

УДК: 623.1.7

DOI: 10.53816/23061456_2022_3-4_104

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРИОДА ЗАДЕРЖКИ
ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВА
В УСЛОВИЯХ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ТАНКОВОГО ДВИГАТЕЛЯ В-92С2**
**METHOD FOR DETERMINING THE VALUE OF THE FUEL IGNITION DELAY
PERIOD UNDER THE CONDITIONS
OF THE COMBUSTION CHAMBER OF THE V-92S2 TANK ENGINE**

Д-р техн. наук Д.В. Шабалин, канд. пед. наук П.Е. Кобзарь, И.А. Фомин

D.Sc. D.V. Shabalin, Ph.D. P.E. Kobzar, I.A. Fomin

Омский автобронетанковый инженерный институт

В статье представлена методика расчетно-теоретического определения величины периода задержки воспламенения топлива в условиях камеры сгорания танкового дизельного двигателя с целью корректировки угла опережения впрыска при глубоком охлаждении наддувочного воздуха. Сложность корректного определения величины периода задержки воспламенения топлива обусловлена тем, что при использовании уравнения С. Аррениуса необходимо определять входящие в него коэффициенты для каждого конкретного двигателя, отличающегося газодинамическими условиями в камере сгорания. В результате проведенного расчетно-теоретического исследования разработана методика определения величины периода задержки воспламенения топлива и получены коэффициенты уравнения для условий камеры сгорания танкового двигателя В-92С2. Точность определения периода задержки воспламенения имеет важное значение для обеспечения эффективного протекания рабочего цикла дизелей бронетанкового вооружения и техники.

Ключевые слова: дизельный двигатель, танковая силовая установка, период задержки воспламенения топлива, бронетанковое вооружение, угол опережения впрыска топлива, температура начала сжатия, энергия активации топлива, скорость тепловыделения.

The article presents a method of calculation and theoretical determination of the value of the fuel ignition delay period in the conditions of the combustion chamber of a tank diesel engine in order to adjust the injection advance angle with deep cooling of the charge air. The difficulty of correctly determining the value of the fuel ignition delay period is due to the fact that when using the S. Arrhenius equation, it is necessary to determine the coefficients included in it for each specific engine that differs in gas-dynamic conditions in the combustion chamber. As a result of the computational and theoretical research carried out by the team of authors, a method for determining the magnitude of the fuel ignition delay period was developed and the coefficients of the equation for the conditions of the combustion chamber of the В-92С2 tank engine were obtained. The accuracy of determining the ignition delay period is important to ensure the effective flow of the working cycle of diesel engines of armored weapons and equipment.

Keywords: diesel engine, tank power plant, fuel ignition delay period, armored armament, fuel injection advance angle, compression start temperature, fuel activation energy, heat release rate.

В условиях сложной военно-политической обстановки Российской Федерации необходимы вооруженные силы, способные адекватно реагировать на весь спектр военных угроз от вооруженного конфликта до крупномасштабной войны. Существенная роль в решении этих задач отводится Сухопутным войскам (СВ), основой могущества которых является бронетанковое вооружение (БТВ), дополненное артиллерией, боевыми вертолетами и высокоточным оружием. Это позволяет СВ успешно осуществлять как ударное воздействие на противника, так и вести высокоманевренные боевые действия.

Высокоманевренный характер боевых действий, возможность массовых потерь и необходимость быстрого наращивания усилий первого эшелона, возросшие возможности противника по нарушению транспортировки войск по железнодорожным дорогам, а также увеличение маршевых способностей образцов БТВ может быть причиной того, что передвижение на большие расстояния своим ходом будет составлять большую часть боевого функционирования воинских соединений. Таким образом, более высокие потребности развивающейся тактики и оперативного искусства обуславливают непрерывное повышение требований к боевому свойству образцов БТВ — их подвижности.

Известно, что подвижность образца в значительной степени зависит от его средней скорости, которая во многом обусловлена мощностью применяемой силовой установки (СУ).

Тенденция роста эффективной мощности танковых СУ обусловила комбинацию дизеля с лопаточными агрегатами. Наддув как способ улучшения энергетических характеристик стал технически и экономически оправданным, поскольку позволяет увеличить литровую мощность двигателя. Однако степень форсирования СУ по наддуву ограничивается тепловой напряжённостью и динамической нагруженностью деталей цилиндропоршневой группы. Поэтому дальнейшее улучшение энергетических характеристик комбинированных СУ неразрывно связано с охлаждением наддувочного воздуха, поступающего в цилиндры двигателя.

В настоящее время подавляющее большинство СУ с комбинированным дизелем, применяемых на образцах БТВ, устройствами охлаждения наддувочного воздуха (ОНВ) не оснащены,

либо установленные охладители имеют низкую эффективность. Это обусловлено, прежде всего, тем, что применяются охладители по принципу «жидкость-воздух», включенные в общий контур системы охлаждения (СО) дизеля. Такая схема включения ОНВ не способна обеспечить температуру наддувочного воздуха ниже температуры охлаждающей жидкости СО двигателя. Большой глубины охлаждения наддувочного воздуха возможно достичь, применяя схему по принципу «воздух-воздух». Однако подобная схема ОНВ не нашла широкого применения в СУ образцов БТВ в связи с трудностями создания охлаждающего потока в забронированном пространстве моторно-трансмиссионного отделения (МТО). Избежать перечисленных проблем можно в случае применения эжекционных систем охлаждения наддувочного воздуха. Вместе с тем, при обеспечении глубокого охлаждения наддувочного воздуха требуется корректировка угла опережения впрыска топлива (УОВТ), для чего необходимо знать закономерность изменения периода задержки воспламенения (ПЗВ) от температуры наддувочного воздуха (температуры начала сжатия).

Важность точности определения периода задержки воспламенения (ПЗВ) для дизелей бронетанкового вооружения и техники (БТВТ) сложно переоценить. Так, к примеру, погрешность в 1 градус поворота коленчатого вала для двигателя В-92С2 даёт ошибку расчета индикаторной мощности 18 кВт, максимального давления сгорания — 400 кПа.

Снижение температуры начала сжатия (T_a) влечет уменьшение угла ПКВ (до ВМТ) при котором сгорают пары топлива, образующиеся в ПЗВ, рис. 1 (примерно соответствует 10 % сгоревшего топлива). Угол ПКВ после ВМТ, при котором диффузно сгорает основная масса топлива (примерно соответствует 50 % сгоревшего топлива) уменьшается. Догорание (примерно соответствует 90 % сгоревшего топлива) происходит раньше.

Существенный рост динамики тепловыделения наблюдается при температуре сжатия ниже 350 К, рис. 2.

Как известно, в большинстве моделей ПЗВ определяется на основе закона С. Аррениуса по формулам вида

$$\tau_i = A_i \cdot P^{-n_i} \cdot e^{\frac{E_a}{T}}, \quad (1)$$

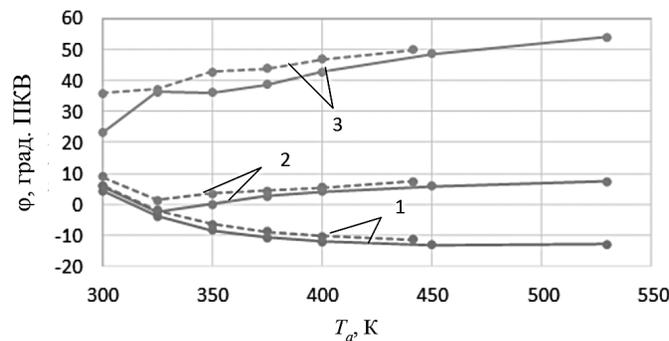


Рис. 1. Зависимость угла ПКВ, соответствующего моменту сгорания 10 % (1), 50 % (2) и 90 % (3) топлива, от температуры начала сжатия:
 $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$; — — — 100 % и - - - - 50 % цикловой подачи от максимальной

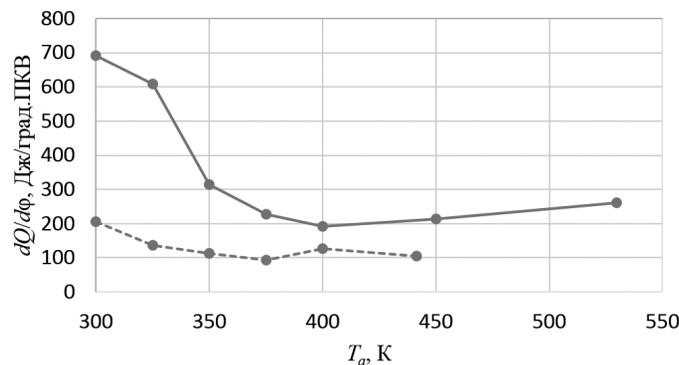


Рис. 2. Зависимость скорости тепловыделения от температуры начала сжатия:
 $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$; — — — 100 % и - - - - 50 % цикловой подачи от максимальной

где A_r, n_i — коэффициенты;
 P — давление; T — температура;
 E_a — энергия активации реакции окисления топлива.

В таблице приведены значения коэффициентов в уравнении (1), полученные разными исследователями.

По данным таблицы, величины коэффициентов существенно отличаются, это позволяет утверждать, что при использовании уравнения С. Аррениуса необходимо определять входящие в него коэффициенты для каждого конкретного двигателя, отличающегося газодинамическими условиями в камере сгорания (КС). Согласно Т.В. Руан [1] физическая составляющая ПЗВ составляет около 95 % от общей продолжительности ПЗВ. Формула (1) не учитывает особенности физических (газодинамических) процессов в КС. Кроме того, одним из недостатков подхода, основанного на уравнениях вида (1), является пренебрежение зоной с так называемым отрицательным температурным коэффициентом

(NTC — Negative Temperature Coefficient), где ПЗВ уменьшается с увеличением температуры [2, 3]. Это явление можно объяснить эндотермической реакцией образования радикалов HO_2 , протекающей в диапазоне между низкими и высокими температурами при снижении общей скорости реакции.

Тем не менее этот подход получил широкое распространение вследствие низкой трудоёмкости. Для уточнения результатов расчета применяются различные методы. Например, для учета зоны с отрицательным коэффициентом NTC выполняется корректировка величины ПЗВ:

$$\tau'_i = \frac{\tau_i}{1 + T_{xres} \cdot X_{bg}}$$

где X_{bg} — доля продуктов сгорания в свежем заряде; T_{xres} — константа, определяющая влияние продуктов сгорания.

Кроме исследователей, приведенных в таблице, вопросами влияния характерных темпе-

Коэффициенты в уравнении для определения ПЗВ

Исследователь	Условия определения	A_i	n_i	E_a/R	E_a
Wolfer	Бомба $V = \text{const}$	0,44	1,19	4650	38660
Kadota	Установка впрыска	6,58	0,52	4400	36582
Spadaccini	Труба	4,0	1	20080	166945
Stringer	Труба	0,0409	0,757	5473	45503
Hiroyasu	Бомба $V = \text{const}$	$0,01 \cdot \varphi_{inj}^{-1,04}$	2,5	6000	49884
Fujimoto	Бомба $V = \text{const}$	0,134	1,06	5130	42651
Pischinger	Труба	0,0081	1,14	7813	64957
Watson	Дизель	3,45	1,02	2100	17459
Assanis	Дизель	4,2	1,56	2100	17459
Hardenberg	Дизель	4,2	1,31	979	8139
Aghav	Дизель	4,07	1,54	2073	17235
Rothamer	Дизель	3,71	1,6	2287	19014
Матиевский и Сеначин	Дизель				25000–38000
Elliot	Бомба $V = \text{const}$				8900
Sitkei	Бомба $V = \text{const}$				64800
Henein	Дизель				34900

ратур в КС на ПЗВ занимались S.G. Bauer (температура в момент начала сгорания), K.S. Tsao, P.S. Myers и O.A. Uehara (температура в момент начала впрыска топлива), W.T. Lyn и E. Valdemanis (максимальная температура сжатия). Исследования по оценке влияния температуры воздуха на впуске на показатели многотопливного танкового дизеля с открытой КС проводились под руководством D.N. Assanis в университете Мичигана (США) по заказу командования танковыми и автомобильными войсками (Army Tank Automotive Command) [4].

Энергия активации определялась M.A. Elliot, G. Sitkei, W.E. Garner путём измерения ПЗВ в бомбе постоянного объёма, B.P. Mullins, I. Koizumi и Y. Kitaoka, W.G. Burwell и D.R. Olson — в трубе. Полученные значения не учитывают особенности газовой динамики и смесеобразования в КС двигателя, но могут быть применены для качественной оценки влияния тех или иных факторов на ПЗВ.

Трудно однозначно определить, какая из характерных температур является более подходящей для оценки ПЗВ. Большинство исследователей склоняется к тому, что температура начала впрыска в наибольшей степени определяет динамику испарения топлива. С одной стороны, локальное снижение температуры газов вследствие испарения вокруг топливного факела уменьшает

скорость реакций, с другой стороны, теплопередача от горячего воздуха в конце ПЗВ к парам топлива увеличивает скорость реакции. Рост средней температуры газов вследствие сжатия также увеличивает скорость реакции. Некоторые исследователи (D.N. Assanis, J.C. Livengood, P.C. Wu [5]) предлагают в качестве характерной температуры брать среднюю интегральную температуру газов в течении ПЗВ. Изменение ПЗВ с момента τ_1 начала испарения первых капель топлива до воспламенения τ_2 определяется по формуле

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{d\tau}{\tau(P, T)} = 1.$$

Фирмой AVL предложено выражение для определения ПЗВ, учитывающее концентрацию кислорода и топлива в рабочем теле [6]:

$$\tau_i = 4,804 \cdot 10^{-8} \cdot \left(N_{O_2}^{u,M} \Big|_{u,m} \right)^{-0,53} \times \left(N_f^{u,M} \Big|_{u,m} \right)^{0,05} \cdot \rho_f \cdot e^{\frac{5914}{T}}, \text{ с,}$$

где N — молярная концентрация кислорода и топлива, моль/м³.

Формула для определения относительно изменения ПЗВ при изменении температу-

ры начала впрыска предложена N.A. Henein и J.A. Bolt:

$$\frac{\tau_i}{\tau_{i,ref}} = e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{SOI,ref}} - \frac{1}{T_{SOI}} \right)},$$

где ref — референсные значения.

Одной из причин низкой точности формулы (1) является то, что дизельное топливо — смесь различных углеводородов, для каждого из которых существует своя энергия активации. Поэтому предпринимаются попытки связать среднюю величину энергии с химическими свойствами топлива, в первую очередь с цетановым числом, характеризующим его воспламеняемость. Например, Н.Н. Wolfer было предложено выражение

$$E_a = \frac{618840}{CN + 25}, \text{ Дж/моль},$$

где CN — цетановое число.

Y.V. Aghav [7] уточнил это выражение:

$$E_a = \frac{1310000}{R \cdot (CN + 25)}, \text{ Дж/моль}.$$

При использовании CFD-моделей наиболее точный результат определения ПЗВ дают модели, включающие детальные механизмы химической кинетики окисления суррогатных топлив, например W.J. Pitz, M. Mehl, H.J. Curran [8].

Анализ особенностей рабочих процессов в КС при снижении температуры начала сжатия показывает, что преобладающее влияние имеет величина ПЗВ. На рис. 3 показана зависимость ПЗВ от обратной величины температуры начала сжатия для режима максимальной мощности.

Аппроксимация, согласно закону С. Аррениуса, этой зависимости экспоненциальной функцией ($R_2 = 0,97$) имеет вид

$$\tau_i = 0,0133 \cdot e^{\frac{1453}{T_a}}, \text{ мс.} \quad (2)$$

Учитывая большую длительность впрыска (для двигателя В-92С2 — 22 градуса ПКВ и более, при $\varphi_{SOI} = 20,5$ градуса ПКВ до ВМТ на режиме максимальной мощности) температуру газов в КС в момент впрыска с достаточной степенью точности можно принять равной:

$$T_{SOI} = T_c = T_a \cdot \varepsilon^{n_1 - 1}.$$

Отсюда

$$T_a = T_{SOI} \cdot \varepsilon^{1 - n_1}. \quad (3)$$

Подставим (3) в (2):

$$\tau_i = 0,0133 \cdot e^{\frac{1453}{T_{SOI} \cdot \varepsilon^{1 - n_1}}}, \text{ мс.}$$

Сравним с формулой (1), выразим энергию активации:

$$E_a = \frac{1453 \cdot R}{\varepsilon^{1 - n_1}}. \quad (4)$$

Вывод

Таким образом, для условий камеры сгорания двигателя В-92С2, с учетом разброса значений политропы сжатия, величина энергии активации составляет $E_a = 28500 \pm 1100$ Дж/моль. Необходимо отметить, что выражение (4) не оз-

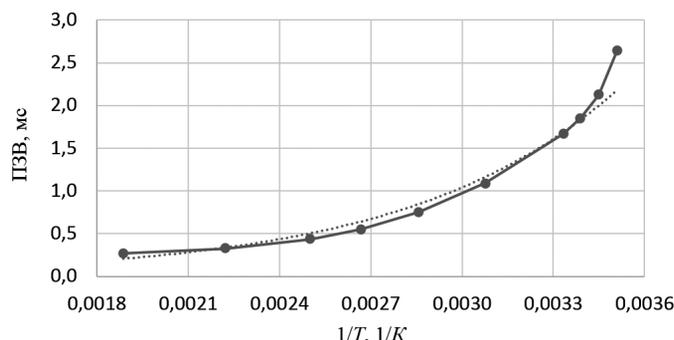


Рис. 3. Зависимость ПЗВ от обратной величины температуры начала сжатия ($n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, максимальная цикловая подача топлива): - - - — аппроксимация экспонентой

начает, что энергия активации зависит от степени сжатия. Это формула для нахождения E_a по эмпирическим данным.

Литература

1. Райан Т. Корреляция физико-химической задержки воспламенения с цетановым числом / Т.В. Райан // Международная встреча и выставка горюче-смазочных материалов. — Талса. 1985. Технический документ SAE № 852103.

2. Вандерсикель А. Самовоспламенение практического топлива в условиях HCCI: эксперименты с ударными трубами высокого давления и феноменологическое моделирование / А. Вандерсикель, М. Хартманн, К. Фогель, Ю. Райт и др. // Топливо. 2012. 93 (0). С. 492–501.

3. Йейтс А. Корреляция данных о задержках самовоспламенения и ограничении детонации опережения зажигания для различных типов топлива / А. Йейтс, А. Свартс, К. Вилджоен // Технический документ SAE 2005-01-2083. 2005.

4. Ассанис Д.Н. Прогнозируемая корреляция задержки зажигания в установившемся и переходном режиме дизельного двигателя с прямым впрыском / Д.Н. Ассанис, З.С. Филиппи, С. Фивленд, М. Сиримис // Журнал инженерии газовых турбин и энергетики. 2003. Том. 125 (2). С. 450–457.

5. Эрнандес Дж. Дж. Возможность прогнозирования самовоспламенения корреляции Ливенгуда-Ву применительно к топливам, представляющим коммерческий интерес / Дж. Дж. Эрнандес, М. Лапуэрта, Дж. Санс-Арджент // Международный журнал исследований двигателей. 2014. Т. 15 (7). С. 817–829.

6. Колин О. Трехзонная расширенная когерентная модель пламени (ECFM3Z) для расчета предварительно смешанного / диффузионного горения / О. Колин, А. Бенкенида // Нефтегазовая наука и технологии. 2004. Том. 59. № 6. С. 593–609.

7. Агхав Ю.В. Прогнозирование задержки воспламенения и выброса углеводородов для дизельного двигателя с прямым впрыском топлива, включающего систему рециркуляции отработавших газов и кислородсодержащее топливо / Ю.В. Агав, В. Татте, М. Кумар, П.А. Лакшминараянан, М.К.Г. Бабу // Доклад SAE № 2008-28-0050. 2008 г.

8. Мель М. Детальное кинетическое моделирование низкотемпературного тепловыделения для топлива PRF в двигателе HCCI / — М. Мель, В. Дж. Питц, М. Шёберг, JE Dec / SAE 2009 International Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting, SAE Paper No. 2009-01-1806. — Флоренция, Италия. 2009 г.

References

1. Ryan T.W. Correlation of physical and chemical ignition delay to cetane number / T.W. Ryan // International fuels and lubricants meeting and exposition Tulsa. 1985. SAE Technical paper № 852103.

2. Vandersickel A. The autoignition of practical fuels at HCCI conditions: High-pressure shock tube experiments and phenomenological modeling / A. Vandersickel, M. Hartmann, K. Vogel, Y. Wright, et al. // Fuel. 2012. 93(0). P. 492–501.

3. Yates A. Correlating auto-ignition delays and knock-limited spark-advance data for different types of fuel / A. Yates, A. Swarts, C. Viljoen // SAE Technical Paper 2005-01-2083. 2005.

4. Assanis D.N. A Predictive ignition delay correlation under steady-state and transient operation of a direct injection diesel engine / D.N. Assanis, Z.S. Filipi, S. Fiveland, M. Syrimis // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2003. Vol. 125 (2). P. 450–457.

5. Hernandez J.J. Autoignition prediction capability of the Livengood-Wu correlation applied to fuels of commercial interest / J.J. Hernandez, M. Lapuerta, J. Sanz-Argent // International Journal of Engine Research. 2014. Vol. 15 (7). P. 817–829.

6. Colin O. The 3-Zones extended coherent flame model (ECFM3Z) for computing premixed/diffusion combustion / O. Colin, A. Benkenida // Oil & gas science and technology. 2004. Vol. 59. № 6. P. 593–609.

7. Aghav Y.V. Predicting ignition delay and HC emission for DI diesel engine encompassing EGR and oxygenated fuels / Y.V. Aghav, V.M. Thatte, M.N. Kumar, P.A. Lakshminarayanan, M.K.G. Babu // SAE paper № 2008-28-0050. 2008.

8. Mehl M. Detailed kinetic modeling of low-temperature heat release for PRF fuels in an HCCI engine / M. Mehl, W.J. Pitz, M. Sjöberg, J.E. Dec / SAE 2009 International Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting, SAE Paper No. 2009-01-1806. — Florence, Italy. 2009.