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

УДК 533.62.01

Б.И. Руднев, О.В. Повалихина

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

Представлен метод расчета геометрических угловых коэффициентов излучения в камере сгорания судового среднеоборотного дизеля. Показан локальный характер изменения указанных коэффициентов по радиусу цилиндра. Установлена связь между характером изменения угловых коэффициентов и тепловых потоков излучения, воспринимаемых поверхностями камеры сгорания.

Ключевые слова: оптико-геометрические характеристики, излучение, камера сгорания судового дизеля.

B.I. Rudnev, O.V. Povalikhina

OPTICAL-GEOMETRICAL DATA OF RADIATION IN MARINE DIESEL COMBUSTION CHAMBER

Method of calculation geometrical angle coefficients radiation in marine medium speed diesel engine combustion chamber is given. Local disposition of variation this coefficient on cylinder radius. The connection between of disposition variation of angle coefficients and radiation heat fluxes receive by combustion chamber surfaces has been define.

Key words: Optical-geometrical data of radiation in marine diesel combustion chamber.

Введение

Форсирование современных судовых дизелей по параметрам рабочего процесса приводит к значительному увеличению температур деталей, образующих камеру сгорания (КС). В мощных малооборотных судовых дизелях для улучшения температурного состояния деталей цилиндропоршневой группы используется водяное охлаждение вместо масляного. Вместе с тем расчетное определение тепловых потоков, в том числе и радиационных на поверхностях деталей КС (крышки цилиндра, поршня и втулки цилиндра), на стадии проектирования вызывает значительные трудности. Это увеличивает сроки доводки новых образцов дизелей и подтверждает актуальность разработки новых и совершенствование уже существующих математических моделей (ММ) с целью более достоверного определения теплового состояния деталей, образующих КС.

Расчетный метод определения геометрических угловых коэффициентов излучения

В ряде предлагаемых ММ [1, 2, 3] для расчета локальных радиационных тепловых потоков используется хорошо развитый в теплофизике зональный метод, при этом в оптико-геометрической части указанного метода обобщенные угловые коэффициенты излучения $\psi(M_V, F_k)$ представлены как произведение угловых (геометрических) коэффициентов и параметра Бугера, учитывающего поглощение излучения в объеме КС [3, 4, 5].

$$\psi(M_V, F_k) = \varphi(M_V, F_k) \exp(-kL), \quad (1)$$

где $\psi(M_V, F_k)$ – обобщенный угловой коэффициент излучения; $\varphi(M_V, F_k)$ – геометрический угловой коэффициент излучения; k – коэффициент ослабления потока излучения; L – эффективная длина пути луча.

Определение геометрических угловых коэффициентов излучения для системы поверхностей и тел «классической» конфигурации: плоскости, цилиндры, сферы и т.п. – не вызывает особых трудностей, так как в справочной литературе имеются соответствующие расчетные зависимости [4, 5]. Однако в случае реальной КС судового дизеля мы имеем дело с геометрической системой поверхностей, существенно отличающихся от «классических». Например, для судового дизеля 6 ЧН 24/36, исследованного авторами, поверхность поршня со стороны КС имеет сферическую выемку, и требуется разработка специального расчетного метода для определения геометрических коэффициентов излучения. Как известно [4], геометрический угловой коэффициент определяет условия теплообмена излучением между поверхностями F_1 и F_2 двух тел конечных размеров. Он характеризует долю полусферического потока энергии, испускаемого одной и падающего на другую поверхность тел конечных размеров. Угловой коэффициент представляет собой чисто геометрическую характеристику формы, размеров и взаимного расположения двух тел, находящихся в состоянии теплообмена излучением друг с другом, и определяется по зависимостям:

$$\varphi_{12} = \frac{1}{F_1} \int_{F_2} \int_{F_1} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2; \quad (2)$$

$$\varphi_{21} = \frac{1}{F_2} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2, \quad (3)$$

где r – расстояние между центрами элементарных площадок dF_1 и dF_2 на поверхностях F_1 и F_2 ; β_1 и β_2 – соответствующие углы между нормалью к одной площадке и направлением на другую.

Угловой коэффициент для поверхности S отличается от телесного угла, под которым видна эта поверхность лишь множителем $1/4\pi$ (рис. 1).

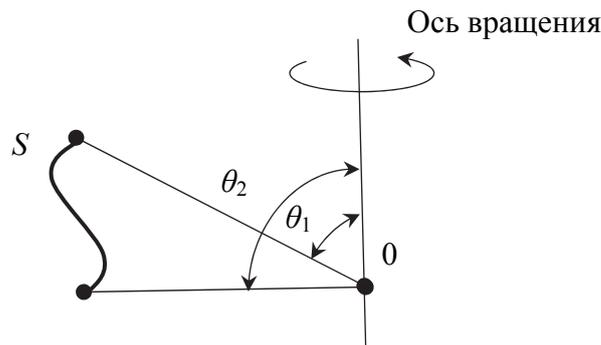


Рис. 1. Схема к определению геометрического углового коэффициента излучения
Fig. 1. Scheme on definition of geometrical angle coefficients radiation

$$\frac{1}{4\pi} \Omega(S) = k(S), \quad (4)$$

где $\Omega(S)$ – телесный угол; $k(S)$ – угловой коэффициент; S – элемент поверхности вращения.

В случае судового дизеля 6 ЧН 24/36 S представляет собой элемент поверхности сферической выемки в поршне. Телесный угол для S можно вычислить по формуле

$$\Omega(S) = 2\pi(\cos\theta_2 - \cos\theta_1), \quad (5)$$

Соответственно угловой коэффициент может быть определен по зависимости

$$k(S) = \frac{1}{2}(\cos\theta_2 - \cos\theta_1), \quad (6)$$

где θ_1 и θ_2 – полярные углы, отсчитываемые от оси вращения.

Формулу (6) можно также записать в виде

$$k(S) = \frac{1}{2}(1 - \cos\theta_2) - \frac{1}{2}(1 - \cos\theta_1), \quad (7)$$

т.е. как приращение углового коэффициента, отсчитываемого от полярной оси. Рассмотрим поверхность, образованную кривой P_0P_n при вращении ее вокруг оси (рис. 2).

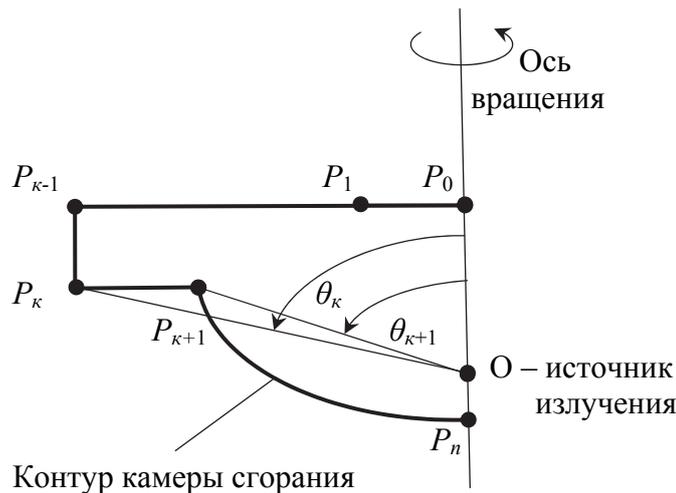


Рис. 2. К расчету геометрических угловых коэффициентов излучения применительно к открытой камере сгорания судового дизеля 6 ЧН 24/36

Fig. 2. For calculation of geometrical angle coefficients radiation apply for open marine diesel engine 6ChN 24/36 combustion chamber

Пусть θ_k – полярный угол точки P_k , т.е. угол между лучом OP_k и осью вращения. Угол θ_k отсчитывается против часовой стрелки. Тогда угловой коэффициент для сегмента поверхности, образованного отрезком P_{k+1}, P_k , находим по формуле

$$k(P_{k+1}, P_k) = \frac{1}{2}(1 - \cos\theta_{k+1}) - \frac{1}{2}(1 - \cos\theta_k). \quad (8)$$

Указанный коэффициент может получиться отрицательным. Это означает, что сегмент P_{k+1}, P_k находится в тени. В этом случае нужно изменить ранее вычисленный коэффициент $k(P_k, P_{k-1})$, прибавив к нему отрицательную величину $k(P_{k+1}, P_k)$, а $k(P_{k+1}, P_k)$ положить равным нулю. Предыдущий угловой коэффициент был уменьшен, поскольку в данном случае сегмент P_kP_{k-1} частично затеняется сегментом $P_{k+1}P_k$.

В итоге схема расчета геометрических угловых коэффициентов излучения может быть представлена следующим образом:

1. Вычисляем декартовы координаты всех точек $P_1 \dots P_n$.
2. Пересчитываем декартовы координаты в полярные (нужны только значения полярных углов θ_k).
3. Вычисляем геометрические угловые коэффициенты излучения по формуле (8) для всех k .
4. Проверяем, нет ли отрицательных коэффициентов, если они есть, то угловые коэффициенты модифицируются с учетом того, находится ли соответствующий сегмент в тени или нет.

Затем шаги 1–4 выполняются для каждого значения угла поворота коленчатого вала α .

Результаты и их обсуждение

Использование рассмотренной выше методики для определения локальных геометрических угловых коэффициентов излучения позволило получить соответствующие зависимости для сферической выемки в поршне, для крышки и втулки цилиндра судового дизеля 6ЧН 24/36. Указанные зависимости представлены на рис. 3–5.

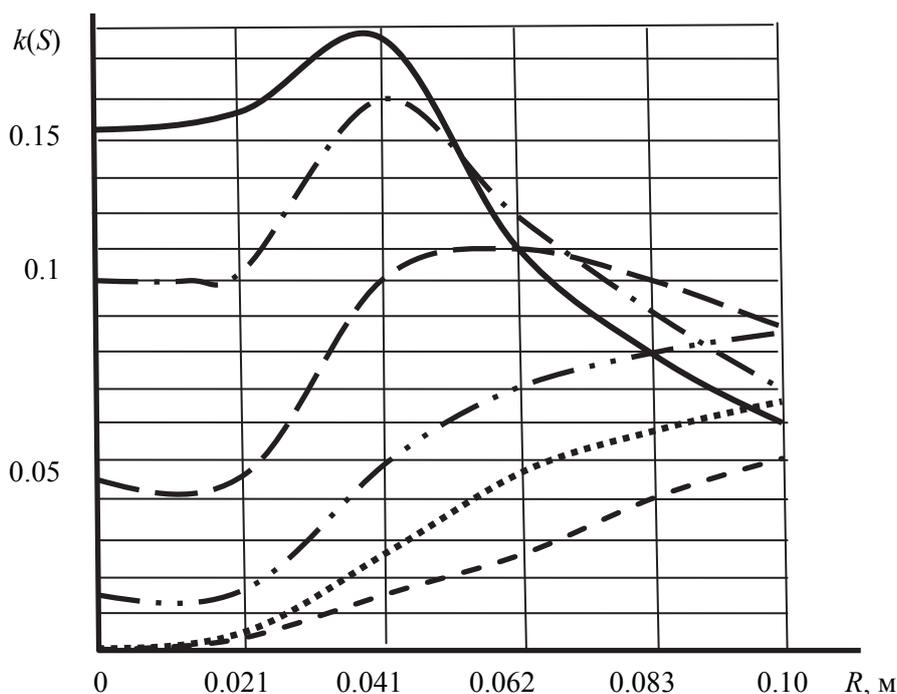


Рис. 3. Изменение геометрического углового коэффициента излучения для сферической выемки в поршне судового дизеля 6 ЧН 24/36:

- | | | | |
|---------|------------------------------------|---------|-------------------------------------|
| ————— | для ВМТ; | — · · — | $\alpha = 60^\circ$ ПКВ после ВМТ; |
| — · · — | $\alpha = 20^\circ$ ПКВ после ВМТ; | ····· | $\alpha = 80^\circ$ ПКВ после ВМТ; |
| — — — | $\alpha = 40^\circ$ ПКВ после ВМТ; | — — — | $\alpha = 100^\circ$ ПКВ после ВМТ. |

Fig. 3. Variation of geometrical angle coefficients radiation for spherical hollow in piston of marine diesel 6ChN 24/36:

- | | | | |
|---------|------------------------------------|---------|-------------------------------------|
| ————— | for TDC; | — · · — | $\alpha = 60^\circ$ CAD after TDC; |
| — · · — | $\alpha = 20^\circ$ CAD after TDC; | ····· | $\alpha = 80^\circ$ CAD after TDC; |
| — — — | $\alpha = 40^\circ$ CAD after TDC; | — — — | $\alpha = 100^\circ$ CAD after TDC. |

Анализ показывает, что наибольшее значение угловых коэффициентов приходится на кромку сферической выемки в поршне. Из практики эксплуатации судовых дизелей известно, что именно в этих локальных зонах чаще всего возникают термические трещины и наблюдается явление «выгорания» поверхностного слоя металла поршня.

Зависимости, представленные на рис. 4, подтверждают, что наиболее нагруженной потоками излучения оказывается центральная часть крышки цилиндра. Для исследованного авторами статьи судового дизеля 6ЧН 24/36 в центральной части огневой поверхности крышки цилиндра располагается межклапанная перемилька и отверстие для установки форсунки, которые уже сами по себе являются концентраторами напряжений. Неудивительно, что в практике эксплуатации судовых дизелей [1] именно в этой части крышки цилиндра возникают термические трещины.

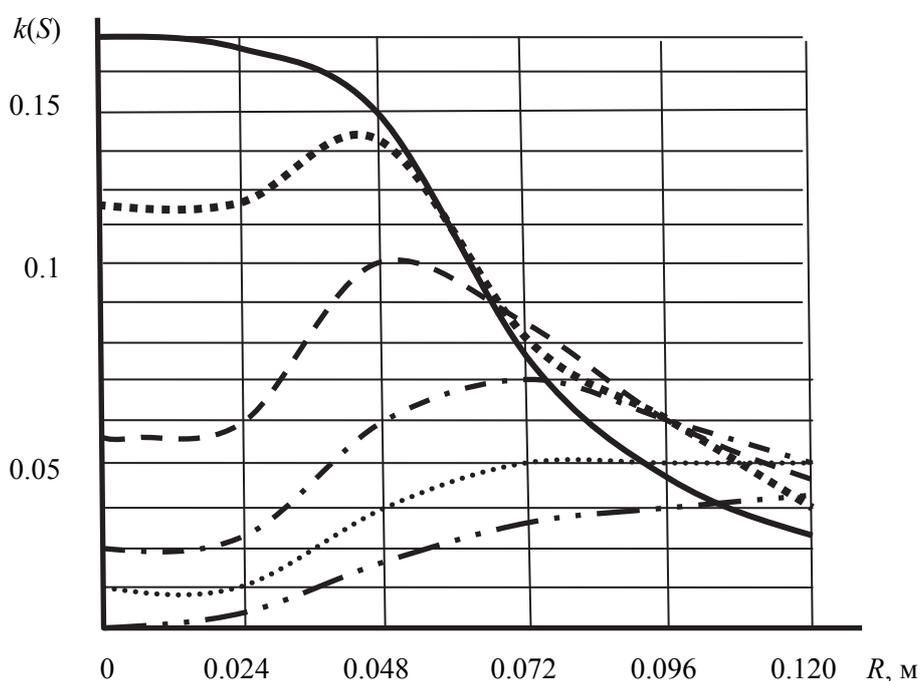


Рис. 4. Изменение геометрического углового коэффициента излучения для крышки цилиндра судового дизеля 6ЧН 24/36:

- | | | | |
|-------|--------------------------------------|---------|---------------------------------------|
| — | для ВМТ; | - . - . | $\alpha = 60^{\circ}$ ПКВ после ВМТ; |
| | $\alpha = 20^{\circ}$ ПКВ после ВМТ; | | $\alpha = 80^{\circ}$ ПКВ после ВМТ; |
| - - - | $\alpha = 40^{\circ}$ ПКВ после ВМТ; | - . . . | $\alpha = 100^{\circ}$ ПКВ после ВМТ. |

Fig. 4. Variation of geometrical angle coefficients radiation for head of cylinder marine diesel engine 6ChN 24/36:

- | | | | |
|-------|--------------------------------------|---------|---------------------------------------|
| — | for TDC; | - . - . | $\alpha = 60^{\circ}$ CAD after TDC; |
| | $\alpha = 20^{\circ}$ CAD after TDC; | | $\alpha = 80^{\circ}$ CAD after TDC; |
| - - - | $\alpha = 40^{\circ}$ CAD after TDC; | - . . . | $\alpha = 100^{\circ}$ CAD after TDC. |

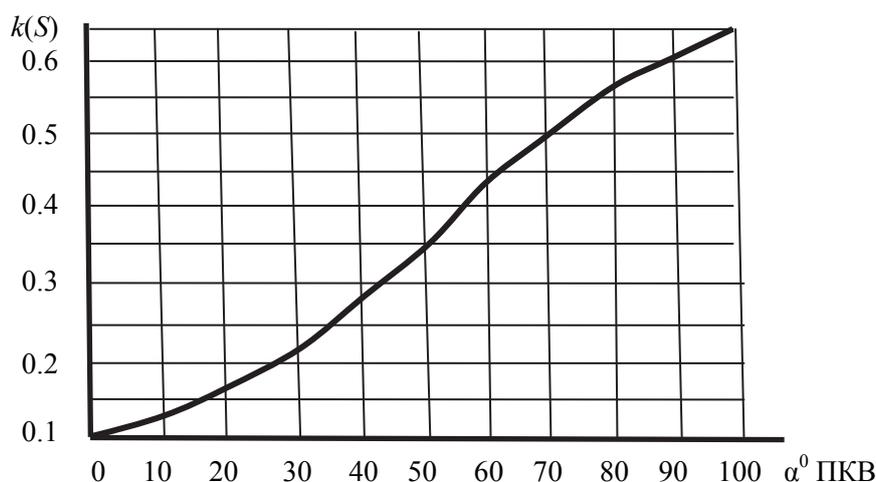


Рис. 5. Изменение геометрического углового коэффициента излучения для втулки цилиндра судового дизеля 6 ЧН 24/36

Fig. 5. Variation of geometrical angle coefficients radiation for line of cylinder marine diesel engine 6ChN 24/36

В наиболее благоприятных с точки зрения тепловых нагрузок, обусловленных потоками излучения, находится втулка цилиндра (см. рис. 5). Несмотря на высокое значение геометрических угловых коэффициентов излучения (0,1–0,65), уровень радиационных тепловых потоков оказывается незначительным, так как в период активного тепловыделения в камере сгорания (ВМТ – 40° ПКВ после ВМТ) поверхность втулки цилиндра закрыта поршнем. Необходимо также учитывать и тот факт, что поверхность втулки цилиндра имеет степень черноты в пределах 0,3÷0,4, а поверхности поршня и крышки цилиндров 0,9÷0,95.

Выводы

Сопоставление расчетных данных по локальным геометрическим угловым коэффициентам излучения, представленных на рис. 3–5 и экспериментальных данных по локальным тепловым потокам излучения [1], позволяет сделать вывод о наличии корреляционной связи между характером изменения угловых коэффициентов излучения и тепловым состоянием деталей, образующих КС судового дизеля. Это обстоятельство является весьма важным для разработки путей снижения тепловой напряженности деталей КС судовых дизелей и повышения их эксплуатационной надежности.

Список литературы

1. Петриченко Р.М., Батулин С.А., Исаков Ю.Н. и др. Элементы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ. Л.: Машиностроение, 1990. 328 с.
2. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. Владивосток: Дальнаука, 2000. 221 с.
3. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Математическое моделирование радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9, № 9. С. 422–425.
4. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
5. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.

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