

Bibliography (transliterated):

1. Matievskij D.D. Issledovanie teplovydelenija i pokazatelej raboty traktornogo dizelja Ch13/14 s polurazdelennoj kameroj sgoranija:

Поступила в редакцию 01.06.2013

Кулманаков Сергей Павлович – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры двигателя внутреннего сгорания ФБГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Барнаул, Россия, e-mail: SPK_ICE@mail.ru; +7-905-985-3559

Кулманаков Сергей Сергеевич – инженер кафедры двигателя внутреннего сгорания ФБГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Барнаул, Россия, e-mail: Kulmanakov_SS@mail.ru ; +7-903-949-6148

Лысенко Александр Викторович – аспирант кафедры двигателя внутреннего сгорания ФБГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Барнаул, Россия, e-mail: iron_head1989@mail.ru ; +7-961-236-3281

ВПЛИВ СКЛАДУ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ НА ФОРМУВАННЯ ІНДИКАТОРНОГО ККД ДИЗЕЛЯ

С.П.Кулманаков, С.С.Кулманаков, А.В.Лысенко

У даній статті розглянуто вплив елементарного складу альтернативних палив на індикаторний ККД дизеля. Проведене розрахункове дослідження дозволило оцінити вплив різного складу робочого тіла на коефіцієнти невикористання теплоти в циклі, пов'язані із зміною складу робочого тіла. Наведено результати експериментального дослідження при роботі на паливах з різним співвідношенням вуглецю і водню. В якості об'єкта дослідження було обрано двигун 1Ч 13/14, що працює на сумішевих біопаливах на основі етилового ефіру ріпакової олії та етанолу.

INFLUENCE OF ALTERNATIVE FUELS FOR THE FORMATION OF DIESEL INDICATED EFFICIENCY

S.P.Kulmanakov, S.S.Kulmanakov, A.V.Lysenko

In this article the influence of the elemental composition of alternative fuels on the indicated efficiency of diesel is considered. A computational study allowed to estimate the effect of different composition of the working body on the coefficients of non-use of heat in the cycle associated with changes in the composition of the working fluid. The results of the pilot study while working on fuel with different ratios of carbon and hydrogen are given. The engine 1ЧН 13/14 was chosen as a object of the study. Engine works on mixed biofuels based on ethyl ester of rapeseed oil and ethanol.

УДК 536.46: 662.61

А.П. Сеначин, П.К. Сеначин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ СТУКА ПЕРЕД ФРОНТОМ ПЛАМЕНИ В ДВИГАТЕЛЕ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ НА ОСНОВЕ ДЕТАЛЬНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ

Приведены результаты численного моделирования пределов самовоспламенения смесей изооктана и н-гептана перед фронтом пламени в двигателе с искровым зажиганием в фазовой плоскости «частота вращения – угол зажигания» при варьировании степени сжатия и коэффициента избытка воздуха. Предложенные математическая модель и детальный кинетический механизм удовлетворительно описывают процесс самовоспламенения смеси и могут быть использованы для прогнозирования пределов стука или детонации в двигателях. Подтверждено существование полуострова самовоспламенения смеси в указанной фазовой плоскости. Влияние термодинамических, конструктивных, геометрических, динамических и других параметров процесса на самовоспламенение соответствует известным экспериментальным данным.

Введение

Проблема жесткого сгорания, со стуком или детонацией, в двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием все еще далека от окончательного решения [1-3]. В настоящее время исследователи решают эту задачу с привлечением детальной кинетики химических реакций [4-8]. Однако, неэмпирические детальные кинетические меха-

низмы (ДКМ) окисления углеводородов бензиновых фракций содержат тысячи элементарных реакций и сотни частиц, что является серьезным препятствием для применения подобных ДКМ при численном моделировании процессов горения в ДВС. Кроме того, в настоящее время эти ДКМ или отсутствуют или практически недоступны (полностью не опубликованы). Данная работа посвящена

численному моделированию самовоспламенения смеси изооктана и н-гептана с воздухом на основе сокращенного ДКМ.

Использованный в названии статьи термин «стук» (аналогичный англоязычному «knock»), который в последнее время часто заменяют термином «детонация», обозначает ненормальное сгорание смеси в ДВС с искровым зажиганием в конце рабочего цикла (с образованием ударных волн), в течение многих лет используется в русскоязычной литературе. Поскольку истинная детонация при этом реализуется не всегда, старый термин точнее.

В работе также используется термин «полуостров воспламенения» для обозначения области, где реализуется рассматриваемое явление в плоскости «частота вращения – угол зажигания», в некотором смысле подобный аналогичному термину, используемому для обозначения области, ограниченной первым и вторым пределом воспламенения смеси водорода с кислородом в плоскости «температура - давление».

Кинетический механизм

Принятый (на основе разработок Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН) ДКМ 43/31 включает 43 реакции и 31 частицу (таблица 1) и состоит из: блока самовоспламенения и редукции к углеводородам $C_1 - C_2$ (реакции 1-28), и блока реакций самовоспламенения $C_1 - C_2$ (реакции 29-43) [5-7]. Верификация ДКМ 43/31 на гомогенном реакторе идеального смешивания показала, что он удовлетворительно воспроизводит двухстадийность воспламенения углеводородов [8], результаты расчетов близки к результатам моделирования по ДКМ 284/43 и другим [5-7]. Постановка задачи соответствует работе [9]. Моделирование проводится применительно к характеристикам двигателя автомобиля «Renault Logan» типа «K7J 710» размерностью 4Ч 7,95/7 для модельных смесей, соответствующих бензину с октановым числом (ОЧ), равным 90 (90 % изооктана C_8H_{18} и 10 % н-гептана C_7H_{16}).

Таблица 1. Сокращенный ДКМ 43/31

№ пп.	Детальный кинетический механизм
1	$C_7H_{16} \rightarrow C_7H_{15} + H$
2	$C_7H_{15} \rightarrow C_6H_{12} + CH_3$
3	$C_6H_{12} + O_2 \rightarrow C_2H_3 + C_2H_5 + CH_4 + CO_2$
4	$C_7H_{16} + OH \rightarrow C_7H_{15} + H_2O$
5	$C_7H_{15} + O_2 \rightarrow C_7H_{15}O_2$
6	$C_7H_{15}O_2 \rightarrow C_7H_{15} + O_2$
7	$C_7H_{15}O_2 + C_7H_{16} \rightarrow C_7H_{15}O_2H + C_7H_{15}$

8	$C_7H_{16} + O_2 \rightarrow C_7H_{15} + HO_2$
9	$C_7H_{16} + CH_3O_2 \rightarrow CH_3O_2H + C_7H_{15}$
10	$C_7H_{15}O_2H \rightarrow C_7H_{15}O + OH$
11	$C_7H_{15}O \rightarrow C_6H_{11} + CH_3 + OH$
12	$C_6H_{11} + 2O_2 \rightarrow C_2H_3 + 2CH_4 + 2CO_2$
13	$C_7H_{15}O_2 + C_7H_{15} \rightarrow 2C_7H_{15}O$
14	$C_7H_{15}O_2 + HO_2 \rightarrow C_7H_{15}O_2H + O_2$
15	$C_7H_{15} + HO_2 \rightarrow C_7H_{15}O + OH$
16	$C_8H_{18} \rightarrow C_8H_{17} + H$
17	$C_8H_{17} \rightarrow C_6H_{12} + C_2H_5$
18	$C_8H_{18} + OH \rightarrow C_8H_{17} + H_2O$
19	$C_8H_{17} + O_2 \rightarrow C_8H_{17}O_2$
20	$C_8H_{17}O_2 \rightarrow C_8H_{17} + O_2$
21	$C_8H_{17}O_2 + C_8H_{18} \rightarrow C_8H_{17}O_2H + C_8H_{17}$
22	$C_8H_{18} + O_2 \rightarrow C_8H_{17} + HO_2$
23	$C_8H_{18} + CH_3O_2 \rightarrow CH_3O_2H + C_8H_{17}$
24	$C_8H_{17}O_2H \rightarrow C_8H_{17}O + OH$
25	$C_8H_{17}O \rightarrow C_6H_{11} + CH_3 + CH_3O$
26	$C_8H_{17}O_2 + C_8H_{17} \rightarrow 2C_8H_{17}O$
27	$C_8H_{17}O_2 + HO_2 \rightarrow C_8H_{17}O_2H + O_2$
28	$C_8H_{17} + HO_2 \rightarrow C_8H_{17}O + OH$
29	$H + O_2 \rightarrow HO_2$
30	$OH + H_2O_2 \rightarrow HO_2 + H_2O$
31	$H_2O_2 \rightarrow 2OH$
32	$2HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$
33	$CH_2O + OH \rightarrow HCO + H_2O$
34	$HCO + O_2 \rightarrow HO_2 + CO$
35	$CH_3 + O_2 \rightarrow CH_3O_2$
36	$CH_3O_2 \rightarrow CH_3 + O_2$
37	$CH_3O_2 \rightarrow CH_2O + OH$
38	$CH_3O \rightarrow CH_2O + H$
39	$C_2H_4 + OH \rightarrow C_2H_3 + H_2O$
40	$C_2H_3 + O_2 \rightarrow C_2H_2 + HO_2$
41	$C_2H_3 + CH_2O \rightarrow HCO + C_2H_4$
42	$C_2H_5 + O_2 \rightarrow C_2H_4 + HO_2$
43	$C_2H_5 + OH \rightarrow CH_3 + CH_3O$

Математическая модель

Модель процесса фронтального горения смеси в ДВС с искровым зажиганием и самовоспламенения (теплового взрыва) перед фронтом пламени включает уравнения (в функции угла ПКВ φ):

- динамики объема

$$\dot{V} = V_c \frac{\varepsilon - 1}{2} \sin\varphi \left(1 + \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1/\lambda^2 - \sin^2\varphi}} \right), \quad (1)$$

где $\dot{V} = dV/d\varphi$ - производная объема по углу ПКВ; V_c - объем камеры сгорания; ε - геометрическая степень сжатия; $\lambda = r/l$ - отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;

$$V_u = (m_a/M_u)(1-x)RT_u/p, \quad (2)$$

где m_a - полная масса смеси в цилиндре двигателя; M_u - средняя молекулярная масса свежей смеси; R - универсальная газовая постоянная; T_u - температура зоны свежей смеси; p - давление в цилиндре двигателя; x - массовая доля сгоревшей смеси в цилиндре двигателя;

$$V_b = V - V_u, \quad (3)$$

- скорости горения на фронте пламени

$$\dot{x} = \frac{F_f}{2\pi n} \cdot \frac{1-x}{V_u} \sqrt{S_u^2 + u_t^2}, \quad (4)$$

где F_f - площадь поверхности фронта пламени, определяемая как поверхность сферических сечений рабочего объема через приведенную координату фронта пламени r_f и текущую координату поршня z ; n - частота вращения;

- нормальной скорости пламени

$$S_u = S_{u0} (p/p_0)^{m_p} (T_u/T_0)^{m_T}, \quad (5)$$

где S_{u0} - нормальная скорость пламени при нормальных условиях; p_0, T_0 - давление и температура при нормальных условиях;

- скорости турбулентных пульсаций на фронте пламени

$$u_t = k_{nop} \langle u_{nop} \rangle = 4rnk_{nop} \cong 4,2rn, \quad (6)$$

где k_{nop} и $\langle u_{nop} \rangle$ - эмпирический коэффициент

и средняя скорость поршня;

- динамики давления в цилиндре двигателя

$$\begin{aligned} \dot{p} \left(V - V_u \frac{R}{C_{pu}} - V_b \frac{R}{C_{pb}} \right) = -p\dot{V} - \\ - p\dot{x} \left[\frac{V_u}{1-x} \left(\frac{H_u}{C_{pb}T_u} - 1 \right) - \frac{V_b}{x} \left(\frac{H_b}{C_{pb}T_b} - 1 \right) \right] + \\ + \dot{Q}_u \frac{R}{C_{pu}} + \dot{Q}_b \frac{R}{C_{pb}}, \quad (7) \end{aligned}$$

где \dot{Q}_u и \dot{Q}_b - теплообмен со стенками цилиндра, поршня и крышки зон свежей смеси и продуктов сгорания, соответственно; C_{pu} , C_{pb} и H_u , H_b - средние молярные теплоемкости и энтальпии свежей смеси и продуктов сгорания;

- скоростей химических реакций в смеси перед фронтом пламени

$$W_i = k_p (p/p_0) k_i T^{n_i} \prod_{ij} A_j \exp(-E_i/RT), \quad (8)-(50)$$

где k_p - коэффициент влияния давления на скорость химической реакции; k_i и E_i - предэкспонент константы скорости и энергия активации i -ой реакции (таблица 1); A_j - концентрации j -ой компоненты частиц, вступающих в i -ю реакцию);

- динамики температуры свежей смеси

$$\frac{\dot{T}_u}{T_u} = \frac{R}{C_{pu}} \left(\frac{\dot{p}}{p} + \frac{\dot{Q}_u}{pV_u} - \frac{1}{2\pi n p} \sum_i h_i W_i \right), \quad (51)$$

где h_i - теплота (энтальпия) i -ой реакции;

- средней температуры продуктов сгорания

$$T_b = pV_b M_b / (m_a R x); \quad (52)$$

- концентраций компонентов свежей смеси

$$\dot{A}_j = \frac{W_j}{2\pi n} + A_j \left(\frac{\dot{p}}{p} - \frac{\dot{T}_u}{T_u} - \frac{RT_u}{2\pi n p} \sum_i W_i \right) \quad (53)-(83)$$

и начальные условия в моменты закрытия впускного клапана (индекс a) и зажигания (индекс 1):

$$\varphi = \varphi_a, \quad p = p_a, \quad T_u = T_a, \quad A_j = A_{aj}, \quad (84)$$

$$\varphi = \varphi_1, \quad p = p_1, \quad T_u = T_1, \quad A_j = A_{aj}. \quad (85)$$

Численное моделирование

Интегрирование системы уравнений (1)-(85) проводилось по собственной программе, с привлечением специальных методов интегрирования систем жестких уравнений. На рисунке 1 представлены зависимости критического угла опережения зажигания, обеспечивающего сгорание без стука и детонации, от частоты вращения коленчатого вала при различных значениях степени сжатия и коэффициента избытка воздуха. Характер зависимостей соответствует результатам, ранее полученным в [9] с использованием макрокинетического уравнения для химической реакции самовоспламенения смеси перед фронтом пламени. Видно, что существует вполне определенная область углов зажигания, для которых в некоторый момент времени фронтальный режим горения смеси переходит в объемный (со стуком или детонацией) из-за самовоспламенения смеси перед фронтом пламени.

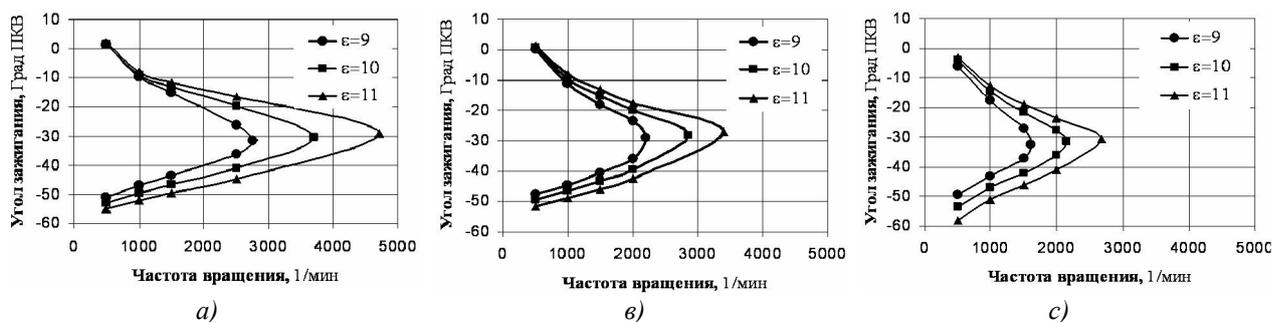


Рис. 1. Графики зависимостей критического угла зажигания φ_1 от частоты вращения вала n при различных значениях степени сжатия ε для смесей разного стехиометрического состава. Вне полуострова самовоспламенение отсутствует, внутри полуострова – область стука или детонации.

$a - \alpha = 0,8$; $b - \alpha = 1,0$; $c - \alpha = 1,2$

На рисунке 2 приведена динамика самовоспламенения (теплового взрыва) стехиометрической смеси ($\alpha = 1,0$) перед фронтом пламени при степени сжатия $\varepsilon = 11$ и частоте вращения вала $n = 2500$ мин^{-1} для значения угла зажигания $\varphi_1 = -30$ Град ПКВ. Можно отметить следующие особенности динамики процесса самовоспламенения. Температура смеси перед фронтом пламени T_u после момента зажигания плавно растет в результате процессов сжатия поршнем и продуктами фронтального горения смеси. Далее она проходит две точки перегиба во время холоднотеплой стадии, а при переходе ко второй стадии самовоспламенения, проходит третью точку перегиба. Затем в процессе объемного взрывного горения оставшейся смеси температура резко возрастает. При наступлении холоднотеплой стадии самовоспламенения резко возрастает и затем падает концентрация изооктанового перекисного радикала $C_8H_{17}O_2$, при этом максимальное значение концентрации достигает 4600 ppm (рисунок 2, линия 2).

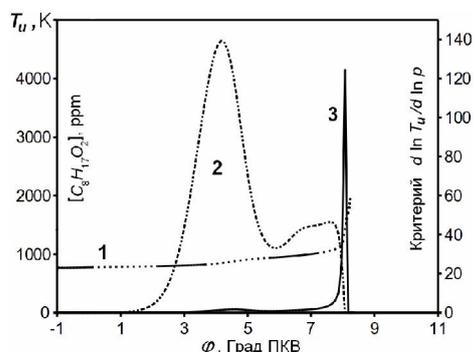


Рис. 2. Динамика самовоспламенения смеси перед фронтом пламени: 1 - температура смеси T_u ; 2 - концентрация радикала $C_8H_{17}O_2$ в единицах ppm; 3- величина критерия (86)

Дифференциальный критерий самовоспламенения [2]

$$d \ln T_u / d \ln p = \text{const} \quad (86)$$

в начале фронтального горения смеси близок к нулю, во время холоднотеплой стадии перед фронтом пламени его величина достигает нескольких единиц (порядка 1-3) и падает практически до нуля. Причем локальный максимум функции совпадает с максимумом концентрации радикала $C_8H_{17}O_2$ (рисунок 2, линия 3). При переходе ко второй стадии теплового взрыва величина критерия резко возрастает до значения порядка 120. При моделировании углеводородных смесей в двигателе в качестве условия самовоспламенения можно принять значение критерия (86) порядка 20-30.

Отметим, что ранее при теоретическом решении задач самовоспламенения смеси при адиабатическом сжатии, в том числе в ДВС с искровым зажиганием [2, 9], с уравнением макрокинетики, численное значение дифференциального критерия (86) принималось равным единице $d \ln T_u / d \ln p = 1$.

Заключение

Численное моделирование самовоспламенения смеси перед фронтом пламени в ДВС с искровым зажиганием на основе ДКМ 43/31 показывает:

- предложенный ДКМ 43/31 для смесей изооктана и н-гептана с воздухом удовлетворительно описывает процесс самовоспламенения смеси перед фронтом пламени и может быть использован для прогнозирования пределов стука (детонации);
- подтверждено существование полуострова самовоспламенения перед фронтом пламени в фазовой плоскости «частота вращения вала – угол зажигания», ранее полученного с уравнением макрокинетики [9];
- с использованием ДКМ подтверждено влияние термодинамических, конструктивных, геометрических, динамических и других параметров про-

цесса на самовоспламенение смеси перед фронтом пламени в ДВС с искровым зажиганием;

- при самовосплавлении углеводородных смесей в двигателе динамика температуры перед фронтом пламени имеет три точки перегиба по причине двустадийности процесса;

- при самовосплавлении смесей изооктана и н-гептана в ДВС с искровым зажиганием концентрация радикала $C_8H_{17}O_2$ последовательно проходит четко выраженные максимум и минимум на первой (холоднопламенной) стадии процесса, а на второй стадии (перехода к объемному взрыву или детонации) стремится к нулю, что может быть использовано при численном моделировании;

- дифференциальный критерий (86) при самовосплавлении смесей изооктана и н-гептана с воздухом в двигателе имеет два максимума, первый (при прохождении холоднопламенной стадии) является слабовыраженным с численным значением 1-3, а второй (на стадии перехода к взрыву) подобен дельта-функции с максимумом порядка 100-120. При численных расчетах за условие самовосплавления можно положить достижение критерием (86) значения порядка 20-30.

Список литературы:

1. Воинов, А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях [Текст] / А.Н. Воинов.- М.: Машиностроение, 1977.- 277 с. 2. Сеначин, П.К. Самовоспламенение газа перед фронтом пламени в закрытом сосуде [Текст] / П.К. Сеначин, В.С. Бабкин // Физика горения и взрыва.- 1982.- Т. 18, № 1.- С. 3-8. 3. Bradley, D. Influence of Autoignition Delay Time Characteristics of Different Fuels on Pressure Waves and Knock in Reciprocating Engines [Text] / D. Bradley, G.T. Kalghatgi // Combustion and Flame.- 2009.- Vol. 156.- No. 8.- P. 2307-2318. 4. Варнац, Ю. Моделирование процессов горения с помощью детальной кинетики элементарных реакций [Текст] / Ю. Варнац // Химическая физика.- 1994.- Т. 13, № 2.- С. 3-16. 5. Басевич, В.Я. Сокращенная кинетическая схема для моделирования самовосплавления воздушных смесей изооктана и н-гептана в течение периода индукции применительно к двигателям внутреннего сгорания [Текст] / В.Я. Басевич, С.М. Фролов // Химическая физика.- 1994.- Т. 13, № 8-9.- С. 146-156. 6. Басевич, В.Я. Моделирование

самовосплавления изооктана и н-гептана применительно к условиям ДВС [Текст] / В.Я. Басевич, А.А. Беляев, В. Брандштетер, М.Г. Нейгауз, Р. Ташл, С.М. Фролов // Физика горения и взрыва.- 1994.- Т. 30, № 6.- С. 15-25. 7. Басевич, В.Я. Моделирование задержек самовосплавления метановоздушных смесей в двигателе внутреннего сгорания [Текст] / В.Я. Басевич, В.И. Веденеев, В.С. Арутюнов // Физика горения и взрыва.- 1994.- Т. 30, № 21.- С. 7-14. 8. Сеначин, А.П. Численное моделирование самовосплавления смесей изооктана и н-гептана с воздухом перед фронтом пламени в поршневых двигателях с искровым зажиганием [Текст] / А.П. Сеначин, П.К. Сеначин // Ползуновский вестник.- 2010.- № 1.- С. 3-12. 9. Сеначин, П.К. Самовоспламенение смеси перед фронтом пламени в поршневых двигателях с искровым зажиганием [Текст] / П.К. Сеначин, В.С. Бабкин, А.В. Борисенко // Физика горения и взрыва.- 1997.- Т. 33, № 6.- С. 3-13.

Bibliography (transliterated):

1. Voinov, A.N. Sgoranie v bystrohodnykh porshnevyykh dvigatelyah [Tekst] / A.N. Voinov. M.: Mashinostroenie, 1977. 277 s. 2. Senachin, P.K. Samovosplamnenie gaza pered frontom plameni v zakrytom sosude [Tekst] / P.K. Senachin, V.S. Babkin // Fizika gorennya i vzryiva. 1982. T. 18. No. 1. S. 3-8. 3. Bradley, D. Influence of Autoignition Delay Time Characteristics of Different Fuels on Pressure Waves and Knock in Reciprocating Engines [Text] / D. Bradley, G.T. Kalghatgi // Combustion and Flame. 2009. Vol. 156. No. 8. P. 2307-2318. 4. Varnats, Yu. Modelirovanie protsessov gorennya s pomoshchyu de-talnoy kinetiki elementarnykh reaktsiy [Tekst] / Yu. Varnats // Himicheskaya fizika. 1994. T. 13. No. 2. S. 3-16. 5. Basevich, V.Ya. Sokraschennaya kineticheskaya shema dlya modelirovaniya samovosplamneniya vozdushnykh smesey izooktana i n-geptana v techenie perioda induktsii pri-menitelno k dvigatelyam vnutrennego sgoraniya [Tekst] / V.Ya. Basevich, S.M. Frolov // Himicheskaya fizika. 1994. T. 13, No. 8-9. S. 146-156. 6. Basevich, V.Ya. Modelirovanie samovosplamneniya izooktana i n-geptana primeni-telno k usloviyam DVS [Tekst] / V.Ya. Basevich, A.A. Belyaev, V. Brandshteter, M.G. Neygauz, R. Tashl, S.M. Frolov // Fizika gorennya i vzryiva. 1994. T. 30. No. 6. S. 15-25. 7. Basevich, V.Ya. Modelirovanie zaderzhek samo-vo-splamneniya metanovoz-dushnykh smesey v dvigatele vnutrennego sgoraniya [Tekst] / V.Ya. Basevich, V.I. Vedeneev, V.S. Arutyunov // Fizika gorennya i vzryiva. 1994. T. 30. No. 21. S. 7-14. 8. Senachin, A.P. Chislennoe modelirovanie samovosplamneniya smesey izooktana i n-geptana s vozduhom pered frontom plameni v porshne-vyih dvigatelyah s iskrovyim zazhiganiem [Tekst] / A.P. Senachin, P.K. Senachin // Polzunovskiy vestnik. 2010. No. 1. S. 3-12. 9. Senachin, P.K. Samovosplamnenie smesi pered frontom plameni v porshnevyykh dvigatelyah s is-krovyim zazhiganiem [Tekst] / P.K. Senachin, V.S. Babkin, A.V. Borisenko // Fizika gorennya i vzryiva. 1997. T. 33. No. 6. S. 3-13

Поступила в редакцию 04.06.2013

Сеначин Андрей Павлович – канд. техн. наук, докторант кафедры двигателей внутреннего сгорания Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова «АлтГТУ», Барнаул, Россия,
e-mail: senachin.ap@yandex.ru

Сеначин Павел Кондратьевич – доктор техн. наук, проф., профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова «АлтГТУ», Барнаул, Россия,
e-mail: senachinp@mail.ru

МОДЕЛЮВАННЯ ЯВИЩА СТУК ПЕРЕД ФРОНТОМ ПОЛУМ'І У ДВИГУНІВ З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ НА ОСНОВІ ДЕТАЛЬНОЇ ХІМІЧНОЇ КІНЕТИКИ

А.П. Сеначін, П.К. Сеначін

Наведено результати чисельного моделювання меж самозаймання сумішей ізооктана і нормального гептану перед фронтом полум'я в двигуні з іскровим запалюванням у фазовій площині «частота обертання - кут запалювання» при

варіюванні ступеня стиснення і коефіцієнта надлишку повітря. Запропоновані математична модель і детальний кінетичний механізм задовільно описують процес самозаймання суміші і можуть бути використані для прогнозування меж стукну або детонації у двигунах. Підтверджено існування півострова самозаймання суміші у зазначеній фазовій площині. Вплив термодинамічних, конструктивних, геометричних, динамічних та інших параметрів процесу на самозаймання відповідає відомим експериментальним даним.

SIMULATION OF THE PHENOMENA A KNOCK BEFORE OF THE FLAME FRONT IN THE SPARK IGNITION ENGINE ON THE BASIS OF A DETAILED CHEMICAL KINETICS

A.P. Senachin, P.K. Senachin

The results of numerical simulation of ignition limits of mixtures of normal heptane, isooctane and the flame front of a spark ignition engine in the phase plane of the frequency of rotation - the ignition angle when varying the compression ratio and the excess air ratio is offered. The proposed mathematical model and a detailed kinetic mechanism satisfactorily describe the process of spontaneous combustion mixture and can be used to predict the limits of a knock or detonation engines. The existence of the peninsula ignition mixture in said phase plane is proved. The influence of thermodynamic, structural, geometric, dynamic, and other process parameters on the self-ignition consistent with the known experimental data.

УДК 621.43.03

I.A. Швець

ВИЗНАЧЕННЯ ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ПРИ РУСІ ЧЕРЕЗ ЗМІШУВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ

Розглянуто питання щодо визначення вихідних параметрів газоповітряного потоку як перший етап чисельного моделювання. Наведено математичні залежності, які значно спрощують отримання чисельних значень вихідних параметрів і, відповідно, вхідних для роботи з CFD комплексами. Вихідними параметрами які підлягають визначенню перед чисельним моделюванням, є перепад тиску в змішувальному пристрої та швидкість потоку на виході. Розглянуто основні допущення, які можуть застосовуватись при роботі з математичними залежностями, та відмічено їх вплив на точність отримання вихідних параметрів газового потоку.

Вступ

Моделювання параметрів потоку газу (рідини) з використанням розрахункових Computational fluid dynamics (CFD) комплексів типу ANSYS, Flow Vision та інших на сьогодні являє собою складний та кропіткий процес, який вимагає від дослідника:

- фундаментальних знань з гідро- та газодинаміки, для вибору математичної моделі обрахунку параметрів потоку у відповідності до поставленого завдання;

- вмінь швидко та якісно готувати початкові дані для препроцесору;

- навичок роботи на ПЕОМ з інтерфейсом конкретного CFD комплексу;

- значних затрат часу на розрахунок та обробку результатів.

Витрати часу на розв'язання конкретних завдань залежать від:

- 1) складності геометрії фасеткової моделі;
- 2) рівня складності завдання, що розв'язується та обраної для його розв'язання математичної моделі;
- 3) кількості та розмірів кінцевих елементів;
- 4) початкових параметрів потоку, початкових та граничних умов системи, тощо.

Постановка проблеми. Для досягнення найбільшої достовірності результатів, що будуть отримані

мані в ході чисельного експерименту, необхідно забезпечити його тісний взаємозв'язок з натурним експериментом. Тому дані, отримані в ході попереднього натурального дослідження, є основою для дослідження чисельного. За умови відсутності даних, отриманих в ході експериментального дослідження, початкові дані для подальшого чисельного експерименту можуть бути отримані розрахунковим шляхом. Застосування початкових даних, отриманих розрахунковим шляхом, значно зменшує витрати часу при проведенні чисельного експериментального дослідження. Тому отримання математичних залежностей, що дозволять суттєво зменшити час на підготовку початкових даних та обрахунок результатів є на сьогодні актуальним завданням.

В даному випадку вирішується завдання дослідження характеру протікання процесів в камері змішувального пристрою сучасними електронно-обчислювальними засобами із застосуванням програмного комплексу Flow Vision з метою визначення ефективності їх протікання. В даній роботі буде розглянуто математичні залежності щодо визначення попередніх параметрів потоку для підготовки та реалізації чисельного експерименту.

Викладення основного матеріалу

При протіканні повітряного потоку змішувач газу може розглядатись як місцевий опір. Для ви-

значення початкових параметрів потоку будуть задіяні основні закони та залежності гідро- та газодинаміки.

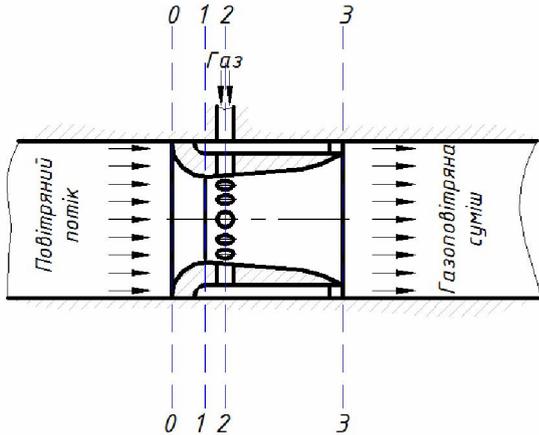


Рис. 1. Схема змішувального пристрою:

- 0 – 0 – вхід в змішувальний пристрій;
- 1 – 1 – найвузший (критичний) переріз змішувального пристрою;
- 2 – 2 – місце виходу газового потоку;
- 3 – 3 – вихід із змішувального пристрою

Представлений на рисунку 1 газозмішувальний пристрій має конструктивні особливості:

- 1) дотичний принцип розташування отворів подачі газу;
- 2) комбінований щільово-отворовий принцип подачі газового палива.

З метою визначення параметрів робочого тіла в довільному перетині змішувального пристрою використано рівняння Бернуллі:

$$z_i + \frac{P_i}{\rho_i \cdot g} + \alpha_i \cdot \frac{v_{cp,i}^2}{2 \cdot g} = z_{i+1} + \frac{P_{i+1}}{\rho_{i+1} \cdot g} + \dots$$

$$\dots + \alpha_{i+1} \cdot \frac{v_{cp,i+1}^2}{2 \cdot g} + \xi_{i,i+1} \cdot \frac{v_{cp,i+1}^2}{2 \cdot g} = const,$$
(1)

де i – індекс параметрів потоку рідини (газу) на початку ділянки, що розглядається;

$i+1$ – індекс параметрів потоку рідини (газу) в кінці ділянки що розглядається;

z_i, z_{i+1} – геометричний напір потоку рідини (газу), відповідно, на початку та в кінці ділянки;

p_i, p_{i+1} – тиск потоку рідини (газу), відповідно, на початку та в кінці ділянки;

ρ_i, ρ_{i+1} – густина потоку рідини (газу), відповідно, на початку та в кінці ділянки;

α_i, α_{i+1} – коефіцієнт Коріоліса для потоку рідини (газу), відповідно, на початку та в кінці ділянки;

v_i, v_{i+1} – середня швидкість потоку рідини (газу), відповідно, на початку та в кінці ділянки;

$\xi_{i,i+1}$ – коефіцієнт місцевих втрат на ділянці, що розглядається.

За умови $z_i = z_{i+1}$, тобто $D_z = 0$, та нехтування впливом масових сил для газу справедливим буде допущення $z_i = z_{i+1} = 0$, тоді:

$$\frac{P_i}{\rho_i \cdot g} + \alpha_i \cdot \frac{v_{cp,i}^2}{2 \cdot g} = \frac{P_{i+1}}{\rho_{i+1} \cdot g} + \dots$$

$$\dots + \alpha_{i+1} \cdot \frac{v_{cp,i+1}^2}{2 \cdot g} + \xi_{i,i+1} \cdot \frac{v_{cp,i+1}^2}{2 \cdot g}.$$
(2)

Прирівнявши нулю праву та ліву частину рівняння (2), маємо:

$$\left(\frac{P_i}{\rho_i \cdot g} - \frac{P_{i+1}}{\rho_{i+1} \cdot g} \right) + \left(\alpha_i \cdot \frac{v_{cp,i}^2}{2 \cdot g} - \alpha_{i+1} \cdot \frac{v_{cp,i+1}^2}{2 \cdot g} \right) - \dots$$

$$\dots - \xi_{i,i+1} \cdot \frac{v_{cp,i+1}^2}{2 \cdot g} = 0.$$
(3)

Якщо вважати $\rho_i = \rho_{i+1} = \rho = const$

$$\frac{P_i - P_{i+1}}{\rho \cdot g} + \frac{(\alpha_i \cdot v_{cp,i}^2 - \alpha_{i+1} \cdot v_{cp,i+1}^2)}{2 \cdot g} - \dots$$

$$\dots - \xi_{i,i+1} \cdot \frac{v_{cp,i+1}^2}{2 \cdot g} = 0.$$
(4)

Для спрощення рівняння (4) помножимо його ліву та праву частину на множник $2 \cdot \rho \cdot g$

$$2 \cdot (P_i - P_{i+1}) + (\alpha_i \cdot v_{cp,i}^2 - \alpha_{i+1} \cdot v_{cp,i+1}^2 - \dots$$

$$\dots - \xi_{i,i+1} \cdot v_{cp,i+1}^2) \cdot \rho = 0.$$
(5)

Виходячи з умови нерозривності потоку [1],

$$Q = f_i \cdot v_{cp,i} = f_{i+1} \cdot v_{cp,i+1} = const,$$

де f_i, f_{i+1} – площа перетину пристрою відповідно на вході та виході.

Тоді маємо:

$$Q = f_i \cdot v_{cp,i} = f_{i+1} \cdot v_{cp,i+1} = const$$

$$v_{cp,i} = \frac{f_{i+1} \cdot v_{cp,i+1}}{f_i},$$
(6)

$$2 \cdot (P_i - P_{i+1}) + \left(\alpha_i \cdot \left(\frac{f_{i+1} \cdot v_{cp,i+1}}{f_i} \right)^2 - \dots \right)$$

$$\alpha_{i+1} \cdot v_{cp,i+1}^2 - \xi_{i,i+1} \cdot v_{cp,i+1}^2) \cdot \rho = 0.$$
(7)

Зробивши необхідні перетворення отримуємо:

$$2 \cdot (P_i - P_{i+1}) + \left(\alpha_i \cdot \frac{f_{i+1}^2}{f_i^2} - \dots \right)$$

$$\dots - \alpha_{i+1} - \xi_{i,i+1}) \cdot \rho \cdot v_{cp,i+1}^2 = 0.$$
(8)

Тоді на базі даного рівняння (8) отримуємо:

$$\left(\alpha_i \cdot \frac{f_{i+1}^2}{f_i^2} - \alpha_{i+1} - \xi_{i,i+1} \right) \cdot \rho \cdot v_{cp,i+1}^2 = \dots$$

$$\dots = -2 \cdot (P_i - P_{i+1})$$
(9)

або

$$\left(\alpha_{i+1} - \alpha_i \cdot \frac{f_{i+1}^2}{f_i^2} + \xi_{i-i+1} \right) \cdot \rho \cdot v_{cp,i+1}^2 = \dots$$

$$\dots = 2 \cdot (p_i - p_{i+1}). \quad (10)$$

Тоді

$$v_{cp,i+1}^2 = \frac{2 \cdot (p_i - p_{i+1})}{\left(\alpha_{i+1} - \alpha_i \cdot \frac{f_{i+1}^2}{f_i^2} + \xi_{i-i+1} \right) \cdot \rho} \quad (11)$$

рішенням якого буде:

$$v_{cp,i+1} = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_i - p_{i+1})}{\left(\alpha_{i+1} - \alpha_i \cdot \frac{f_{i+1}^2}{f_i^2} + \xi_{i-i+1} \right) \cdot \rho}} \quad (12)$$

Також з рівняння (8) отримуємо залежність для визначення перепаду тиску на ділянці що розглядається:

$$2 \cdot (p_i - p_{i+1}) = - \left(\alpha_i \cdot \frac{f_{i+1}^2}{f_i^2} - \dots \right. \quad (13)$$

$$\left. \dots - \alpha_{i+1} - \xi_{i-i+1} \right) \cdot \rho \cdot v_{cp,i+1}^2$$

або відповідно

$$2 \cdot (p_i - p_{i+1}) = \left(\alpha_{i+1} - \alpha_i \cdot \frac{f_{i+1}^2}{f_i^2} + \dots \right. \quad (14)$$

$$\left. \dots + \xi_{i-i+1} \right) \cdot \rho \cdot v_{cp,i+1}^2$$

і тоді

$$\Delta p = \frac{\left(\alpha_{i+1} - \alpha_i \cdot \frac{f_{i+1}^2}{f_i^2} + \xi_{i-i+1} \right) \cdot \rho \cdot v_{cp,i+1}^2}{2} \quad (15)$$

Необхідно відмітити, що в обох рівняннях (12) та (15) факторами основного та безпосереднього впливу на вихідні параметри потоку є співвідношення квадратів площ перетинів $\frac{f_{i+1}^2}{f_i^2}$ та швидкість потоку на виході $v_{cp,i+1}^2$. Вплив величин α_i , та α_{i+1} на вихідні параметри потоку також присутній, але він не суттєвий внаслідок стаціонарності режиму руху газового потоку для перетину, що розглядається. Суттєві зміни в характері руху потоку можливі за умови різкого переходу від ламінарного до турбулентного режиму руху, що в результаті може призвести до коливань α . Так згідно [2] для ламінарного режиму руху $\alpha = 2$, а для турбулентного $\alpha = 1,13 \dots 1,15$, а в більшості розрахунків для турбулентного режиму руху потоку приймається $\alpha = 1$. Безпосередній вплив коефіцієнту місцевих втрат ξ_{i-i+1} на вихідні параметри потоку відбувається через число Re і найбільш відчутний для ламінарного руху потоку згідно [3]. Враховуючи турбулентний характер руху, для задачі, що розглядається, малу

довжину і-тої ділянки перетину змішувального пристрою, коефіцієнт ξ_{i-i+1} умовно можна вважати сталою величиною. Також враховуючи незначний рівень коливань зміни густини газового потоку $\Delta \rho \rightarrow 0$, кінцевий вплив зміни густини потоку на результати для (12) та (15) буде несуттєвий.

Висновки

1) Застосування аналітичних залежностей для визначення початкових параметрів потоку, отриманих на базі рівняння Бернуллі, дає можливість зменшити матеріальні та людські витрати під час моделювання із застосуванням (CFD) комплексів.

2) Розрахункове дослідження для початкових параметрів потоку, виконане з використанням рівняння Бернуллі, показало, що головними факторами впливу на вихідні параметри потоку є співвідношення квадратів площ перетинів змішувального пристрою $\frac{f_{i+1}^2}{f_i^2}$ та квадрат швидкості потоку на виході $v_{cp,i+1}^2$.

3) В зв'язку з незначним рівнем зміни величин α , ξ_{i-i+1} та ρ при русі потоку через змішувальний пристрій, їх вплив на вихідні параметри потоку не суттєвий.

Список літератури:

1. Сергель О.С. Уравнение неразрывности / Сергель О.С. – М.: Машиностроение, 1981. – 374 с., ил. – (Прикладная гидродинамика: Учебник для авиационных вузов.)
2. Винников В.А., Гидромеханика: [учебник для вузов] / Винников В.А., Каркашадзе Г.Г. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 302 с., ил.
3. Идельчик И.Е. Общие указания / Идельчик И.Е. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.: ил. – (Справочник по гидравлическим сопротивлениям – 3-е изд., перераб. и доп./ Под ред. М.О. Штейнберга)
4. Круглов М.Г., Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания: [учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания»] / Круглов М.Г., Меднов А.А. – М.: Машиностроение, 1988. – 360 с.: ил.

Bibliography (transliterated):

1. Sergel OS The equation of continuity / Sergel OS - Mashinostroyeniye, 1981. - 374 p., Ill. - (Applied Fluid Dynamics: A Textbook for aviation schools.)
2. VINNIKOV VA, Fluid [textbook for high schools] / VINNIKOV VA, GG Karkashadze Moscow: Publishing the Moscow State Mining University, 2003. - 302 p., Ill.3. Idelchik IE, General Instructions / Idelchik IE - M.: Mechanical Engineering, 1992. - 672 s.: Ill. - (Handbook of hydraulic resistance - 3rd ed., Rev. And add. / Ed. Steinberg MO)
4. Kruglov MG, Gas dynamics of combined internal combustion engines [Textbook. aid for students enrolled in the specialty "Internal Combustion Engines"] / MG Kruglov, copper AA. - M.: Mechanical Engineering, 1988. - 360 s.: Ill.

Поступила в редакцию 03.07.2013

Швец Игорь Анатолійович – викладач Первомайського політехнічного інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала С.Й. Макарова, Первомайськ, Україна, e-mail: asistent2011@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОЗДУШНОГО ПОТОКА ПРИ ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ УСТРОЙСТВО СМЕШЕНИЯ

И.А. Швец

Рассмотрены вопросы определения выходных параметров газо-воздушного потока как первый этап численного моделирования. Приведенные математические зависимости значительно упрощают получение численных значений выходных параметров и, соответственно, входных для работы с CFD комплексами. Исходные параметры, которые подлежат определению, перед численным моделированием есть перепад давления в устройстве смешения и скорость потока на выходе. Рассмотрены основные допущения, применимые при работе с математическими зависимостями и отмечено их влияние на точность получения исходных параметров газового потока.

METRICS SPECIFICATION OF GAS-AIR FLOW MOVING THROUGH MIXING DEVICE

I. A. Shvets

The problems of determining the output parameters of the gas-air flow as the first stage of the numerical simulation are considered. These mathematical relationships are much easier to obtain numerical values as junction parameters and input respectively to work with CFD systems. Baseline parameters that must be determined before the numerical simulation is the pressure drop in the mixing device and the flow rate at the outlet. The basic assumptions are applicable when dealing with mathematical relations and noted their influence on the accuracy of the initial parameters of the gas flow.

УДК 621.438

М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевский, А.С. Митрофанов, А.С. Познанский, А.Ю. Проскурин

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНВЕРСИИ БИОЭТАНОЛА ДВС 2Ч 7,2/6

Представлены принцип действия и конструктивные особенности экспериментальной установки ТХР-2.0, предназначенной для исследований паровой конверсии биоэтанола в синтез-газ в термохимическом реакторе. Определены основные конструктивные и энергетические показатели реактора на характерных режимах. Минимальная температура, при которой была достигнута 100% конверсия биоэтанола, составила 620 °С при использовании смеси с 54% содержанием биоэтанола. Эффективная мощность реактора в зависимости от состава смеси составляла 252...333 Вт.

Постановка проблемы

Постоянное повышение стоимости нефтяных топлив и их ограниченные запасы приводят к необходимости решения двуединой задачи - поиск новых видов топлива и принципов более эффективного использования этих топлив в энергетических установках. Одним из путей ее решения является использование продуктов термохимической конверсии биоэтанола в качестве топлива тепловых двигателей.

Использование биоэтанола в качестве топлива в тепловых двигателях достаточно подробно изучены отечественными и иностранными специалистами. Биоэтанол в основном используется в автомобильных двигателях с искровым зажиганием в качестве добавки к бензину (Е10, Е25) или в качестве основного топлива [1].

Большая часть биоэтанола производится из кукурузы (США) и сахарного тростника (Бразилия). Наиболее целесообразным с экономической точки зрения сырьем для производства биоэтанола в Украине является кукуруза [2]. Биоэтанол обес-

печивает высокие антидетонационные свойства и пониженное содержание токсичных веществ в отработавших газах [3]. Недостатками биоэтанола являются пониженная теплота сгорания ($Q_n = 26,78$ МДж/кг), высокая теплота испарения ($Q_i = 870$ кДж/кг) и низкое давление насыщенных паров ($p_n = 12,2$ кПа) [4].

Термохимическая конверсия биоэтанола позволяет улучшить не только топливно-экономические и экологические характеристики ДВС, но и кинетические показатели процесса сгорания топлива внутри цилиндра.

В энергетических установках с ДВС необходимая энергия для осуществления реакции конверсии может быть получена при утилизации тепла отходящих газов двигателя [5,6]. В результате конверсии химическая энергия полученного синтез-газа превышает энергию исходного биоэтанола на величину утилизированной энергии отходящих газов в реакторе, которая таким образом регенерируется.

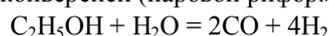
Большинство известных исследований посвящено конверсии традиционных топлив применительно к топливным элементам, что предполагает максимальный выход водорода [7]. В качестве исходного топлива чаще всего используют метан [8], пропан [9] и метанол [10].

Цель работы – исследование характеристик системы термохимической конверсии биоэтанола применительно к высокооборотному ДВС.

Изложение основного материала

Конверсия биоэтанола в синтез-газ может быть осуществлена тремя известными методами [11]:

паровой конверсией (паровой риформинг)



$$\Delta H_{298} = + 256 \text{ кДж/моль,}$$

углекислотной конверсией («сухой» риформинг)



$$\Delta H_{298} = + 297 \text{ кДж/моль}$$

и разложением



$$\Delta H_{298} = + 50 \text{ кДж/моль.}$$

В поршневых ДВС целесообразно применять метод паровой конверсии. Реакция углекислотной конверсии по сравнению с паровой конверсией обладает большим эндотермичным эффектом, а реакция разложения обладает небольшим энергетическим потенциалом [11].

Первичная оценка эффективности термохимической конверсии биоэтанола может быть проведена путем сравнения теплотворной способности

жидкого биоэтанола и газообразных продуктов его конверсии. Так при сгорании 1 кг жидкого биоэтанола выделяется 26,78 МДж тепловой энергии, а продукты его паровой конверсии могут уже выделить 34,87 МДж (на 23,2% больше) [12]. Увеличение теплотворной способности полученного синтез-газа по сравнению с исходным биоэтанолом является следствием внесения в систему дополнительного количества энергии (теплота реакции конверсии) и не противоречит закону сохранения энергии [13].

При разработке энергетической установки с системой термохимической конверсии биоэтанола особое внимание уделяется вопросам проектирования высокоэффективного реактора, который в широком диапазоне температур отходящих газов должен обеспечивать необходимую степень конверсии биоэтанола в синтез-газ.

С целью детального изучения этих вопросов в центре «Перспективные энергетические технологии» Национального Университета Кораблестроение имени адмирала Макарова создана экспериментальная установка – ТХР-2.0, позволяющая исследовать особенности процесса получения синтез-газа из биоэтанола в термохимическом реакторе.

Экспериментальная установка состоит из ряда систем (рис. 1.):

- 1) по исследованию параметров процесса паровой конверсии биоэтанола в термохимической реакторе;
- 2) измерений;
- 3) автоматики и регулирования.

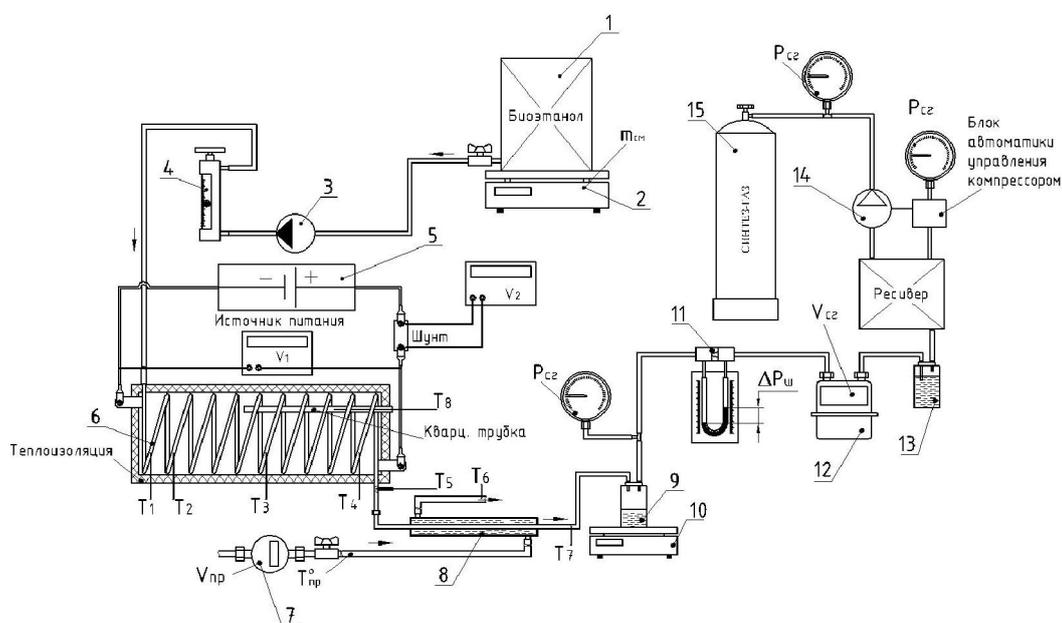


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки ТХР-2.0

Система по исследованию параметров процесса паровой конверсии биоэтанола в термохимическом реакторе состоит из подсистемы подачи биоэтанола в термохимический реактор (ТХР), и устройств подвода энергии к нему, подсистемы охлаждения, подсистемы конденсации продуктов конверсии и закачки синтез-газа в баллоны. Подвод тепла ОГ ДВС с температурой 500 ... 600 °С, необходимого для протекания реакции, имитируется путем пропускания через реактор постоянного тока от источника питания 5 напряжения 24...31 В. Подсистема измерений позволяет измерять расхода, давления, плотности и температуры всех теплоносителей, а также электрическую нагрузку на термохимический реактор.

Подача биоэтанола в ТХР 6 осуществляется с помощью насоса 3 с электрическим приводом постоянного тока. Расход биоэтанола контролируют ротаметром 4. Охлаждение продуктов конверсии и очистка от остатков воды и не прореагировавшего этанола обеспечивается в теплообменнике 8 типа «труба в трубе» ($L = 5$ м, $d_{\text{вн}} = 7,8$ мм, материал – сталь 12Х18Н10Т), который охлаждается проточной водой. Расход воды фиксируется с помощью водяного счетчика 7 (Ду 15 VALTEC). Водяной пар и не прореагировавшие компоненты, собираются в реторте сконденсированной смеси 9. Количество прореагировавшего биоэтанола определяется весовым способом путем взвешивания реторты 1 с биоэтанолом до начала эксперимента и после его окончания на электронных цифровых весах ВТА-60/6-7-А 2. Количество сконденсировавшейся смеси, после охлаждения в конденсаторе определяется путем взвешивания с помощью электронных цифровых весов 10 (JKH-1000). Мгновенный расход синтез-газа замеряют по перепаду на расходомерной шайбе 11. Объем полученного синтез-газа фиксируется газовым счетчиком 12 (Gallus 2000), прошедшим индивидуальную тарировку. Перед ресивером с синтез-газом установлен водяной затвор 13. Полученный синтез-газ с помощью компрессора 14 (CAJ 4492 A) набивается в баллон 15 ($V_6 = 50$ л), где он и хранится.

В процессе исследований решались следующие задачи:

- определение энергетических показателей реактора паровой конверсии биоэтанола;
- определение характера изменения температур стенки $T_{\text{ст}}$ по длине реактора L ;
- определение свойств синтез-газа в зависимости от состава и расхода смеси, а также мощности реактора;

Исследовано 4 смеси с различным объемным содержанием биоэтанола – 54%, 46%, 39% и 25%.

Мощность реактора составляла 1,5 кВт, а расход смеси достигал 1,2 кг/ч. Главным условием было достижение 100% конверсии биоэтанола. В результате исследований выявлены:

- зависимость средних тепловых потерь реактора от средней температуры стенки реактора;
- зависимость максимальной температуры синтез-газа на выходе из реактора при 100% конверсии от состава смеси «биоэтанол-вода»;
- зависимость эффективной мощности реактора от расхода и состава смеси «биоэтанол-вода»;
- зависимость средней температуры стенки по длине реактора от состава смеси «биоэтанол-вода»;
- зависимость плотности синтез-газа от состава смеси «биоэтанол-вода»;
- зависимость расчетной теплоты сгорания синтез-газа от расхода и состава смеси «биоэтанол-вода».

Результаты исследований приведены на рис. 2-5.

Так средние тепловые потери реактора в диапазоне температур стенки 215...528 °С составили 77...285 Вт.

При исследовании смеси с 54% объемным содержанием биоэтанола были достигнуты минимальное значение температуры (620 °С), при которой произошла 100% конверсия биоэтанола, а также максимальное значение средней интегральной температуры стенки реактора (325,3 °С). Плотность полученного синтез-газа составила 0,898 кг/м³. Расчетное значение удельной массовой теплоты сгорания синтез-газа составило 13,5 МДж/кг. Для осуществления реакции паровой конверсии затрачено наименьшее количество энергии – 252 Вт.

Выводы

1. Определены основные теплотехнические показатели реактора конверсии биоэтанола при различных режимах. Минимальная температура, при которой была достигнута 100% конверсия биоэтанола, составила 620 °С при использовании смеси с 54% содержанием биоэтанола. В этих условиях плотность полученного синтез-газа составила 0,898 кг/м³.

2. Эффективная мощность реактора в зависимости от состава смеси «биоэтанол-вода» составляла 252...333 Вт при условии одинаковой энергии нагрева реактора.

3. Расчетная удельная теплота сгорания полученного синтез-газа в зависимости от состава смеси «биоэтанол-вода» составляла 11,9...13,5 МДж/кг.

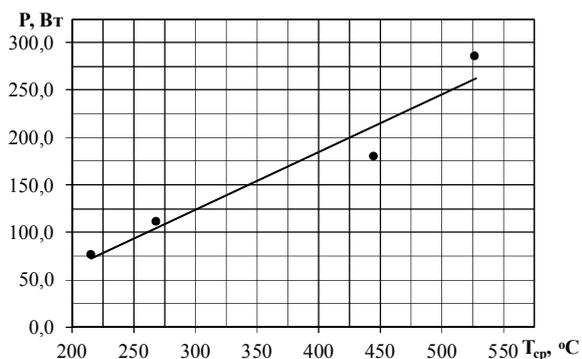


Рис. 2. Влияние средней температуры стенки трубки на тепловые потери ТХР

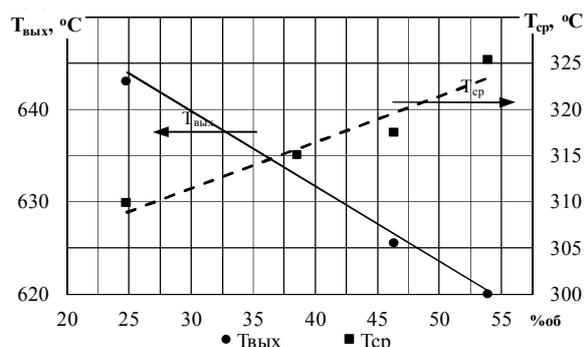


Рис. 3. Влияние состава смеси «биоэтанол-вода» на максимальную температура синтез-газа на выходе из реактора и среднюю температуру стенки по длине реактора

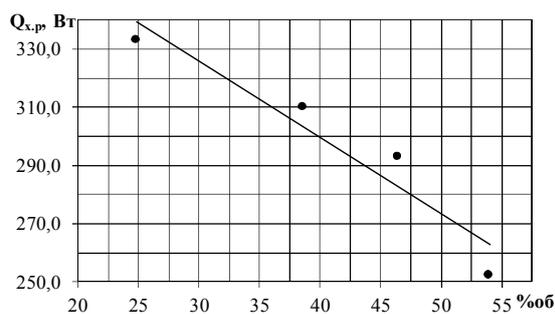


Рис. 4. Влияние состава смеси «биоэтанол-вода» на эффективную мощность реактора

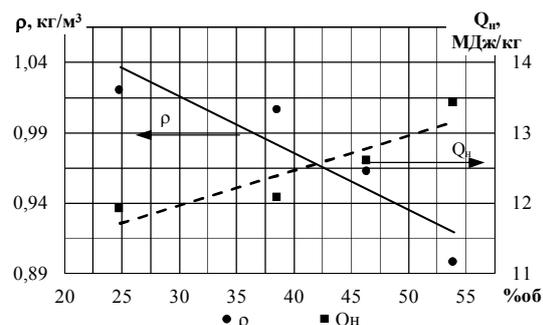


Рис. 5. Влияние состава смеси «биоэтанол-вода» на плотность синтез-газа и расчетную теплоту сгорания синтез-газа

Список литературы:

1. Карпов, С. А. Автомобильные топлива с биоэтанолом [Текст] / С. А. Карпов, В. М. Капустин, А. К. Старков. – М. : Колос, 2007. – 216 с.
2. Третьяков, В. Ф. Биоэтанол – стратегия развития топливного и нефтехимического комплекса [Текст] / В. Ф. Третьяков // Химическая техника. – 2008. – № 1. – С. 8-12.
3. Данилов, А. М. Альтернативные топлива: достоинства и недостатки. Проблемы применения [Текст] / А. М. Данилов, Э. Ф. Каминский, В. А. Хавкин // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И.Менделеева). – 2003. – Т. 47, № 6. – С. 4-11.
4. Работа дизелей на нетрадиционных топливах / В. А. Марков, А. И. Гайворонский, Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко. – М. : Изд-во «Легион – Автодата», 2008. – 464 с.
5. Носач, В.Г. Повышение эффективности использования биогаза в теплоэнергетических установках с помощью термохимической регенерации [Текст] / В.Г. Носач, А.А. Шрайбер // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т.31, №2 – С. 57-63.
6. Носач, В.Г. Повышение эффективности использования природного газа в теплоэнергетике с помощью термохимической регенерации [Текст] / В.Г. Носач, А.А. Шрайбер // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т.31, №3 – С. 42-50.
7. Cheekatamarla P.K. Reforming catalysts for hydrogen generation in fuel cell applications [Text] / P.K. Cheekatamarla, C.M. Finnerty // Journal of Power Sources. – 2006. – P. 490-499.
8. Methane steam reforming for hydrogen production using low water-ratios without carbon formation over ceria coated Ni catalysts [Text] / J. Xu et al. // Applied Catalysis A. – 2008. – P. 119-127.
9. Reactivity of steam in exhaust gas catalysis III. Steam and oxy-gen/steam conversions of propane on a Pd/Al2O3 catalyst [Text] / T. Maillot et al. // Applied Catalysis B. – 1996. – P. 251-266.
10. Production of H2 for fuel cell applications: methanol steam reforming with sufficiently thorough cleaning of H2 from CO impurity [Text] / A. Ya. Rozovskii et al. // Topics in Catalysis. – 2007. – Vol. 42-43. – P. 437-441.
11. Ethanol steam reforming in a microchannel reactor [Text] / Y. Men, G. Kolb, R. Zapf, V. Hessel and H. Lowe. – Trans IChemE, Part B, Process Safety and Environmental Protection, 2007, 85(B5): 413-418.
12. Тимошевский, Б.Г. Эффективность термохимической конверсии углеводородных топлив применяемых в ДВС [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурин // Вісник НУК. – 2011. – №3. – С. 36-42.
13. Блинов, Л.М. Справочник по химии [Текст] / Л.М. Блинов, И.Л. Перфилова, Л.В. Юмашева, Р.Г. Чувиляев. – М.: Проспект, 2011. – 160 с.

Bibliography (transliterated):

1. Karpov, S. A. Avtomobilnye topliva s bioetanолом [Tekst] / S. A. Karpov, V. M. Kapustin, A. K. Starkov. – M. : Kolos, 2007. – 216 s.
2. Tretyakov, V. F. Bioetanol – strategiya razvitiya toplivnogo i neftehimicheskogo kompleksa [Tekst] / V. F. Tretyakov // Himicheskaya teh-nika. – 2008. – # 1. – S. 8-12.
3. Danilov, A. M. Alter-nativnyie topliva: dostoinstva i nedostatki. Proble-myi prime-neniya [Tekst] / A. M. Danilov, E. F. Kaminskiy, V. A. Havkin // Ros. him. zh. (Zh. Ros. him. ob-va im. D.I.Mendeleeva). – 2003. – T. 47, # 6. – S. 4-11.
4. Rabota dizeley na netraditsionnyih toplivah / V. A. Markov, A. I. Gayvoronskiy, L. V. Grehov, N. A. Ivaschenko. – M. : Izd-vo «Legion – Avtodata», 2008. – 464 s.
5. Nosach, V.G. Povyishenie effektivnosti ispolzovaniya biogaza v teplo-energeticheskikh ustanovkakh s pomoschyu termohimicheskoy regeneratsii [Tekst] / V.G. Nosach, A.A. Shrayber // Pro-myishlennaya teplotekhnika. – 2009. – T.31, #2 – S. 57-63.
6. Nosach, V.G. Povyishenie effektivnosti ispolzovaniya prirodnogo gaza v teplo-energetike s pomoschyu termohimicheskoy regeneratsii [Tekst] / V.G. Nosach, A.A. Shray-

ber // *Promyshlennaya teplotekhnika*. – 2009. – Т.31, #3 – S. 42-50. 7. Cheekatamarla P.K. Reforming catalysts for hydrogen generation in fuel cell applications [Text] / P.K. Cheekatamarla, C.M. Finnerty // *Journal of Power Sources*. – 2006. – P. 490-499. 8. Methane steam reforming for hydrogen production using low water-ratios without carbon formation over ceria coated Ni catalysts [Text] / J. Xu et al. // *Applied Catalysis A*. – 2008. – P. 119-127. 9. Reactivity of steam in exhaust gas catalysis III. Steam and oxy-gen/steam conversions of propane on a Pd/Al₂O₃ catalyst [Text] / T. Maillet et al. // *Applied Catalysis B*. – 1996. – P. 251-266. 10. Production of H₂ for fuel cell applications: methanol steam reforming with sufficiently thorough

cleaning of H₂ from CO impurity [Text] / A. Ya. Rozovskii et al. // *Topics in Catalysis*. – 2007. – Vol. 42-43. – P. 437-441. 11. Ethanol steam reforming in a microchannel reactor [Text] / Y. Men, G. Kolb, R. Zapf, V. Hessel and H. Lowe. – *Trans IChemE, Part B, Process Safety and Environmental Protection*, 2007, 85(B5): 413-418. 12. Timoshevskiy, B.G. Effektivnost termohimicheskoy konversii uglevodородnyih topliv primenyaemyih v DVS [Tekst] / B. G. Timoshevskiy, M. R. Tkach, A. Yu. Proskurin // *VIsnik NUK*. – 2011. – #3. – S. 36-42. 13. Blinov, L.M. Spravochnik po himii [Tekst] / L.M. Blinov, I.L. Perfi-lova, L.V. Yumasheva, R.G. Chuvilyaev. – M.: Prospekt, 2011. – 160 s.

Поступила в редакцию 12.05.2013

Тимошевский Борис Георгиевич – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: btyum@mksat.net, (050) 948-22-22.

Ткач Михаил Романович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tkach@mksat.net, (050) 521-93-80.

Митрофанов Александр Сергеевич – ассистент кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: m.aleksandr.s@mail.ru, (063) 021-30-93.

Познанский Андрей Станиславович – ассистент кафедры теоретической механики Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: AndPozn@yandex.ru, (096) 968-51-24.

Проскурин Аркадий Юрьевич – ассистент кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: mover@ukt.net, (093) 204-80-26.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНВЕРСИИ БИОЭТАНОЛУ ДВС 2Ч 7,2/6

М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевський, О.С. Митрофанов, А.С. Познанський, А.Ю. Проскурін

Представлені принцип дії і конструктивні особливості експериментальної установки ТХР-2.0, призначеної для досліджень парової конверсії біоетанолу в синтез-газ у термохімічному реакторі. Визначено основні конструктивні та енергетичні показники реактора на характерних режимах. Мінімальна температура, при якій була досягнута 100% конверсія біоетанолу, складала 620 °С при використанні суміші з 54% вмістом біоетанолу. Ефективна потужність реактора залежно від складу суміші становила 252 ... 333 Вт.

CHARACTERISTICS OF BIOETHANOL CONVERSION EXPERIMENTAL SYSTEM FOR THE 2 CYLINDER 4-STROKE ENGINE 7,2/6

M.R. Tkach, B.G. Timoshevsky, A.S. Mitrofanov, A.S. Poznansky, A.Y. Proskurin

Represented principle of operation and design features of the experimental plant TCR-2.0 for research bio-ethanol steam reforming in syngas by thermochemical reactor. The basic structural and energy performance of the reactor at the characteristic modes are describes. The minimum temperature, which was achieved with 100% conversion ethanol, was 620 °C when using a mixture containing 54% ethanol. The effective capacity of the reactor depending on the composition of the mixture was 252 ... 333 watts.