

пламени и проникают в горячие продукты сгорания, занимающие достаточно большой объем. Их испарение приводит к снижению температуры продуктов и соответствующему уменьшению давления в сосуде.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тюльпинов А. Д., Глинкин М. А., Савицкий Л. М. // Проблемы охраны труда: Тез. докл. V науч. конф., 1986.
2. Moore S. R., Weiberg F. R. Proc. Roy. Soc. Lond., 1983, A385, 1789, 373.
3. Bulewics E. M., Kucherowics B. J. Polak Comb. and Flame, 1987, 70, 2, 127.
4. Thomas G. O., Edwards M. Y., Edwards D. H. Euromech 208: Book of Abstracts.— Göttingen: Max — Planck Inst., 1986.
5. Furno A. L., Cook E. B., Kuchta J. M. et al. // 13th Symp. (Intern.) on Comb.— Pittsburgh: The Comb. Inst., 1971.
6. Kumar R. K., Tamm H., Harrison W. C. Comb. Sci. Technol., 1983, 33, 2/4, 167.

*г. Балашиха*

*Поступила в редакцию 5/IV 1989*

УДК 541.124

*М. А. Гороховский, А. М. Саламатин*

### АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ К ВАРИАЦИИ ВХОДНЫХ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

При воспламенении жидких углеводородных топлив наряду с физическими процессами (распыл, испарение, смешение с воздухом) развиваются химические явления, связанные с образованием свободных радикалов при термическом разложении молекул [1—12]. В свою очередь, радикалы порождают цепной процесс, приводящий к взрывному тепловыделению в горючей смеси. Физические и химические процессы при воспламенении углеводородного топлива протекают параллельно, даже во время испарения в парах топлива и жидких каплях могут идти реакции окисления [1]. В [3] иллюстрируется развитие воспламенения от появления свечения до распространения пламени по всему объему дизельного впрыска. Показано, что процессы, управляемые химической кинетикой, связаны с горением предварительно перемешанной смеси, степень влияния химических реакций отражает степень гомогенизации предварительно гетерогенной системы.

В экспериментах [4, 5] отмечено, что при начальной температуре  $T_0 < 750$  К время задержки воспламенения  $\tau$  контролируется химической кинетикой. Одновременно существуют ситуации, когда физические явления определяют  $\tau$ . Например, в случае большой  $T_0$  изменяется механизм воспламенения. К моменту появления свечения смесь не успевает сформироваться, а пламя не может охватить весь объем впрыска пока не организуется диффузионный факел. Таким образом, при высокой  $T_0$  период задержки воспламенения контролируется уже физическими процессами, и доминирующим фактором становится смешение [5, 7].

В настоящей работе процессы воспламенения моделируются в гомогенной предварительно перемешанной газовой смеси, т. е. предполагается, что воспламенение определяется химической кинетикой.

Существуют различные способы управления рабочим процессом в дизельных двигателях. Традиционно к ним относятся изменения давления в цилиндре, начальной температуры воздуха, состава топлива и стехиометрии воздушно-топливной смеси. Кроме того, используются промотирующие добавки для воздействия на эффективность рабочего процесса (присутствие ускоряющих веществ равносильно введению в камеру сго-

рання свободных радикалов [13]). В [14] выявлены кинетические закономерности промотированного воспламенения при цепочно-тепловом неразветвленном механизме процесса. Остается неясной степень влияния того или иного воздействия на время задержки воспламенения.

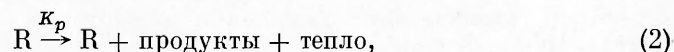
Вследствие нестационарной природы турбулентных явлений, протекающих в цилиндре ДВС, и нелинейности кинетики горения существенную роль в работе двигателя играют межцикловые вариации параметров [15], в том числе начальных условий единичного цикла. Поэтому при выяснении степени влияния того или иного способа воздействия на  $\tau$  недостаточно рассчитывать последнее по модели единичного цикла при изменении одного из начальных условий, а необходимо привлечь аппарат определения чувствительности выходного параметра модели воспламенения к варьированию всего набора этих условий.

Цель настоящей работы — оценка влияния вариации набора начальных термохимических условий на период задержки воспламенения углеводородного топлива.

Детальный анализ возможных кинетических реакций при воспламенении тяжелых углеводородных топлив приведен в работах [16—24] для различных температурных режимов. Обобщенная кинетическая модель Shell цепочно-теплого разветвляющегося механизма воспламенения в единичном цикле предложена в [8, 25]. Если обозначить углеводородное топливо символом RH, совокупность радикалов R, агент ветвления B, продукт-промотор, участвующий в образовании агента ветвления Q, то схематично последовательность реакций воспламенения записывается в [8] следующим образом: реакция инициирования



реакция распространения цепи



реакция распространения цепи с образованием B



реакция распространения цепи с образованием B, контролируемая Q:



реакция линейной гибели R



реакция распространения с образованием Q



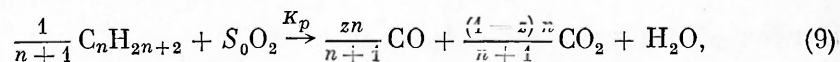
реакция квадратичной гибели R



реакция ветвления



Отвлекаясь от фактического вида компонентов R, B, Q, необходимо заметить, что хотя их доля в смеси пренебрежимо мала, они играют определяющую роль в кинетике воспламенения. Используется также одностадийная глобальная реакция



где  $S_0 = \frac{(3-z)n+1}{2(n+1)}$  и  $z = 0,57$ , из которой определяется скорость тепловыделения.

Константы скоростей реакций (1) — (9) находятся экспериментально для данного топлива. Из [25] известен набор этих величин для изооктана и смеси его с гептаном. Эти значения используются в настоящей работе.

Рассматривается следующая задача. В камере сгорания с известным законом изменения объема со временем находится смесь углеводородного топлива с воздухом. Под действием сжатия газ нагревается. В конце такта сжатия фиксируется постоянный объем камеры сгорания, в которой протекает процесс воспламенения. Моделируется нульмерная кинетика воспламенения смеси. Кинетический механизм (1) — (9) представляется известной системой обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение концентрации компонентов смеси [8]. Эта система дополняется уравнениями сохранения массы смеси и инертного разбавителя для замкнутого объема. Уравнение энергии в этом случае записывается с учетом работы сил давления и теплообмена на стенках цилиндра  $Q_n$  [8, 25]:

$$\frac{dE}{dt} = p \frac{dV}{dt} - Q_n + Q_{хим}.$$

Конвективный теплообмен на стенках складывается из суммарного влияния вынужденной и естественной конвекции. Во время такта сжатия последней можно пренебречь:

$$Q_n = 0,017 Re^{0,87} AK/D(T - T_w),$$

где  $Re$  — число Рейнольдса, рассчитываемое по мгновенной скорости поршня, диаметру камеры  $D$ , вязкости смеси;  $A$  — площадь поверхности стенок камеры;  $K$  — коэффициент теплопроводности;  $T$ ,  $T_w$  — температура смеси и стенок соответственно.

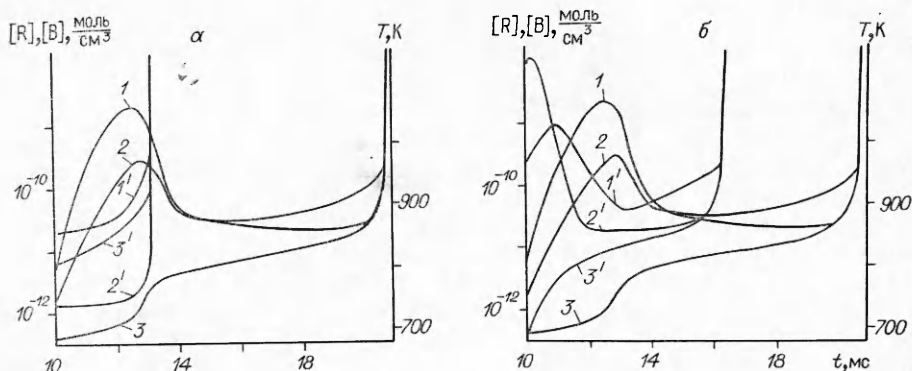
После сжатия теплопотери вычисляются с учетом свободной конвекции

$$Q_n = 0,073 Re^{0,76} \exp(-t/t') AK/D(T - T_w) + 0,23 Gr^{0,39} AK/D$$

( $t$  — время, отсчитываемое от момента завершения такта сжатия;  $t' = 88 \cdot 10^{-3} \cdot Re^{-0,4}$ ;  $Gr$  — число Грасгофа). Выделение тепла за счет химических реакций рассчитывается из соотношения  $Q_{хим} = qVK_p [R]$ ;  $q$  — коэффициент тепловыделения [25].

Математическая модель замыкается формулой движения поршня, температурными зависимостями коэффициентов переноса, а также термодинамическими соотношениями состояния смеси идеальных газов.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений численно интегрируется с помощью эффективной вычислительной программы GEAR, в которой реализуется семейство линейных многошаговых методов переменных порядка точности и шага интегрирования, выбираемых на основе ограничения локальной погрешности вычислений. На каждом шаге интегрирования рассчитываются концентрации компонентов [R], [B], [Q], [RH], [O<sub>2</sub>], [CO], [CO<sub>2</sub>], [H<sub>2</sub>O] и внутренняя энергия. По найденным значениям внутренней энергии и величинам энтальпий образования, взятым из таблиц JANAF [26] с интервалом 100 К, определяются значения температуры при обращении связи внутренней энергии и температуры. Обращение осуществляется с помощью алгоритма линейного поиска и учета продолжительности производной  $\frac{\partial E}{\partial i}$ . По новым данным концентраций компонентов смеси и температуры находятся давление, плотность смеси, коэффициент переноса. Расчет профилей продолжается до тех пор, пока зависимость температуры от времени не становится практически вертикальной с градиентом, превышающим  $10^7$  К/с, и темпера-



Распределение  $T$ ,  $[R]$ ,  $[B]$  при  $T_0 = 373$  ( $1-3$ ),  $473$  К ( $1'-3'$ ) ( $a$ ) и  $[R]_0 = 0$  ( $1-3$ ) и  $[R]_0 = 2,3 \cdot 10^{-11}$  ( $1'-3'$ ) ( $b$ ).  $1, 1' - [R]$ ;  $2, 2' - [B]$ ;  $3, 3' - T$ .

турой не ниже 1100 К. Этот момент времени обычно [8, 25] принимается за окончание периода воспламенения.

На рисунке  $a$  приведены распределения  $T$ ,  $[R]$ ,  $[B]$ , со временем при различных  $T_0$  и постоянных значениях остальных начальных условий. Отметим типичное для холоднотлеменных явлений поведение расчетных распределений с двухстадийностью процесса воспламенения. Концентрация радикалов и агента ветвления резко падают после холоднотлеменного участка и остаются почти постоянными в течение всего оставшегося периода воспламенения, резко возрастая в момент зажигания смеси. Как видно, с увеличением  $T_0$  время задержки воспламенения существенно сокращается, двухстадийное воспламенение вырождается в стадийное.

Для сравнения на рисунке  $b$  показаны аналогичные распределения при изменении стартовых значений активных радикалов и фиксации остальных начальных значений параметров задачи. Появление свободных радикалов в начальный момент времени может быть обусловлено введением промотирующих добавок, нанесением катализатора на стенки камеры сгорания, действием ионизирующего излучения, организацией двухфазного питания с подачей доли пиролизированного топлива на такте сжатия. Увеличение начальной концентрации радикалов также приводит к сокращению  $\tau$  и перестройке профилей к характерным для одностадийного воспламенения.

Для оценки чувствительности выходной функции времени задержки воспламенения к вариации набора входных параметров анализируемой задачи, к числу которых относятся значения температуры смеси и стенки, плотности и коэффициента стехиометрии смеси, концентрации радикалов, используется амплитудный Фурье-анализ [27, 28]. Каждому входному параметру  $k_i$  произвольно ставится в соответствие целочисленная частота из линейно-независимого набора частот  $\omega$ , равного, например, {11, 21, 27, 35, 39}. Выходная функция подвергается анализу Фурье на отрезке ( $0 \leq S \leq 2\pi$ ) для получения синусоидальных амплитуд  $A_{\omega_i}$ , соответствующих входным частотам  $\omega_i$ , т. е. входным параметрам. После вычисления  $A_{\omega_i}$  делается вывод об относительном влиянии вариации того или иного входного параметра на период индукции. Вариация входных параметров задается в виде

$$k_i = k_i^{(0)} e^{U_i}, \quad U_i = U_i^{(0)} \sin(\omega_i S), \quad (10)$$

где  $k_i^{(0)}$  — значение параметра, около которого происходит варьирование;  $U_i^{(0)}$  — величина, определяющая интервал варьирования, в рамках которого моделируется воспламенение. С учетом (10) получаем

$$k_i = k_i^{(0)} \exp(0,2 \sin(\omega_i S)),$$

Вариант	$\frac{[R]_0, \text{ моль}}{\text{см}^3}$	Амплитуды фурье, соответствующие				
		температуре смеси (373 К)	температуре стенки (373 К)	плотности смеси ( $4,12 \cdot 10^{-4}$ моль/см <sup>3</sup> )	стехиометрии смеси (0,9)	концентрации радикалов
I	$2,3 \cdot 10^{-15}$	$-1,05 \cdot 10^{-3}$	$-1,90 \cdot 10^{-4}$	$-2,14 \cdot 10^{-4}$	—	$-2,07 \cdot 10^{-6}$
	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$-9,34 \cdot 10^{-4}$	$-1,82 \cdot 10^{-4}$	$-1,92 \cdot 10^{-5}$	—	$-2,24 \cdot 10^{-5}$
	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$-1,34 \cdot 10^{-3}$	$-2,51 \cdot 10^{-4}$	—	$+1,32 \cdot 10^{-3}$	$-1,50 \cdot 10^{-5}$
II	$4,7 \cdot 10^{-13}$	$-3,62 \cdot 10^{-3}$	$-1,02 \cdot 10^{-3}$	$-9,67 \cdot 10^{-5}$	—	$-1,89 \cdot 10^{-5}$
	$2,3 \cdot 10^{-12}$	$-3,58 \cdot 10^{-3}$	$-1,08 \cdot 10^{-3}$	$-5,23 \cdot 10^{-5}$	—	$-1,35 \cdot 10^{-6}$
	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$-3,35 \cdot 10^{-3}$	$-9,89 \cdot 10^{-4}$	$-2,96 \cdot 10^{-5}$	—	$-7,34 \cdot 10^{-5}$
	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$-3,58 \cdot 10^{-3}$	$-1,07 \cdot 10^{-3}$	—	$+8,96 \cdot 10^{-4}$	$-6,70 \cdot 10^{-5}$
	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$-3,20 \cdot 10^{-3}$	$-9,54 \cdot 10^{-4}$	—	$+7,83 \cdot 10^{-4}$	$-1,17 \cdot 10^{-5}$

Примечание. Начальные условия:  $[RH]_0 = 8,61 \cdot 10^{-6}$  моль/см<sup>3</sup>,  $[O_2]_0 = 8,46 \times 10^{-5}$  моль/см<sup>3</sup>,  $[N_2]_0 = 3,19 \cdot 10^{-4}$  моль/см<sup>3</sup>,  $[B]_0 = [Q]_0 = [CO]_0 = [CO_2]_0 = [H_2O]_0 = 0$ .

при этом амплитуду Фурье вычисляем по формуле

$$A_{\omega_e} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tau [k(S)] \sin(\omega_e S) dS. \quad (11)$$

Здесь  $\tau [k(S)]$  — время задержки воспламенения, соответствующее набору начальных параметров  $\{k\}$  для данного значения  $S \in [0, 2\pi]$ . Интеграл (11) рассчитывается по интерполяционным формулам 5-й степени точности с автоматическим выбором шага (программа QSF1R из библиотеки программ МГУ для ЭВМ БЭСМ-6).

Результаты систематических расчетов амплитуд Фурье представляются в таблице, где отрицательный знак амплитуд означает уменьшение  $\tau$  с ростом данного входного параметра, положительный знак — об увеличении  $\tau$ . В варианте II приведены амплитуды Фурье при варьировании начальных величин в пределах 20 % от средних значений. Видно, что наибольшее влияние на период индукции оказывает вариация начальной температуры смеси, затем по убыванию — вариации температуры стенки, коэффициента стехиометрии, плотности смеси и концентрации радикалов. Отметим рост периода индукции с увеличением коэффициента стехиометрии от значения 0,9, а также слабое относительное влияние наличия радикалов. В связи с последним обстоятельством возникает необходимость проведения Фурье-анализа чувствительности с различной для каждого входного параметра областью варьирования. В частности, теперь значения температуры смеси и стенки изменяются в пределах 10 %, плотность и коэффициент стехиометрии смеси — в пределах 70 %, а концентрация радикалов в пределах 100 % в обе стороны от их средних значений. Результаты расчетов (вариант I) показывают, что степень влияния активных радикалов остается практически на том уровне. Следует отметить более существенное в этом случае влияние коэффициента стехиометрии смеси на период воспламенения. При варьировании начальных условий в анализе Фурье время задержки воспламенения колебалось от 9 до 22 мс.

Авторы выражают благодарность В. И. Головичеву за полезные советы и внимание к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wong C. L., Steere D. E. SAE Techn. Pap. Ser.— 1982.— N 821231.
2. Murphy M. J. SAE Techn. Pap. Ser.— 1983.— N 831746.
3. Konishi K., Sato J., Okado H. Engng Rev., 1986, 9, 1, 19.
4. Henein N. A., Chiu-Shan Lee. SAE Techn. Pap. Ser.— 1986.— N 861230.
5. Parker T. E., Forsha M. D., Stewart H. E. et al. SAE Techn. Pap. Ser.— 1985.— N 850087.

6. Belardini P., Bertoli C., Corcione F. E. et al. Mech. Eng., 1983, C86/83.
7. Kegami M. I., Miwa K., Inada M. // Bull. JSME, 1981, 24, 195.
8. Halstead M. P., Kirsch L. J., Quinn C. P. Comb. Flame, 1977, 30, 45.
9. Baev V. K., Bazhaikin A. N., Buzukov A. A. et al. // 19th Intern. Coll. on Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 1984.
10. Shiozaki T., Suzuki M., Shimoda M. SAE Techn. Pap. Ser.— 1980.— N 800025.
11. Kuniyoshi H., Tanabe H., Sato G. T. et al. SAE Techn. Pap. Ser.— 1980.— N 800968.
12. Mechel I. N., Quillian R. D. SAE Techn. Pap. Ser., 656A/Automotive Engng Congr., 1963.
13. Лернер М. О. Химические регуляторы горения моторных топлив.— М.: Химия, 1979.
14. Борисов А. А., Заманский В. М., Лисянский В. В. и др. Хим. физика, 1987, 6, 1, 100.
15. Daily J. W. SAE Techn. Pap. Ser.— 1987.— N 870165.
16. Westbrook C. K. UCRL-95037 prepr.
17. Kaiser E. W., Westbrook C. K., Pitz M. J. Intern. J. Chem. Kinet., 1986, 18, 655.
18. Pitz W. J., Westbrook C. K. Comb. Flame, 1983, 63, 113.
19. Westbrook C. K., Creighton J., Lund C. et al. J. Phys. Chem., 1977, 81, 2542.
20. Westbrook C. K., Dryer F. L. Comp. Sci. Technol., 1979, 20, 125.
21. Westbrook C. K., Dryer F. L., Schug K. P. 19th Symp. (Intern.) on Combustion.— Pittsburgh, 1983.
22. Westbrook C. K., Pitz W. J. Comb. Sci. Technol., 1984, 37, 117.
23. Westbrook C. K., Pitz W. J., Proscia W. M. et al. // 20th Symp. (Intern.) on Combustion.— Pittsburgh, 1985.
24. Axelsson E., Brezinsky K., Dryer F. L. et al. // 12th Symp. (Intern.) on Combustion.— Pittsburgh, 1986.
25. Natarayan B., Bracco F. V. Comb. Flame, 1984, 57, 179.
26. Stull D. R., Prophet H. JANAF Thermochem. Tables.— Michigan. 1971.
27. Cukier R. I., Fortuin C. M., Shuler K. E. et al. J. Chem. Phys., 1973, 59, 8.
28. Schaibly J. H., Shuler K. E. J. Chem. Phys., 1973, 59, 8.

г. Алма-Ата

Поступила в редакцию 16/V 1989,  
после доработки — 12/X 1989

УДК 532.529

С. И. Барановский, И. В. Коновалов

## ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ СТРУЙ НА ГОРЕНИЕ В СВЕРХЗВУКОВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Интенсивное исследование горения в сверхзвуковых камерах сгорания проводится давно [1—4], но до сих пор многие элементы этого процесса не исследованы в достаточной степени. Так, для камер сгорания с многоструйной системой смесеобразования, когда топливо подается в поток со стенок, до сих пор остается открытым вопрос о влиянии геометрических и режимных параметров топливных струй на развитие процесса. В данной работе основное внимание уделено влиянию относительной глубины проникновения струй газообразного водорода, подаваемых со стенок в сверхзвуковой сносный поток, на самовоспламенение и горение в камере сгорания постоянного по длине поперечного сечения.

Исследование проводилось на охлаждаемой водой экспериментальной установке (рис. 1), которая состоит из бензинового подогревателя воздуха 1, присоединенного к нему сверхзвукового сопла 2 на число Маха  $M = 2,5$ , инжекторного отсека 3 и двух жаровых труб 4. Размеры поперечного сечения рабочей части  $100 \times 50$  мм. Продукты сгорания на выходе из подогревателя обогащаются кислородом до процентного содержания кислорода в воздухе. Температура воздуха  $T_{0\infty}$  в подогревателе поддерживалась равной 1850 К. Статическое давление на срезе сопла равнялось атмосферному. На расстоянии 40 мм от среза сопла в первом отсеке выполнены круглые отверстия — инжекторы, диаметром  $D_j = 1,5$  мм. На нижних стенках инжекторного отсека и жаровых труб имеются дрена-