета геометрических угловых коэффициентов излучения $\varphi(M_v, F_k)$ использовались уравнения, представленные в [3]. В частности, выражение для углового коэффициента излучения граничной поверхности F_2 (см. рис. 1) на объемную зону V определенного радиуса r_i имеет вид [3]

$$\varphi_{12} = R \left[1 - \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{X}{Z}\right) \right] - \frac{\pi Z}{4H} - \frac{1}{2\pi H} \left[\sqrt{(X+2)^2 - 4R^2} \arccos\left(\frac{RX}{Z}\right) - X \arcsin R \right]. \quad (9)$$

Угловой коэффициент излучения объемной зоны V радиуса r_i на граничную поверхность F_2 (т.е. на поверхность втулки цилиндра) определяется по зависимости [3]

$$\varphi_{21} = \frac{1}{R} \varphi_{12}, \quad (10)$$

а угловой коэффициент излучения от объемной зоны V на граничную поверхность F_3 (поверхность дна поршня) соответственно

$$\varphi_{23} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{R} \varphi_{12} \right). \quad (11)$$

В уравнениях (9)-(11) приняты следующие обозначения:

$$R = r_2/r_1; \quad H = h/r_i; \quad X = H^2 + R^2 - 1; \quad Z = H^2 - R^2 + 1. \quad (12)$$

С учетом симметрии излучающей системы угловой коэффициент от объемной зоны V на граничную поверхность F_1 (поверхность крышки цилиндра) будет равен коэффициенту φ_{23} .

При расчете локальных радиационных тепловых потоков в КС дизельного двигателя необходимо учесть, что значения всех параметров (за исключением R), определяемых соотношениями (12), зависят от угла ПКВ, т.е. являются переменными. Связь параметров H , X и Z с текущим углом ПКВ осуществляется по известной зависимости для кривошипно-шатунного механизма двигателя:

$$S = \bar{R} \left(1 - \cos \alpha + 0,5\bar{\lambda} \sin^2 \alpha \right). \quad (13)$$

В соответствии с принятой зональной излучающей системой (см. рис. 1) текущее значение перемещения поршня

$$S_i = h_0 + h_i \quad (14)$$

или
$$S_i = h_0 + \bar{R} \left(1 - \cos \alpha + 0,5\bar{\lambda} \sin^2 \alpha \right), \quad (15)$$

для любого фиксированного угла ПКВ при расчете угловых коэффициентов излучения с учетом схемы, представленной на рис. 1, используется выражение

$$h = h_0 \bar{R} \left(1 - \cos \alpha + 0,5\bar{\lambda} \sin^2 \alpha \right), \quad (16)$$

где $\bar{\lambda}$ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна.

Тогда для параметров, определяющихся по (12), имеем

$$R = r_i/R'. \quad (17)$$

$$H = h/r_i = \left(h_0 + \bar{R} \left(1 - \cos \alpha + 0,5\bar{\lambda} \sin^2 \alpha \right) \right) / r_i. \quad (18)$$

$$X = H^2 + R^2 - 1 = \left[\left(h_0 + \bar{R} \left(1 - \cos \alpha + 0,5\bar{\lambda} \sin^2 \alpha \right) \right) / r_i \right]^2 + (r_i/R')^2 - 1. \quad (19)$$

$$Z = H^2 - R^2 + 1 = \left[\left(h_0 + \bar{R} \left(1 - \cos \alpha + 0,5\bar{\lambda} \sin^2 \alpha \right) \right) / r_i \right]^2 - (r_i/R')^2 + 1. \quad (20)$$

Полный вид расчетных зависимостей для обобщенных угловых коэффициентов излучения ввиду их громоздкости здесь не приводится и имеется в [4]. Расчет угловых коэффициентов излучения выполнялся на ПК по специальной программе. Результаты расчетов показаны на рис. 2, 3 и 4.

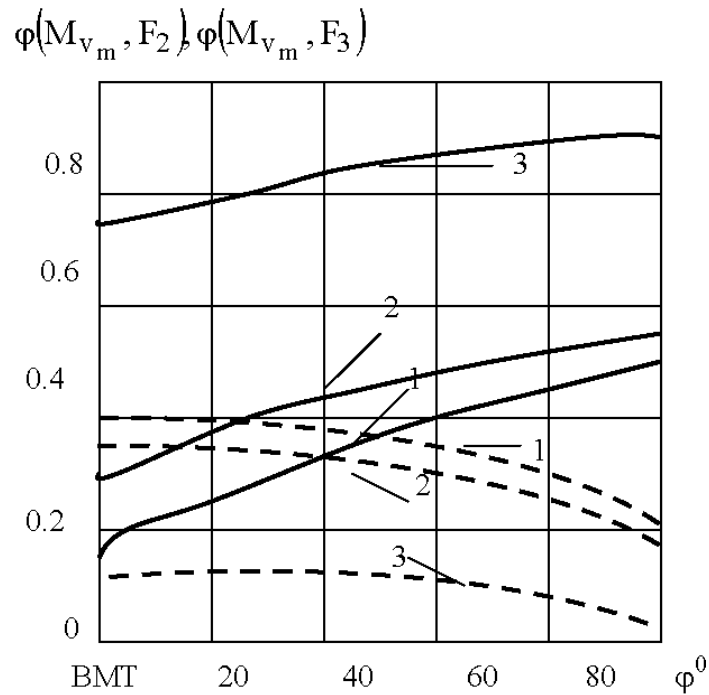


Рис. 2. Изменение угловых коэффициентов излучения от объемных зон на поверхности втулки цилиндра и поршня: — $\varphi(M_{V_m}, F_2)$; ---- $\varphi(M_{V_m}, F_3)$;

1 — V_1 при $r_1 = 10$ мм; 2 — V_2 при $r_2 = 30$ мм; 3 — V_1 при $r_3 = 57$ мм

Fig. 2. Variation angle coefficients radiation from volume of zones on surface line cylinder and piston:

1 — V_1 for $r_1 = 10$ mm; 2 — V_2 for $r_2 = 30$ mm; 3 — V_1 for $r_3 = 57$ mm

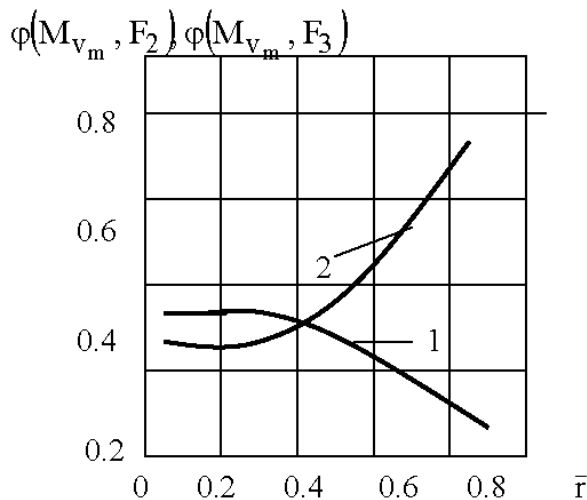


Рис. 3. Изменение угловых коэффициентов излучения от объемных зон по поверхности КС (положение коленчатого вала 20° после БМТ): 1 — $\varphi(M_{V_m}, F_3)$; 2 — $\varphi(M_{V_m}, F_2)$

Fig. 3. Variation angle coefficients radiation from volume of zones on surface combustion chamber (crank angle 20 degrees after TDC): 1 — $\varphi(M_{V_m}, F_3)$; 2 — $\varphi(M_{V_m}, F_2)$

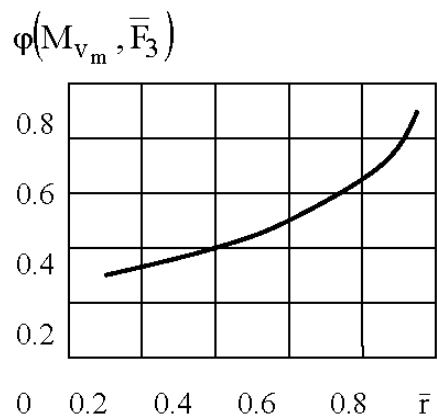


Рис. 4. Изменение угловых коэффициентов излучения от объемных зон на боковую поверхность выемки в поршне

Fig. 4. Variation angle coefficients radiation from volume of zones on lateral surface of piston

Анализ представленных на них графиков позволяет сделать весьма важный вывод о том, что угловой коэффициент от объемных зон на поверхность втулки цилиндра $\varphi(M_{v_m}, F_2)$ с увеличением угла ПКВ возрастает, а на поверхности крышки цилиндра и днище поршня $\varphi(M_{v_m}, F_3)$ уменьшается.

Причем, чем меньше радиус объемной излучающей зоны, тем больше значение углового коэффициента излучения на поверхности крышки цилиндра и поршня $\varphi(M_{v_m}, F_3)$. Для углового коэффициента от объемных зон на поверхность втулки цилиндра $\varphi(M_{v_m}, F_2)$ зависимость от радиуса имеет обратную тенденцию. На рис. 4 показано изменение углового коэффициента излучения от объемных зон $\varphi(M_{v_m}, \bar{F}_3)$ на боковую поверхность выемки в поршне \bar{F}_3 (см. рис. 1) в функции ее относительно радиуса. Из этого графика можно заключить, что боковая поверхность выемки в поршне \bar{F}_3 подвергается значительным радиационным тепловым нагрузкам. Последнее подтверждается и экспериментальными данными [10].

Такой характер изменения угловых коэффициентов излучения $\varphi(M_{v_m}, F_3)$ и $\varphi(M_{v_m}, F_1)$ приводит к тому, что расчетные значения локальных радиационных тепловых потоков достигают своего максимума в центре КС.

Это положение хорошо согласуется с экспериментальными данными [11] и свидетельствует о правильном учете основных особенностей радиационного теплообмена в КС дизельного двигателя при построении ММ.

Переход от геометрических коэффициентов излучения, представленных на рис. 2-4, к соответствующим значениям обобщенных угловых коэффициентов выполняется по зависимости (7). При этом характер изменения обобщенных угловых коэффициентов излучения в функции угла ПКВ и относительного радиуса излучающего объема остается прежним.

Детальные расчеты, результаты которых представлены в [4], показали, что поглощение в объеме КС дизельного двигателя не превышает 5-10 % от величины падающего потока излучения.

Заключение

Проведенный анализ особенностей расчета оптико-геометрических характеристик теплообмена излучением применительно к КС дизельного двигателя позволяет отметить следующее. Имеющиеся в научно-технической литературе формулы и графические зависимости для определения угловых коэффициентов излучения справедливы для систем, содержащих тела и поверхности относительно простой геометрической формы и находящихся в стационарном положении. В условиях работающего дизельного двигателя геометрия излучающей системы изменяется в зависимости от угла ПКВ, что существенно усложняет решение оптико-геометрической части задачи теплообмена излучением. Полученные авторами доклада расчетные данные по изменению угловых коэффициентов излучения между объемными зонами и поверхностями, образующими КС (поверхности крышки цилиндра, втулки и поршня), в зависимости от угла ПКВ и относительного радиуса имеют два аспекта применения. Первый аспект – для решения энергетической части задачи теплообмена излучением и расчета результирующих потоков излучения по вышеуказанным поверхностям КС. Второй аспект – для определения наиболее нагруженных в термическом отношении участков этих поверхностей, так как характер изменения угловых коэффициентов излучения в функции относительного радиуса КС коррелирует с распределением радиационных тепловых потоков. Последнее позволяет прогнозировать теплонпряженное состояние деталей цилиндропоршневой группы и решать ряд вопросов, связанных с повышением эксплуатационной надежности современных дизельных двигателей.

Список литературы

1. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. Математические модели механизма и электродинамики сплошной среды. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 512 с.
2. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ / Р.М. Петриченко, С.А. Батурин, Ю.Н. Исаков и др. / под ред. Р.М. Петриченко. – Л.: Машиностроение, 1990. – 328 с.
3. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справ. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
4. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 221 с.
5. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Процессы теплообмена в камере сгорания дизельных двигателей. Эксперимент и математическое моделирование. Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 112 с.
6. Kawamura K., Saito A., Vaegashi T. et al. Measurement of flame temperature distribution in engines by using a two-color high speed shutter: TV camera system // SAE Preprints. – 1989. – № 890320. – 8 p.
7. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 472 с.
8. 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.
9. Рубцов Н.А. Теплообмен излучением в сплошных средах. – Новосибирск: Наука, 1984. – 278 с.
10. Dent J.C., Siluman S.I. Convective and radiative heat transfer in a high swirl direct injection diesel engine // SAE Preprints. – 1977. – № 770407. – 26 p.
11. Kostin A.K., Rudnev B.I. Radiative heat transfer in a diesel cylinder an experiment and method of calculation // Heat and mass transfer in gasoline and diesel engines: Proc. 19th International Symposium. Dubrovnik, Yugoslavia, 1987. – P. 439-448.

Сведения об авторах: Руднев Борис Иванович, доктор технических наук, профессор;
Повалихина Ольга Владимировна, доцент, e-mail: povalichina@mail.ru.