

РАСЧЕТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

**А. В. Капустин¹, Б. А. Жоробеков², В. Л. Чумаков³,
А. В. Бижаев³**

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

²Ошский технологический университет имени М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан

³ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена совершенствованию методов расчетного моделирования рабочего цикла двигателей внутреннего сгорания. На основе сравнения экспериментальных и расчетных исследований показано, что «классические» формулы прогнозирования детонации без учета состава топливоздушную смеси не позволяют достоверно прогнозировать детонацию на современных двигателях, имеющих повышенные степени сжатия и работающих на переобедненных составах смеси.

Авторы, на основе проведенных расчетных и экспериментальных исследований предлагают использовать уточненные «классические» эмпирические закономерности, описывающие моменты начала детонации для бензинов октановым числом 92, 100 и двигателей с высокими степенями сжатия, работающих на бедных смесях $\alpha = 1,2 \dots 1,8$. Предлагаемые зависимости обеспечивают удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных исследований при прогнозировании детонации.

Ключевые слова: математическая модель; рабочий цикл двигателя; детонация; степень сжатия; состав топливоздушную смеси; расчеты; эксперименты.

CALCULATED PREDICTION OF DETONATION TAKEN INTO ACCOUNT OF THE INFLUENCE OF EXCESS AIR RATIO

**A. V. Kapustin^a, B. A. Zhorobekov^b, V. L. Chumakov^c,
A. V. Bizahaev^c**

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

^b*Osh Technological University named after Academician M. Adyshev, Osh, Kyrgyzstan*

^c*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation*

Abstract. *The article is devoted to improving methods for computational modeling of the working cycle of internal combustion engines. Based on a comparison of experimental and computational studies, it is shown that «classical» formulas for predicting detonation without taking into account the composition of the fuel-air mixture do not reliably predict detonation on modern engines with increased compression ratios and operating on lean mixture compositions.*

The authors, based on the calculations and experimental studies carried out, propose to use refined «classical» empirical laws that describe the moments of the onset of detonation for gasoline with an octane number of 92, 100 and engines with high compression ratios operating on lean mixtures $\alpha = 1,2...1,8$. The proposed dependencies provide satisfactory convergence of computational and experimental studies in predicting detonation.

Keywords: *mathematical model; engine operating cycle; detonation; compression ratio; air-fuel mixture composition; calculations; experiments.*

Современные форсированные бензиновые двигатели часто работают на грани начала детонации. В этой связи развитие методов расчетных исследований прогнозирования детонации на стадии разработки рабочего процесса и регулирования двигателя приобретают особое значение. В настоящей работе представлены результаты расчетных исследований влияния состава топливовоздушной смеси на возникновение детонации в бензиновом двигателе.

Исследования проводятся по 10-ти зонной модели рабочего цикла двигателя, предполагающего последовательное выгорание заряда по зонам. Используемая математическая модель цикла прошла экспериментальную проверку и показала хорошую сходимость расчетных и экспериментальных результатов [1]. Момент самовоспламенения последних порций заряда при моделировании детонации традиционно определяется по эмпирическим формулам, полученных разными методами для стехиометрического состава смеси. Из этих формул хорошо зарекомендовало себя кинетическое выражение Дауда и Ейза, полученное непосредственно при испытании бензиновых ДВС на эталонных изооктано-гептановых смесях [2]:

$$\frac{1}{19,75} \cdot \left(\frac{ON}{100}\right)^{-3.4107} \cdot \int_0^{\tau} (10,2 \cdot p)^{1,7} \cdot e^{-3800/T_H} \cdot d\tau \geq 1, \quad (1)$$

где ON – октановое число топлива: процентная объемная доля изооктан в смеси с нормальным гептаном;

p – текущее термодинамическое давление цикла, МПа;

T_H – текущая термодинамическая температура несгоревшей части заряда, К;

τ – время, мс.

Эта формула, однако, как и другие известные кинетические выражения, не учитывает влияния состава смеси (коэффициента избытка воздуха) на самовоспламенение топливной смеси и, следовательно, на детонацию в ДВС.

В данной работе поставлена задача численным методом по математической модели цикла двигателя с прогнозированием детонации оценить отклонения результатов расчетов детонации по формуле Дауда и Ейза (1) от экспериментальных статистических данных антидетонационных свойств поршневых ДВС и найти уточняющие поправки для корректирования формулы (1) в зависимости от состава смеси.

На рисунке 1 сплошными линиями показаны экспериментальные зависимости допустимой по условиям детонации степени сжатия от коэффициента избытка воздуха – α для двух топлив с октановым числом 100 (ОЧ 100) и октановым числом 92 (ОЧ 92). Среднестатистические экспериментальные данные приняты по данным [3]. Пунктирные линии соответствуют расчетным данным, полученным в сравнимых условиях зависимости по формуле (1). Как видно в области изменения коэффициента избытка воздуха от $\alpha = 0,8$ до $\alpha = 1,2$ расчетные показатели с приемлемой точностью прослеживают экспериментальные показатели изменения допустимой по детонации степени сжатия. В области бедных смесей при $\alpha > 1,2$ начинается резкое отклонение расчетных данных от данных эксперимента. Область богатых составов смеси (богаче $\alpha = 0,9$) для анализа критических условий детонации практического значения не имеет и далее в статье не рассматривается. Заметим, что расчеты момента детонации в [4] по формулам, полученным на установках импульсного сжатия, дают близкие результаты с расчетами по формуле (1).

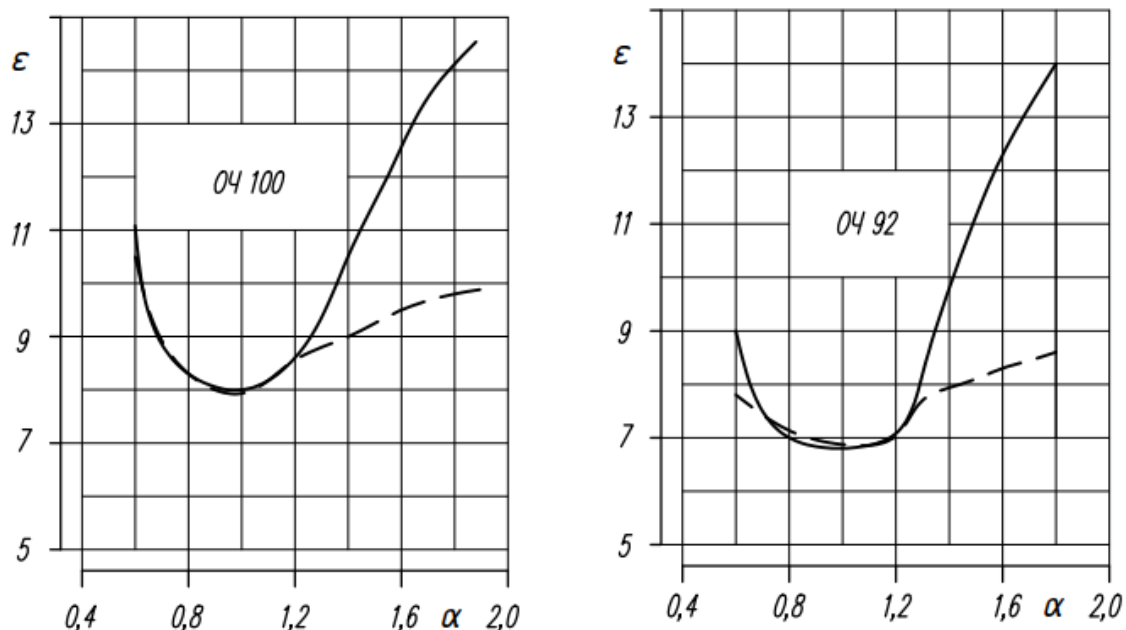


Рисунок 1 – Сравнение зависимостей допустимой по условию детонации степени сжатия от коэффициента избытка воздуха:

— — — экспериментальные данные [3],
 - - - расчетные данные по формуле Дауда и Эйза [2]

Для корректирования формулы (1) будем исходить из следующих соображений. Данная формула получена на основе представлений о скорости экзотермической брутто-реакции окисления, определяемой формально-кинетическое выражением

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

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.

Известные фундаментальные закономерности кинетики химических реакций [5] показывают, что при изменении коэффициента избытка воздуха изменяется концентрация реагирующих веществ: углерода, кислорода, и водорода, и реакция окисления должна бы осуществляться в результате одновременного столкновения трех реагирующих частиц. В этом случае концентрация каждого из реагирующих веществ входит в выражение скорости реакции в

степени, равной соответствующему коэффициенту в уравнении реакции. Но реакция окисления при самовоспламенении протекает по цепному механизму с большим количеством участвующих частиц. Сложные реакции, уравнения которых содержат большое число частиц, представляют собой совокупность последовательно или параллельно протекающих процессов, каждый из которых происходит при столкновении двух частиц или распада отдельной частицы. В подобных случаях закон действия масс применим только к каждой отдельной реакции, но не к реакции в целом. Поэтому определить степень реакции теоретически сложно. Но в любом случае при изменении концентрации топлива в смеси должна меняться степень этой концентрации в формуле скорости химической реакции, и в выражении (2) нужно корректировать степень « m », а в формуле (1) изменять степень 1,7 при давлении p . Отметим, что с точки зрения химической теории величина константы скорости реакции (предэкспонентный множитель в формуле 2) как и энергия активации не зависят от концентрации веществ.

Таким образом, далее по математической модели цикла ДВС методом последовательных приближений определялся такой показатель при давлении m (вместо значения 1,7) в формуле (1), при котором расчетная допустимая по детонации степень сжатия совпадала с экспериментальной степенью сжатия с точностью 0,1 при коэффициентах избытка воздуха более 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7 и 1,8. Для сравнения в адекватных условиях, экспериментальные значения допустимой по детонации степени сжатия для бензинов с различным октановым числом выбраны по условиям опытов [6].

Результаты этих расчетов представлены на рисунке 2, где значками (крестик, круг) обозначены расчетные точки. Точность определения экспериментальных ε по данным [2] невысокая, и сложно по расчетным точкам судить о форме кривых зависимости $\varepsilon=f(\alpha)$. Поэтому, в первом приближении, эти зависимости приняты прямыми (линейными). По тангенсу угла наклона прямых линий можно получить формулы для расчета показателя m при коэффициентах избытка воздуха в диапазоне от $\alpha=1,2$ до $\alpha=1,8$.

Эти формулы имеют вид:

$$\text{ОЧ 100 } m = 1,7 - 0,55 \cdot (\alpha - 1,2) \quad (3)$$

$$\text{ОЧ 92 } m = 1,7 - 0,75 \cdot (\alpha - 1,2) \quad (4)$$

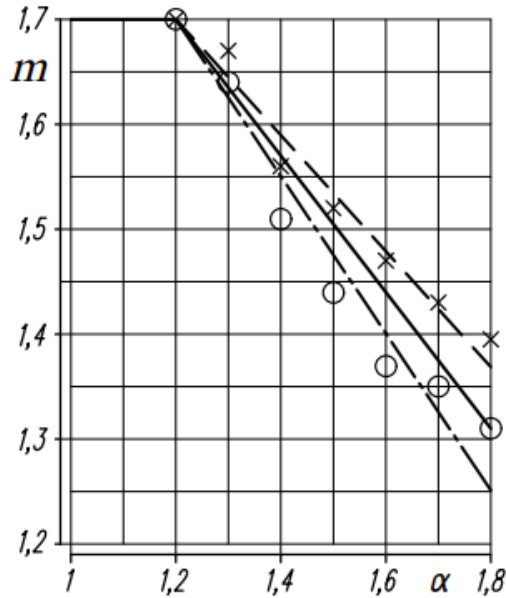


Рисунок 2 – Зависимость показателя при давлении m (в уравнении 2) от коэффициента избытка воздуха для бензинов с октановыми числами 92, 100:

× — — × – ОЧ 100, ○ — — — ○ – ОЧ 92,
 ————— – осредненная линейная зависимость

Из рисунка 2 следует, что расчетные зависимости для определения показателя m отличаются для топлив с различной детонационной стойкостью. Это создает сложности для математического моделирования. Но возможно, точность определения этого показателя достаточно грубая и все расчетные точки для топлив ОЧ 100 и ОЧ 60 находятся в поле отклонений одной зависимости, общей для всех топлив. Исходя из этого, графически определена осредненная прямая зависимость показателя $m = f(\alpha)$, которая на рисунке 2 показана сплошной прямой линией и имеет формулу:

$$m = 1,7 - 0,65 \cdot (\alpha - 1,2) \quad (5)$$

В этом случае формула (1) примет вид:

$$\frac{1}{19,75} \cdot \left(\frac{ON}{100}\right)^{-3,4107} \cdot \int_0^\tau (10,2 \cdot p)^{1,7 - 0,65 \cdot (\alpha - 1,2)} \cdot e^{-3800/T_H} \cdot d\tau \geq 1 \quad (6)$$

Формула (6) справедлива в диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха от $\alpha = 1,2$ до $\alpha = 1,8$.

Результаты расчетов по этой формуле представлены на рисунке 3.

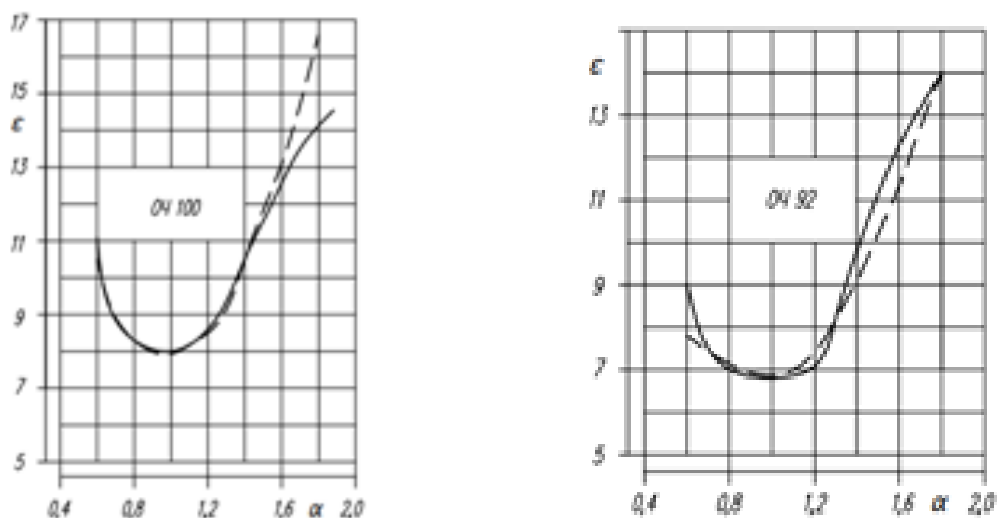


Рисунок 3 – Прогнозирование допустимой по условию детонации степени сжатия от коэффициента избытка воздуха при работе на переобедненных смесях:

— — — экспериментальные данные [3],
 — — — расчет по откорректированной формуле 6

Формула (5) требует уточнения, для чего нужны среднестатистические данные зависимостей допустимой по детонации степени сжатия в зависимости от состава смеси. Но и по этой формуле можно проводить ориентировочные прогнозные расчеты по детонации. Например, можно расчетом оценить, до какого значения α можно обогащать смесь газовым топливом при конвертировании дизеля на газодизельный процесс без изменения степени сжатия. Можно оценивать некоторые компромиссные решения. Например, что выгоднее для бензиновых ДВС исходя из условий детонации: повышение степень сжатия при обеднении смеси или же работа на мощностном составе при меньшей степени сжатия и др.

Выводы.

1. Традиционные формулы расчета допустимой по условиям детонации степени сжатия без учета реального состава топливно-воздушной смеси справедливы для коэффициентов избытка воздуха в диапазоне $\alpha = 0,8 \dots 1,2$. Для смесей переобедненных смесей, характерных для газодизелей и бензиновых двигателей с расслоенным зарядом при коэффициентах избытка воздуха более 1,2 результаты расчетов сильно расходятся с экспериментальными данными.

2. Расчетное моделирование рабочего цикла двигателя требует учета реального состава топливо-воздушной смеси в кинетических закономерностях Дауда и Ейза, что позволяет достоверно прогнозировать появление детонации в переобедненной смеси с коэффициентами избытка воздуха от 1,2 до 1,8 для современных двигателей с повышенной степенью сжатия и расслоенным зарядом топливовоздушной смеси в камере сгорания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Капустин, А. В. Математическая модель рабочего цикла двигателя с искровым зажиганием / А. В. Капустин, С. В. Смирнов, В. Л. Чумаков // В сборнике: Чтения академика В. Н. Болтинского. – 2021. – С. 86-95.
2. Dauaud, A. M. Four Octane – Number Method for Predicting the Anti-Knock Behavior of fuels and Engines / A.M. Dauaud, P. Eyzat // SAE Transactions. – 1978. – vol. 87, Sec. I, pap. 780080. – P. 294-308.
3. Математическое моделирование детонации в двигателях с искровым зажиганием / А. В. Капустин, В. Л. Чумаков, С. Н. Девянин, Б. А. Жоробеков // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 43-51.
4. Воинов, А. Н. Анализ макрокинетических зависимостей при низко- и высокотемпературном самовоспламенении углеродовоздушных смесей / А. Н. Воинов, Д. И. Скорodelов // Труды МАДИ. Двигатели внутреннего сгорания. – 1972. – Вып. 49. – С. 82-90.
5. Глинка, Н. Л. Общая химия в 2 т. Том 1 : учебник для вузов / Н. Л. Глинка ; под редакцией В. А. Попкова, А. В. Бабкова. – 20-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2024. – 353 с.
6. Автомобильные двигатели. «Двигатели внутреннего сгорания» / В. Л. Лурье, В. А. Мангушев, И. В. Маркова, Б. Я. Черняк. – М. : ВИНТИ, АН СССР, 1985. – Т. 3. – 232 с.

Об авторах:

Капустин Александр Васильевич, доцент кафедры энергетики и транспорта ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого» (173003, Российская Федерация, г. Великий Новгород, Большая Санкт-Петербургская ул., 41), кандидат технических наук, доцент, aleksandr.kapustin@novsu.ru.

Жоробеков Болотбек Астаевич, кандидат технических наук, доцент, Ошский технологический университет имени Академика М.М. Адышева (Кыргызстан, г. Ош, ул. Исанова, д.81).

Чумаков Валерий Леонидович, профессор кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, Москва, ул. Тимирязевская, 49), кандидат технических наук, профессор, valery.chumakov@gmail.com.

Бижаев Антон Владиславович, доцент кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, Москва, ул. Тимирязевская, 49), кандидат технических наук, доцент.

About the authors:

Alexander V. Kapustin, associate professor of the Department of Energy and Transport, Yaroslav the Wise Novgorod State University (173003, Russian Federation, Veliky Novgorod, Bolshaya St. Petersburg st., 41), Cand.Sc. (Engineering), associate professor, aleksandr.kapustin@novsu.ru.

Bolotbek A. Zhorobekov, associate professor, Osh Technological University named after Academician M.M. Adyshev (Kyrgyzstan, Osh, Isanova str., 81) Cand.Sc. (Engineering).

Valery L. Chumakov, professor of the Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya St., 49), Cand.Sc. (Engineering), professor, valery.chumakov@gmail.com.

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