

УДК 621.436: 621.43.019.2

## ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Гаврилов А.А., Гоц А.Н.

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: hotz@mail.ru

Проведен анализ эмпирических и полуэмпирических зависимостей для определения продолжительности задержки воспламенения топливо-воздушной смеси в поршневых двигателях с принудительным воспламенением, а также с воспламенением от сжатия. При математическом моделировании цикла поршневого двигателя определение времени задержки воспламенения смеси позволяет прогнозировать начало процесса сгорания, а кроме того, оптимальное по индикаторной работе расположение участка быстрого нарастания давления относительно ВМТ. Она решается при любой сложности математической модели цикла и является основной при сравнении расчётной и индикаторной диаграмм цикла поршневого двигателя. Предложена эмпирическая зависимость для определения времени задержки воспламенения топливо-воздушной смеси от определяющих цикл поршневого двигателя факторов: давления и температуры рабочего тела, скоростного режима, коэффициента избытка воздуха.

**Ключевые слова:** поршневой двигатель, воспламенение, давление, температура, скоростной режим

## THE DELAY OF IGNITION THE FUEL-AIR MIXTURE IN PISTON ENGINES

Gavrilov A.A., Gots A.N.

Federal state educational institution of higher professional education «Vladimir state University of a  
name of Alyaksandr G. and Nicholas G. Stretovyeh», Vladimir, e-mail: hotz@mail.ru

The analysis empirical and other dependences for definition of duration of a delay of ignition of a fuel – air mix in piston engines with compulsory ignition, and also with ignition from compression is lead. At mathematical model of a cycle of the piston engine definition of time of a delay of ignition of a mix allows to predict the beginning of process of combustion, and, besides optimum on display work an arrangement of a site of fast increase of pressure is relative of top dead center. It is solved at any complexity of mathematical model of a cycle and the basic is at comparison of settlement and display diagrams of a cycle of the piston engine. Empirical dependence for definition of time of a delay of ignition of a fuel – air mix from determining a cycle of the piston engine of factors is offered: pressure and temperatures of a working body, a high-speed mode, factor of surplus of air.

**Keywords:** the piston engine, ignition, pressure, temperature, high-speed mode

При математическом моделировании цикла поршневого двигателя (ПД) важное значение имеет определение формул времени  $\tau_i$  задержки воспламенения смеси (ЗВС), позволяющих с достаточной для практики точностью прогнозировать начало процесса сгорания. Его продолжительность определяют по индикаторной диаграмме, построенной в координатах  $p$ - $\varphi$ , как время  $\tau_i$ , с, или угол поворота коленчатого вала (ПКВ) в градусах  $\varphi_i$ , за которое КВ поворачивается, от момента образования искры (момента зажигания) для ПД с принудительным зажиганием (ПЗ) или начала впрыска топлива для ПД с воспламенением от сжатия (ВС) до момента отклонения кривой давления при сгорании от кривой давления при сжатии. Для наглядности на рис. 1 приведен участок индикаторной диаграммы (на тактах сжатия и расширения вблизи ВМТ). В точке  $F$  при повороте КВ на угол  $\varphi_f$  – подача искры для двигателя с ПЗ или начала впрыска топлива. Точку  $D$  при повороте КВ на угол  $\varphi_d$  принимают за начало воспламенения, когда давление на индикаторной диаграмме превышает давление сжатия (рисунок – линия сжатия показана пунктирной линией).

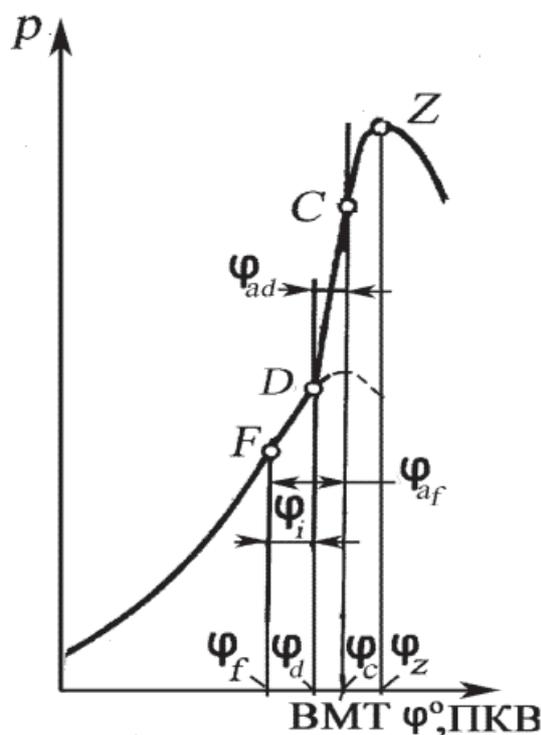


Диаграмма цикла в координатах  $p - \varphi$

Точка  $C$  определяет давление в цилиндре, когда поршень находится в ВМТ, а точка  $Z$  – максимальное давление цикла. Угол опережения зажигания для двигателя с ПЗ или впрыска топлива для двигателя с ВС относительно ВМТ  $\phi_{af}^{\circ} = \phi_c^{\circ} - \phi_f^{\circ}$ . Тогда угол  $\phi_i^{\circ} = \phi_d^{\circ} - \phi_f^{\circ}$ , а угол  $\phi_{ad}^{\circ} = \phi_c^{\circ} - \phi_d^{\circ}$  определяет угол начала нарастания давления. Углы  $\phi_i^{\circ}$  и  $\phi_{ad}^{\circ}$  оказывают огромное влияние на процесс сгорания. При слишком большом угле  $\phi_{ad}^{\circ}$  сгорание смеси начинается слишком рано, создается большое противодавление ходу поршня к ВМТ (линия  $DC$ ), скорость нарастания и максимальное давление оказываются чрезмерно большими, двигатель перегружается газовыми силами и перегревается, а его мощность и экономичность не достигают оптимальных значений. Для двигателя с ПЗ возможно возникновение детонации. При экспериментальных исследованиях оптимальное с точки зрения экономических показателей на данном режиме расположение т.  $F$ ,  $D$  и  $Z$  относительно ВМТ достигается выбором угла  $\phi_{af}^{\circ}$  по регулировочной характеристике, а достоверное значение угла  $\phi_i$  определяется по индикаторной диаграмме. Полученное значение  $\phi_i$  носит индивидуальный для данного типа ПД и режима работы характер, а математическая модель обычно предполагает исследование различных типов двигателей. Целесообразно выработать наиболее приемлемую эмпирическую зависимость для определения времени  $\tau_i$  ( $\phi_i$ ) ЗВС от определяющих цикл ПД факторов: давления и температуры рабочего тела, скоростного режима, энергии активации и т.д. На строгую зависимость продолжительности ЗВС от указанных факторов в своё время обращал внимание А.И. Толстов [9]. Сложность учета влияния различных факторов на ЗВС породила большое количество полуэмпирических формул для расчета  $\tau_i$ . Работы, посвященные получению зависимостей для расчета  $\tau_i$ , предполагают решение двух задач:

- определение продолжительности ЗВС по времени  $\tau_i$  или углу ПКВ  $\phi_i$  [1; 10, 11];
- исследование физико-химических процессов, протекающих в рабочем теле за  $\tau_i$  [4–9].

Решение первой задачи позволяет при расчёте цикла определить оптимальное по индикаторной работе **расположение участка быстрого нарастания давления относительно ВМТ** (линия  $D-C-Z$ , см. рисунок). Она решается при любой сложности математической модели цикла и является основной при сравнении расчётной и действительной индикаторных диаграмм цикла ПД.

Решение второй задачи обычно выполняется с использованием более сложных моделей цикла и имеет целью **согласо-**

**вание расчётной и экспериментальной скорости нарастания давления** (наклон кривой  $DCZ$ ) и его максимального значения в точке  $Z$ .

Классическая модель самовоспламенения капли горючего основана на стационарном приближении Семенова – Франк-Каменецкого [6, 10]. Анализ развития этих моделей, а также модель горения капель жидких углеводородов с расчетом значений  $\tau_i$  для гомогенной стехиометрической смеси н-декана-воздух при различных температурах и давлениях дан в [11].

В математической модели цикла ПД угол  $\phi_i^{\circ}$  ПКВ (или  $\tau_i$ ,  $c$ ) вычисляется, а ориентирование точек  $D$  и  $Z$  относительно ВМТ достигается корректированием положения точки  $F$ .

**Цель исследования** – провести анализ опубликованных результатов исследований по решению первой задачи для ПД, работающих на жидком топливе, и дать рекомендации по расчету продолжительности задержки воспламенения смеси.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Заметим, что большинство формул для вычисления **времени**  $\tau_i$  ЗВС соответствует зависимости, предложенной Н.Н. Семёновым [6]:

$$\tau_i = B p^{-n} \exp\left(E / (\tilde{R}T)\right), \quad (1)$$

где  $B = \text{const}$  – некоторая постоянная величина;  $p$ ,  $T$  – давление и температура в момент впрыска топлива;  $E$  – энергия активации рабочего тела;  $\tilde{R}$  – универсальная газовая постоянная.

Наиболее полный и качественный анализ методик определения  $\tau_i$  приведен в книге Р.З. Кавтарадзе [4, табл. 8.6] (анализируется 19 полуэмпирических и экспериментальных зависимостей). Отметим следующие особенности этих формул:

- главными факторами, влияющими на время  $\tau_i$  ЗВС в большинстве зависимостей, являются давление  $p_f$  и температура  $T_f$  в точке  $F$  (см. рисунок);
- оценку степени влияния  $p_f$  и  $T_f$  на  $\tau_i$  затрудняет значительный разброс в этих формулах множителя, учитывающего значения энергии активации рабочего тела  $E / \tilde{R}$ , а также показателей степени  $n$  и  $m$  при  $p^{-n}$  и  $p^{-m}$ ;
- некоторые зависимости учитывают влияние дополнительных факторов: средней скорости поршня  $w_p$ , частоты вращения КВ  $n_e$  (формулы А.И. Толстова, В.С. Семенова, Х. Харденберга), коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и даже коэффициента наполнения  $\eta_v$  (формула З. Нойгебауэра и др.);

• судя по структуре формул, влияние неучтенных факторов включается в постоянную величину  $B$ , так как численные значения ее в некоторых зависимостях различаются на  $10^3$ .

Перевод временных значений ЗВС по зависимостям, приведенным в [4, табл. 8.6], в угловые единицы ( $\varphi_i = 6n_e \tau_i$ ) показывает, что ряд формул дают значения  $\tau_i$  ( $\varphi_i$ ), нереальные для автомобильных и тракторных двигателей. Видимо, это происходит из-за некорректного перевода физических величин из старых единиц в новые (например, в формуле А.И. Толстова). Только этим можно установить причину такого большого разброса значений  $\tau_i$ .

Согласно статистике, на номинальном режиме  $n_e$  автомобильных и тракторных двигателей угол  $\varphi_{af} = 12...35^\circ$  (до ВМТ), ( $\varphi_f = 325...348^\circ$  ПКВ) (см. рисунок), тогда  $\tau_i = \varphi_i / (6n_e)$  для быстроходных дизелей ( $n_e = 2000...4000 \text{ мин}^{-1}$ ) не должно превышать  $\tau_i \leq 0,0025 \text{ с}$ , а для двигателей с ПЗ ( $n_e \geq 4000 \text{ мин}^{-1}$ )  $\tau_i \leq 0,00125 \text{ с}$  ( $\varphi_{ad} = 4...7^\circ$  до ВМТ, см. рисунок).

Целесообразно найти общую зависимость для  $\tau_i$  путем определения и ранжирования степеней влияния определяющих факторов на время ЗВС. Для этого из [4, табл. 8.6] были выбраны формулы, структура которых близка к (1). В табл. 1 эти зависимости располагались в порядке возрастания времени  $\tau_i$  ЗВС. Не рассматривались из

[4, табл. 8.6] формулы Г. Ситкея, Х. Харденберга и З. Нойгебауэра, так как в них присутствует алгебраическое сложение составляющих, а также формулы В.С. Семенова, А.И. Толстова и др., где учитывается влияние скоростного режима и другие факторы.

Обращает на себя внимание большое различие показателей (см. табл. 1) при давлении  $p^{-n}$  – от 0,35 (Г. Вошни) до 2 (Л. Спадацини), что несвойственно продолжительности физико-химических процессов за время ЗВС. Точно также, показатель степени при  $T$  или число  $a$  в множителе  $\exp(a/T)$  в приведенных зависимостях также значительно отличаются. Найдем средние значения степеней влияния  $p_f$  и  $T_f$  на продолжительность ЗВС.

Для этого использовалась программа расчета цикла, математическая модель которой изложена в [7, 8]. В ней реализуется изменение показателей цикла по времени (углу ПКВ) при изменении давления  $p_f$ , температуры  $T_f$ , средней скорости поршня  $w_p$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и других факторов. Используя расчёт цикла дизеля ЗЧ10,5/12 (Д-130, ООО ВМТЗ) при частоте вращения  $n_e = 2000 \text{ мин}^{-1}$ , определим (см. табл. 1) влияния факторов  $B$ ,  $p_f$  и  $T_f$  на  $\tau_i$ . При этом использовалась структура формул двух видов: по (1) или

$$\tau_i = B \cdot p^{-n} \cdot T^{-m}. \quad (2)$$

Если в уравнениях (1) или (2) найти абсолютные значения логарифмов сомножителей

$$|\lg \tau_i| = |\lg B| + |\lg(p^{-n})| + |\lg[\exp(E/(\tilde{R}T))]|$$

или

$$|\lg \tau_i| = |\lg B| + |\lg(p^{-n})| + |\lg(T^{-m})|, \quad (3)$$

то это позволяет вычислить степень влияния  $\delta$  каждого из факторов  $B$ ,  $p$  и  $T$  на величину  $\tau_i$

$$\delta_B = |\lg B| / |\lg \tau_i|; \quad \delta_p = |\lg(p^{-n})| / |\lg \tau_i|;$$

$$\delta_T = |\lg(\exp(E/(\tilde{R}T)))| / |\lg \tau_i|$$

$$m = -(\delta_T \lg \tau_{i\text{cp}}) / \lg T_{f\text{cp}} = -[0,277 \cdot (-2,7812)] / 2,851 = 0,2702 \cong 0,27.$$

Показатель степени  $n$  при давлении  $p$ , Па из зависимостей (4) для  $\delta_p$

$$n = -[\delta_p \lg \tau_{i\text{cp}}] / \lg p_{\text{cp}} = -[0,539 \cdot (-2,7812) / \lg 1555200] = 1,495067 / 6,19179 = 0,2421 \cong 0,24.$$

или

$$\delta_T = |\lg(T^{-m})| / |\lg \tau_i|. \quad (4)$$

Формулы и результаты вычислений по уравнениям (4)  $\delta_B$ ;  $\delta_p$ ;  $\delta_T$  приведены в табл. 1, что свидетельствует о достаточно большом различии влияний  $B$ ,  $p$  и  $T$  на  $\tau_i$ . Для вычисления показателей  $n$  и  $m$  при  $p^{-n}$  и  $T^{-m}$  используем средние значения  $\delta_B$ ;  $\delta_p$ ;  $\delta_T$  (см. табл. 1). По среднему значению времени  $\tau_{i\text{cp}} = 0,001655 \text{ с}$  ЗВС найдем

$$\lg \tau_{i\text{cp}} = \lg 0,001655 = -2,7812.$$

Показатель степени  $m$  при температуре  $T$  из (4) для  $\delta_T$  при среднем значении  $T_{f\text{cp}} = 710 \text{ К}$

Сомножитель  $B$  в формуле (2), судя по анализу, приведенному в [4], должен учитывать:

• состав рабочего тела – значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , при увеличении которого продолжительность ЗВС должна повышаться;

• турбулизацию рабочего тела с помощью средней скорости поршня  $w_p$ , увеличение которой уменьшает время ЗВС.

Влияние других факторов введем в другой сомножитель  $B_i$ , а значение  $B$  представим в виде

$$B = B_i \alpha w_p^{-k}. \quad (5)$$

Таблица 1

К анализу степени влияния факторов на ЗВС в дизеле ЗЧ 10,5/12

№ п/п	$p_p$ , МПа	$T$ , К	$\tau_p$ , мс	$\varphi_p$ , ПКВ	$\delta_B$	$\delta_p$	$\delta_T$
					Степень влияния на $\tau_p$ , %		
1	$\tau_i = 12,7 / n_e (40 / C)^{0,69} p^{-0,386} \exp(4644 / T)$ ; Б. Книхт. $C = 52$ – цетановое число.						
	1,5550	713	2,406	28	36,9	28,9	34,2
2	$\tau_i = 1,3 p^{-0,35} \exp(990 / T)$ ; Г. Вошни, Ф. Аниситс						
	1,5550	713	3,543	42	24,2	59,3	16,5
3	$\tau_i = 4646 \cdot 10^4 p^{-0,7} T^{-2,22}$ ; Х. Оберг						
	1,5554	709	1,011	12	41,8	23,6	34,6
4	$\tau_i = 1,76 p^{-0,866} \exp(2490 / T)$ ; Р.З. Кавтарадзе						
	1,5552	705	0,262	3	3,4	75,1	21,5
5	$\tau_i = 0,55 p^{-1,3} \exp(4400 / T)$ ; Р.З. Кавтарадзе						
	1,5553	708	0,976	11	3,1	64,8	32,1
6	$\tau_i = 0,0405 p^{-0,757} \exp(5473 / T)$ ; Ф. Стрингер						
	1,5552	712	1,814	21	14,8	49,8	35,4
7	$\tau_i = 78,07 p^{-1,66} \exp(2055 / T)$ ; М. Туге						
	1,5552	704	0,159	1	18,7	68,8	12,5
8	$\tau_i = 0,44 p^{-1,19} \exp(4650 / T)$ ; Х. Вольфер. ( $p$ , mbar)						
	1,5551	713	3,067	36	4,4	61,0	34,6
Среднее значение	1,5552	710	1,655	20	18,4	53,9	27,7

При определении показателя  $k$  примем значения  $\alpha = 1,5$  и  $w_p = 8$  м/с из формул (4) и (5)  $B_i = 1,0$ , а из расчета цикла дизеля ЗЧ10,5/12 при среднем значении  $\delta_{всп} = 0,184$  (18,4%):

$$\lg B = \delta_B \lg \tau_{i\text{cp}} = 0,184 \cdot (-2,74208) = -0,504543;$$

$$\lg(w_p^{-k}) = -k \lg w_p = \lg B - \lg B_i - \lg \alpha = -0,504543 - 0 - 0,176091 = -0,680634.$$

Откуда

$$k = -[\lg B - \lg B_i - \lg \alpha] / \lg w_p;$$

$$k = 0,680634 / 0,903 = 0,753748 \cong 0,754.$$

На основании выполненного анализа предлагается следующая формула для вычисления времени задержки воспламенения смеси  $\tau_p$ ,

$$\tau_i = B_i \alpha w_p^{-k} p_f^{-n} T_f^{-m}, \quad (6)$$

где  $B_i = 1,0$  – сомножитель, который при корректровке  $\varphi_i$  по экспериментальным

данным может иметь значение, отличное от единицы;  $p_p, T_f$  – давление, Па и температура, К в т.  $F$  (см. рисунок);  $w_p$  – средняя скорость поршня, м/с;  $k = 0,754$ ;  $n^p = 0,242$ ;  $m = 0,270$ .

При аналогичном анализе по формуле (6), выполненном применительно к двигателю ЗМЗ-409.10 (диаметр цилиндра/ход поршня  $D/S = 95,5/94$  мм) с ПЗ, частотой

вращения  $n_e = 4400 \text{ мин}^{-1}$  ( $w_p = 13,49 \text{ м/с}$ ),  $\alpha = 0,9$ , значения степени влияния  $\delta_B; \delta_p; \delta_T$  на  $\tau_i$  оказались близкими к значениям для дизеля ЗЧ10,5/12 (табл. 2), что дает основание использовать формулу (6) для расчета  $\tau_i$  и в цикле двигателя с ПЗ в виде

$$\tau_i = B_i \alpha w_p^{-0,754} p_f^{-0,242} T_f^{-0,270}.$$

**Таблица 2**

Различие между степенями влияния  $\delta_B, \delta_p, \delta_T$  и показателями  $m, n$

ПД	$\delta_B$	$\delta_p$	$\delta_T$	m	n
Д-130	0,184	0,539	0,277	0,270	0,242
ЗМЗ-409	0,189	0,534	0,277	0,267	0,236
Различие	2,6%	0,9%	0	1,1%	2,3%

Результаты расчета по формуле (6) продолжительности ЗВС в дизеле и двигателях

с ПЗ на номинальных режимах, без наддува и с наддувом (Т), приведены в табл. 3.

**Таблица 3**

Результаты расчета продолжительности ЗВС по формуле (6)

Двигатель	$n, \text{ мин}^{-1}$	$\alpha$	$p_p, \text{ МПа}$	$T, \text{ К}$	$\tau_i, \text{ мс}$	$\varphi_f^\circ$	$\varphi_i^\circ$	$\varphi_d^\circ$	$\varphi_z^\circ$	$\delta_a$	$\delta_w$	$\delta_p$	$\delta_T$
						°п.к.в.				Степень влияния, %			
Д130 ЗЧ 10,5/12	2000	1,50	1,7111	741	1,629	24	20	4	9	5,6	21,7	48	24,7
Д145Т 4ЧН 10,5/12	2200	1,60	2,9291	853	1,367	22	18	4	9	6,1	21,8	47,9	24,2
2А-9ДГ-01 16ЧН 26/26	1000	2,10	5,0869	694	1,678	15	10	5	13	9,5	20,7	47,4	22,4
ЗМЗ-4062 $D/S = 9,2/8,6$	5200	0,90	1,1560	605	0,710	26	22	4	10	1,4	28,1	48,6	23,9
ЗМЗ-409 $D/S = 9,55/9,2$	4400	0,90	1,2187	614	0,753	24	20	4	10	1,5	27,3	47,1	24,1
ЗМЗ-406Т $D/S = 9,55/9,2$	4400	0,92	1,9196	719	0,661	22	17	5	11	1,2	26,8	47,8	24,2
ВАЗ-21083 $D/S = 8,2/7,1$	5600	0,96	0,9117	580	0,887	34	30	4	8	0,6	27,7	47,3	24,4
ВАЗ-2119 $D/S = 7,65/7,56$	5800	0,95	0,9881	599	0,792	32	27	5	7	0,7	28,4	46,7	24,2

Как видно из табл. 3, разброс рассчитанных значений  $\tau_i$  (или  $\varphi_i$ ) значительно сократился и их значения более близки к экспериментальным. Полученные результаты позволяют:

- ранжировать степени влияния определяющих факторов на продолжительность ЗВС: давления  $p_f - \delta_p \approx 50\%$ ; температуры  $T_f - \delta_T \approx 25\%$ ; средней скорости поршня  $w_p - \delta_w \approx 20\%$ ; остальных факторов  $\approx 5\%$ ;
- установить ориентировочные диапазоны возможных значений  $\delta_p; \delta_T; \delta_w$  при корректировке формулы для определения ЗВС при расчете циклов ПД:

$$\delta_p = 0,535 \dots 0,540;$$

$$\delta_T = 0,275 \dots 0,280; \delta_w = 0,18 \dots 0,19. (7)$$

Рекомендуется показатели степени принимать в формуле (6) в диапазонах:

$$n = 0,236 \dots 0,242;$$

$$m = 0,267 \dots 0,270; k = 0,754. (8)$$

Уточнение показателей  $n$  и  $m$  в формуле (6) можно выполнять при наличии экспериментальной индикаторной диаграммы или данных с прототипа двигателя:

- на диаграмме измеряется угол  $\varphi_i$  и рассчитывается время  $\tau_i = \varphi_i / (6n)$ ;
- определяются давление  $p_p, \text{ Па}$  и температура  $T_p, \text{ К}$  в точке  $F$  (см. рисунок);
- принимаются по (7) величины степеней влияния  $\delta_p; \delta_T; \delta_w$  на время  $\tau_i$ ;
- вычисляются показатели:

$$n = -(\delta_p \lg \tau_i) / \lg p_f; m = -(\delta_T \lg \tau_i) / \lg T_f;$$

● выполняется расчет цикла и оценивается совпадение рассчитанного и экспериментального значений угла ЗВС  $\varphi_r$ .

### Список литературы

1. Варбанец Р.А., Ивановский В.Г. Моделирование рабочего процесса в задачах повышения эффективности эксплуатации судовой дизельной энергетической установки // Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення: Матеріали III-ої Всеукраїнської науч. техн. конференції. – Первомайск, 2009. – С. 6–10.
2. Гаврилов А.А., Гоц А.Н. Влияние внешних факторов на давление рабочего тела в цикле поршневого двигателя // Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення: матеріали V-ої Всеукраїнської науч. техн. конференції с міжнарод. участю. – Первомайск, 2013. – С. 52–59.
3. Гаврилов А.А., Гоц А.Н. Модель турбонаддува в цикле двигателя с переменным давлением воздуха на впуске // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8 (часть 1). – С. 24–28.
4. Кавтрадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.
5. Лебедев О.Н., Сомов В.А., Калашников С.А. Двигатели сгорания речных судов. – М.: Транспорт, 1990. – 320 с.
6. Семенов Н.Н. Цепные реакции. – Л.: ОНТИ, 1934. – 110 с.
7. Славущий В.М., Салыкин Е.А., Славущий В.В. Анализ факторов, определяющих задержку воспламенения топлива в дизелях // Известия Волг. гос. техн. ун-та: межвуз. сб. науч. ст. № 12(99), (Сер. Процессы преобразования энергии и энергетические установки) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – Вып. 4. – С. 51–54.
8. Портнов Д.А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия. – М.: Mashgiz, 1963. – 640 с.
9. Толстов А.И. Индикаторный период запаздывания воспламенения и динамика цикла быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия // Исследование рабочего процесса и подачи топлива в быстроходных дизелях: тр. НИЛД. – М.: Mashgiz, 1955. – № 1. – С. 5–55.
10. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 2-е изд. – М.: Наука, 1967.
11. Фролов С.М., Басевич В.Я., Фролов Ф.С., Борисов А.А., Сметанюк В.А., Авдеев К.А., Гоц А.Н. Корреляция между испарением и самовоспламенением капли // Химическая физика, т. 28. – 2009. – № 5. – С. 3–18.

### References

1. Varbanets R.A., Ivanovsky V.G. Model of working process in problems of increase of efficiency of operation ship diesel power installations // Materials of the III Ukrainian scientific and technical conference «Modern problems of a engine building: a condition, ideas, decisions». Pervomaisk, 2009. pp. 6–10.
2. Gavrilo A.A., Gots A.N. Influence of external factors on pressure of a working body in a cycle piston двигателя // Materials of the V Ukrainian scientific and technical conference «Modern problems of a engine building: a condition, ideas, decisions». Pervomaisk, 2013. pp. 52–59.
3. Gavrilo A.A., Gots A.N. Model of a turbo-supercharging in a cycle of the engine with variable pressure of air upon an admission // Basic researches, no. 8 (a part 1), 2013. pp. 24–28.
4. Кавтрадзе R.Z. Theory of piston engines. Special the chapter: the Textbook for high schools. M.: Publishing house of MGTU name N.E. Bauman, 2008. 720 p.
5. Lebedev O.N., Somov V.A., Kalashnikov S.A. Engine of combustion of river courts. M.: Transport, 1990. 320 p.
6. Semenov N.N. The chain reactions. L.: ONTI, 1934, 110 p.
7. Slavutskij V.M., Salykin E.A., Slavutskij V.V. Analys of the factors determining a delay of ignition of fuel in diesel engines / News of Volg. Stage tech. univ.: interhigh school. no. 2 (99), (Processes of transformation of energy and power installations) // VolgSTU. Volgograd, 2012. Reales 4. pp. 51–54.
8. Portnov D.A. A high-speed turbomondial engines with ignition from compression. M.: Mashgiz, 1963. 640 p.
9. Tolstov A.I. Display the period of delay of ignition and dynamics of a cycle of the high-speed engine with ignition from compression // Works NILD «Research of working process and submission of fuel in high-speed diesel engines». no. 1. M.: Mashgiz, 1955. pp. 5–55.
10. Frank-Kamenetsky D.A. Diffusion and a heat transfer in chemical kinetic. M.: Publishing house AN of the USSR, 1947, M.: Nauka, 1967.
11. Frolov S.M., Basevich V.J., Frolov F.S., Borisov A.A., Smetanjuk V.A., Avdeev K.A., Gots A.N. Correlation between drop vaporization and self-ignition // Russian Journal of Physical Chemistry, 2009, Vol. 3, pp. 333–347.

### Рецензенты:

Кобзев А.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, ФГБОУ «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир;

Кульчицкий А.Р., д.т.н., профессор, главный специалист ООО «Завод инновационных продуктов» КТЗ, г. Владимир.

Работа поступила в редакцию 18.04.2014.