

получим

$$u_c = a_k \beta (T_p - T_{пл}) \sqrt{\frac{m_0}{8K} \ln \left( \frac{T_B - T_H}{T_{пл} - T_H} \right)}, \quad (2)$$

где  $K$ ,  $m_0$  — газопроницаемость и открытая пористость топлива;  $a_k$  — коэффициент температуропроводности твердой фазы.

В литературе практически отсутствуют данные о коэффициенте  $\beta$ , поэтому оценим величину  $\xi_n$ , используя развиваемые представления. Известно, что для плавящихся веществ существует критическая пористость  $m_*$ , ниже которой срыв нормального горения не происходит даже при очень высоких давлениях [6, 9]. Это связано с резким уменьшением при  $m = m_*$  газопроницаемости топлива, а следовательно, и  $d_n$ . Из (1) следует, что  $\tau_3 \ll \tau_n$  или  $l_b \ll l$ . При  $\xi_n = 0$  расплав имел бы пористость  $m_*$ , а поскольку  $l_b \ll l$ , то прирост объема за счет расширения расплава практически полностью ее устраняет, следовательно,  $\xi_n = \Delta V/V \approx m_*/(1 - m_*)$ . Для гексогена и тэна  $m_* \approx 0,05$  [1], поэтому для них  $\xi_n \approx 5,26 \cdot 10^{-2}$ . Записи датчика давления в порах [13] совместно с (2) дают для гексогена  $\xi_n = 5,2 \cdot 10^{-2}$ , а для тэна из экспериментальных данных [1] по срыву нормального горения и формулы (2) получаем  $\xi_n = 5 \cdot 10^{-2}$ .

Таким образом, рассмотренный механизм позволяет количественно описать исследуемое явление.

Поступила в редакцию 25/VII 1984,  
после доработки — 19/XII 1984

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
2. К. К. Андреев. ЖФХ, 1946, 20, 467.
3. В. Э. Аппиков, Б. И. Кондриков. ФГВ, 1968, 4, 3, 350.
4. I. W. Taylor. Comb. Flame, 1962, 6, 103.
5. В. К. Боболев, С. В. Чуйко, Л. Ф. Чекирда. ПМТФ, 1963, 4, 99.
6. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков, А. А. Сулимов. ПМТФ, 1963, 5, 117.
7. К. К. Андреев, П. П. Попова. ЖФХ, 1961, 35, 9.
8. Б. И. Кондриков, Ма Чин-юнь. — В кн.: Теория взрывчатых веществ. М.: Высшая школа, 1967.
9. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков, А. А. Сулимов. ФГВ, 1966, 2, 3, 47.
10. В. К. Боболев, А. Д. Марголин, С. В. Чуйко. Докл. АН СССР, 1965, 162, 388.
11. К. К. Андреев. Докл. АН СССР, 1946, 53, 237.
12. В. К. Боболев, А. И. Карпухин, С. В. Чуйко. НТПГВ, 1965, 1, 4, 44.
13. В. Г. Коростелев, Ю. В. Фролов. ФГВ, 1982, 18, 2, 3.
14. Л. С. Лейбензон. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.: Гостоптехиздат, 1947.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДПЛАМЕННОГО ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ В ИСКРОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В. В. Карпусенко, А. А. Кельин, С. А. Лесняк

(Тольятти)

Эффективная работа современных карбюраторных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) требует использования дорогостоящих высокооктановых бензинов. Несоответствие октанового числа бензина тому значению, для которого сконструирован данный двигатель, приводит к детонации, стуку. Возникновение детонации в ДВС — серьезное препятствие на пути повышения КПД и мощности двигателей с искровым зажиганием. Переход на детонационный режим сгорания характеризуется появлением высокочастотных пульсаций давления и увеличением

локальных температур в камере сгорания (КС). Детонация приводит к механической эрозии металла, прогорают клапаны и поршни, растрескивается изоляция свечи, прогорают поршневые кольца.

В последнее время для объяснения возникновения детонации выдвигаются следующие причины:

1) увеличение скорости сгорания в результате взаимодействия фронта пламени с отраженными волнами сжатия;

2) самовоспламенение несгоревшей части горючей смеси [1].

Опыты по исследованию детонации с применением скоростной кинопленки показали, что воспламенение горючей смеси происходит еще до прихода фронта пламени [2]. При работе двигателя в режиме детонации отмечено появление продуктов цепного окисления углеводородов, что свидетельствует о наличии очагов самовоспламенения в несгоревшей части заряда [3]. В [4] указывается, что создание достаточно сильных ударных волн в КС взрывом небольшой навески азида свинца не приводит к возникновению детонации. Поэтому в [2—4] роль самовоспламенения в развитии детонации в ДВС полагается преобладающей.

Кинетической моделью окисления углеводородов является цепная реакция с вырожденным разветвлением [2, 5, 6]. Точное решение системы кинетических уравнений на данном этапе невозможно из-за отсутствия констант скоростей зарождения и продолжения цепи [5]. Поэтому для описания кинетики окисления тяжелых углеводородов используются различные схемы, позволяющие качественно оценить состав промежуточных продуктов и описать температурную зависимость задержек воспламенения [2, 6]. В частности, в работе [6] авторы поставили задачу: на основании экспериментальных данных подобрать параметры кинетических уравнений. Кинетическая схема была предельно упрощена и включала восемь уравнений химических реакций, при этом не конкретизировались компоненты химических реакций и не делались различия между разными типами радикалов. Тем не менее даже при такой сравнительно простой модели приходится подбирать 26 параметров для каждого топлива (константы скоростей, энергии активаций и т. д.), что достаточно трудоемко.

Цель данной работы — предложить простую модель тепловыделения в предпламенных реакциях, удовлетворительно соответствующую в первом приближении экспериментальным данным для диапазона температур и давлений, имеющих место в ДВС.

В основе модели лежит основанное на анализе экспериментальных данных предположение о том, что лимитирующей стадией в цепном механизме предпламенного окисления является реакция первого порядка (изомеризации или мономолекулярного распада [7]). Реакции такого вида встречаются в схемах цепного окисления углеводородов [2, 3, 6]. В работе [8] полагается, что процесс термического распада молекул углеводородов, происходящий в карбюраторном ДВС в предпламенном периоде, — первичный акт образования активных продуктов, в том числе радикалов. Там же на основании опубликованных данных делается вывод о том, что стадия термического распада углеводородов описывается, как правило, мономолекулярной реакцией.

При математическом моделировании работы карбюраторного ДВС использовалась программа, состоящая из нескольких блоков-подпрограмм для расчета процесса сгорания, тактов сжатия, расширения, выхлопа, всасывания и подпрограммы-библиотеки, содержащей зависимости теплотемкостей и энтальпий компонентов от температуры [9]. В качестве исходных данных задавались: состав и температура горючей смеси, коэффициент избытка воздуха, закон выгорания смеси, угол опережения зажигания, степень сжатия, давление во впускном и выпускном патрубках.

При проведении расчетов использовался линейный закон выгорания

$$x = (\varphi - \theta) / \Delta \quad (\theta \leq \varphi \leq \theta + \Delta), \quad (1)$$

где  $x$  — массовая доля сгоревшего топлива;  $\varphi$  — угол поворота коленчатого вала;  $\theta$  — угол опережения зажигания;  $\Delta$  — длительность сгорания. Это допущение базируется на данных работы [10], где показано, что основная часть топлива ( $\sim 80\%$ ) сгорает по линейному закону.

Расчет процесса сгорания приводился следующим образом. На первом этапе определялось изменение температуры и давления горючей смеси за счет изменения объема КС при увеличении угла поворота коленчатого вала от  $\varphi = \theta$  до  $\varphi = \theta + \delta\varphi_1$ . После этого предполагалось мгновенное сгорание части смеси массой  $\delta m_1$  при постоянном объеме КС, соответствующем углу поворота коленчатого вала  $\varphi = \theta + \delta\varphi_1$  (для линейного закона выгорания  $\delta m_1 = (\delta\varphi_1/\Delta)m_0$ , где  $m_0$  — начальная масса топлива).

В составе продуктов сгорания учитывалось 12 компонентов, концентрации которых соответствовали термодинамически равновесным значениям, зависящим от температуры и давления. Значения констант равновесия взяты из [9]. Одновременно рассчитывалось изменение температуры несгоревшей части смеси, обусловленное повышением давления вследствие увеличения объема первой зоны (массы  $\delta m_1$ ) при сгорании.

На каждом последующем  $k$ -м этапе определялось изменение давления и поля температур, вызванное изменением объема КС при увеличении угла поворота коленчатого вала от  $\varphi = \theta + \sum_{i=1}^{k-1} \delta\varphi_i$  до  $\varphi = \theta + \sum_{i=1}^k \delta\varphi_i$ . Затем находилось изменение давления и поля температур в КС из-за сгорания  $k$ -й зоны топлива массой  $\delta m_k = m_0 \delta\varphi_k / \Delta$  при постоянном объеме, соответствующем углу поворота коленчатого вала  $\varphi = \theta + \sum_{i=1}^k \delta\varphi_i$ . Процессы сжатия, расширения, сгорания рассчитывались в адиабатическом приближении.

Концентрация  $c$  горючего, прореагировавшего в предпламенных реакциях, определялась численным интегрированием уравнения

$$\frac{dc}{dt} = ck_0 \exp(-E/RT), \quad (2)$$

где  $k_0 = 10^{13.6} \text{ с}^{-1}$ ;  $E = 167 \text{ кДж/моль}$  ( $40 \text{ ккал/моль}$ );  $T$  — температура смеси. Величина энергии активации для  $n$ -гептана  $E = 167 \text{ кДж/моль}$  получена в [2] при исследовании самовоспламенения смесей стехиометрического состава. В работах [11—13] при моделировании окисления углеводородов рассматриваются мономолекулярные реакции с  $E = 167 \pm 21 \text{ кДж/моль}$ .

Повышение температуры за счет тепловыделения в предпламенных реакциях  $\delta T$  считалось малым возмущением поля температур, возникающим в процессе распространения пламени в КС, оно связано с изменением концентрации горючего соотношением

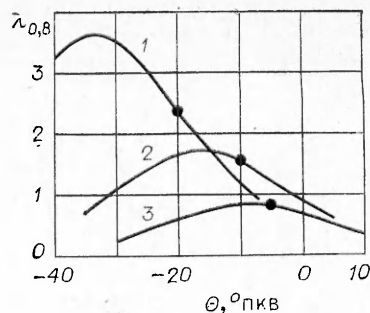
$$\delta T = T_r \cdot \delta c/c, \quad (3)$$

где  $T_r$  — температура продуктов горения;  $\delta c/c$  — доля прореагировавшего в предпламенных реакциях горючего, определяемая интегрированием уравнения (2). В дальнейшем  $\delta T$  сравнивалось с величиной характерного разогрева  $\Delta T$

$$\Delta T = RT^2/E. \quad (4)$$

Для оценки интенсивности тепловыделения в предпламенных реакциях введен параметр  $\lambda = \delta T/\Delta T$ : чем больше  $\lambda$ , тем интенсивнее протекает тепловыделение. В машинах быстрого сжатия под воздействием высоких температур и давлений происходит окисление углеводородоповоздушных смесей, сопровождающееся тепловыделением, которое заканчивается самовоспламенением смеси. Последнее происходит тем быстрее,

чем интенсивнее развиваются реакции окисления углеводородов. В камере сгорания ДВС параллельно протекают два процесса: сгорание во фронте пламени и окисление смеси за счет предпламенных реакций. Если предпламенные реакции протекают недостаточно быстро, то фронт пламени достигает периферийных участков КС до того, как происходит их самовоспламенение, и последняя порция топлива сгорает во фронте пламени. Если же предпламенные процессы протекают достаточно быстро, то наблюдается самовоспламенение несгоревшей части смеси до прихода фронта пламени.



Предполагается, что интенсивность тепловыделения в предпламенных реакциях можно рассматривать как критерий возникновения детонации в ДВС. Если при некоторых условиях работы ДВС отмечается появление детонационного сгорания, можно предположить, что для всех других режимов, характеризующихся таким же или более интенсивным тепловыделением в предпламенных реакциях (при одинаковых длительностях сгорания), следует ожидать появления детонационного сгорания.

По мере выгорания заряда разогрев несгоревшей части топлива возрастает, а ее масса  $m$  уменьшается. Поэтому может получиться так, что условия, необходимые для самовоспламенения, будут достигнуты к тому моменту, когда масса несгоревшей части топлива станет недостаточной для того, чтобы, прореагировав, вызвать достаточно сильные ударные волны. Более того, в [4] отмечается, что появление детонации в последней фазе сгорания способствует ускорению догорания смеси в пристеночных слоях, где ее турбулизация мала и не сопровождается разрушениями в КС из-за малой массы «детонирующего» топлива (слабая детонация).

В дальнейшем рассматривалось значение параметра  $\lambda$  к моменту выгорания 80% топлива  $\lambda_{0,8} = \lambda(x = 0,8)$ , так как именно в это время расчетное полное количество тепла, выделяемое в предпламенных реакциях, пропорциональное  $\lambda m$ , достигает максимума. В [14] отмечается, что при работе двигателя в детонационном режиме фронт пламени начинает вибрировать, а затем ускоряться после прохождения от 3/4 до 7/8 всего пути пламени.

На рисунке представлены зависимости параметра  $\lambda_{0,8}$  от угла опережения зажигания  $\theta$ . Кривые 1—3 отвечают длительностям сгорания  $\Delta = 40, 20, 10^\circ$  пкв (градусов поворота коленчатого вала) соответственно. Точками отмечены значения оптимальных углов опережения зажигания  $\theta_0$ . Общим для всех зависимостей является то, что параметр  $\lambda_{0,8}$  достигает максимума при  $\theta_{\max} = -0,825\Delta$ . Как видно из графика, максимальное значение параметра  $\lambda_{0,8}$  достигается при углах опережения зажигания, существенно отличающихся от  $\theta_0$ . Для всех  $\Delta$  при  $\theta > \theta_{\max}$  частная производная  $\frac{\partial \lambda_{0,8}}{\partial \theta}$  имеет отрицательный знак.

При  $\theta = \theta_0$  с уменьшением длительности сгорания быстрее возрастает температура несгоревшей части смеси, а ее максимально достижимое значение больше. Вместе с тем с уменьшением  $\Delta$  сокращается время пребывания несгоревшей части смеси под воздействием высоких температур и давлений. При прочих равных условиях увеличение температуры способствует возрастанию параметра  $\lambda_{0,8}$ , а сокращение времени пребывания горючей смеси под воздействием высоких температур и давлений приводит к уменьшению  $\lambda_{0,8}$ . Расчеты показали, что значение параметра  $\lambda_{0,8}$  тем выше, чем больше длительность сгорания. Этим можно объяснить ужесточение требований к октановым числам для двигателей с одинаковыми степенями сжатия по мере увеличения диамет-

ра цилиндра [4]; чем больше диаметр цилиндра, тем больше путь, проходимый фронтом пламени, больше длительность сгорания.

Поступила в редакцию 25/IX 1984

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. Malv, G. Ziegler. SAE Techn. Pap. Ser., 1982, N 820759.
2. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968.
3. C. J. Luck, A. R. Burgess, D. H. Desty et al. 14-th Symp. (Intern.) on Combust., 1973.
4. А. П. Воинов. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1977.
5. В. Я. Штерн. Механизм окисления углеводородов в газовой фазе. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
6. M. P. Halstead, L. J. Kirsch, C. P. Quinn. Comb. Flame, 1977, 30, 1.
7. А. А. Кельин, С. А. Лесняк. Двигателестроение, 1984, 4.
8. Б. Г. Гаврилов. Химизм предпламенных процессов в двигателях. Л.: ЛГУ, 1970.
9. Термодинамические свойства индивидуальных веществ/Под ред. В. П. Глушко. М.: Наука, 1979.
10. J. A. Lo Russo, R. J. Tabaczynski. 11-th Intern. Energy Conversion Eng. Conf. Proc. V. 1, 1976.
11. S. W. Benson. Prog. Energy and Comb. Sci., 1981, 7, 12.
12. M. P. Halstead, A. Prothero, C. P. Quinn. Proc. Roy. Soc. Lond., A322, 1971.
13. W. M. Lee, C. T. Yeh. Phys. Chem., 1979, 83, 7.
14. А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М.: Изд-во АН СССР, 1960.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ В ИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКЕ ВЗРЫВНОГО ТИПА

*А. Б. Бриган, В. А. Левин, Г. Д. Смехов, А. М. Старик,  
Ю. В. Туник, А. Н. Хмелевский  
(Москва)*

Вопросы моделирования в лабораторных условиях сверхзвуковых потоков колебательно-неравновесных смесей сложного состава продолжают интересовать исследователей в связи с широким использованием этих течений в различных приложениях. Чаще всего подобные исследования проводят с помощью ударных или аэродинамических труб, а также установок с камерой сгорания [1—10]. В ударных трубах моделируют достаточно широкий диапазон условий по параметрам торможения, однако из-за малой продолжительности «рабочего времени» установки в таких экспериментах сложно следить за изменением состава и параметров смеси в процессе измерений. Стационарные аэродинамические трубы позволяют плавно изменять и контролировать условия в потоке, однако температурный диапазон этих установок ограничен значениями  $<1500$  К. В установках с импульсным электродуговым нагревом смеси могут возникнуть проблемы с неоднородностью параметров по сечению, локальным перегревом, диссоциацией и даже ионизацией смеси на оси разряда.

При изучении инверсных характеристик продуктов сгорания особенно полезны результаты экспериментов в импульсных лабораторных установках взрывного типа, которые достаточно компактны, отличаются от ударных труб большей длительностью рабочего процесса и обеспечивают получение высоких параметров торможения исследуемых смесей (температуры до 3000 К, давления до 30 МПа). Поскольку для приготовления и нагрева смеси в таких установках используется реакция горения, в конечных продуктах присутствует большинство компонентов, характерных для составов продуктов сгорания реальных топлив.

В данной работе на установке подобного типа изучались инверс-