

---

---

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

---

---

УДК 621.431.74.016

**Б.И. Руднев, О.В. Повалихина**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 526

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАМЕНИ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

*Использование математических моделей, в основу которых положен зональный метод расчета теплообмена излучением, применительно к камере сгорания судового дизеля, требует предварительного определения ряда энергетических характеристик. Важнейшей из них является спектральная оптическая толщина пламени. Целью данной статьи является разработка расчетного метода для оценки спектральной оптической толщины пламени в камере сгорания судового дизеля 6 ЧН 24/36. Показано, что величина спектральной оптической толщины пламени зависит от трех основных параметров: коэффициента ослабления излучения, концентрации частиц сажи и их оптических характеристик (среднего диаметра и параметра дифракции). Представлены распределение частиц сажи по размерам и значения спектральной оптической толщины пламени в функции угла поворота коленчатого вала для судового дизеля 6 ЧН 24/36 при испытании его по нагрузочной характеристике. Приведены основные подходы, позволяющие определить интегральную степень черноты пламени в камере сгорания с использованием полученных расчетных данных по его спектральной оптической толщине.*

**Ключевые слова:** *судовой дизель, спектральная оптическая толщина пламени, радиационный теплообмен.*

**B.I. Rudnev, O.V. Povalikhina**

## CALCULATION-EXPERIMENTAL METHOD OF DEFINITION POWER DATA OF FLAME IN MARINE DIESEL COMBUSTION CHAMBER

*Application of mathematical models in the base of them a zonal method of calculation of radiative transfer is included in additional to marine diesel combustion chamber, it is required first determination the number of power data. Spectral optical thickness of flame is very important. Development of method calculation for the estimation of spectral optical thickness of flame in marine diesel 6 ChN 24/36 combustion chamber is the purpose of this paper. A value of spectral optical thickness of flame depends from three basic data: coefficient of attenuation radiation, concentration of soot particles and its optical data (mean diameter and parameter of diffraction) is given. Distribution of soot particles according to sizes and values of spectral optical thickness of flame in function of crank angle degree for marine diesel 6 ChN 24/36 in its power data is shown. Basic methods per missing to determine integral degree of flame blackness in combustion chamber with application of calculation data on its spectral optical thickness is determined.*

**Key words:** *marine diesel, spectral optical thickness of flame, radiation heat transfer.*

### Введение

В структуру математических моделей (ММ), позволяющих определить локальные потоки излучения на поверхностях деталей камеры сгорания (КС) судовых дизелей, в качестве исходных входит ряд энергетических характеристик. Важнейшей из них является спектральная оптическая толщина пламени [1, 2]. Целью данной статьи является разработка расчетного метода для оценки спектральной оптической толщины пламени в КС судового дизеля 6 ЧН 24/36. Как известно [1, 2], величина спектральной оптической толщины пламени в основном определяется тремя параметрами: коэффициентом ослабления излучения, концентрацией частиц сажи и их оптическими характеристиками (средним диаметром и параметром дифракции). В ранее выполненных работах [3] оптические данные по частицам сажи (средний диаметр и параметр дифракции) принимались по опубликованным в научно-технической литературе сведениям и имели приближенный характер. Это вносило существенную (до 15–20 %) неточность в расчетную величину локальных результирующих потоков излучения в КС дизелей. В рамках настоящей статьи впервые в отечественной практике исследований радиационного теплообмена в КС дизельных двигателей рассмотрен метод оценки спектральной оптической толщины пламени с учетом реальных (полученных экспериментальным путем) оптических характеристик частиц сажи применительно к судовому дизелю типа 6 ЧН 24/36 [4,5].

### Экспериментально-расчетный метод определения спектральной оптической толщины пламени в КС судового дизеля

Основным излучателем в светящемся пламени судового дизеля являются частицы сажи. Локальная концентрация и оптические характеристики последних в совокупности с коэффициентом поглощения определяют степень черноты пламени [6]. Анализ теоретических решений для области малых значений параметра дифракции, приведенных в [1, 2], показывает, что частицы сажи обладают низкой поглощательной способностью во всей области спектра теплового излучения пламени. Величина и спектральный ход коэффициентов ослабления в значительной степени определяются параметром дифракции  $\rho$  и дисперсией оптических параметров  $n(\lambda)$  и  $\chi(\lambda)$  (показателя преломления  $n$  и показателя поглощения  $\chi$ ),  $n$  и  $\chi$  связаны соотношением (1)

$$m = n - i\chi, \quad (1)$$

где  $i = -1$ .

Таким образом, для расчета излучения частиц сажи (сажистого пламени) наряду с размерами частиц  $d$  (средним диаметром) необходимо знать и их количественные показатели преломления  $m(\lambda)$  во всех областях спектра теплового излучения пламени. Вопрос об оптических параметрах аморфного углерода (сажи) подробно рассмотрен в [1, 2].

Определение спектрального показателя ослабления  $K_\lambda$  связано с выяснением вопроса, можно ли частицы сажи, образующиеся в КС судового дизеля типа 6 ЧН 24/36, считать малыми или нет, так как выражение для  $K_\lambda$  в области малых и больших частиц не совпадают. В работе [1] показано, что частицы сажи могут быть отнесены к малым, если выполняется условие  $\rho \leq 0,1$  при  $|m|\rho < 1$  для ближней инфракрасной области спектра от  $\lambda = 0,5$  мкм до  $\lambda = 6,0$  мкм. Расчеты по параметрам  $|m|\rho$  для частиц дизельной сажи были выполнены в [6]. Их результаты показали, что зависимость  $|m|\rho$  близка к гиперболе и условие  $|m|\rho < 1$  выполняется для всей ближней инфракрасной области спектра, а следовательно, частицы сажи в пламени дизеля с полным основанием могут быть отнесены к малым частицам. В силу этого для определения спектрального коэффициента ослабления можно воспользоваться формулой, представленной в [1]

$$K_\lambda = \Phi(m)\rho, \quad (2)$$

где  $\Phi(m)$  – функция комплексного показателя преломления;  $\rho = \pi d/\lambda$  – параметр дифракции;  $d$  – средний диаметр частиц сажи;  $\lambda$  – длина волны излучения.

Как установлено в [1], зависимость  $\Phi(m) = f(\lambda)$  является линейно убывающей и в диапазоне длин волн от 0,5 мкм до 6,0 мкм с достаточной точностью описывается уравнением

$$\Phi(m) = 1,36(1 - 0,1\lambda). \quad (3)$$

Подставляя в (2) значение  $\Phi(m)$  из (3), получим выражение для спектрального коэффициента ослабления

$$K_\lambda = 1,36(1 - 0,1\lambda)\rho. \quad (4)$$

Справедливость зависимости (4) для турбулентного сажистого пламени, каковым является пламя в КС судового дизеля, показана в [7]. Зависимость (4) является приближенной, сопоставление результатов расчета  $K_\lambda$  по (4) и по точным теоретическим формулам выполнено в [1]. При этом показано, что вплоть до  $\rho \leq 0,1$  значения  $K_\lambda$ , рассчитанные на ЭВМ по точным формулам и по зависимости (4), практически совпадают. При  $\rho > 0,1$  появляются заметные расхождения. Однако даже для  $\rho = 0,15$  отличие составляет (в среднем по всей области спектра излучения пламени) не более 10 %. В расчетах средний диаметр частиц сажи принимался на основе экспериментальных данных [4, 5] и составлял  $d_{ср} = 0,035-0,045$  мкм. Отмеченное выше позволяет успешно применять формулу (4) для расчетов излучения частиц сажи в светящихся пламенах при значении параметра дифракции  $\rho \leq 0,1$  [1]. Полученные авторами настоящей статьи распределения частиц сажи по размерам при испытании судового дизеля 6 ЧН 24/36 по нагрузочной характеристике для режимов 100 и 75 % от номинальной мощности  $N_{ном}$  показано на рис. 1 и 2. На гистограммы, представленные на этих рисунках, специально нанесены кривые нормального распределения, чтобы показать весьма существенное отличие от него экспериментальных данных.

К аналогичным выводам относительно вида распределения частиц сажи по размерам пришли и другие исследователи, изучавшие их оптические характеристики опытным путем [8, 9].

Спектральная оптическая толщина пламени  $\tau_\lambda$  связана, как известно [1, 2], со спектральным показателем ослабления  $K_\lambda$  уравнением

$$\tau_\lambda = 1,5K_\lambda\mu L/(\gamma d), \quad (5)$$

где  $\mu$  – концентрация частиц сажи;  $L$  – эффективная длина пути луча;  $\gamma$  – удельный вес частиц сажи.

Величина  $\gamma$  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 (4) в (5) и выполнив преобразование, имеем

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

Обозначив постоянной величину  $6,4/\gamma$  через  $C$ , окончательно получим

$$\tau_\lambda = C(\lambda^{-1} - 0,1) \cdot \mu L. \quad (7)$$

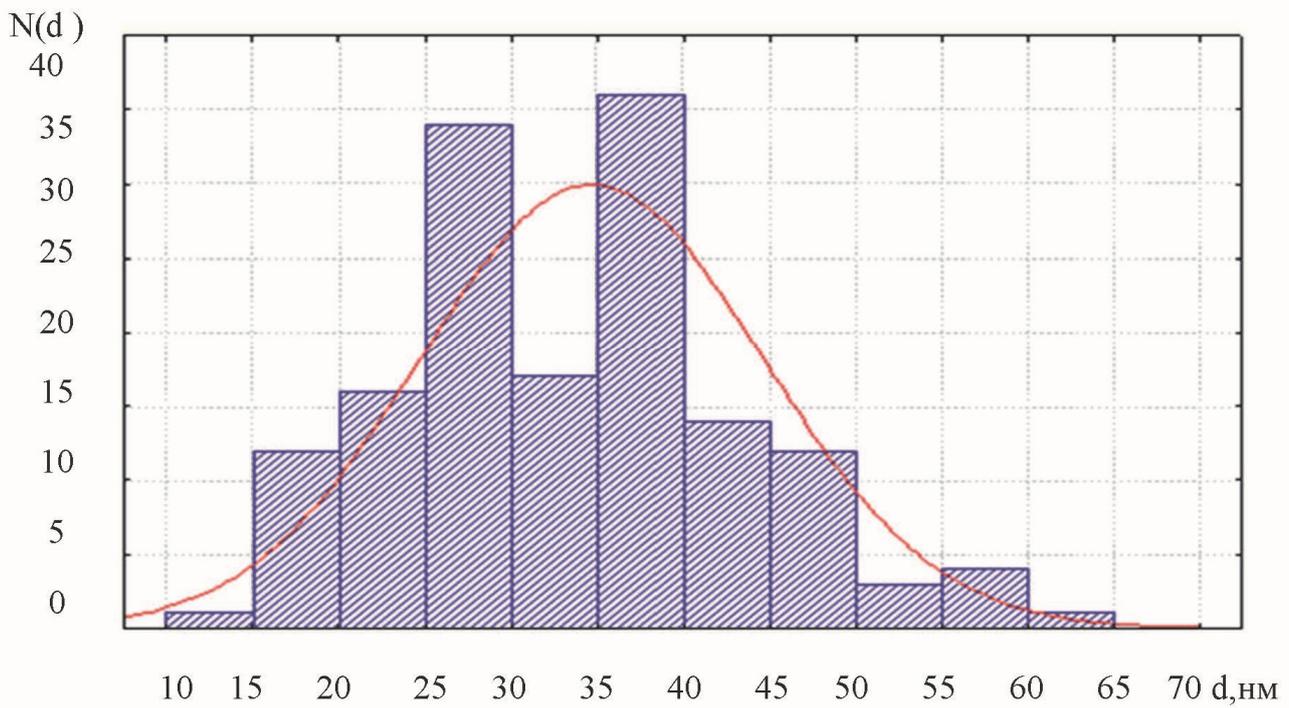


Рис. 1. Распределение частиц сажи по размерам, судовой дизель 6ЧН 24/36, нагрузка 75 % от  $N_{e_{ном}}$ .

Fig. 1. Dispensation of soot particles on sizes of marine diesel 6 ChN 24/36 by power 75 % from  $N_{e_{ном}}$

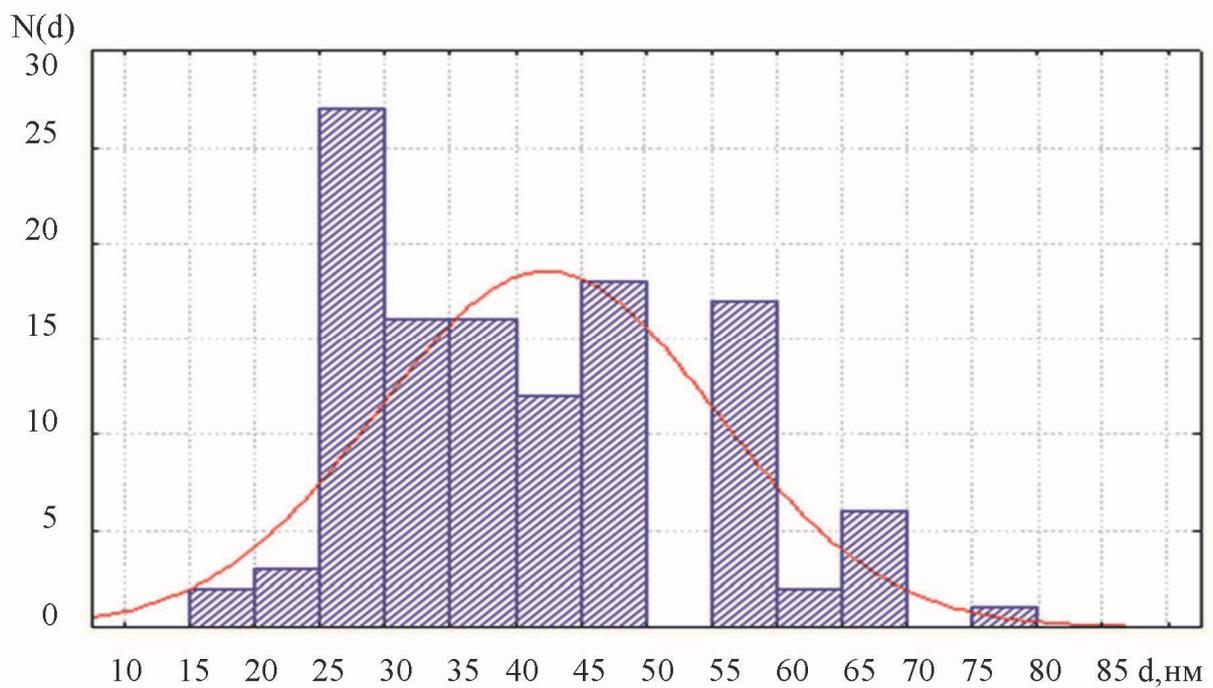


Рис. 2. Распределение частиц сажи по размерам, судовой дизель 6ЧН 24/36, нагрузка 100 % от  $N_{e_{ном}}$ .

Fig. 2. Dispensation of soot particles on sizes of marine diesel 6 ChN 24/36 by power 100 % from  $N_{e_{ном}}$

Результаты расчетов спектральной оптической толщины пламени применительно к КС судового дизеля 6 ЧН 24/36 для режимов 75 и 100 % от  $N_{e_{ном}}$  показаны на рис. 3 и 4. Необходимо отметить весьма сильную зависимость этой величины как от длины волн, так и от угла поворота коленчатого вала (ПКВ). Последнее объясняется характером изменения концентрации частиц сажи в КС судового дизеля 6 ЧН 24/36 в функции угла ПКВ.

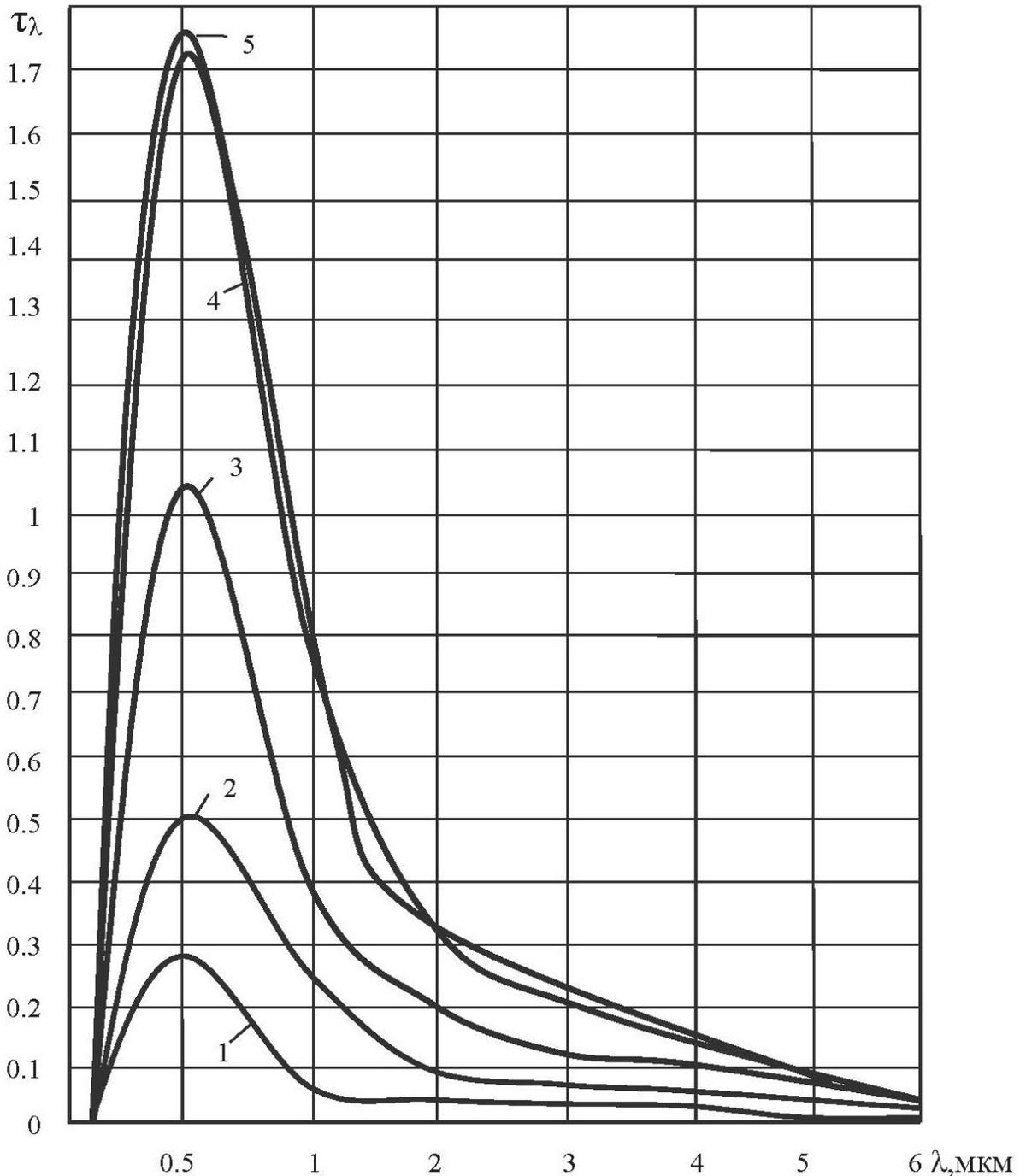


Рис. 3. Изменение спектральной оптической толщины пламени судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 75 % от  $N_{e_{ном}}$ : 1 – ВМТ; 2 – 20° ПКВ после ВМТ; 3 – 40°; 4 – 60°; 5 – 80°  
Fig. 3. Variation of spectral optical thickness of flame in marine diesel 6 ChN 24/36 by power 75 % from  $N_{e_{ном}}$ : 1 – TDC; 2 – 20° CAD after TDC; 3 – 40°; 4 – 60°; 5 – 80°

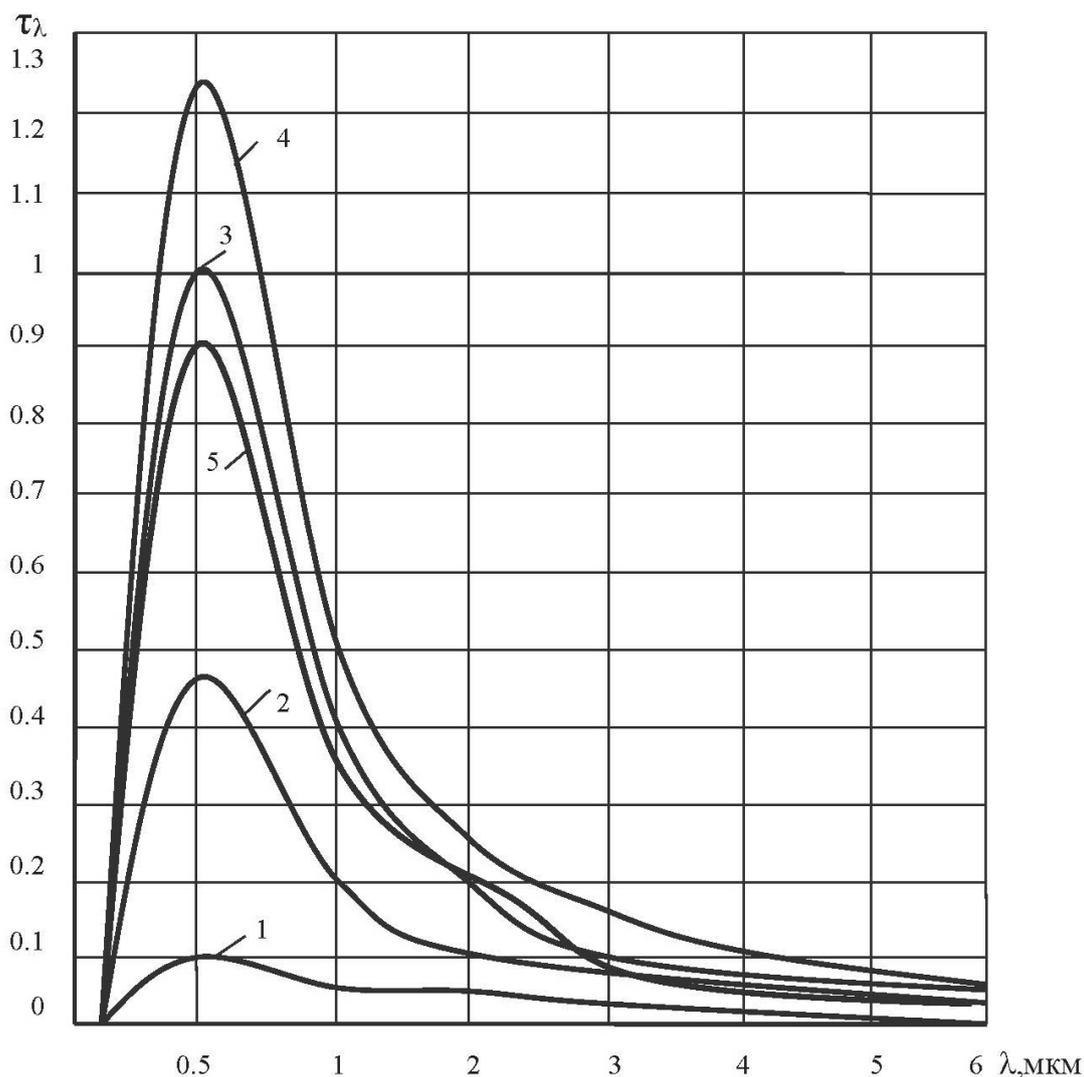


Рис. 4. Изменение спектральной оптической толщины пламени судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 100 % от  $N_{e_{ном}}$ : 1 – ВМТ; 2 – 20° ПКВ после ВМТ; 3 – 40°; 4 – 60°; 5 – 80°  
 Fig. 4. Variation of spectral optical thickness of flame in marine diesel 6 ChN 24/36 by power 100% from  $N_{e_{ном}}$ : 1 – TDC; 2 – 20° CAD after TDC; 3 – 40°; 4 – 60°; 5 – 80°

### Спектральная и интегральная степени черноты пламени в КС судового дизеля

Спектральная оптическая толщина пламени связана с его спектральной степенью черноты законом Бугера:

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - \exp(-\tau_{\lambda}). \quad (8)$$

Подставляя в (8) выражение (7), получим

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - \exp[-C(\lambda^{-1} - 0,1) \cdot \mu L] \quad (9)$$

Переход от спектральной степени черноты пламени к ее интегральной величине может быть осуществлен по зависимости

$$\varepsilon = \frac{\int_{0,5}^6 \{1 - \exp[-C(\lambda^{-1} - 0,1\lambda) \cdot \mu L]\} E_0 d\lambda}{\int_{0,5}^6 E_0 d\lambda}, \quad (10)$$

где  $E_0$  – интенсивность излучения абсолютно черного тела при температуре дизельного пламени, определяемая по закону Планка.

Величины интегральной степени черноты пламени для пяти режимов нагрузочной характеристики судового дизеля 6 ЧН 24/36, рассчитанные по зависимости (10), представлены на рис. 5. Из него видно, что с ростом нагрузки дизеля интегральная степень черноты пламени возрастает.

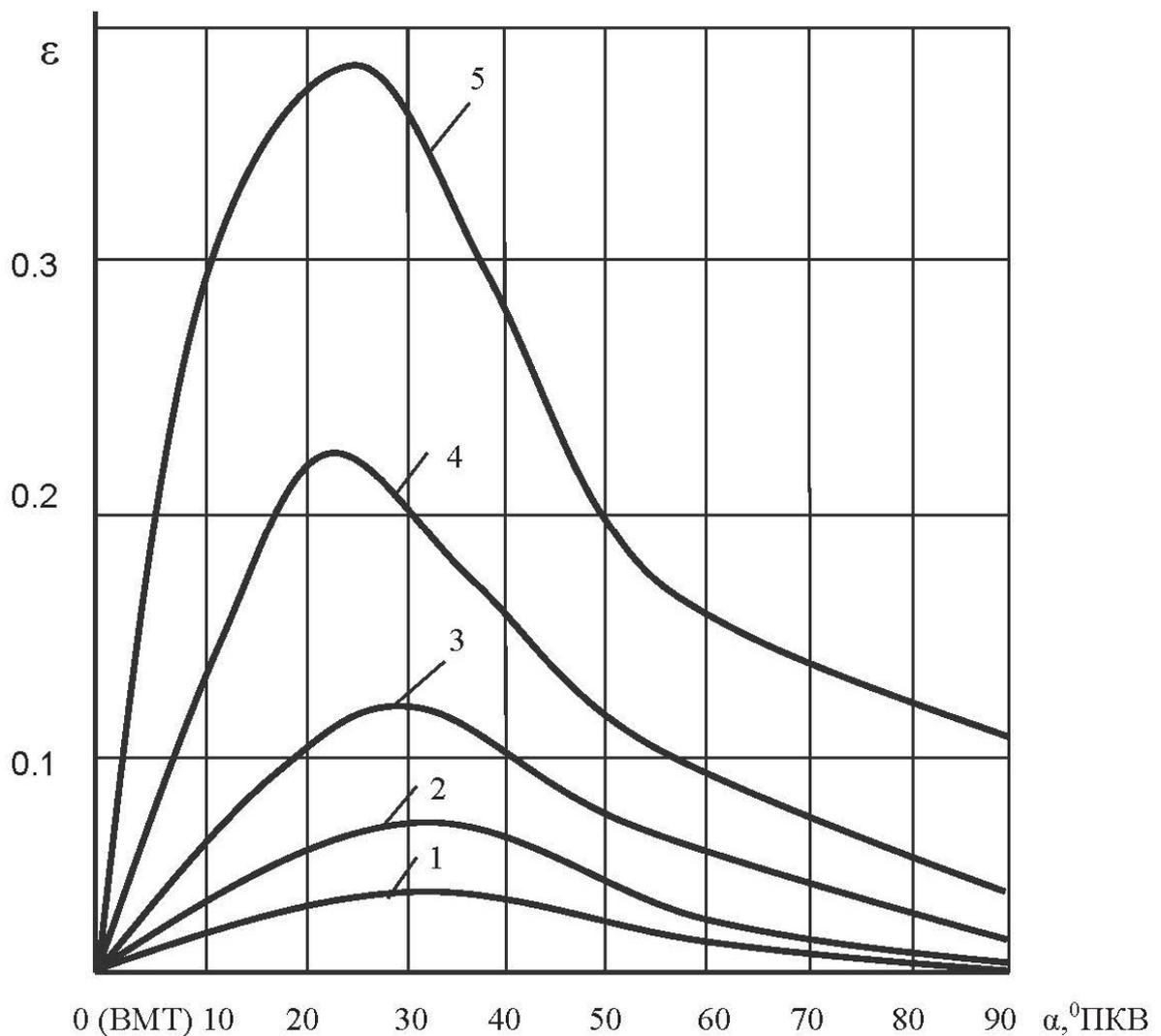


Рис. 5. Изменение интегральной степени черноты пламени при испытании судового дизеля 6 ЧН 24/36 по нагрузочной характеристике: 1 – холостой ход; 2 – 25 % от  $N_{e\text{ном}}$ ; 3 – 50 %; 4 – 75 %; 5 – 100 %

Fig. 5. Variation of integral degree of flame blackness by experience of marine diesel 6 ChN 24/36 from power data: 1 – single motion; 2 – 25 % from  $N_{e\text{ном}}$ ; 3 – 50 %; 4 – 75 %; 5 – 100 %

### **Выводы**

Предложенные в статье оценки спектральной оптической толщины пламени и его интегральной степени черноты были использованы в зональной ММ для расчета локальных результирующих потоков излучения на поверхностях, образующих КС [10]. Полученные в работе [10] расчетные данные по результирующим потокам излучения позволили установить наиболее нагруженные в тепловом отношении участки поверхностей поршня и крышки цилиндра судового дизеля 6 ЧН 24/36. Это центральная часть сферической выемки на поршне и несколько смещенная от центра часть поверхности крышки цилиндра. Сопоставление расчетных и известных экспериментальных данных по локальным результирующим потокам излучения показало их различие в среднем на 10–15 %, что вполне приемлемо для практики проектирования и доводки современных судовых дизелей.

### **Список литературы**

1. Блох А.Г., Журавлев А.Г., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
2. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York: Academic Press, 2003. 822 p.
3. Петриченко Р.М., Батулин С.А., Исаков Ю.Н. и др. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ / под ред. Р.М. Петриченко. Л.: Машиностроение, 1990. 328 с.
4. Израильский Ю.Г., Повалихина О.В., Руднев Б.И. Исследование оптических параметров и наноструктур частиц сажи судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии. 2016. Т. 1, № 3(33). С. 159–164.
5. Руднев Б.И., Курявый В.Г., Повалихина О.В. Экспериментальное исследование оптических параметров и наноструктур частиц сажи дизельного двигателя // Тепловые процессы в технике. 2016. Т., № 9. С. 416–422.
6. Руднев Б.И. Определение излучательной способности дизельного пламени // Динамика судовых энергетических установок и их систем. М.: В/О «Мортехинформреклама», 1991. С. 57–62.
7. Кузнецов В.Р. Сабельников В.Р. Турбулентность и горение. М.: Наука, 1988. 288 с.
8. Бакиров Ф.Г., Захаров В.М., Полещук И.З. и др. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив. М.: Машиностроение, 1989. 128 с.
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.

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