

УДК 621.431.74.016

**Б.И. Руднев, О.В. Повалихина**Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б**ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЧАСТИЦ САЖИ И РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*Проанализированы основные аспекты, связанные с определением оптических параметров частиц сажи, образующихся в камере сгорания (КС) дизельных двигателей. Показано, что указанные частицы сажи с оптической точки зрения могут быть отнесены к малым. Отмечается необходимость проведения дальнейших экспериментальных исследований по определению оптических параметров частиц сажи и их распределения по размерам, особенно для современных высокофорсированных дизельных двигателей.*

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, камера сгорания, степень черноты пламени, оптические параметры, частицы сажи.

**B.I. Rudnev, O.V. Povalikhina****OPTICAL PARAMETERS OF SOOT PARTICLES AND RADIATIVE HEAT TRANSFER IN DIESEL ENGINE COMBUSTION CHAMBER**

*The basic aspects connected with the definition optical parameters of soot particles are analysed especially formed in diesel engine combustion chamber. It is shown that the abovementioned particles from optical point of view can be referred to the small ones. It is underlined the necessity of conducting further experimental investigations concerning the findings of soot particles parameters and size distribution expressed for modern high energy diesel engines.*

**Key words:** diesel engine, combustion chamber, degree of flame blackness, optical parameters, soot particles.

**Введение**

Несовершенство математических моделей (ММ) радиационно-конвективного теплообмена в КС дизельных двигателей в значительной степени затрудняет достоверное определение локальных тепловых потоков, передаваемых от рабочего тела к стенкам деталей цилиндропоршневой группы на стадии проектирования. Это заставляет разработчиков перспективных моделей решать ряд вопросов экспериментальным путем и увеличивает сроки создания новых дизельных двигателей. В связи с отмеченным совершенствованием существующих и создание новых ММ локального радиационно-конвективного теплообмена в КС по-прежнему остается весьма актуальной проблемой, особенно для современных высокофорсированных дизельных двигателей, к которым предъявляются повышенные требования по эффективным и экологическим характеристикам их работы [1, 2].

**Определение оптических параметров частиц сажи дизельного пламени**

Экспериментальные данные показывают, что в процессе сгорания топлива в цилиндре дизельного двигателя образуется светящееся пламя. Светимость пламени обуславливается наличием в нем частиц сажи. Светящееся сажистое пламя в КС дизельного двигателя представляет собой дисперсную систему, излучательная способность которой, как известно [3, 4], зависит от оптических констант вещества частиц, их размеров, формы, концентрации, температуры и изменяется с длиной волны излучения. В общем случае такие дисперсные системы являются рассеивающими и поглощающими системами (средами).

Для этих сред введено понятие коэффициента ослабления, равного сумме коэффициентов поглощения  $\alpha_\lambda$  и рассеивания  $\beta_\lambda$  [3, 4].

$$\alpha_\lambda + \beta_\lambda = k_\lambda. \quad (1)$$

где  $\alpha_\lambda$  – коэффициент поглощения,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\beta_\lambda$  – коэффициент рассеивания,  $\text{м}^{-1}$ ;  $k_\lambda$  – коэффициент ослабления,  $\text{м}^{-1}$ .

Выяснение вопроса, является ли данная среда (в рассматриваемом случае – дизельное пламя) только поглощающей или поглощающей и рассеивающей средой, связано с вычислением специального критерия. В теории теплообмена излучением [3, 4] таким критерием, характеризующим рассеивание, является критерий Шустера  $Sc$ :

$$Sc = \frac{\beta_\lambda}{\alpha_\lambda + \beta_\lambda}. \quad (2)$$

где  $Sc$  – критерий Шустера.

Последний является функцией параметра дифракции  $\rho$  и комплексного показателя преломления  $m$ . В свою очередь параметр дифракции

$$\rho = \pi d / \lambda, \quad (3)$$

где  $\rho$  – параметр дифракции;  $d$  – диаметр частицы сажи,  $\text{мкм}$ ;  $\lambda$  – длина волны излучения,  $\text{мкм}$ .

Для оценки критерия Шустера необходимо определить размеры частиц сажи, находящихся в дизельном пламени. Образующиеся в КС дизельного двигателя пламя содержит в общем случае частицы сажи различных размеров. Последние оказывают влияние и на величину спектральных коэффициентов ослабления лучей, и на характер их зависимости от длины волн. В соответствии с размером частиц сажи изменяется температурная зависимость интегрального коэффициента ослабления лучей пламени и соотношение между поглощательной и рассеивающей способностями частиц [3, 4]. Следовательно, вопрос об оценке размеров частиц сажи является одним из основных вопросов при исследовании излучательной способности светящегося пламени, в том числе и дизельного. В различных видах пламени при сжигании углеводородных топлив могут образовываться частицы сажи, имеющие широкий диапазон изменения своих размеров и формы. Например, в [4, 5] отмечается, что частицы сажи, образующиеся в углеводородном пламени в лабораторных условиях и в промышленности, имеют диаметры от 0,005 до 0,3  $\text{мкм}$  и более. Кроме того, сажа может присутствовать в пламени в виде сферических частиц, агломератов, а иногда и в виде длинных нитей.

Для определения энергетических характеристик излучения дизельного пламени целесообразно воспользоваться экспериментальными данными, полученными в [6]. Результаты этой работы являются итогом комплексных исследований, проведенных Научно-исследовательским автотранспортным институтом (НАМИ), Всероссийским научно-исследовательским институтом газовой промышленности (ВНИИГАЗ) и Институтом экспериментальной и клинической онкологии Российской академии медицинских наук (РАМН) по единой программе с целью изучения влияния типа рабочего процесса дизельных двигателей с объемным и пленочным смесеобразованием, вида применяемого топлива, скоростных и нагр-

зочных режимов работы, регулировочных и технологических фактов на физико-химические свойства сажи, ее концентрацию и адсорбцию бензо- $\alpha$ -пирена. Проведенными исследованиями [6] установлено, что сажа, содержащаяся в отработавших газах, как по форме, так и по распределению частиц по размерам приближается к высокодисперсным промышленным сажам типа ДГ-100 и ПМ-100 с удельной поверхностью  $S = 80-125 \text{ м}^2/\text{г}$ , средним поверхностным диаметром  $d = 0,012-0,03 \text{ мкм}$  и числом частиц, заключенном в литре газа при нормальных условиях, до  $3 \cdot 10^{13}$  частиц при массовой концентрации для КС дизельного двигателя 8ЧН 13/14 по скоростной характеристике в пределах  $0,4-0,6 \text{ мг/л}$ . Размер частиц сажи определялся с помощью электронного микроскопа, данные этих измерений представлены в таблице [6].

**Данные о дисперсности частиц сажи, образующихся в пламени дизельного двигателя**  
**Data about scales of soot particles diesel engine of flame**

Параметр	Частота вращения коленчатого вала, $n$ , $\text{мин}^{-1}$				
	1200	3000	3000	1500	3000
Число обмеренных частиц	Дизтопливо Л		Бензин А-72		
	1834	1498	1640	1164	1872
Диаметр обмеренных частиц, средний поверхностный $\bar{d}$ , $\text{км}$	0.0271	0.0251	0.0284	0.0284	0.0272
Диаметр средний арифметический $d_n$ , $\text{мкм}$	0.0215	0.0206	0.0204	0.0241	0.0238
Удельная геометрическая поверхность $S$ , $\text{м}^2/\text{г}$ (электронно-микроскопический метод)	111.1	120.5	106.8	107	111
Удельная поверхность по методу газовой хроматографии, $\text{м}^2/\text{г}$	94.4	119	103	99	99

Принимается, что частицы сажи имеют сферическую форму диаметром  $d$ . В более поздних отечественных [7] и зарубежных [8, 9] исследованиях приводятся данные по размерам частиц дизельной сажи, весьма близкие к указанным ранее. Оценив размер частиц сажи, можно определить параметр дифракции  $\rho$  и величину критерия Шустера  $Sc$ . Выполненные в [10] расчеты показывают, что  $\rho = 0,060 - 0,157$  и  $Sc = 0,1681 \cdot 10^{-3} - 0,2592 \cdot 10^{-2}$ .

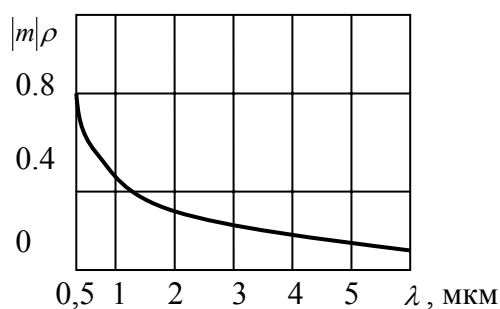


Рис. 1. Спектральная зависимость параметра  $|m|\rho$  для частиц дизельной сажи  
 Fig. 1. Spectral dependence parameter  $|m|\rho$  for soot particles of diesel engine

Столь малые величины критерия Шустера позволяют в условиях дизельного пламени пренебречь рассеиванием и считать, что ослабление потока излучения происходит лишь за счет его поглощения на частицах сажи, т.е. дизельное пламя можно считать поглощающей дисперсной средой, для которой справедливо выражение  $k_\lambda \approx a_\lambda$ . Определение спектрального показателя ослабления  $k_\lambda$  связано с выяснением вопроса, можно ли частицы дизельной сажи считать малыми или нет, так как выражения для  $k_\lambda$  в области малых и больших час-

тиц не совпадают. В [3, 4] показано, что частицы сажи могут быть отнесены к малым, если выполняются условия  $\rho \leq 0,1$  и  $|m|\rho < 1$  для ближней инфракрасной области спектра от

$\lambda = 0,5$  мкм до  $\lambda = 6,0$  мкм. Результаты расчетов по параметру  $|m|\rho$  для частиц дизельной сажи, выполненные в [10], представлены на рис. 1. Из него видно, что зависимость  $|m|\rho = f(\lambda)$  близка к гиперболе и условие  $|m|\rho < 1$  выполняется для всей ближней инфракрасной области спектра, а следовательно, частицы сажи в пламени дизельного двигателя с полным основанием могут быть отнесены к малым частицам. Поскольку зависимость комплексного показателя преломления в функции длины волны для частиц сажи (углерода) известна [3], то можно на основании известных из теории зависимостей определить спектральные коэффициенты ослабления лучей частицами при различных значениях параметра дифракции. Указанные расчеты при широком изменении  $\rho$  и длины волны  $\lambda$  в пределах видимой и ближней инфракрасной области были выполнены в [3]. В ней показано, что в области значений  $\rho < 0,1$  спектральный коэффициент ослабления  $k_\lambda$  является линейной функцией параметра  $\rho$  во всем диапазоне длин волн теплового излучения пламени.

$$k_\lambda = \Phi(m)\rho. \quad (4)$$

В свою очередь функция  $\Phi(m)$  может быть определена [3] по зависимости

$$\Phi(m) = 1,36(1 - 0,1\lambda). \quad (5)$$

Подставляя в (4) значение  $\Phi(m)$  из (5), получим выражение для спектрального коэффициента ослабления

$$k_\lambda = 1,36(1 - 0,1\lambda)\rho. \quad (6)$$

Возможность использования зависимости (6) для турбулентного сажистого пламени показана в [11].

Зависимость (6) является приближенной, однако выполненное в [3] сопоставление результатов расчета  $k_\lambda$  по (6) и по точным теоретическим формулам показало, что вплоть до  $\rho \leq 0,1$  значения  $k_\lambda$  практически совпадают. При  $\rho > 0,1$  появляются заметные расхождения. Вместе с тем даже для  $\rho = 0,15$  отличие составляет (в среднем по всей области спектра излучения пламени) не более 10 %. Последнее позволяет успешно применять формулу (6) для расчетов излучения сажистых частиц в светящихся пламенах при значении параметра дифракции  $\rho \leq 0,1$  [3].

Спектральная оптическая толщина потока сажистых частиц  $\tau_\lambda$  связана, как известно [3], со спектральным показателем ослабления  $k_\lambda$  уравнением

$$\tau_\lambda = 1,5k_\lambda \mu L / (jd), \quad (7)$$

где  $\mu$  – концентрация частиц сажи в КС, кг/м<sup>3</sup>;  $j$  – удельный вес частиц сажи, кг/м<sup>3</sup>;  $L$  – эффективная длина пути луча, м.

Величина  $j$  для частиц дизельной сажи лежит в узких пределах 1800-2100 кг/м<sup>3</sup> и может быть принята равной 1950 кг/м<sup>3</sup>. Подставив выражение (6) в (7) и выполнив преобразования, имеем

$$\tau_\lambda = \frac{6,4}{j} (\lambda^{-1} - 0,1) \mu L. \quad (8)$$

Обозначив постоянную величину  $6,4/j$  через  $C$ , окончательно получим

$$\tau_{\lambda} = C(\lambda^{-1} - 0,1)\mu L. \quad (9)$$

На основании уравнения (9) можно сделать очень важный вывод, что для дизельного пламени с малыми частицами спектральная оптическая толщина не зависит от размеров частиц сажи.

### **Спектральные энергетические характеристики излучения дизельного пламени**

В соответствии с законом Бугера выражение для спектральной степени черноты дизельного пламени можно представить в виде

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - \exp(-\tau_{\lambda}) = 1 - \exp[-C(\lambda^{-1} - 0,1)\mu L], \quad (10)$$

где  $\varepsilon_{\lambda}$  – спектральная степень черноты дизельного пламени.

Результаты расчета спектральной степени черноты пламени, выполненные одним из авторов доклада [10], для режима номинальной мощности дизельного двигателя 8 ЧН 13/14 представлены на рис. 2. Обращает на себя внимание сильная зависимость величины  $\varepsilon_{\lambda}$  от длины волны излучения. Для определения результирующих потоков излучения в КС дизельного двигателя с использованием зонального метода необходимо располагать интегральными энергетическими характеристиками [12]. Переход от спектральной степени черноты дизельного пламени к ее интегральной величине может быть осуществлен по зависимости

$$\varepsilon = \frac{\int_{0,5}^6 \{1 - \exp[-C(\lambda^{-1} - 0,1)\mu L]\} E_0 d\lambda}{\int_{0,5}^6 E_0 d\lambda}, \quad (11)$$

где  $\varepsilon$  – интегральная степень черноты дизельного пламени;  $E_0$  – плотность потока излучения абсолютно черного тела при температуре дизельного пламени, Вт/м<sup>2</sup>.

Величина интегральной степени черноты пламени для нескольких режимов нагрузочной характеристики дизельного двигателя 8ЧН13/14, рассчитанная по зависимости (11), представлена на рис. 3. Из него видно, что с ростом нагрузки интегральная степень черноты пламени возрастает. Это необходимо учитывать при оценке радиационной тепловой нагрузки на детали, образующие КС.

### **Заключение**

Рассмотренные аспекты определения оптических параметров частиц сажи, образующихся в КС дизельного двигателя, позволяют отметить следующее. По имеющейся в научно-технической литературе информации о размерах частиц дизельной сажи они могут быть отнесены с оптической точки зрения к малым частицам. В связи с этим в расчетах радиационного теплообмена в КС рассеиванием можно пренебречь и считать, что ослабление излучения происходит лишь за счет поглощения. Коэффициент ослабления также входит и в уравнение для разрешающих угловых коэффициентов излучения, т.е. связан с оптико-геометрическими характеристиками радиационного теплообмена в КС. Последнее

требует проведения дополнительных экспериментальных исследований по определению оптических параметров частиц сажи и функции их распределения по размерам при работе дизельных двигателей на различных видах топлива. Отмеченное обстоятельство особенно актуально для современных высокофорсированных дизельных двигателей.

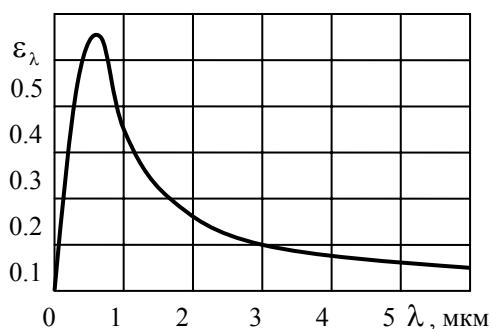


Рис. 2. Спектральная степень черноты пламени дизельного двигателя 8ЧН 13/14  
Fig. 2. Spectral degree of flame blackness of diesel engine 8 ChN 13/14

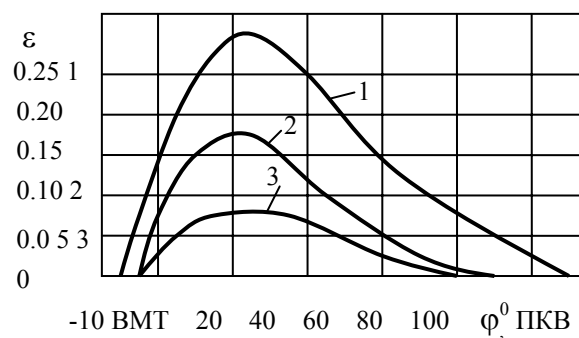


Рис. 3. Интегральная степень черноты пламени дизельного двигателя 8ЧН 13/14:  
1 –  $P_{me} = 0,61$  МПа, 2 –  $P_{me} = 0,36$  МПа,  
3 –  $P_{me} = 0,12$  МПа  
Fig. 3. Integral degree of flame blackness of diesel engine 8 ChN 13/14: 1 –  $P_{me} = 0,61$  МПа,  
2 –  $P_{me} = 0,36$  МПа, 3 –  $P_{me} = 0,12$  МПа

### Список литературы

1. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 472 с.
2. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.
3. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справ. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
4. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1975. – 934 с.
5. Kamimoto T., Yagita M. Particulate formation and flame structure in diesel engines // SAE Preprints. - 1989. – № 890436. – 9 p.
6. Влияние типа рабочего процесса и режима работы быстроходного дизеля на свойства сажи и отработавшие газы / М.М. Вихерт, А.П. Кратко, И.С. Рафалькес и др. // Автомобильная пром-сть. – 1975. – № 10. – С. 8-14.
7. Махов В.З. Процессы сгорания в двигателях. – М.: МАДИ, 1980. – 76 с.
8. Блазовски В.С. Зависимость сажеобразования от характеристик смеси топлива и условий горения // Энергетические машины и установки. – 1980. – Т. 102, № 2. – С. 150-158.
9. 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.
10. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 221 с.
11. Кузнецов В.Р., Сабельников В.А. Турбулентность и горение. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
12. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Анализ использования зональной модели радиационного теплообмена в камере сгорания дизельного двигателя // Тр. 5-й Рос. национальной конф. по теплообмену. – М.: МЭИ, 2010. – Т. 6. – С. 261-263.

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