

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.43: 629. 113

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-43-51

**Математическое моделирование детонации в двигателях с искровым зажиганием****Капустин Александр Васильевич**, канд. техн. наук, доцент¹

aleksandr.kapustin@novsu.ru

Чумаков Валерий Леонидович✉, канд. техн. наук, профессор²valery.chumakov@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>**Девянин Сергей Николаевич**, д-р техн. наук, профессор²devta@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>**Жоробеков Болотбек Астаевич**, канд. техн. наук, доцент³

bolot60@rambler.ru

¹ Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого; 173003, Российская Федерация, г. Великий Новгород, Большая Санкт-Петербургская ул., 41² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49³ Ошский технологический университет имени М. Адышева; 723503, Кыргызская Республика, г. Ош, ул. Исанова, 81

Аннотация. Математическое моделирование детонации, прогнозирующее самовоспламенение топливно-воздушной смеси, упрощает регулирование двигателей и позволяет находить эффективные методы улучшения антидетонационных свойств двигателей. Анализ расчётной модели термодинамического цикла поршневого двигателя с искровым зажиганием, приближенной к действительному циклу, позволяет с достаточной точностью определять во времени изменения текущего давления цикла и температуры несгоревшей части заряда. Модель учитывает теплообмен между зонами горения заряда и стенками камеры сгорания. Начало детонации связано с моментом самовоспламенения несгоревшей части заряда и определено в зависимости от термодинамических параметров несгоревшей части заряда и кинетического механизма предпламенных химических процессов в топливно-воздушной смеси. Показано, что математическое моделирование механизма развития самовоспламенения несгоревшей части заряда в поршневых двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием можно выполнять так же, как и моделирование механизма развития самовоспламенения топливно-воздушной смеси в условиях продолжающегося сжатия в установках со свободно летящим поршнем. Точность расчёта самовоспламенения по модели цикла проверена экспериментально путём индентирования на различных скоростных режимах при различных коэффициентах избытка воздуха и наполнения, различных температурах смеси во впускном трубопроводе. Результаты моделирования проверены экспериментально на изоктане и октановой смеси (60% изоктана), и на товарных бензинах. Установлено, что при невысокой степени сжатия (до 5-7) преобладает низкотемпературный механизм самовоспламенения, при больших степенях – высокотемпературный механизм. Граница возникновения детонации в ДВС может быть определена по моменту самовоспламенения (взрыва) в несгоревшей части заряда при остаточной цикловой доле несгоревшего топлива не менее 10%.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием, детонация, математическое моделирование детонации, задержки самовоспламенения, расчёт момента самовоспламенения

Формат цитирования: Капустин А.В., Чумаков В.Л., Девянин С.Н., Жоробеков Б.А. Математическое моделирование детонации в двигателях с искровым зажиганием // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 43-51. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-43-51>.

© Капустин А.В., Чумаков В.Л., Девянин С.Н., Жоробеков Б.А., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Mathematical modeling of engine detonation in spark ignition engines**Aleksandr V. Kapustin**, CSc (Eng), Associate Professor¹

aleksandr.kapustin@novsu.ru

Valery L. Chumakov✉, CSc (Eng), Professor²valery.chumakov@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0002-1442-4416>

Sergey N. Devyanin, DSc (Eng), Professor²

devta@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6776-0432>

Bolotbek A. Zhorobekov, PhD (Eng), Associate Professor³

bolot60@rambler.ru

¹ Novgorod State University named after Yaroslav the Wise; 173003, Russian Federation, Veliky Novgorod, Bolshaya St. Petersburg st., 41

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127550, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya st., 49

³ Osh Technological University named after M. Adyshev; 723503, Kyrgyz Republic, Osh, Isanov st. 81

Abstract. Adjusting engines with a high compression ratio operating on traditional gasoline grades is simplified by the application of mathematical models of the operating cycle that predict the self-ignition of the fuel-air mixture. Mathematical simulation of detonation based on the analysis of a computational model of the thermodynamic cycle of a spark-ignited piston engine, which is close to the actual cycle, can be used to determine with sufficient accuracy in time the change in the current cycle pressure and the temperature of the unburned part of the charge. The model takes into account the heat exchange between the combustion zones of the charge and the walls of the combustion chamber. The onset of detonation is associated with the point of self-ignition of the unburned part of the charge and is determined depending on the thermodynamic parameters of the unburned part of the charge and the kinetic mechanism of pre-ignition chemical processes in the fuel-air mixture. It is shown that mathematical modeling of the self-ignition of the unburned part of the charge in a spark-ignition piston-type internal combustion engine can be performed in the same way as the modeling of self-ignition of the fuel-air mixture under continuing compression in units with a free-sliding piston. The accuracy of the self-ignition calculation using the cycle model has been experimentally verified by indicating it at different speeds and at different excess air and charge volume ratios, as well as different mixture temperatures in the intake manifold. The simulation results were verified experimentally on isooctane and octane blends (60% isooctane) and on commercial gasoline. It was found that at low compression ratios (up to 5 to 7), the low-temperature mechanism of self-ignition prevails, while at higher compression ratios, the high-temperature mechanism prevails. The detonation limit of an internal combustion engine can be determined by the point of self-ignition (explosion) in the unburned part of the charge at a residual cycle fraction of unburned fuel of at least 10%.

Key words: internal combustion engine with spark ignition, engine detonation, mathematical modeling of detonation, self-ignition delays, calculation of the point of self-ignition.

For citation: Kapustin A.V., Chumakov V.L., Devyanin S.N., Zhorobekov B.A. Mathematical modeling of engine detonation in spark ignition engines. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(4):43-51. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-43-51>.

Введение. Несмотря на новые тенденции в развитии автотракторного двигателестроения, двигатели с искровым зажиганием широко используются не только на легковых автомобилях, но и в средствах малой механизации, позволяя существенно увеличить производительность ручного труда. В целях повышения мощности и топливной экономичности развитие современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с искровым зажиганием направлено на повышение степени сжатия. Рост степени сжатия при создании двигателей ограничен октановыми числами применяемых традиционных бензинов и возможными нарушениями процесса сгорания в виде детонации. Тем не менее современный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием (Хонда, Тойота) может обеспечивать достижение степени сжатия до 14...16 ед.

В связи с расширением использования природного газа или биогаза в качестве топлива для автотракторных двигателей возросла актуальность исследований детонационных свойств двигателей. Высокие детонационные свойства этого топлива позволяют

использовать на двигателе высокую степень сжатия и наддув [1-3]. Экспериментальная доводка таких двигателей и поиск их оптимального регулирования даже в условиях цифрового компьютерного регулирования представляют сложную задачу. Особые условия процессов воспламенения и сгорания требуют своего решения и в двухтопливных газодизельных двигателях, особой проблемой которых может быть детонация обеднённой газозоудшной смеси в условиях высокой степени сжатия [4-5]. Поиск оптимального регулирования двигателей с высокой степенью сжатия, использующих традиционные сорта бензина, может быть существенно упрощён при разработке и использовании математических моделей рабочего цикла, прогнозирующих самовоспламенение топливо-воздушной смеси.

Цель исследований: проанализировать существующие теоретические и экспериментальные данные по оценке задержек самовоспламенения топливно-воздушных смесей различного состава, уточнить механизм самовоспламенения и последующей детонации. Разработать математическую модель рабочего

цикла с учётом моделирования механизма детонации заряда в цилиндре двигателя.

Материалы и методы. Под детонацией в поршневом двигателе с искровым зажиганием понимается детонационная волна скачка давления, представляющая собой ударную волну, которая поддерживается энергией от сгорания остаточной дозы топлива. Этой энергии достаточно для поддержания волны во времени и многократного отражения ее от стенок.

Для математического моделирования детонации нужно знать механизм зарождения ударной волны и необходимое минимальное остаточное количество топлива, энергии которого достаточно как для зарождения ударной волны, так и для поддержания ее во времени.

В настоящее время нет единого мнения о механизме зарождения ударных волн в двигателе с искровым зажиганием. Сторонники одной точки зрения считают, что ударная волна зарождается в результате аккумуляции элементарных волн давления, возникающих от движущегося с ускорением фронта пламени по аналогии с зарождением ударной волны при сгорания горючих газовых смесей в трубах. В этом случае нужно иметь математический аппарат аккумуляции (наложения и суммирования) элементарных волн повышения давления от фронта пламени с учётом механизмов предпламенных экзотермических химических реакций в этих волнах. Но это достаточно сложная задача, которая требует дополнительных экспериментальных исследований.

Согласно другой точке зрения детонация зарождается в результате самовоспламенения порций заряда, до которого фронт горения доходит в последнюю очередь. Такого взгляда придерживаются большинство исследователей, и в данной работе математическое моделирование детонации основано на теории самовоспламенения последних порций заряда. В этом случае волновыми возмущениями от фронта пламени пренебрегают и определяют момент самовоспламенения в зависимости от термодинамических параметров несгоревшей части заряда и кинетического механизма предпламенных химических процессов в топливно-воздушной смеси.

Момент самовоспламенения определяется на основе выражения

$$y = \int_0^{\tau} w \cdot d\tau \geq y_{кр}, \quad (1)$$

где y – текущая концентрация активных частиц (радикалов) в ходе предпламенных химических реакций; $y_{кр}$ – некоторая критическая концентрация этих частиц (константа), при которой возникает самовоспламенение (взрыв); w – формально-кинетическое выражение скорости брутто-реакции предпламенных процессов, которая в момент взрыва достигает критического значения $w_{кр}$; τ – время.

Формально-кинетическое выражение скорости брутто-реакции в общем случае имеет вид:

$$w = A \cdot p^m \cdot e^{-E/(R \cdot T)}, \quad (2)$$

где $A = \text{const}$ – предэкспонентный множитель; m – эмпирический показатель, характеризующий условный порядок брутто-реакции; p , T – термодинамические давление и температура газовой смеси; $E = \text{const}$ – величина, условно характеризующая энергию активации; R – универсальная газовая постоянная.

Подставив (2) в (1), разделив обе части на $y_{кр}$ и обозначив $y / y_{кр} = J$; $\frac{A}{y_{кр}} = A'$, получим:

$$J = A' \cdot \int_0^{\tau} p^m \cdot e^{-E/(R \cdot T)} \cdot d\tau \geq 1. \quad (3)$$

Выражение (3) показывает, что как только текущее значение интеграла J превысит значение 1, происходит самовоспламенение (взрыв) горючей смеси.

Условные кинетические константы (A' , m , E) определяются экспериментальным путем или непосредственно в условиях поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС), или в специальных установках по исследованию самовоспламенения горючих газовых смесей.

Для условий поршневых ДВС хорошо зарекомендовало себя кинетическое выражение Дауда и Ейза, полученное для эталонных изоктано-гептановых смесей [6]:

$$\frac{1}{19,75} \cdot \left(\frac{ON}{100} \right)^{-3,4107} \cdot \int_0^{\tau} (10,2 \cdot p)^{1,7} \cdot e^{-3800/T_n} \cdot d\tau \geq 1, \quad (4)$$

где ON – октановое число топлива (процентная объемная доля изоктан в смеси с нормальным гептаном); p – текущее термодинамическое давление цикла; T_n – текущая термодинамическая температура несгоревшей части заряда; τ – время.

Результаты и их обсуждение. Исследования в специальных установках показали, что условия самовоспламенения несгоревшего заряда в двигателях наиболее приближены в поршневых установках адиабатического (импульсного) сжатия. Исследовать самовоспламенение можно двумя способами: в условиях постоянного объема в установках со стопорением поршня и в условиях продолжающегося сжатия в установках со свободно летящим поршнем. В первом случае изучают длительность задержек самовоспламенения, а в случае продолжающегося сжатия со свободно летящим поршнем – термодинамические давление и температуру, при которых происходит самовоспламенение (взрыв) газовой смеси.

Исследование самовоспламенения при постоянном объеме происходит в строго контролируемых условиях и позволяет точнее и глубже изучить механизм самовоспламенения. В работе А.Н. Воинова и Д.И. Скороделова¹ выполнены исследования самовоспламенения

двух эталонных топлив: изооктана (ОЧ100) и топливной эталонной смеси, состоящей из 60% по объёму изооктана и 40% нормального гептана (ОЧ60). Изучались горючие смеси стехиометрического состава при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$. Показано, что изооктан и изооктано-гептановые смеси имеют двухстадийный механизм самовоспламенения. Суммарная задержка самовоспламенения определяется суммой задержек: низкотемпературной (холоднопламенной) стадии (z_{HT}) и высокотемпературной стадий (z_{BT}):

$$z = z_{\text{HT}} + z_{\text{BT}}. \quad (5)$$

Задержку холоднопламенной стадии авторы подразделяют на две составляющие:

$$z_{\text{HT}} = z_1 + z_2. \quad (6)$$

Каждая из задержек z_j (z_1, z_2, z_{BT}) описывается кинетическим выражением в форме закона Аррениуса:

$$z_j = 10^{A_j} \cdot (10,2 \cdot p)^{n_j} \cdot e^{B_j/T}, \quad (7)$$

где p, T – термодинамические давление и температура в конце сжатия; A_j, n_j, B_j – эмпирические показатели топлива.

В работе¹ определены значения A_j, n_j, B_j , которые представлены в таблице.

Сравнение экспериментальных и расчётных задержек самовоспламенения по приведенным формулам показало достаточно высокую точность расчета (рис. 1).

Условия самовоспламенения в продолжающемся сжатии отличаются от условий самовоспламенения при постоянном объёме. В некоторых работах^{2,3} встречаются возражения по поводу возможности

Таблица

Значения эмпирических показателей A_j, n_j, B_j

Table

Values of empirical indicators A_j, n_j, B_j

Обозначение задержки Delay indication		Показатели Indicator	Изооктан (ОЧ100) Isooctane (O.N.)	Смесь 60 об.% изооктана, 40% нормального гептана (ОЧ60) Blend: 60% v/v isooctane and 40% normal heptane (O.N. 60)
z_{HT}	z_1	A_1	-7,06	-6,73
		n_1	0,367	0,325
		B_1	14000	13000
	z_2	A_2	8,07	$10,77 - 85 \cdot 10,2 \cdot p / T - 780 / T$
		n_2	1,89	$5,21 - 1900 / T$
		B_2	-7730	$189,8 \cdot 10,2 \cdot p - 10648$
z_{BT}		A_{BT}	-4,0	-6,01
		n_{BT}	1,38	0,925
		B_{BT}	14500	16900

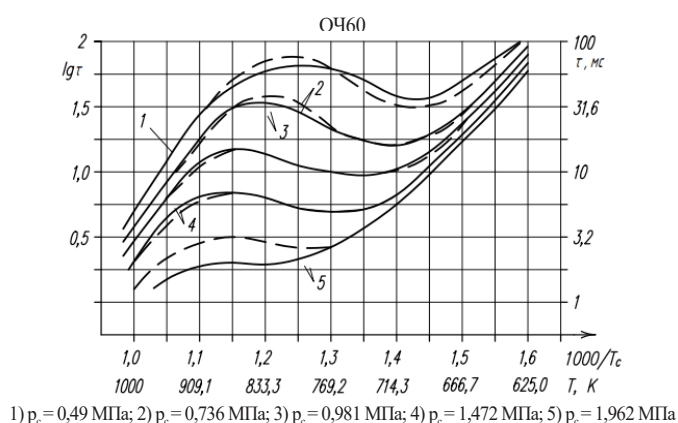
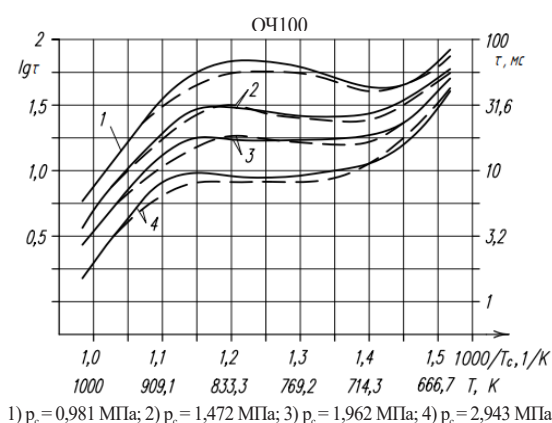


Рис. 1. Сравнение расчётных и экспериментальных задержек самовоспламенения в условиях постоянного объёма (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,0$):

— эксперимент; --- расчёт¹

Fig. 1. Self-ignition delays under constant volume conditions at the air-fuel ratio $\alpha = 1.0$:

— experiment; --- calculation¹

¹ Воинов А.Н., Скороделов Д.И. Анализ макрокинетических зависимостей при низко- и высокотемпературном самовоспламенении углеводородоздушных смесей // Труды МАДИ. Двигатели внутреннего сгорания. 1972. Вып. 49. С. 82-90.

использования формально-кинетических выражений, полученных в условиях постоянного объёма, для расчёта момента самовоспламенения (взрыва) в процессе продолжающегося сжатия. Так, А.Н. Воинов отмечает, что при самовоспламенении в процессе продолжающегося сжатия задержки «...подчиняются существенно иным зависимостям, чем при самовоспламенении в условиях постоянного объёма»¹. В исследованиях эти утверждения проверены. Для этого использованы данные работы [7] экспериментальных исследований самовоспламенения топливно-воздушных смесей стехиометрического состава тех же эталонных топлив (ОЧ100 и ОЧ60) в установке импульсного сжатия со свободно летящим поршнем. В работе [7] измерялось давление самовоспламенения (взрыва) в условиях продолжающегося сжатия при разных скоростях поршня.

Момент самовоспламенения в продолжающемся сжатии можно определить интегрированием по формуле:

$$J = \int_0^{\tau} (1/z) \cdot d\tau \geq 1, \quad (8)$$

где z – эмпирическое выражение задержки самовоспламенения, полученного в условиях постоянного объёма; τ – время.

Выражение (8) получается из (1) и (3) с учётом того, что задержка самовоспламенения z обратно пропорциональна скорости брутто-реакции w , то есть $z \sim 1/w$. Когда значение $J = \int_0^{\tau} (1/z) \cdot d\tau = 1$, скорость брутто-реакции или концентрация активных частиц достигают критического значения и происходит взрыв.

Интегрирование по (8) выполнялось численным методом трапеций по специально разработанной для этого программе. Текущие термодинамические давление и температура сжатия определялись по формулам:

$$P = \left(\frac{440}{440 - S} \right)^k \cdot P_0; \quad (9)$$

$$T = \left(\frac{440}{440 - S} \right)^{k-1} \cdot T_0,$$

где P_0 и T_0 – термодинамические давление и температура в начале сжатия [7]; 440 – максимальный ход поршня используемой установки импульсного сжатия, мм; S – текущее положение поршня; k – показатель адиабаты (отношение истинных изобарной и изохорной теплоёмкостей).

Интегрирование выполнялось с шагом по времени:

$$\Delta\tau = \Delta S / C_n, \quad (10)$$

где ΔS – шаг перемещения поршня (принято $\Delta S = 0,2$ мм); C_n – средняя скорость поршня [7].

² Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1977. 277 с.

³ Броне Д. Сгорание в поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1969. 248 с.

В работе [7] представлены графические зависимости давлений самовоспламенения от скорости нарастания давления в момент появления холодного пламени (начало низкотемпературной стадии). Поэтому в программе определялась скорость нарастания давления $\Delta p / \Delta \tau = (p_i - p_{i-1}) / \Delta \tau$.

Пример расчёта одной точки самовоспламенения изоктана при средней скорости поршня $C_n = 10$ м/с представлен на рисунке 2. Давление, при котором появлялось холодное пламя для изоктана в опытах [7], равнялось $p_{xn} = 7,4$ МПа вне зависимости от скорости поршня. Поэтому в расчётах по программе скорость нарастания давления $\Delta p / \Delta \tau$ определялась также при давлении 7,4 МПа, как показано на рисунке 2. По аналогии определялись все расчётные точки как для изоктана (ОЧ100), так и для ОЧ60. На рисунке 3 представлены построенные графики, где также показаны экспериментальные точки [7].

Из рисунка 3 следует, что расчёты момента самовоспламенения в продолжающемся сжатии по формулам

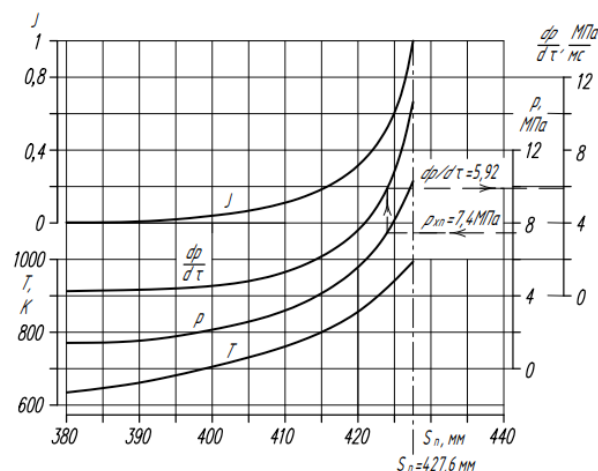


Рис. 2. Пример расчёта момента самовоспламенения изоктана

Fig. 2. Example of isooctane self-ignition calculation

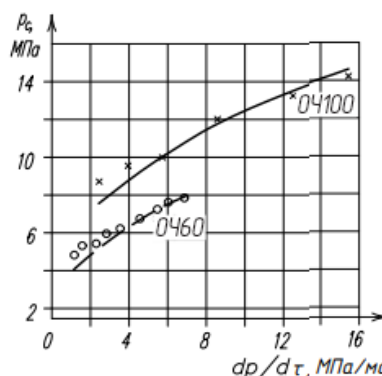


Рис. 3. Сравнение расчётных давлений самовоспламенения с экспериментальными: — расчёт; ×, ° – эксперимент [7]

Fig. 3. Comparison of calculated and experimental self-ignition pressures: — calculated; ×, ° – experiment [7]

задержек самовоспламенения, полученных при постоянном объёме, дают вполне приемлемую точность расчётов. Наблюдаемое небольшое отклонение расчётов от экспериментальных точек в области низких скоростей поршня можно объяснить утечками газа через неплотности, отклонением процесса сжатия от адиабатного ввиду теплоотдачи в стенки, доля которых растёт по мере снижения скорости поршня.

Для математического моделирования детонации в двигателе нужно определять моменты самовоспламенения топлива с различной антидетонационной стойкостью. Возникает вопрос о том, можно ли с помощью имеющихся формально-кинетических выражений самовоспламенения двух топлив (низкооктанового и высокооктанового) выполнять расчёты момента самовоспламенения смеси этих топлив.

Допустим, что предпламенные химические реакции каждого топлива, входящего в топливную смесь, протекают независимо друг от друга, а общая скорость грунто-реакции пропорциональна их мольным долям:

$$w_{см} = r_{100} \cdot w_{100} + r_{60} \cdot w_{60}, \quad (11)$$

где r_{100} , r_{60} – мольные доли соответственно ОЧ100 и ОЧ60; w_{100} и w_{60} – скорости предпламенных химических реакций ОЧ100 и ОЧ60.

Соответственно задержка самовоспламенения смеси этих топлив –

$$\frac{1}{z_{см}} = \frac{r_{100}}{z_{100}} + \frac{r_{60}}{z_{60}}, \quad (12)$$

где z_{100} , z_{60} – задержки самовоспламенения ОЧ100 и ОЧ60; $z_{см}$ – задержка самовоспламенения топливной смеси, состоящей из изоктана, 60 об.% изоктана и 40% нормального гептана.

Учитывая, что молярные массы и плотности топлив ОЧ100 и ОЧ60 незначительно отличаются по величине, можно допустить, что мольные доли равны их объёмным долям в жидкой фазе. В этом случае октановое число смеси топлив ОЧ100 и ОЧ60 можно определить по формуле:

$$ОЧ_{см} = r_{100} \cdot 100 + r_{60} \cdot 60. \quad (13)$$

Например, если объёмная доля ОЧ100 (в жидкой фазе) равна $r_{100} = 0,3$, а объёмная доля ОЧ60 равна $r_{60} = 0,7$, то октановое число топливной смеси $ОЧ_{см} = 0,3 \cdot 100 + 0,7 \cdot 60 = 72$ ед.

В работе [7] даны графические зависимости задержек самовоспламенения для эталонной смеси с октановым числом ОЧ = 78 ед. (78 об.% изоктана и 22% н. гептана), полученные экспериментальным путем при тех же условиях, что и для задержек самовоспламенения ОЧ100 и ОЧ60.

Из двух эталонных топлив ОЧ100 и ОЧ60 изоктано-гептановая смесь с ОЧ = 78 получается, если объёмные доли этих топлив равны $r_{100} = 0,45$ и $r_{60} = 0,55$.

Задержки самовоспламенения эталонной смеси с ОЧ = 78 ед., рассчитанные по формуле (12), сопоставлены с экспериментальными данными таблицы [7]. Результаты анализа показали достаточно хорошую точность расчёта (рис. 4).

Если величину $1/z = z^{-1}$ назвать обратной задержкой, то выражение (12) можно интерпретировать так: обратная задержка смеси двух топлив равна сумме произведений объёмных долей этих топлив на их обратные задержки.

Это правило требует дополнительных подтверждений, но для углеводородов одной группы (в рассмотренном случае это алканы) в сравнительно небольшом диапазоне антидетонационной стойкости двух топлив (низкооктанового и высокооктанового) может быть вполне приемлемым.

Для математического моделирования детонации в двигателе подойдёт любая математическая модель термодинамического цикла поршневого двигателя с искровым зажиганием, приближенная к действительному циклу, которая с приемлемой точностью определяет во времени текущее давление цикла и температуру несгоревшей части заряда. В исследованиях была использована математическая модель цикла, разработанная группой авторов⁴ [8] и дополненная расчётом теплообмена А.В. Капустиным⁵. Основные особенности данной математической модели цикла изложены в учебнике⁶. Отметим, что в модели теплоотдача в стенки рассчитывается как от сгоревших зон, так и от несгоревшей части, а передача теплоты от сгоревшей к несгоревшей части заряда не учитывается, потому что турбулентная

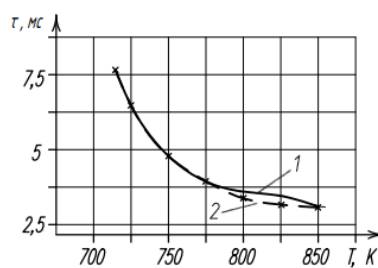


Рис. 4. Задержки самовоспламенения для эталонной смеси с ОЧ = 78 в условиях постоянного объёма:

1 – эксперимент; 2 – расчёт

Fig. 4. Self-ignition delays for a reference mixture with O.N. = 78:

1 – experiment; 2 – calculation

⁴ Максимов А.Л., Черняк Б.Я. Расчётная модель действительного цикла двигателя внутреннего сгорания // Сборник научных трудов. М.: МАДИ, 1976. С. 74-81.

⁵ Капустин А.В. Расчёт цикла ДВС при многозонной модели с учётом теплопотерь в стенки. Рабочие процессы автотракторных двигателей и их агрегатов // Сборник научных трудов. М.: МАДИ, 1983. С. 75-83.

⁶ Двигатели внутреннего сгорания: Учебник для вузов. Кн. 3. Компьютерный практикум. Моделирование процессов в ДВС / Под ред. В.Н. Луканина, М.Г. Шатрова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2005. 414 с.

скорость горения больше скорости переноса теплоты теплопроводностью.

Расчёт момента самовоспламенения в несгоревшей части заряда выполняется как по формулам (5-7) в первом варианте (в условиях постоянного объёма), так и по формуле (4) во втором варианте (в условиях продолжающегося сжатия).

Точность расчёта самовоспламенения по модели цикла проверена экспериментально путём индицирования на различных скоростных режимах при различных коэффициентах избытка воздуха (α) и наполнения (η_v), различных температурах смеси во впускном трубопроводе ($t_{см}$). Более тщательно она проверена на изоктане и 60-октановой смеси, выборочно на отдельных режимах проверялась на эталонных смесях с ОЧ от 60 до 100 ед. и на товарных бензинах. Точность расчёта оценивалась по разности углов начала детонации (расчётного φ_p и экспериментального φ_o), то есть $\Delta\varphi_p = \varphi_p - \varphi_o$, наблюдающейся в ходе сгорания, после – в виде резкого повышения давления после верхней мёртвой точки ВМТ (схематично показано на рисунке 5).

Результаты проверки модели представлены на рисунках 6, 7.

Можно отметить, что математическая модель показывает неплохую точность расчёта момента самовоспламенения по обоим вариантам и с качественной стороны правильно прослеживает самовоспламенение при изменении параметров и режима работы двигателя.

При экспериментальной проверке модели рассчитывалась доля сгоревшего топлива к моменту самовоспламенения при различной интенсивности детонации. Интенсивность детонации оценивалась инструментально по начальному скачку давления Δp (рис. 5). Технические возможности не позволяют измерить абсолютное значение давлений в детонационной волне, но косвенно величина Δp может характеризовать интенсивность детонации.

На рисунке 8 показана связь между долей горевшего топлива X и величиной скачка давления Δp . При любой интенсивности детонации доля сгоревшего топлива к началу детонации не превышает $X = 0,9$, что согласуется с данными источника [9].

Поэтому за границу разделения нормального горения от детонационного можно принять условие: $J = \int_0^{\tau} (1/z) \cdot d\tau \geq 1$ при $X \leq 0,9$.

При этих граничных условиях возникновения детонации проводились последующие расчёты требуемого октанового числа топлива в зависимости от степени сжатия, угла опережения зажигания и др. По двум вариантам расхождение в оценке октанового числа составляло не более 5%. Но расчёт момента

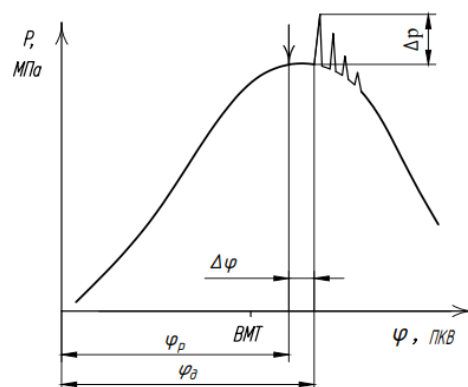


Рис. 5. Схема оценки расчётного φ_p и экспериментального φ_o начала детонации
Fig. 5. Diagram for estimating the calculated φ_p and experimental φ_o detonation onset

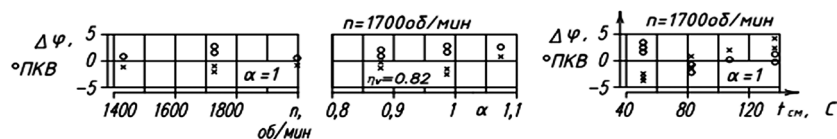


Рис. 6. Оценка точности расчёта момента самовоспламенения изоктана (ОЧ100):

○ – в условиях постоянного объёма; × – в условиях продолжающегося сжатия

Fig. 6. Evaluation of calculation accuracy of isooctane self-ignition (O.N. 100):

○ – under conditions of constant volume;

× – under conditions of continuing compression

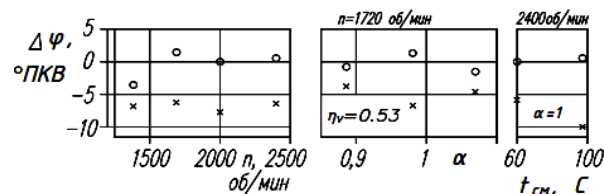


Рис. 7. Оценка точности расчёта эталонной смеси ОЧ60:

○ – в условиях постоянного объёма;

× – в условиях продолжающегося сжатия

Fig. 7. Evaluation of the calculation accuracy of reference mixture O.N.60:

○ – under conditions of constant volume;

× – under conditions of continuing compression

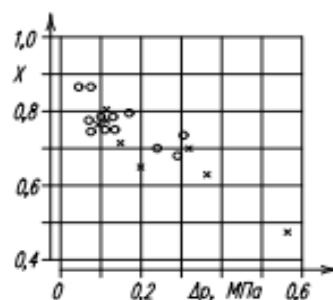


Рис. 8. Связь между интенсивностью детонации и долей сгоревшего топлива к началу детонации:
○ – ОЧ100; × – ОЧ60

Fig. 8. Relationship between the detonation intensity and the proportion of burnt fuel by the detonation onset:
○ – O.N.100; × – O.N.60

самовоспламенения по второму варианту, то есть по выражениям для задержек самовоспламенения топлива с двухстадийным механизмом, позволяет оценить вклад холоднопламенной и высокотемпературной стадий в общий механизм самовоспламенения.

Выражение (8) с учетом (5) можно преобразовать следующим образом:

$$J = \int_0^{\tau} \left(\frac{1}{z} \right) \cdot d\tau = \int_0^{\tau} \left(\frac{1}{z_{нт}} + \frac{1}{z_{вт}} \right) \cdot d\tau = \int_0^{\tau} \left(\frac{1}{z_{нт}} \right) \cdot d\tau + \int_0^{\tau} \left(\frac{1}{z_{вт}} \right) \cdot d\tau = J_{нт} + J_{вт}, \quad (14)$$

где $J_{нт}$ – величина, характеризующая влияние низкотемпературной (холоднопламенной) стадии; $J_{вт}$ – величина, характеризующая влияние высокотемпературной стадии самовоспламенения.

Такой подход дает возможность оценить то, как велико влияние низкотемпературной аномальной (задержка самовоспламенения не меняется или растёт с ростом температуры) стадии самовоспламенения в общий процесс самовоспламенения топливно-воздушной смеси. Пример такого анализа для топлив ОЧ100 и ОЧ60 приведен на рисунке 9.

Расчёт циклов выполнен при одинаковых параметрах режима работы: частота вращения $n = 2000$ об/мин; коэффициент наполнения $\eta_v = 0,84$; длительность

тепловыделения – 50° поворота коленчатого вала; температура в начале сжатия – 350 К; коэффициент остаточных газов – $0,06$; давление окружающей среды – $0,098$ МПа; углы зажигания – оптимальные. При этих параметрах определена допустимая по условию детонации степень сжатия: $\varepsilon = 8$ для ОЧ100, $\varepsilon = 4,9$ для ОЧ60.

На рисунке 9 представлены кривые изменения давления циклов (p), температуры несгоревшей части заряда (T_n) и доли сгоревшего топлива (X) на участке цикла от начала тепловыделения до момента начала детонации ($J \geq 1$ при $X \leq 0,9$), а также показано нарастание интегралов $J_{нт}$, характеризующих вклад низкотемпературной стадии в общий процесс развития самовоспламенения.

Из данных рисунка следует, что для изооктана величина интеграла $J_{нт} = 0,15$, в то время как для топлива ОЧ60 $J_{нт} = 0,96$. Таким образом, при невысоких степенях сжатия преобладает низкотемпературный механизм самовоспламенения, а при высоких преобладает высокотемпературный механизм. Возможно, по этой причине хорошо известные способы борьбы с детонацией, изученные еще Г.Р. Рикардо⁷ при степенях сжатия около 5, при повышении степеней сжатия снижали свою эффективность или вообще не оказывали на детонацию никакого влияния.

Выводы

1. Формально-кинетические выражения для задержек самовоспламенения топлив, полученные на основе экспериментальных исследований самовоспламенения на безмоторных установках как в условиях сгорания при постоянном объёме, так и в условиях поджатия смеси при сгорании, могут быть использованы для оценки возникновения детонации в ДВС с искровым воспламенением при расчётно-аналитическом моделировании рабочего цикла двигателя.

2. Полученные экспериментально на безмоторных установках формально-кинетические выражения задержек самовоспламенения двух топлив (низкооктанового и высокооктанового) позволяют определить задержку самовоспламенения их смеси. Обратная задержка самовоспламенения смеси из двух топлив равна сумме произведений их объёмных долей на обратные задержки самовоспламенения этих топлив.

3. Математическое моделирование механизма развития самовоспламенения несгоревшей части заряда в поршневых двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием можно выполнять так же, как и моделирование механизма развития самовоспламенения топливно-воздушной смеси в условиях продолжающегося сжатия в экспериментальных установках со свободно летящим поршнем.

⁷ Рикардо Г.Р. Быстроходные двигатели внутреннего сгорания. М.: Машгиз, 1960. 412 с.

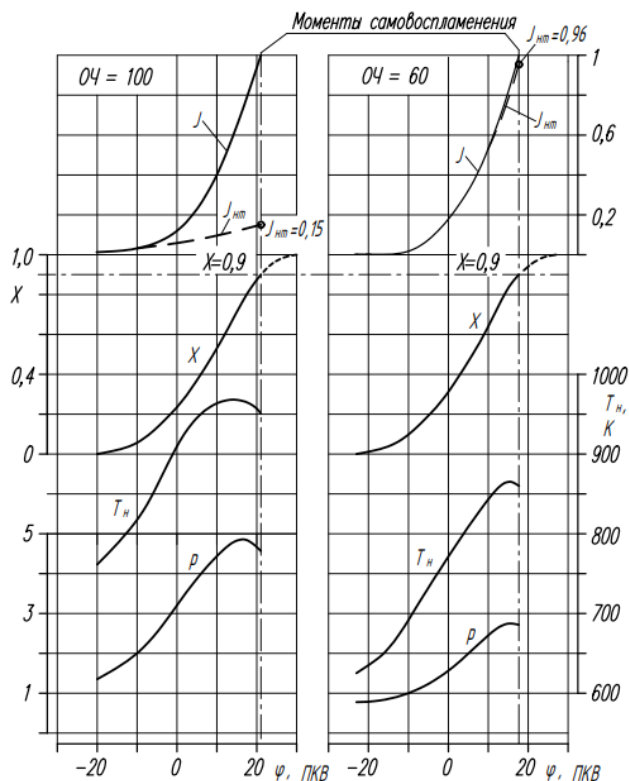


Рис. 9. Пример расчёта момента возникновения детонации ($J \geq 1$, $X \leq 0,9$) для топлив ОЧ100 и ОЧ60

Fig. 9. Example of calculating the detonation onset ($J \geq 1$, $X \leq 0,9$) for fuels O.N.100 and O.N.60

4. Граница возникновения детонации в ДВС может быть определена по моменту самовоспламенения (взрыва) в несгоревшей части заряда при остаточной цикловой доле несгоревшего топлива не менее 10%.

5. Расширение экспериментальных исследований самовоспламенения углеводородов различных групп, входящих в состав моторных топлив и имеющих

разные механизмы самовоспламенения (одностадийный или двухстадийный), в установках импульсного сжатия со стопорением поршня позволит глубже понять природу появления детонации в двигателях, проводить математическое моделирование детонации и быстрее находить эффективные методы улучшения антидетонационных свойств двигателей и повышения граничных условий их бездетонационной работы.

Список использованных источников

1. Хакимов Р.Т., Огнев О.Г. Использование природного газа в качестве моторного топлива для автотракторной техники: электронный // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции (Екатеринбург, 3 декабря 2021 г.). Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2022. С. 39-41. EDN: OVNWUP.
2. Димогло А.В., Козлов В.Г. Исследование энергетических характеристик использования природного метана в газодизельном процессе ДВС // АгроЭкоИнфо. 2022. № 3 (51). С. 21. <https://doi.org/10.51419/202123317>
3. Девянин С.Н., Чумаков В.Л., Марков В.А., Ефанов А.А. Использование биогаза в качестве топлива для дизелей // Грузовик. 2011. № 11. С. 32-43. EDN: OJYTTJ.
4. Chumakov V.L., Devyanin S.N., Bijaev A.V. Nitrogen oxide formation with nonuniform fuel distribution in diesel engine. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1679(5):52089. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052089>
5. Чумаков В.Л., Девянин С.Н. Снижение выбросов оксидов при управлении процессом сгорания в дизельном двигателе // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 1. С. 48-56. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-1-48-56>
6. Dauaud A.M., Eyzat P. Four – Octane – Number Method for Predicting the Anti-Knock Behavior of fuels and Engines. *SAE Transactions*. 1978:780080. <https://doi.org/10.4271/780080>
7. Saidaminov S.S. The effects of fuel structure on the autoignition of fuel-air mixtures. *SAE*. 1980. 800046. <https://doi.org/10.4271/800046>
8. Капустин А.В., Смирнов С.В., Чумаков В.Л. Математическая модель рабочего цикла двигателя с искровым зажиганием // Чтения академика В.Н. Болтинского. 2021. С. 86-95. EDN: FQYTNB.
9. By A., Kempinski B., Rife J.M. Knock in Spark ignition Engines. *SAE Techn. Pap.* 1981:810147. <https://doi.org/10.4271/810147>

Вклад авторов

А.В. Капустин – формулирование основной концепции исследования, разработка математической модели, табличное и графическое представление результатов, формирование выводов исследования. В.Л. Чумаков – разработка математической модели рабочего цикла, анализ литературы, подготовка начального варианта текста, описание результатов, формирование выводов. С.Н. Девянин – разработка методологии исследования, анализ и описание результатов, формирование выводов исследования, анализ литературы. Б.А. Жоробеков – обработка результатов опытов, описание результатов и формирование выводов исследования, анализ литературы.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 22.06.2023; поступила после рецензирования и доработки 15.07.2023; принята к публикации 16.07.2023

References

1. Khakimov R.T., Ognev O.G. Use of natural gas as motor fuel for automotive equipment. *Innovative development of land transport equipment and technologies: Collection of articles of the Third All-Russian Scientific and Practical Conference* (Yekaterinburg, December 3, 2021). Yekaterinburg: Ural University Press, 2022:39-41. (In Rus.)
2. Dimoglo A.V., Kozlov V.G. Study of the energy characteristics of the use of natural methane in the gas-diesel process of an internal combustion engine. *Agroecoinfo*. 2022;3(51):21. (In Rus.) <https://doi.org/10.51419/202123317>
3. Devyanin S.N., Chumakov V.L., Markov V.A., Efanov A.A. Using biogas as a fuel for diesel engines. *Gruzovik*. 2011;11:32-43. (In Rus.) EDN: OJYTTJ
4. Chumakov V.L., Devyanin S.N., Bijaev A.V. Nitrogen oxide formation with nonuniform fuel distribution in diesel engine. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1679(5):52089. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052089>
5. Chumakov V.L., Devyanin S.N. Oxide emissions reduction from combustion control in a diesel engine. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(1):48-56. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-1-48-56>
6. Dauaud A.M., Eyzat P. Four – Octane – Number Method for Predicting the Anti-Knock Behavior of fuels and Engines. *SAE Transactions*. 1978:780080. <https://doi.org/10.4271/780080>
7. Saidaminov S.S. The effects of fuel structure on the autoignition of fuel-air mixtures. *SAE*. 1980:800046. <https://doi.org/10.4271/800046>
8. Kapustin A.V., Smirnov S.V., Chumakov V.L. Mathematical model of spark-ignition engine working cycle. *In: Readings devoted to the memory of Academician V.N. Boltinsky*. 2021:86-95. (In Rus.)
9. By A., Kempinski B., Rife J.M. Knock in Spark ignition Engines. *SAE Techn. Pap.* 1981:810147. <https://doi.org/10.4271/810147>

Contribution of the authors

A.V. Kapustin – conceptualization; development of the mathematical model; tabular and graphical visualization of the results; review and conclusions. V.L. Chumakov – development of the mathematical model of the working cycle; literature review; writing – original draft preparation; description of the results; review and conclusions. S.N. Devyanin – research methodology; analysis and description of the results; conclusions; literature review. B.A. Zhorobekov – processing and describing the experimental results; conclusions; literature review.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 22.06.2023; revised 15.07.2023; accepted 16.07.2023