

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ПО ЗАДЕРЖКАМ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВА

**А. В. Капустин¹, А. М. Жданов¹, В. Л. Чумаков²,
С. Н. Девянин², А. В. Бижаев²**

¹ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Анализируется зависимость задержек самовоспламенения и возникновения детонации в двигателях для изооктана и товарных бензинов с разным октановым числом. Отмечается значительное влияние на детонацию роста доли парафиновых углеводородов с задержкой самовоспламенения по низкотемпературному принципу.

Ключевые слова: детонация, степень сжатия, задержки самовоспламенения, двухстадийный механизм самовоспламенения, состав топливных углеводородов.

DETONATION PREDICTION BASED ON FUEL SELF-IGNITION DELAYS

**A. V. Kapustin*, A. M. Zhdanov*, V. L. Chumakov^b,
S. N. Devyanin^b, A. V. Bizahaev^b**

^aNovgorod State University named after Yaroslav the Wise, Veliky Novgorod, Russian Federation

^bRussian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. The dependence of self-ignition delays and the occurrence of detonation in engines for iso-octane and commercial gasolines with different octane numbers is analyzed. There is a significant influence on the detonation of the increase in the proportion of paraffinic hydrocarbons with a delay in self-ignition according to the low-temperature principle.

Keywords: detonation, compression ratio, self-ignition delays, two-stage self-ignition mechanism, composition of fuel hydrocarbons.

Исследования самовоспламенения углеводородов, входящих в состав бензинов, показывают тесную связь между

длительностями задержек самовоспламенения и детонационной стойкостью этих углеводородов. Чем больше длительность задержки самовоспламенения, тем выше октановое число углеводородов. В частности, на рисунке 1 представлены графики задержек самовоспламенения (z) парафиновых (алканов) углеводородов и степени сжатия (ϵ) ограничиваемой условиями детонации в зависимости от октанового числа топлива по исследовательскому методу (ОЧИ) [1,2], которые наглядно подтверждают такую связь.

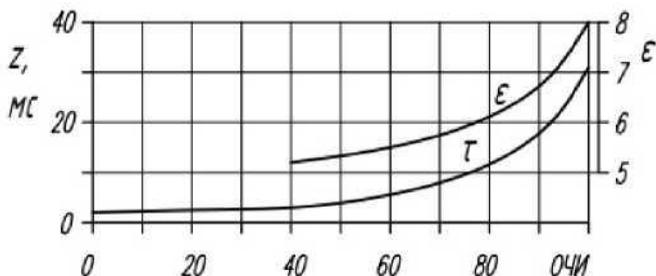


Рисунок 1 - Зависимости степени сжатия при стандартной интенсивности детонации и задержек самовоспламенения парафиновых углеводородов от их октанового числа на установке ИТ9

В работе [3] показано, что если известна формально-кинетическая зависимость задержки самовоспламенения, то момент самовоспламенения в условиях продолжающегося сжатия можно определить по выражению вида [3]:

$$\int_0^t J_0^T (1/z) - dT > 1 \quad (1)$$

где: t - время, z - эмпирическое формально-кинетическое выражение задержки самовоспламенения, полученное при исследовании самовоспламенения в условиях постоянного объема различными методами.

Из этих методов наиболее близок по условиям развития самовоспламенения заряда в двигателях метод исследования в поршневых установках адиабатического (импульсного) сжатия со стопорением поршня.

В работе [4] выполнены такие исследования самовоспламенения двух эталонных топлив: изооктана (далее 04100) и топливной эталонной смеси, состоящей из 60 % по объему изооктана и

40 % нормального гептана (далее 0460). Изучались горючие смеси стехиометрического состава (коэффициент избытка воздуха равен $\alpha = 1$). Показано, что изооктан и изооктано-гептановая смесь 0460 (как и другие парафиновые углеводороды) имеют двухстадийный механизм самовоспламенения. Для обоих топлив суммарная задержка самовоспламенения (z) определяется суммой задержек: низкотемпературной (холоднопламенной) стадии (z_{HT}) и высокотемпературной стадий (z_{BT}):

$$z = z_{HT} + z_{BT} \quad (2)$$

Задержку низкотемпературной стадии авторы делят на две составляющие

$$z_{HT} = z_{HT1} + z_{HT2} \quad (3)$$

Каждая из задержек Z_{ij} (z_{HT1} , z_{HT2} , z_{BT}) описывается формально-кинетическим выражением вида $Z_{ij} = 10^{14} \cdot p^{-1} \cdot (10.2 \cdot p)^{n_i} \cdot e^{E_{ij}/RT}$.

Интегральное выражение (1) для двухстадийного самовоспламенения с учетом (2) можно преобразовать к следующему виду

$$J = \int_{T_0}^{T_{cr}} \frac{dT}{G \cdot \tau} = \int_{T_0}^{T_{cr}} \frac{dT}{G \cdot \tau_{HT} + \tau_{BT}} \quad (4)$$

где \int_{HT} - интеграл, характеризующий вклад низкотемпературной (холоднопламенной) стадии в общий процесс развития самовоспламенения; \int_{BT} - интеграл, характеризующий соответственно вклад высокотемпературной стадии самовоспламенения.

Длительность задержки самовоспламенения обратно пропорциональна скорости предпламенных химических реакций. Если допустить, что предпламенные химические реакции каждого топлива, входящего в топливную смесь, протекают независимо друг от друга, а общая скорость брутто-реакции пропорциональна их мольным долям, то можно записать:

$$w_{CM} = r_{100} \cdot w_{100} + r_{60} \cdot w_{60} \quad (5)$$

где r_{100} , r_{60} - мольные доли соответственно 04100 и 0460;

w_{100} и w_{60} - скорости предплаженных химических реакций 04100 и 0460.

Отсюда, задержку самовоспламенения смеси этих топлив можно определить по выражению

$$\frac{1}{z_{CM}} = \frac{r_{100}}{z_{100}} + \frac{r_{60}}{z_{60}} \quad /g/$$

где: Z_{100} , Z_{60} - задержки самовоспламенения 04100 и 0460;

Z_{CM} - задержка самовоспламенения топливной смеси этих топлив.

Учитывая, что молярные массы и плотности топлив 04100 и 0460 незначительно отличаются по величине, то можно допустить, что молярные доли равны их объемным долям в жидкой фазе. В этом случае октановое число смеси топлив 04100 и 0460 можно определить по формуле:

$$O_{4CM} = \Gamma_{100} \times 100 + \Gamma_{60} \times 60 \quad (7)$$

При разработке расчетной программы в исходные данные удобно вводить октановое число смеси. Если к уравнению (7) добавить уравнение:

$\Gamma_{100} + \Gamma_{60} = 1$ (8) то совместное решение уравнений (7) и (8) дает выражения для расчета долей топливной смеси при заданном октановом числе:

$$\Gamma_{100} = (O_{4CM} - 60)/40; \quad \Gamma_{60} = 1 - \Gamma_{100} \quad (9)$$

где значение O_{4CM} вводится в исходные данные расчетной программы и справедливо в диапазоне $60 < O_{4CM} < 100$ единиц октанового числа.

Изложенная методика расчета момента самовоспламенения (взрыва) использована в математической модели термодинамического цикла двигателя, особенности которой изложены в [5].

На рисунке 2 представлены показатели, характеризующие процессы развития самовоспламенения несгоревшего заряда для топлив 04100 и 0460 при следующих условиях: длительность тепловыделения - 50 °ПКВ; угол зажигания - оптимальный, обороты двигателя - 2000 об/мин; температура в начале сжатия - 350 К; коэффициент наполнения - 0,9. Характеристика выгорания топлива $X = f(p)$ для обоих топлив одинакова. Детонация возможна, если в момент взрыва остается часть (доля) несгоревшего топлива. Условно эта доля остаточного топлива принята равной 0,1 и, соответственно, доля сгоревшего топлива равняется $X = 0,9$ (рисунок 2). В расчетах, последовательным приближением определялась степень сжатия ξ , при которой выполняется условие самовоспламенения $U \sim 1$ при $X \sim 0,9$.

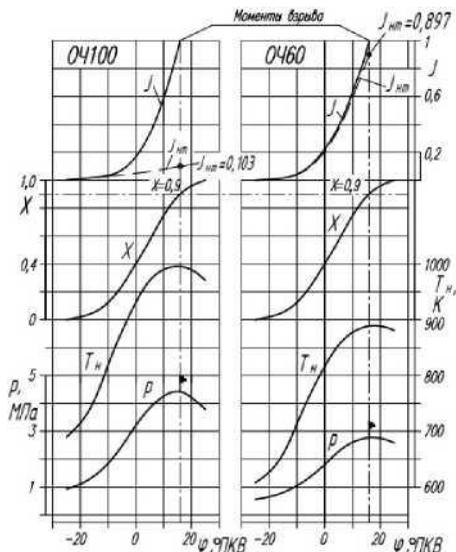


Рисунок 2 - Изменение показателей, характеризующих развитие самовоспламенения несгоревшей части заряда: p - текущее давление цикла; T_n - температура несгоревшей части заряда; X - доля сгоревшего топлива; J - интеграл суммарной обратной задержки самовоспламенения; J_{int} — интеграл обратной задержки низкотемпературной стадии самовоспламенения; - момент взрыва

Как следует из рисунка 2, в случае изооктана самовоспламенение преимущественно развивается по высокотемпературному механизму, а смесь 0460 - по низкотемпературному. Поэтому степень сжатия по условию детонации (самовоспламенения) для топлива 0460 практически не меняется в исследуемом диапазоне начальной температуры, а для топлива 04100 это изменение очень сильное. Топливо 0480 по своему поведению ближе к 0460 (рисунок 3). Влияние на самовоспламенение низкотемпературной стадии на него более сильное, чем высокотемпературной, хотя по октановым единицам находится в середине между 04100 и 0460. Получается, что добавки топлив с невысоким октановым числом сильнее влияют на октановое число смеси из высокооктанового и низкооктанового топлив. Создавая бензины, следует в первую очередь стремиться убрать из него низкооктановые углеводороды (углеводороды с низкой детонационной стойкостью).

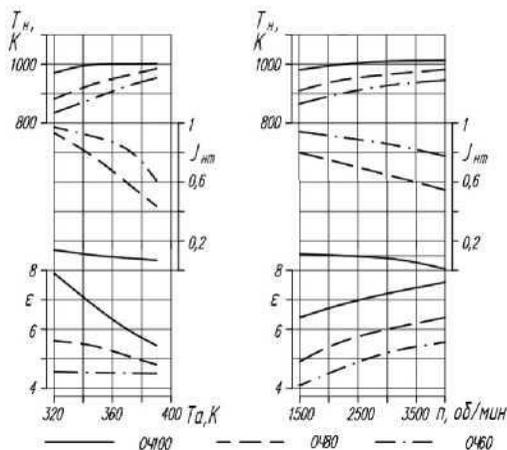


Рисунок 3 - Зависимости степени сжатия из условий детонации (ϵ), вклада в развитие самовоспламенения низкотемпературной стадии (J_{mnt}) и температуры несгоревшего заряда (T_n) от начальной температуры цикла (T_0) и скорости двигателя

Выводы.

1. Расчет самовоспламенения несгоревшей части заряда в поршневом двигателе с искровым зажиганием на основе формально-кинетических выражений задержек самовоспламенения топлив, полученных в установках адиабатного сжатия со стопорением поршня, в случае топлив с двухстадийным механизмом самовоспламенения позволяет оценить вклад каждой стадии в общий процесс и вести направленный поиск методов подавления самовоспламенения, а, следовательно, и детонации.

2. При смеси двух топлив, высокооктанового и низкооктанового, относительный вклад в развитие самовоспламенения больше у низкооктанового топлива. Поэтому для создания более высокооктановых топлив в первую очередь следует уменьшать долю самых низкооктановых топливных компонентов.

3. Важно развивать исследования по самовоспламенению бензиновых углеводородов в установках импульсного сжатия с целью получения формально-кинетических выражений по задержкам самовоспламенения. На основе этого можно расчетным путем вести поиск наиболее эффективных методов повышения антидетонационных свойств двигателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Забрянский, Е. И. Детонационная стойкость и воспламеняемость моторных топлив / Е. И. Забрянский, А. П. Зарубин. - М.-Л. : Химия, 1965. -212 с.
2. Livedahl, W. I. Multistage autoignition of engine fuels / W.I. Livedahl // In: Fifth symposium (international) in. combustion. - №4 Reinhold, 1955. - p. 372-385.
3. Ikegami, M. Aconsideration on the relation between laminas burning, velocity and ignition delay / M. Ikegami, I. Nanba // Bull. JSME. - 1974. - v. 17. - № 104. -Pp. 248-255.
4. Воинов, А. Н. Анализ макрокинетических зависимостей при низко- и высокотемпературном самовоспламенении углеводородоздушных смесей / А. Н. Воинов, Д. И. Скорodelов. // Труды МАДИ. Двигатели внутреннего сгорания. - 1972. - Вып. 49. - С. 82-90.
5. Дидманидзе, О. Н. Повышение параметрической надежности автомобильных двигателей / О. Н. Дидманидзе, Д. В. Варнаков // Ремонт. Восстановление. Модернизация. - 2007. - №5.- С. 2-7.
6. Капустин, А. В. Математическая модель рабочего цикла двигателя с искровым зажиганием / А. В. Капустин, С. В. Смирнов, В. Л. Чумаков // Чтения академика В. Н. Болтинского. - 2021. - С. 86-95.
7. Дидманидзе, О. Н. Исследования показателей тепловыделения газовых двигателей / О. Н. Дидманидзе, А. С. Афанасьев, Р. Т. Хакимов // Записки Горного института. - 2018. - Т. 229. - С. 50-55. - DOI 10.25515/PMI.2018.1.50.

Об авторах:

Капустин Александр Васильевич, доцент, ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого» (173003, Российская Федерация, Великий Новгород, Большая Санкт-Петербургская ул., 41), кандидат технических наук, доцент.

Жданов Артем Михайлович, студент, ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого» (173003, Российская Федерация, Великий Новгород, Большая Санкт-Петербургская ул., 41).

Чумаков Валерий Леонидович, профессор кафедры тракторов и автомобилей, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева» (127434, Российская Федерация, Москва, ул. Тимирязевская, 49), кандидат технических наук, профессор.

Девянин Сергей Николаевич, профессор кафедры тракторов и автомобилей, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева» (127434, Российская Федерация, Москва, ул. Тимирязевская, 49), доктор технических наук, профессор.

Бижаев Антон Владиславович, доцент кафедры тракторов и автомобилей, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева» (127434, Российская Федерация, Москва, ул. Тимирязевская, 49), кандидат технических наук.

About the authors:

Alexander V. Kapustin, Associate Professor, Yaroslav the Wise Novgorod State University (173003, Russian Federation, Veliky Novgorod, Bolshaya St. Petersburg st., 41), Cand.Sc. (Engineering), Associate Professor.

Artem M. Zhdanov, student, Yaroslav the Wise Novgorod State University (173003, Russian Federation, Veliky Novgorod, Bolshaya St. Petersburg st., 41).

Valery L. Chumakov, professor, Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya st., 49), Cand.Sc. (Engineering), professor.

Sergey N. Devyanin, professor, Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya st., 49), D.Sc. (Engineering), professor.

Anton V. Bizhaev, associate professor, Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya st., 49), Cand.Sc. (Engineering).