Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Том 77, № 3. С. 242–250.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Научная статья
УДК 621.431.74.016 DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2026-77-23 EDN: ZCOFHO

Методики экспериментального определения температуры пламени и концентрации частиц сажи в камере сгорания судового дизеля с использованием лазера

Борис Иванович Руднев [1], Ольга Владимировна Повалихина [2]
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия
[1, 2] povalichina@mail.ru

Аннотация. Приведены физические основы экспериментальных методик по определению температуры пламени и концентрации частиц сажи в камере сгорания судового дизеля и использованием лазера. Отмечены преимущества таких методик по сравнению с традиционными контактными способами.

Ключевые слова: судовой дизель, камера сгорания, температура пламени, концентрация частиц сажи, лазер

Для цитирования: Руднев Б. И, Повалихина О. В. Методики экспериментального определения температуры пламени и концентрации частиц сажи в камере сгорания судового дизеля с использованием лазера // Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Т. 77, № 3. С. 242–250.

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2026. Vol. 77, no. 3. P. 242–250.

MARINE POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Original article

Methods of experimental definition flame temperature and concentration soot particles in marine diesel combustion chamber with employment of laser

Boris I. Rudnev [1], Olga V. Povalikhina [2]
Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia
n-m-m@mail.ru, ORCID: 0009-0009-2361-0185

Abstract. Physical foundations of experimental methods from definition flame temperature and concentration soot particles in marine diesel combustion chamber with employment of laser are showing. Advantages such of methods from compare with conventional of means are doting.

Keywords: marine diesel, combustion chamber, temperature of flame, concentration of soot particles, laser

For citation: Rudnev B. I., Povalikhina O. V. Methods of experimental definition flame temperature and concentration soot particles in marine diesel combustion chamber with employment of laser. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University.* 2026; 77(3):242–250. (In Russ.).

© Руднев Б. И., Повалихина О. В., 2026

Введение

Современный этап проектирования новых образцов дизелей требует надежных данных по локальным значениям рабочего процесса и теплообмена в камере сгорания (КС). В частности, локальных данных по температуре рабочего тела (газа) и пламени, а также локальных плотностей тепловых потоков на поверхностях, образующих КС. Без этих данных на стадии проектирования невозможно достоверно оценить тепловое и напряженно-деформированное состояние (НДС) поршня, крышки и втулки цилиндра. Определение указанных выше данных чисто расчетным путем все еще вызывает значительные трудности, обусловленные несовершенством математических моделей (ММ), описывающих процессы горения топлива и локального теплообмена в цилиндре дизельного двигателя [1–5]. Целью настоящей статьи является представление и анализ методик экспериментального определения температуры пламени и концентрации частиц сажи в КС судового дизеля с использованием лазера (квантового генератора).

Методика экспериментального определения температуры пламени в камере сгорания судового дизеля

В основе методики экспериментального определения температуры пламени в КС судового дизеля в функции угла поворота коленчатого вала (ПКВ) с использованием лазера лежат известные положения об излучении сажистых пламен. Дизельное пламя можно представить как совокупность микрообъектов горящей смеси, неравномерно распределенных по объему КС, причем каждый микрообъем имеет сложную структуру, состоящую из горючего газа в смеси с окислителем (кислородом воздуха, поступившего в цилиндр), газообразных продуктов сгорания и мельчайших частиц углерода в виде сажи. При термодинамическом равновесии системы температура частиц сажи и газообразных продуктов сгорания равна температуре горящего газа. В этом случае как температура частиц сажи, так и температура газообразных продуктов сгорания характеризуют собой локальную температуру реакции непосредственно в очагах сгорания, т.е. действительную температуру пламени [6]. Метод высокотемпературной пирометрии дизельного пламени был разработан на кафедре «Двигатели внутреннего сгорания» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета им. Петра Великого. В этом методе истинная температура пламени определяется по величине отношения спектральных интенсивностей излучения пламени на двух выбранных участках спектра (λ_1=0,397 мкм и λ_2=0,634 мкм), т.е. в видимой области. Следует отметить, что в видимой и ультрафиолетовой областях спектра может иметь место излучение различных радикалов [7]. В частности, OH – 0,3064 мкм, CH – 0,39 и 0,4315 мкм, H – 0,336 мкм и др. радикал CC дает полосу в видимой области спектра 0,56 мкм. В то же время интегральная интенсивность подобных отдельных полос мала, а плотность их излучения незначительна. Анализ энергий перехода молекул газов, относящихся к устойчивым продуктам сгорания: H_2O, CO_2, CO, O_2 и N_2 показывает, что они имеют сравнительно низкий энергетический уровень. Энергии перехода в таких многоатомных молекулах составляют величину 0,1–10 ккал/моль. Фотоны с указанной энергией соответствуют инфракрасной области спектра. Видимой области спектра (0,4–0,76 мкм) соответствуют энергии перехода ~ 75–36 ккал/моль. Вместе с тем ни одна из перечисленных молекул продуктов сгорания дизельного топлива не имеет такого энергетического уровня. Частицы сажи имеют сплошной спектр излучения, а следовательно, и более высокую интегральную интенсивность излучения. В результате можно считать, что частицы сажи в видимой области спектра являются основным излучателем, определяющим эмиссионную способность дизельного пламени.

Теоретическими предпосылками указанного выше метода определения температуры пламени являются следующие положения, получившие неоднократное экспериментальное подтверждение во многих работах:

1. Средний диаметр частиц сажи в пламени (примерно 0,03–0,05 мкм) намного меньше максимальной длины волны излучения (λ_{max}=0,9 мкм) при ожидаемой температуре частиц ~ 2300 – 2700 К, т.е. пламя в дизеле имеет микродисперсную структуру.

2. Дизельное пламя в видимой области спектра обладает свойствами серого излучателя, а раскаленные частицы сажи излучают сплошной спектр и являются основным источником излучения в названной области спектра. Следует отметить, что независимость коэффициента поглощения (степени черноты) от длины волны распространяется нами лишь на ту узкую часть видимого спектра (0,397–0,634 мкм), в которой производятся измерения интенсивности излучения пламени и именно для такой узкой области видимого спектра (0,390–0,630 мкм), Л.М. Белинкий [8] экспериментально доказал справедливость выражения $(a_{\lambda T})_{ср}$=const. Однако неправомерно было бы распространение серого характера излучения пламени за пределы видимой области и особенно на инфракрасную часть спектра, так как здесь на сплошной спектр излучения сажи накладывается линейчатый спектр излучения многоатомных газов продуктов сгорания CO, CO_2, H_2O и др. [9], а зависимость излучательной и поглощательной способности пламени от длины волны становится существенной. Поэтому для количественной оценки теплового излучения дизельного пламени следует пользоваться не спектральной ε_λ, а интегральной ε излучательной способностью.

3. Дизельное пламя в исследуемой области видимого спектра является термодинамически равновесной системой, т.е. в течение времени, пока частица сажи, находящаяся в очаге горения, способна излучать в видимой области, количество тепла, теряемое частицей вследствие излучения, восполняется за счет подвода тепла к ней из зоны горения, а температура частицы остается равной температуре горения. По мере затухания очага горения частица остывает и прекращает излучать в видимой области. Таким образом, интенсивность излучения пламени в видимой области зависит только от его температуры.

В рассмотренном нами методе температура пламени в КС в функции угла ПКВ определяется по величине отношения спектральных интенсивностей его излучения на двух длинах волн, максимально разнесенных по видимой области спектра. Такой метод обладает существенными преимуществами, так как не требует последовательной регистрации излучения во всем спектральном диапазоне. Кроме того, при этом методе не играет роли абсолютное значение ординат кривой интенсивности излучения, важна лишь величина их отношения при одном и том же угловом положении коленчатого вала. Выбирая дины волн λ_1=0,397 мкм и λ_2=0,634 мкм и полагая, что дизельное пламя в этом диапазоне обладает свойствами серого тела и излучает спектр, подобный спектру излучения абсолютно черного тела, условие подобия можно представить в виде

$$\frac{E_0(\lambda_2,T_1)}{E_0(\lambda_1,T_1)}=\frac{E_{\text{п}}(\lambda_2,T_1)\varepsilon_{\text{п}}(\lambda_2,T_1)}{E_{\text{п}}(\lambda_1,T_1)\varepsilon_{\text{п}}(\lambda_1,T_1)}, \quad (1)$$

где $E_0(\lambda_2,T_1), E_0(\lambda_1,T_1)$ – интенсивность излучения абсолютно черного тела на длине волны λ_1 и λ_2 при температуре T_1; $E_{\text{п}}(\lambda_2,T_1), E_{\text{п}}(\lambda_1,T_1)$ – интенсивность излучения пламени на тех же длинах волн λ_1 и λ_2 и при той же температуре T_1; $\varepsilon_{\text{п}}(\lambda_2,T_1), \varepsilon_{\text{п}}(\lambda_1,T_1)$ – спектральная степень черноты пламени на длинах волн λ_1 и λ_2 при температуре T_1.

По условию серого характера излучения пламени в видимой области спектра степень его черноты не зависит от длины волны и температуры, т.е. $E_{\text{п}}(\lambda_1,T_1)=\varepsilon_{\text{п}}(\lambda_2,T_1)$. Поэтому условие (1) можно представить следующим образом:

$$\frac{E_0(\lambda_2,T_1)}{E_0(\lambda_1,T_1)}=\frac{E_{\text{п}}(\lambda_2,T_1)}{E_{\text{п}}(\lambda_1,T_1)}, \quad (2)$$

обозначив в (2)

$$\frac{E_0(\lambda_2,T_1)}{E_0(\lambda_1,T_1)}=\Pi_0(\lambda_1,\lambda_2,\mathrm{T}_1); \qquad \frac{E_{\text{п}}(\lambda_2,T_1)}{E_{\text{п}}(\lambda_1,T_1)}=\Pi_{\text{п}}(\lambda_1,\lambda_2,\mathrm{T}_1).$$

В итоге получим

$$\Pi_0(\lambda_1, \lambda_2, \mathrm{T}_1) = \Pi_{\text{п}}(\lambda_1, \lambda_2, \mathrm{T}_1)\,. \qquad (3)$$

Из выражения (3) следует, что если отношение интенсивностей излучения пламени на выбранных длинах волн λ_1 и λ_2 равно аналогичному отношению интенсивностей излучения абсолютно черного тела, то температура пламени равна температуре абсолютно черного излучателя. Подставляя в (3) значения интенсивностей излучения согласно закону излучения Вина, после преобразований получим уравнение для определения температуры дизельного пламени:

$$T_{\text{п}} = \frac{\mathrm{C}_2(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1\lambda_2 ln\left[\Pi_0(\lambda_1,\lambda_2,T_1)\left({}^{\lambda_2}/_{\lambda_1}\right)^5\right]}, \qquad (4)$$

где C_2 – вторая постоянная в законе Планка.

Регистрация интенсивностей излучения пламени в эксперименте производится с помощью фотоэлектронных умножителей типа ФЭУ-22, общий вид и детали которых представлены на рис. 1 и 2.

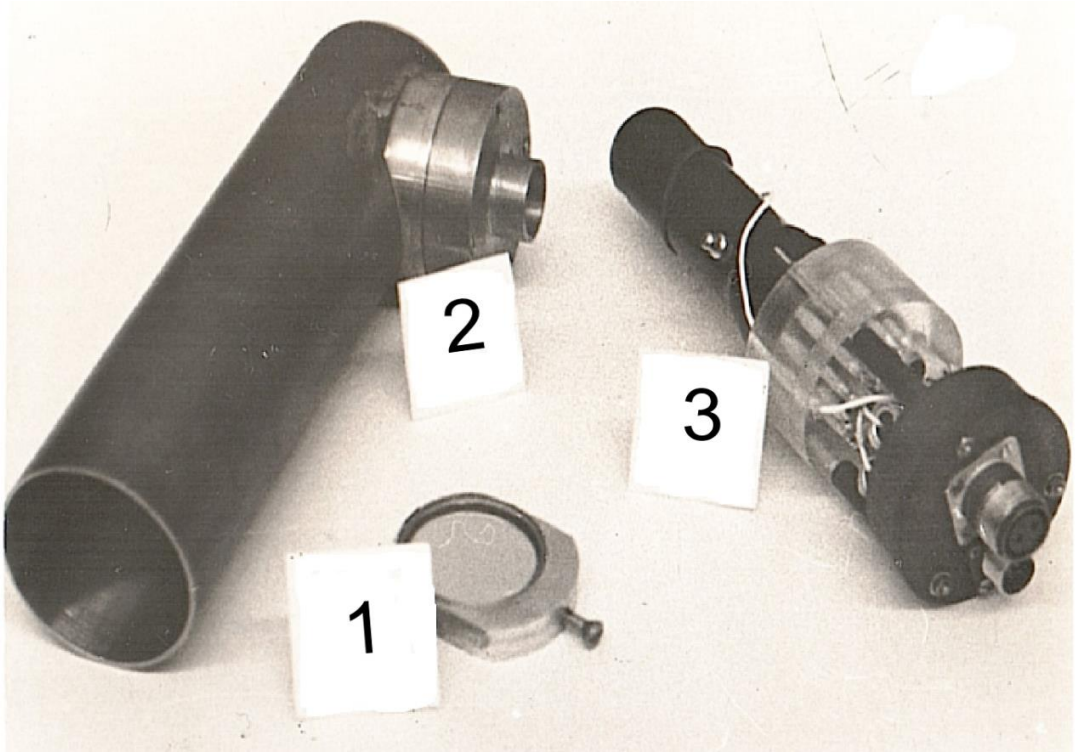


Рис. 1. Общий вид ФЭУ-22: 1 – светофильтр; 2 – светонепроницаемый корпус для ФЭУ; 3 – ФЭУ-22 с делителем напряжения

Fig. 1. Corporate look FGU-22: 1 – light filter; 2 – opaque corps for FGU-22; 3 – FGU-22 with divisor of tension

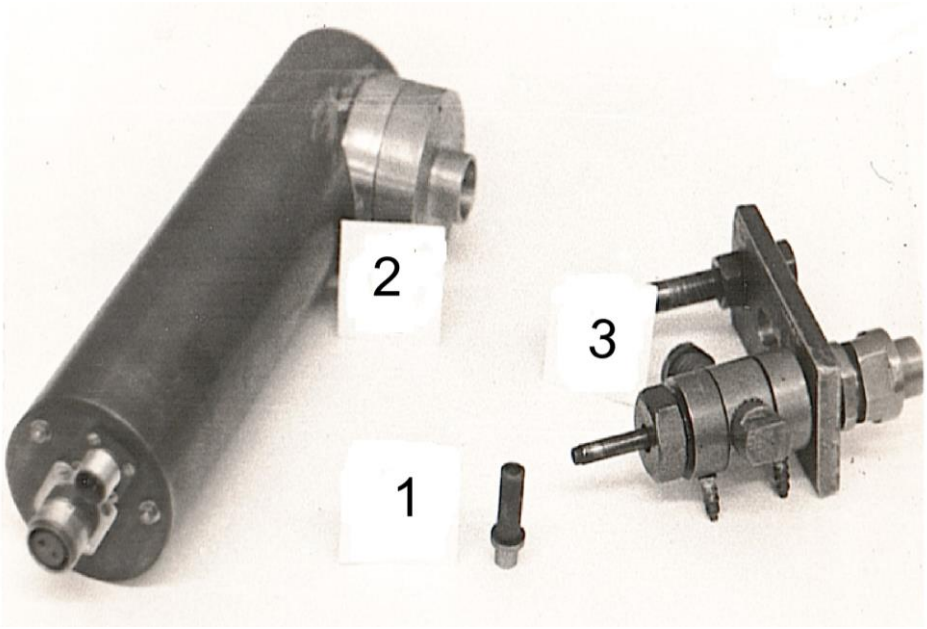


Рис. 2. Детали комплекса для измерения температуры пламени: 1 – обойма с кварцевым стеклом; 2 – ФЭУ-22 в сборке с корпусом; 3 – разобщительный кран с креплением
Fig. 2. Details of complex for definition flame temperature: 1 – shell with glass quartz; 2 – FGU-22 in muster with corps; 3 – disengaged flap with of strong

При этом может использоваться как одноканальная схема, показанная на рис. 3, так и двухканальная [10] (рис. 4).

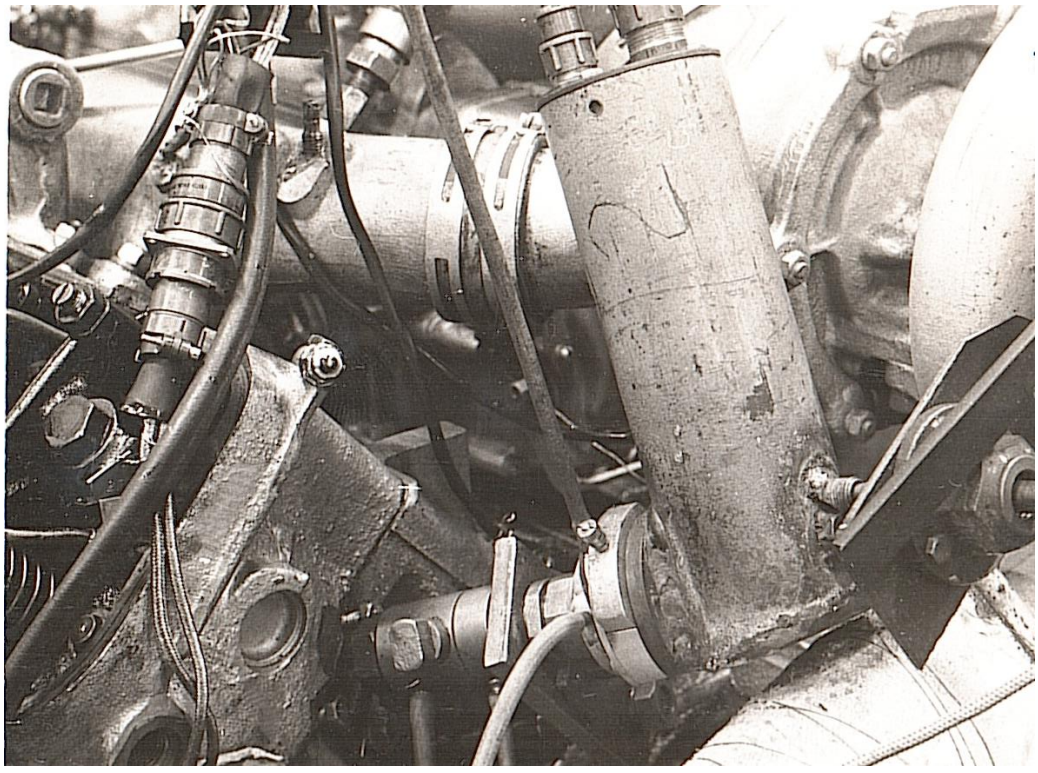


Рис. 3. Общий вид установки ФЭУ при одноканальной регистрации излучения пламени
Fig. 3. Corporate look installation FGU by one-canal definition radiation of flame

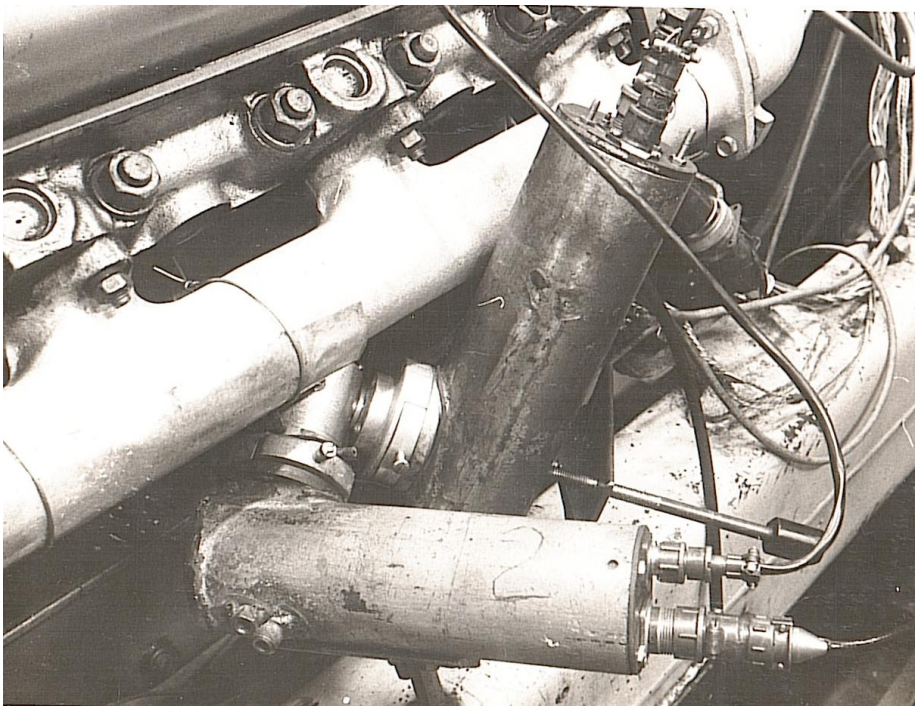


Рис. 4. Общий вид установки ФЭУ при двухканальной регистрации излучения пламени
Fig. 4. Corporate look installation FGU by two-canal definition radiation of flame

Методика определения концентрации частиц сажи в камере сгорания судового дизеля

Основу методики определения концентрации частиц сажи в КС дизеля положена гипотеза Бугера–Беера, которую запишем в виде [11]:

$$\frac{E_{\ell\lambda}}{E_{\text{н}\lambda}} = exp(-ck_\lambda \ell), \tag{5}$$

где c – концентрация поглощающих частиц; k_λ – спектральный показатель ослабления луча; ℓ – эффективная длина пути луча, которая равна 3,6V/F; V – объем газовой среды; F – площадь поверхности, ограничивающей этот объем.

Обозначив в (5) величину $1/k_\lambda \ell$ через M и выполнив простые преобразования, получим уравнение

$$\bar{\text{c}} = ln\frac{E_{\text{н}\lambda}}{E_{\ell\lambda}}, \tag{6}$$

где $\bar{\text{c}} = \text{c}/\text{M}$ – относительная безразмерная концентрация частиц сажи в КС дизеля; $E_{\text{н}\lambda}, E_{\ell\lambda}$ – спектральная интенсивность светового потока, соответственно, на входе в пламя и после прохождения им пламени.

При реализации этой методики в качестве стороннего источника для просвечивания КС использовался оптический квантовый генератор (лазер) типа ЛГ-28 с длиной волны излучения λ=0,630 мкм. Общий вид которого показан на рис. 5, а установка его в системе измерительного комплекса представлена на рис. 6.

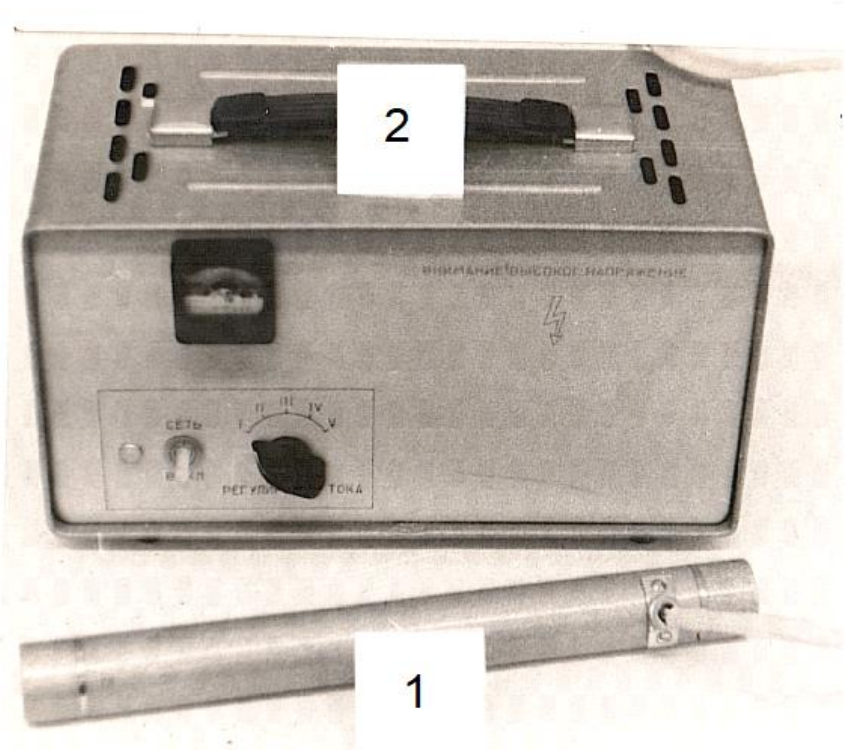


Рис. 5. Общий вид лазера ЛГ-28: 1 – лазер ЛГ-28; 2 – корпус
Fig. 5. Corporate look of laser LG-28: 1 – laser LG-28; 2 – corps of feed

Величина поглощения светового потока от лазера при прохождении его через пламя в КС определяется по результатам регистрации потоков излучения при трех условиях:

1. Дизель не работает, лазер включен. В этом случае регистрируется интенсивность излучения собственно лазера после прохождения света через два кварцевых окна и КС – $E_{л}$.
2. Дизель работает, лазер включен. При этом регистрируется суммарное излучение пламени и частично поглощенное пламенем излучение лазера – $E_{л+п}$.
3. Дизель работает, лазер выключен. Производится регистрация интенсивности излучения собственно пламени – $E_{п}$.

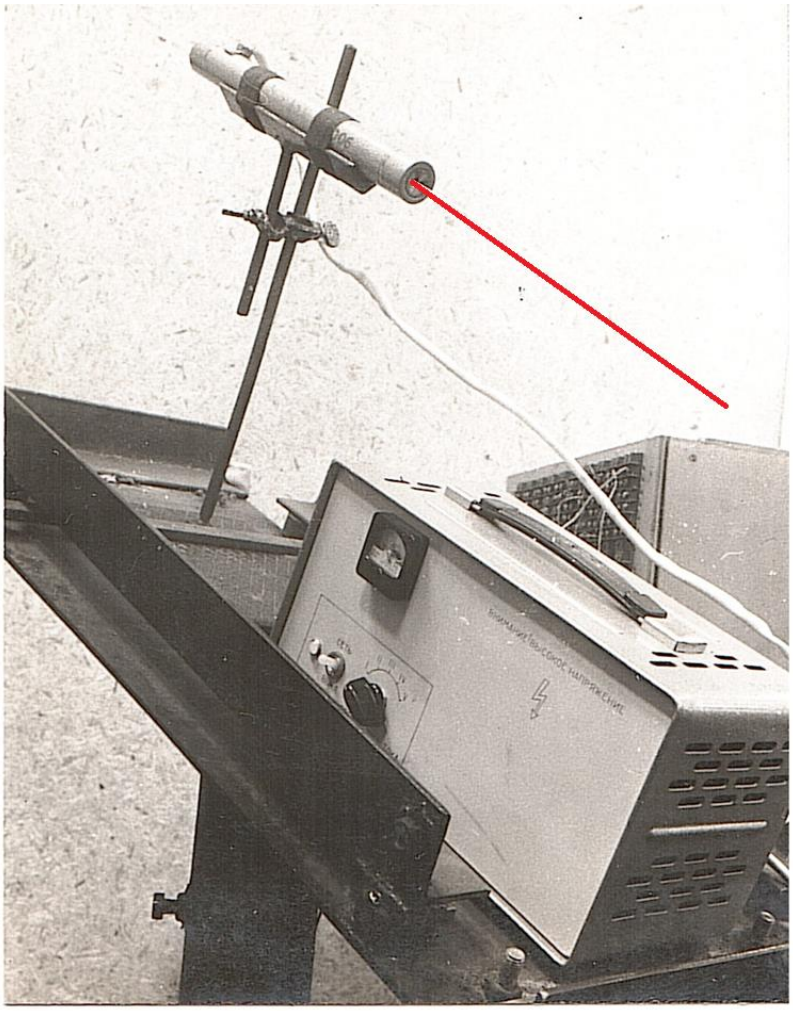


Рис. 6. Установка лазера ЛГ-28 в системе измерительного комплекса
Fig. 6. Installation of laser LG-28 in system of dimension complex

Переходя к ординатам соответствующих осциллограмм h в мм, относительную величину безразмерной концентрации частиц сажи в КС дизеля находим по уравнению

$$\bar{c} = ln\frac{h_л}{h_{л+п} - h_п}. \quad (7)$$

В результате градуировочных опытов была получена величина M=2,44·10^{-3} кг/м^3/ед.$\bar{c}$, которая дала возможность определить действительную концентрацию частиц сажи в КС в функции угла ПКВ [5].

Заключение

Полученные с использованием представленных в настоящей статье методик данные по локальным температурам пламени и локальным концентрациям частиц сажи в КС позволили существенно улучшить качество ММ для оценки теплового и НДС деталей судовых дизелей на стадии проектирования и доводки новых образцов [11].

Список источников

1. Сполдинг Д. В. Горение и массообмен. М. : Машиностроение, 1985. 240 с.
2. Кузнецов В. Р., Сабельников В. А. Турбулентность и горение. М. : Наука, 1986. 288 с.
3. Махов В. З. Процессы сгорания в двигателях. М. : МАДИ, 1980. 76 с.

4. Кавтарадзе Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 472 с.

5. Руднев Б. И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. Владивосток : Дальнаука, 2000. 221 с.

6. Дьяченко Н. Х., Батурин С. А., Ложкин В. Н. Экспериментальное исследование температуры сажистого пламени четырехтактных дизелей// Исследование рабочего процесса и систем быстроходных дизелей. Барнаул, 1976. Вып. 3(58). С. 17–25.

7. Махов В. З. К вопросу о методике определения содержания сажи в цилиндре дизеля // Известия вузов. Машиностроение. 1969. № 8. С. 82–87.

8. Белинкий Л. М. Теплоизлучение в камере сгорания быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия // Исследование рабочих процессов в быстроходных дизелях. М. : Машгиз, 1955. С. 83–113.

9. Блох А. Г. Основы теплообмена излучением. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1962. 330 с.

10. Руднев Б. И., Повалихина О. В. Контрольно-измерительный комплекс для исследования параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания судового высокооборотного дизеля // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2. Часть 1. С. 73–78.

11. Руднев Б. И., Повалихина О. В. Оценка влияния энергетических параметров излучения пламени на локальный радиационный теплообмен в камере сгорания судовых дизелей // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1. Часть 1. С. 135–141.

Сведения об авторах

Б. И. Руднев – доктор технических наук, профессор кафедры «Холодильная техника и инженерные системы».

О. В. Повалихина – доцент, доцент кафедры «Холодильная техника и инженерные системы».

Information about the authors

B. I. Rudnev – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Refrigeration and Engineering Systems.

O. V. Povalikhina – Accociate Professor, Accociate Professor of the Department of Refrigeration and Engineering Systems.

Статья поступила в редакцию 18.09.2026; одобрена после рецензирования 22.09.2026; принята к публикации 22.09.2026.

The article was submitted 18.09.2026; approved after reviewing 22.09.2026; accepted for publication 22.09.2026.

© Руднев Б. И., Повалихина О. В., 2026.

«Методики экспериментального определения температуры пламени и концентрации частиц сажи в камере сгорания судового дизеля с использованием лазера» [Руднев Б. И., Повалихина О. В.] распространяется под лицензией Creative Commons Attribution (CC BY 4.0).