

УДК 621.43:681.5

DOI: 10.30987/article_5cda64cebb6ba2.01228392

А.А. Обозов, М.А. Новиков, Е.В. Дмитриевский

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ ПО ЗАДАННОМУ ЗАКОНУ ПОДАЧИ ТОПЛИВА И ПРОВЕРКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ДИЗЕЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Приведены результаты расчета характеристик тепловыделения по заданному закону подачи топлива по разработанной программе в среде Microsoft Excel. Получено экспериментальное подтверждение математической модели взаимосвязи

подачи топлива и тепловыделения в цилиндре дизельного двигателя Д243Е.

Ключевые слова: дизельный двигатель, программа расчета, закон подачи топлива, характеристики тепловыделения, опытная проверка программы.

А.А. Obozov, М.А. Novikov, E.V. Dmitrievsky

CALCULATION OF HEAT GENERATION ACCORDING TO SPECIFIED LAW OF FUEL FEEDING AND SIMULATOR VERIFICATION BASED ON DIESEL ENGINE

The results of a heat generation characteristic calculation according to a specified law of fuel feeding on the program developed in Microsoft Excel environment are shown. There is obtained an experimental confirmation of the model of the interconnection be-

tween fuel feeding and heat generation in the cylinder of D243E diesel engine.

Key words: diesel engine, calculation program, law of fuel feeding, heat generation characteristics, program test verification.

Характеристики процесса сгорания в дизельных двигателях внутреннего сгорания с объемным и объемно-пленочным смесеобразованием зависят от динамики и структуры факелов распыленного топлива, их числа и ориентации в пространстве, взаимодействия факелов с воздушным зарядом цилиндра и стенками камеры сгорания. Это необходимо учитывать при разработке математической модели смесеобразования и сгорания в дизельных двигателях, а также при решении практических вопросов по интенсификации, оптимизации и управлению характеристиками процесса сгорания [1-6]. При этом достоверность математической модели и эффективность практических решений зависят от того, насколько точно учтены особенности динамики и структуры факелов распыленного топлива в дизельном двигателе.

Методы экспериментального исследования характеристик распыливания топлива дизельными форсунками не дают полной информации о динамике и структуре нестационарной импульсной струи топлива, впрыскиваемой в высокотемпературную среду с переменной плотностью,

особенно при начавшемся горении. Такие исследования проводятся, как правило, на специальных безмоторных моделирующих установках (дизельных бомбах). Так как измерить параметры топливного факела непосредственно в цилиндре работающего дизельного двигателя технически трудно из-за высоких давлений и температур цикла, излучения пламени, нестабильности впрыска топлива от цикла к циклу и др., известны только отдельные попытки изучения динамики и структуры топливных факелов непосредственно на работающем дизельном двигателе или его модели путем кино съемки факела и стробоскопического отбора проб газового топлива в различных точках поперечного сечения факела.

Для исследования процессов распыливания топлива в дизельных бомбах применяют фотографирование и кино съемку топливного факела, отбор топлива из различных его зон с помощью сотовых уловителей или трубчатых зондов, улавливание капель распыленного топлива на законченную пластинку. Фото- и кинорегистрация дает представление о геометрии топливного факела и динамике ее изменения, но почти не раскрывает внутреннюю

структуру в связи с его высокой оптической плотностью. Вследствие этого практически не дают дополнительной информации о структуре топливного факела дизельных двигателей и более сложные методы: шпирен-метод и голография. Отбор топлива зондами и впрыск на пластинки позволяют определить распределение потоков жидкого топлива на различных расстояниях от оси факела или сопла и дисперсность распыливания, суммарную за период впрыска. Таким образом, измерения также не дают представления о внутренней структуре факела в различных его сечениях и динамике ее изменения. Полезную информацию о дисперсности распыленного топлива в определенном сечении факела можно получить с помощью установки со стробоскопическим приспособлением в виде вращающегося диска со щелью, через которую в определенный момент впрыска только часть факела попадает на улавливающую пластинку, расположенную за диском. Однако получаемые таким методом данные недостаточно достоверно отображают действительную структуру факела в его поперечном сечении, так как взаимодействие топливной струи с диском стробоскопа нарушает нормальное развитие факела, а в связи с различием скоростей капель в его поперечном сечении диск стробоскопа вырезает из факела объем в форме эпюры скоростей капель. Вследствие этого основную часть массы топлива, улавливаемого на пластинку, составляют капли, летящие с большой скоростью в плотном осевом потоке струи.

В многочисленных исследовательских работах отечественных и зарубежных авторов, в том числе в [1; 3-5], рассмотрены кинетические уравнения испарения и выгорания распыленного топлива в цилиндре дизельного двигателя, учитывающие характеристики впрыска и распыливания топлива, параметры заряда цилиндра, физико-химические характеристики топлива, особенности его испарения в ди-

зельном двигателе, кинетику цепных реакций в неоднородной топливовоздушной смеси. На основании аналитических и эмпирических зависимостей протекания указанных процессов разработан метод расчета процесса сгорания топлива и характеристик тепловыделения в дизельных двигателях [5].

По рассмотренной методике была разработана программа расчета характеристик тепловыделения по заданному закону подачи топлива в среде Microsoft Excel. Выполненный расчет для дизельного двигателя Д243Е подтвердил хорошее согласование расчетных характеристик тепловыделения и индикаторных диаграмм с экспериментальными данными.

Исходные данные для расчета (дизельный двигатель Д243Е):

Молекулярная масса воздуха $m=28,9$ кг/кмоль.

Диаметр цилиндра $D=0,110$ м.

Ход поршня $S=0,125$ м.

Постоянная КШМ $\lambda=R/L=0,2717$.

Степень сжатия $\varepsilon=16$.

Количество сопловых отверстий форсунки $i_c=6$.

Диаметр сопловых отверстий $d_c=0,2$ мм.

Длина свободного пролета факела $L_{ст}=0,038$ м.

Характеристики топлива:

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива $M_0=0,5$ кмоль.

Плотность топлива (при 323 К) $\rho_T = 825$ кг/м³.

Динамический коэффициент вязкости топлива (при 323 К) $\mu_T = 3 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Коэффициент поверхностного натяжения топлива (при 323 К) $\zeta_T = 28 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

Коэффициенты расчетных формул:

Константа времени испарения крупных капель $A_z=4,6$ с⁻¹.

Коэффициенты уравнения безразмерной характеристики впрыска топлива

$$\sigma = f(\Phi): a=3,9; b=1,73; c=3,5; m_1=1,5; m_2=2; m_3=2; m_4=4; \Phi_1=0,333.$$

Коэффициенты уравнения характеристики тепловыделения на участке топливоподачи:

$$a_0=4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}); a_1=10^{-3} \text{ с}; a_2=15 \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}); b_0=0,1.$$

Коэффициент турбулизации заряда

$$T_y=1.$$

Минимальное значение степени использования воздушного заряда цилиндра $\xi_{во}=0,42$; её абсцисса $\Phi_{20}=0,33$.

Условная энергия активации предпламенных реакций $E_a = 23,8 \cdot 10^3$ кДж/кмоль.

Коэффициент в формуле расчета среднего диаметра капель $E_{32} = 1,7$.

Коэффициент поправочной функции константы испарения топлива $\gamma = 1$.

Коэффициент в формуле определения дальности топливного факела $D_{\phi} = 2,9$.

Коэффициент в формуле угла конуса топливного факела $A_{\text{ст}} = 0,0055$.

Степень уменьшения скорости испарения топлива на стенке (минимальная) $\chi_0 = 0,7$.

Параметры режима работы двигателя:

Частота вращения вала двигателя $n = 1500$ мин⁻¹.

Давление продувочного воздуха (абс.) $P_s = 0,09$ МПа.

Температура наддувочного воздуха $T_s = 315$ К.

Коэффициент наполнения $\eta_v = 0,96$.

Коэффициент остаточных газов $\gamma = 0,05$.

Коэффициент избытка воздуха при сгорании $\alpha_p = 1,86$.

Продолжительность впрыска топлива $\phi_{\text{впр}} = 29^\circ$ пкв.

Момент (угол поворота коленчатого вала до ВМТ) начала впрыска топлива $\phi_n = 17^\circ$ пкв.

Цикловая подача топлива $G_{\text{ц}} = 1,247 \cdot 10^{-4}$ кг.

Недожог топлива (в долях от цикловой подачи) $\Delta_{\text{т}} = 0,01$.

Момент (угол поворота коленчатого вала) окончания расчета тепловыделения по уравнениям участка топливоподачи $\phi_k = 90^\circ$ пкв.

Расчет характеристик тепловыделения

1. Расчет параметров заряда:

Рабочий объем цилиндра $V_h = \pi D^2 S / 4$, м³.

Объем камеры сжатия $V_c = V_h / (\varepsilon - 1)$, м³.

Количество свежего заряда $M_{\text{св}} = \eta_v \cdot 10^3 p_s V_h / (8,312 T_s)$, кмоль.

Количество газов в цилиндре $M_v = M_{\text{св}} (1 + \gamma)$, кмоль.

Цикловая подача топлива (если в исходных данных $G_{\text{ц}} = 0$).

Коэффициент избытка воздуха при сгорании (если в исходных данных $G_{\text{ц}} = 0$).

2. Расчет констант испарения топлива:

Средняя скорость истечения топлива из распылителя форсунки

$$U_0 = \frac{24 G_u n}{0,75 \rho_m \pi d_c^2 i_c \phi_{\text{впр}}}, \text{ м/с.}$$

Критерий M , $M = \mu_m^2 / (\rho_m d_c \zeta_m)$.

Критерий Вебера $We = U_0^2 \rho_m d_c / \zeta_m$.

Плотность заряда в конце условного сжатия $\rho_e = m M_v / V_c$, кг/м³.

Симплекс $\rho = \rho_e / \rho_m$.

Средний поверхностный диаметр капель

$$d_{32} = 10^6 E_{32} d_c M^{0,0733} / (\rho We)^{0,266}, \text{ мкм.}$$

Давление в цилиндре в конце условного сжатия $p_c = p_s \varepsilon^{1,37}$, МПа.

Константа испарения топлива

$$K = 1 / (10^6 p_c), \text{ м}^2/\text{с.}$$

Относительная константа испарения топлива (теоретическая)

$$b_{u.m.} = 10^{12} K / d_{32}^2, \text{ с}^{-1}.$$

Поправка, учитывающая фактические условия испарения, $Y - yf = \gamma n \cdot 10^{-3} = 1$.

Относительная константа испарения (действительная) $b_u = Y b_{u.m.}$, с⁻¹.

Расчет временных и угловых параметров диаграммы

Объем цилиндра в момент начала впрыска топлива,

$$V_n = V_c (1 + (\varepsilon - 1) \sigma_n / 2), \text{ м}^3,$$

где

$$\sigma_n = 1 - \cos \varphi_n + \frac{1}{\lambda} (1 - \cos(\arcsin(\lambda \sin \varphi_n))).$$

Давление газов в момент φ_n

$$p_n = p_s ((V_c + V_h) / V_n)^{1,37}, \text{ МПа.}$$

Температура газов в момент φ_n

$$T_n = 10^3 p_n V_n / (8,312 M_v), \text{ К.}$$

Период задержки воспламенения

$$\tau_i = 3,8 \cdot 10^{-6} (1 - 1,6 \cdot 10^{-4} n) \sqrt{\frac{T_n}{p_n}} e^{\frac{E_a}{8,312 T_n}}, \text{ с;}$$

$$\Delta \varphi_i = 6n \tau_i, \text{ }^\circ \text{ пкв.}$$

Момент воспламенения

$$\varphi_e = \varphi_n + \Delta \varphi_i, \text{ }^\circ \text{ пкв.}$$

Момент окончания впрыска топлива
 $\varphi_{к.в.} = \varphi_n + \varphi_{впр}, \text{°ПКВ.}$

Продолжительность испарения и сгорания крупных капель $\tau_u = A_z / (b_u \alpha_p^{0.6}), \text{с.}$

Продолжительность сгорания
 $\varphi_s = \varphi_{впр} - \Delta\varphi_i + 6n\tau_u, \text{°ПКВ.}$

Момент окончания горения
 $\varphi_{к.г.} = \varphi_s + \varphi_z, \text{°ПКВ.}$

Момент достижения факелом стенки камеры сгорания

$$\tau_{cm} = D_\phi \sqrt{2L_{cm}^2 \rho / (d_c U_0 We^{0.21} M^{0.16}), \text{с;}}$$

$$\varphi_{cm} = \varphi_n + 6n\tau_{cm}, \text{°ПКВ.}$$

Продолжительность взаимодействия фронта факела со стенкой

$$\varphi_\phi = 6nA_{cm} 2\tau_{cm} \sqrt{\rho We^{0.32} / M^{0.07}}, \text{°ПКВ.}$$

Коэффициент в формуле, определяющей характер испарения топлива на стенке,

$$c_m = (1 - \chi_0) / 0,485.$$

Расчет характеристик впрыска и испарения топлива

Текущий ход поршня

$$S = L + R - (RC \cos \varphi + \sqrt{L^2 - R^2 (\sin \varphi)^2}).$$

Относительное время впрыска (рис. 1)

Скорость испарения топлива (рис. 3):

$$\text{если } \varphi_n < \varphi \leq \varphi_{к.в.} \Rightarrow \frac{d\sigma_u}{d\tau} = \frac{\sigma}{\tau} (1 - B^{3/2}) \chi,$$

$$\text{если } \varphi_{к.в.} < \varphi \leq \varphi_{к.} \Rightarrow \frac{d\sigma_u}{d\tau} = \frac{1}{\tau_{впр}} \left((1 - b_u (\tau - \tau_{впр}))^{3/2} - B^{3/2} \right) \chi.$$

Доля испарившегося топлива (рис. 4)

$$\sigma_u = \int_{\varphi_n}^{\varphi} (d\sigma / d\tau) d\varphi / 6n.$$

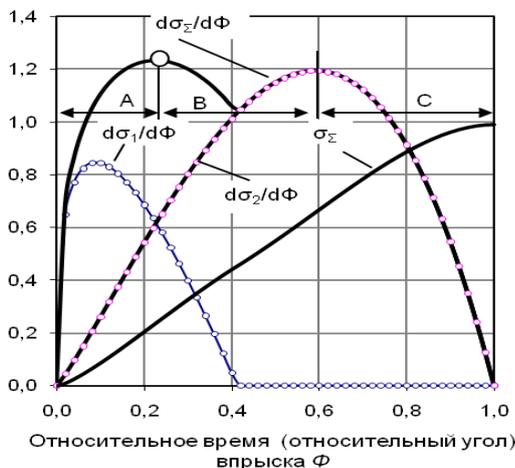


Рис. 1. Дифференциальные ($d\sigma_1/d\varphi$, $d\sigma_2/d\varphi$, $d\sigma_z/d\varphi$) и интегральные (σ_1 , σ_2 , σ_z) характеристики процесса впрыска

$$\Phi = (\varphi - \varphi_n) / \varphi_{впр}.$$

Доля впрыснутого топлива:

$$\text{если } 0 < \Phi \leq \Phi_1 \Rightarrow \sigma_1 = a \left(\frac{1}{m_1} \Phi^{m_1} - \frac{b}{m_2} \Phi^{m_2} \right),$$

иначе $\sigma_1 = \sigma_1(\Phi_1)$.

$$\sigma_2 = c \left(\frac{1}{m_3} \Phi^{m_3} - \frac{1}{m_4} \Phi^{m_4} \right).$$

Интегральная характеристика впрыснутого топлива (рис. 2)

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$$

Текущее время от начала впрыска $\tau = (\varphi - \varphi_n) / 6n.$

Квадрат относительного диаметра испаряющейся капли

$$B = 1 - b_u \tau$$

при $B < 0 \Rightarrow B = 0.$

Степень уменьшения скорости испарения топлива на стенке:

$$\text{если } \varphi \leq \varphi_{cm} \Rightarrow \chi = 1.$$

Относительное время взаимодействия фронта факела со стенкой:

$$\text{если } \varphi > \varphi_{cm} \Rightarrow \Phi_{cm} = (\varphi - \varphi_{cm}) / \varphi_\phi.$$

Степень уменьшения скорости испарения топлива на стенке:

$$\text{если } \varphi > \varphi_{cm} \Rightarrow \chi = 1 - c_m.$$



Рис. 2. Характеристика впрыска топлива

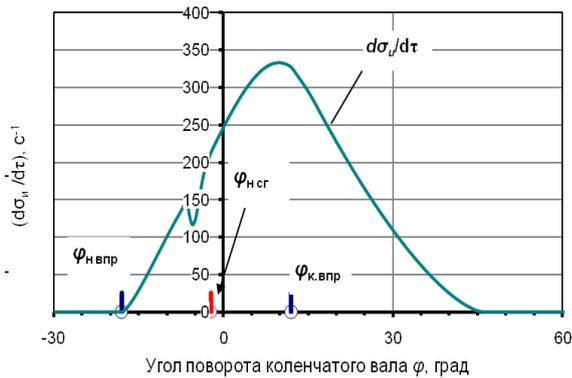


Рис. 3. Скорость испарения топлива $d\sigma_u/d\tau$

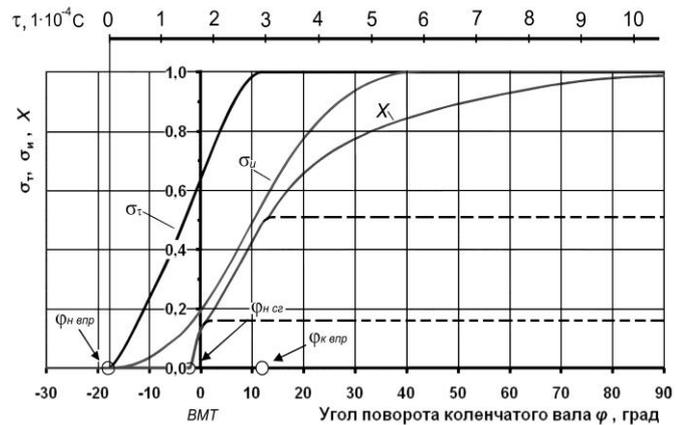


Рис. 4. Доля впрыснутого топлива σ_τ , доля испарившегося топлива σ_u , характеристика тепловыделения X

Доля паров, образовавшихся за период задержки воспламенения,

$$\sigma_{ui} = \sigma_u [\varphi_e] \text{ при } \varphi = \varphi_e.$$

Расчет характеристик тепловыделения на участке топливоподачи

Коэффициенты расчетных формул:

$$A_0 = a_0; A_1 = a_1; A_2 = a_2 n^{0.5}.$$

Объем цилиндра в момент воспламенения (если $\varphi = \varphi_e$):

$$\sigma_e = 1 - \cos \varphi_e + \frac{1}{\lambda} (1 - \cos(\arcsin(\lambda \sin \varphi_e))) ;$$

$$V_e = V_c (1 + (\varepsilon - 1) \sigma_e / 2) .$$

Тепловыделение при начальной вспышке топлива (если $\varphi \geq \varphi_e$ и $x_0 < \sigma_{ui}$):

- функция выгорания паров топлива, образовавшихся за τ_i (рис. 5),



Рис. 5. Функция скорости выгорания паров топлива (образовавшихся за период τ_i) P_0 и функция P_2

$$P_0 = A_0 G_u (\sigma_{ui} - x_0) (b_0 \sigma_{ui} + x_0) / V_e ;$$

- скорость тепловыделения

$$\frac{dx}{d\tau} = \left(P_0 + \frac{d\sigma_u}{d\tau} \right) / \left(1 + A_1 \left(P_0 + \frac{d\sigma_u}{d\tau} \right) \right) ;$$

- доля выгоревших паров топлива, образовавшихся за период задержки воспламенения,

$$x_0 = \int_{\varphi_e}^{\varphi} P_0 \frac{d\varphi}{6n} ;$$

- общая доля выгоревшего топлива

$$x = \int_{\varphi_e}^{\varphi} \frac{dx}{d\tau} \frac{d\varphi}{6n} .$$

Тепловыделение после вспышки топлива (если $x_0 \geq \sigma_{ui}$ и $\varphi_e < \varphi \leq \varphi_k$):

- скорость догорания топлива

$$P_2 = A_2 G_u (\alpha_p - x) (\sigma_u - x) / V_c ;$$

- относительная скорость тепловыделения

$$\frac{dx}{d\tau} = \left(\frac{d\sigma_u}{d\tau} + P_2 \right) / \left(1 + A_1 \frac{d\sigma_u}{d\tau} \right) ;$$

- доля выгоревшего топлива

$$x = \int_{\varphi_e}^{\varphi} \frac{dx}{d\tau} \frac{d\varphi}{6n} .$$

Расчет характеристик тепловыделения на участках развитого горения и догорания

$$\text{Коэффициент } h = 1 / (\sqrt{2} \Phi_{z0}).$$

$$\text{Коэффициент } c_0 = (1 - \xi_{00}) / 0,485.$$

Параметры точки φ_k :

$$x_k = x[\varphi_k] - \text{значение } x \text{ при } \varphi = \varphi_k;$$

$$\Phi_{zk} = (\varphi_k - \varphi_0) / \varphi_z;$$

$$\xi_{ок} = 1 - 2c_0 h \Phi_{zk} / (\sqrt{\pi} \exp(h \Phi_{zk}^2));$$

$$\alpha_{mk} = \xi_{ок} \alpha_p / x_k;$$

$$A_3 = (dx/d\tau)_k / (\alpha_{mk} (1 - \Delta_m - x_k) x_k).$$

Показатели процесса сгорания на участке $\varphi_k < \varphi \leq \varphi_{k.2}$:

- относительная продолжительность горения

$$\Phi_x = (\varphi - \varphi_0) / \varphi_z;$$

- степень использования воздушного заряда

$$\xi_0 = 1 - 2c_0 h \Phi_x / (\sqrt{\pi} \exp(h \Phi_x^2));$$

- текущее значение коэффициента избытка воздуха в зоне горения

$$\alpha_m = \xi_0 \alpha_p / x;$$

- относительная скорость тепловыделения (рис. 6)

$$\frac{dx}{d\tau} = A_3 \alpha_m (1 - \Delta_m - x) x;$$

- доля выгоревшего топлива (рис. 4,

б)

$$x = x_k + \int_{\varphi_k}^{\varphi} \frac{dx}{d\tau} \frac{d\varphi}{6n}.$$

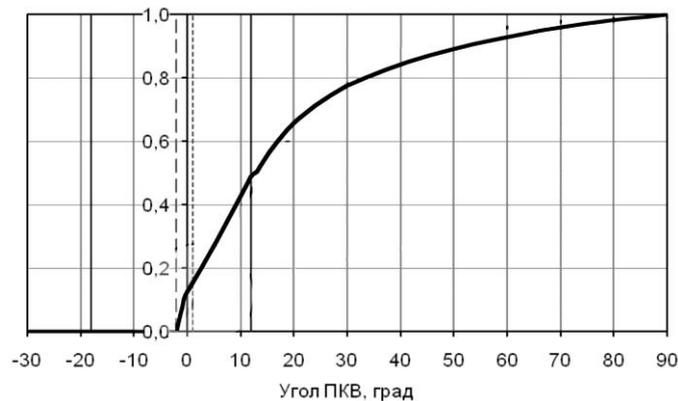


Рис. 6. Интегральная характеристика тепловыделения (доля выгоревшего топлива)

Таким образом, разработанная программа расчета характеристик тепловыделения по заданному закону подачи топлива в среде Microsoft Excel позволяет получить исчерпывающие количественные значения характеристик тепловыделения в цилиндре

двигателя. Выполненный расчет для дизельного двигателя Д243Е подтвердил хорошее согласование расчетных характеристик тепловыделения и индикаторных диаграмм с экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алемасов, В.Е. Основы теории физико-химических процессов в тепловых двигателях и энергетических установках / В.Е. Алемасов [и др.]. – М.: Химия, 2000. – 520 с.
2. Двигатели внутреннего сгорания: учебник: в 3 кн. / В.Н. Луканин, И.В. Алексеев, М.Г. Шатров [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. шк., 1995.
3. Дмитриевский, Е.В. Электронное управление двигателями внутреннего сгорания: учеб. пособие / Е.В. Дмитриевский, А.А. Обозов, М.А. Новиков. – Брянск: БГТУ, 2018. – 195 с.
4. Иванченко, Н.Н. Рабочий процесс дизелей с камерой в поршне / Н.Н. Иванченко, Б.Н. Семенов, В.С. Соколов. – Л.: Машиностроение, 1972. – 228 с.
5. Разлейцев, Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях / Н.Ф. Разлейцев. – Харьков: Изд-во Харьков. ун-та, 1980. – 169 с.
6. Рогалев, В.В. Курсовое проектирование двигателей внутреннего сгорания: Тепловой расчет: учеб. пособие / В.В. Рогалев, Е.В. Дмитриевский. – Брянск: БГТУ, 2017. – 131 с.

1. Alemasov, V.E. *Fundamentals of Theory of Physical-Chemical Processes in Heat-Engines and Power Plants* / V.E. Alemasov [et al.]. – М.: Chemistry, 2000. – pp. 520.
2. *Internal Combustion Engines: manual in 3 Vol.* / V.N. Lukanin, I.V. Alexeev, M.G. Shatrov [et al.]; under the editorship of V.N. Lukanin. – М.: Higher School, 1995.
3. Dmitrievsky, E.V. *Electronic Control of Internal Combustion Engines: manual* / E.V. Dmitrievsky, A.A. Obozov, M.A. Novikov. – Bryansk: BSTU, 2018. – pp. 195.
4. Ivanchenko, N.N. *Working Process of Diesel Engines with Chamber in Piston* / N.N. Ivanchenko, B.N. Semyonov, V.S. Sokolov. – L.: Mechanical Engineering, 1972. – pp. 228.
5. Razleitsev, N.F. *Modeling and Optimization of Combustion Procedure in Diesel Engines* / N.F. Razleitsev. – Kharkov: Kharkov University Publishers, 1980. – pp. 169.
6. Rogalev, V.V. *Course Design of Internal Combustion Engines: Heat Calculation: manual* / V.V. Rogalev, E.V. Dmitrievsky. – Bryansk: BSTU, 2017. – pp. 131.

Статья поступила в редакцию 1.03.19.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного инженерно-технологического университета
Заикин А.Н.

Статья принята к публикации 23. 04. 19.

Сведения об авторах:

Обозов Александр Алексеевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Тепловые двигатели» Брянского государственного технического университета, e-mail: obozov51@mail.ru.

Новиков Максим Александрович, аспирант кафедры «Тепловые двигатели» Брянского государ-

Obozov Alexander Alexeevich, Dr. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Heat Engines", Bryansk State Technical University, e-mail: obozov51@mail.ru.

Novikov Maxim Alexandrovich, Post graduate student of the Dep. "Heat Engines", Bryansk State Tech-

ственного технического университета, e-mail: novikovmax14@yandex.ru.

Дмитриевский Евгений Владимирович, к.т.н., доцент кафедры «Тепловые двигатели» Брянского государственного технического университета, e-mail: Dmitr-bstu@yandex.ru.

nical University, e-mail: novikovmax14@yandex.ru.

Dmitrievsky Evgeny Vladimirovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Heat Engines", Bryansk State Technical University, e-mail: Dmitr-bstu@yandex.ru.