

СНИЖЕНИЕ РЕАКЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ КИСЛОРОДА ИНЕРТНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ В ДВИГАТЕЛЯХ С ВОСПЛАМЕНЕНИЕМ ОТ СЖАТИЯ

В.Г. Камалтдинов, к.т.н.

ФГБОУ ВПО Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

Предложено выражение для определения коэффициента реакционной активности кислорода, с помощью которого учитывается влияние инертных компонентов горючей смеси на скорость сгорания. Определены величины этого коэффициента при сгорании диметилового эфира в смеси воздуха с отработавшими газами. Показано снижение скорости сгорания в результате влияния инертных компонентов смеси.

В настоящее время рециркуляция отработавших газов (ОГ) рассматривается в качестве одного из наиболее эффективных методов снижения выбросов оксидов азота с отработавшими газами ДВС. Для перспективных двигателей с воспламенением от сжатия, работающих на однородной рабочей смеси, то есть при реализации рабочего цикла НСЦИ (Homogeneous Charge Compression Ignition), в России и за рубежом выполнен целый ряд исследований по математическому и экспериментальному моделированию рабочего процесса, в том числе и с рециркуляцией ОГ [1–5 и др.]. Однако вопрос о влиянии содержания инертных компонентов (азота, углекислого газа и водяного пара) в рабочей смеси на процесс сгорания остается недостаточно изученным. Одной из причин этого является отсутствие в применяемых математических моделях количественной оценки содержания данных компонентов в горючей смеси.

Для проведения такого аналитического исследования использована математическая модель горения топлива в ДВС [6–8], которая успешно применялась при моделировании рабочего цикла НСЦИ двигателей [9–14 и др.]. Предложенная математическая модель отличается от известных тем, что позволяет количественно оценить влияние на скорость сгорания не только снижения содержания кислорода, но и увеличения содержания инертных компонентов, которое имеет место в реальном процессе сгорания.

Скорость сгорания топлива в модели определяется по выражению:

$$w = \frac{dN}{dt} = \frac{Z_E}{\tau_y}, \quad (1)$$

где dN — изменение количества вещества в результате реакции; dt — интервал времени; Z_E — количество активных молекул топлива, энергия которых выше энергии активации, составляющих группу одновременно реагирующих молекул; τ_y — условная продолжительность реакции окисления группы активных молекул топлива. Количество активных молекул топлива определяется по известному закону Аррениуса:

$$Z_E = Z_T \cdot e^{-\frac{E_A}{RT}}, \quad (2)$$

где Z_T — общее количество молекул топлива в рассматриваемом объеме V цилиндра двигателя; E_A — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T — температура смеси.

Условная продолжительность реакции окисления группы активных молекул топлива τ_y определяется по выражению:

$$\begin{aligned} \tau_y &= \frac{Z_T}{\text{const} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot V \cdot C_T^p \cdot C_{O_2}^q} = \\ &= \frac{V}{\text{const} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot Z_T^{p-1} \cdot Z_{O_2}^q}, \end{aligned} \quad (3)$$

где const — константа, учитывающая количество активных соударений молекул реагирующих веществ в единицу времени в единице объема; K_1 — коэффициент реакционной активности кислорода, учитывающий влияние инертных составляющих рабочего тела (азота и продуктов сгорания); K_2 — коэффициент, учитывающий турбулентность внутри камеры сгорания, $K_2 \geq 1$; $C_T = Z_T/V$ и $C_{O_2} = Z_{O_2}/V$ — концентрации всех молекул топлива Z_T и кислорода Z_{O_2} в объеме V соответственно; p, q — показатели степени, причем $p + q = n$ — кинетический порядок реакции, $n = 2$.

Для получения численного значения скорости сгорания в любой момент времени достаточно определить количество одновременно реагирующих активных молекул топлива и разделить его на условную продолжительность реакции их окисления.

В модель процесса сгорания введено понятие реакционной активности кислорода, которым характеризуется способность молекул кислорода вступать в реакцию окисления с молекулами топлива. Из моделирования процесса сгорания топлива как результата активных столкновений молекул топлива и кислорода естественным образом следует, что при наличии в горючей смеси инертных примесей частота этих столкновений будет ниже, чем без примесей, из-за нахождения между ними молекул инертных компонентов, которые участвуют в столкновениях. Скорость реакции окисления топлива также будет уменьшаться, что можно рассматривать как снижение реакционной активности кислорода. Максимальная реакционная активность кислорода соответствует коэффициенту $K_1 = 1$, когда инертных компонентов в горючей смеси нет, и условная продолжительность реакции окисления активных молекул топлива τ_y будет наименьшая, а скорость окисления — наибольшая.

Коэффициент реакционной активности кислорода K_1 определяется из выражения, описывающего зависимость относительной величины периода задержки воспламенения (ПЗВ) топлива $\tau_{зв}$ от массовой доли кислорода в окислителе в смеси с азотом ψ [15], представленную на рис. 1:

$$K_1 = 1 - \left(1 - \frac{Z_{O_2}}{Z_{O_2} + Z_{N_2} + Z_{CO_2} + Z_{H_2O} + Z_{CO}} \right)^6, \quad (4)$$

где Z_{N_2} , Z_{CO_2} , Z_{H_2O} и Z_{CO} — соответственно количества молекул азота, диоксида углерода, воды и оксида углерода в расчетном объеме V .

Коэффициент турбулентности K_2 введен для моделирования влияния скорости движения горючей смеси на процесс ее сгорания. При моделировании НССИ процесса сгорания принималось $K_2 = 1$.

На рис. 1 приведены результаты расчетов процесса воспламенения дизельного топлива в окислителе, состоящем из кислорода и азота. При снижении массовой доли кислорода в окислителе ψ от 1 до 0,2 начальное значение коэффициента реакционной активности кислорода K_1 уменьшается от 1 до 0,69. Увеличение относительной величины периода задержки воспламенения при этих условиях составляет ~2,8 раза (пунктирные линии на рис. 1), что согласуется с известными экспериментальными данными [15] как по величине, так и по характеру изменения. Это подтверждает правомочность применения принятого подхода к учету влияния инертных компонентов в горючей смеси на процессы ее воспламенения и сгорания коэффициентом K_1 .

С помощью разработанной модели выполнены расчетные исследования процесса сгорания гомогенной воздушной смеси диметилового эфира

(ДМЭ) при объемном ее самовоспламенении в камере сгорания (КС) постоянного объема при следующих начальных условиях: давление $p = 1,5$ МПа, температура $T = 700$ К. Для исключения влияния количества топлива цикловая подача ДМЭ принималась постоянной, равной $0,053 \cdot 10^{-3}$ кг. Изменение содержания инертных компонентов моделировалось величиной коэффициента остаточных газов $\gamma_{ост}$ в диапазоне от 0 до 0,5.

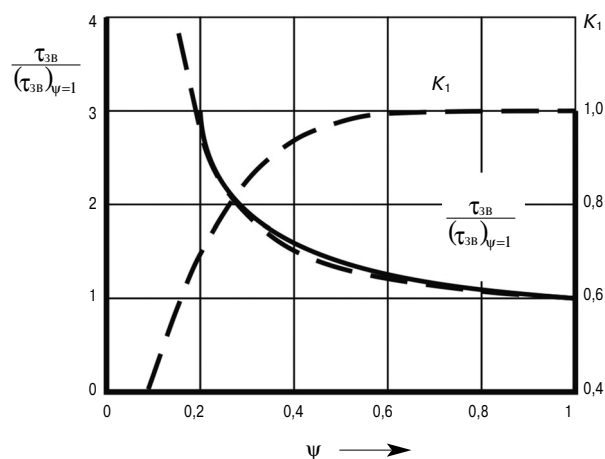


Рис. 1. Зависимость относительной величины периода задержки воспламенения и коэффициента реакционной активности кислорода от массовой доли кислорода в окислителе ψ :

— — — расчет по модели для дизельного топлива; — — — эксперимент [15]

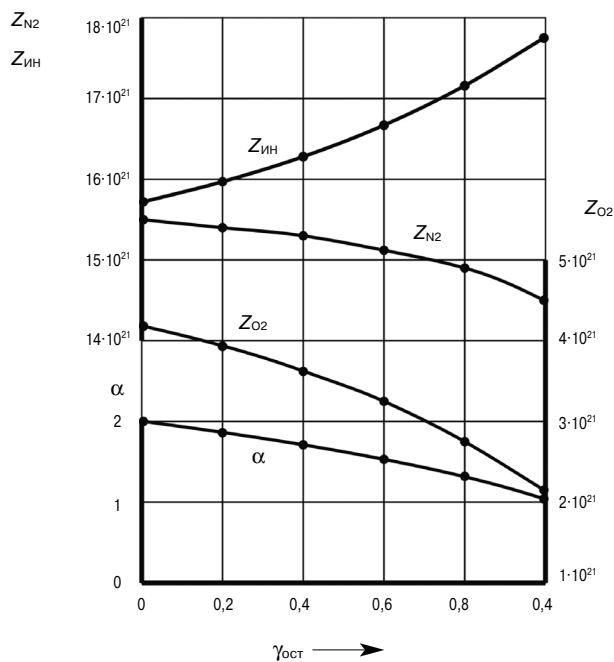


Рис. 2. Влияние коэффициента остаточных газов на начальный состав воздушной смеси ДМЭ в КС постоянного объема при $p = 1,5$ МПа, $T = 700$ К

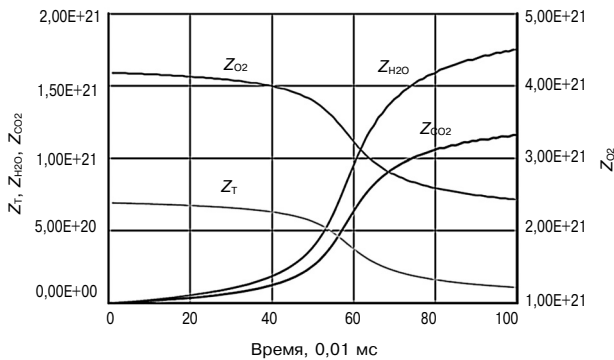


Рис. 3. Изменение в процессе сгорания воздушной смеси ДМЭ количеств молекул топлива Z_T , кислорода Z_{O_2} , воды Z_{H_2O} и диоксида углерода Z_{CO_2} в КС постоянного объема при $\alpha_{\text{в}} = 2,0$; $p = 1,5$ МПа; $T = 700$ К; $\gamma_{\text{ост}} = 0$; $K_1 = \text{var}$ [8]

Изменение начального состава рабочей смеси в зависимости от коэффициента остаточных газов представлено на рис. 2. Здесь видно, что при увеличении $\gamma_{\text{ост}}$ от 0 до 0,5 уменьшается начальное количество молекул кислорода в смеси в 1,94 раза и, соответственно, коэффициент избытка воздуха $\alpha_{\text{в}}$ в пересчете на кислород также снижается в 1,94 раза. Количество молекул инертных компонентов $Z_{\text{ин}}$, включая азот, диоксид углерода и воду, увеличивается на 13 %, азота — уменьшается на 6 %. Причем если при $\gamma_{\text{ост}} = 0$ количество молекул инертных компонентов превышает количество молекул кислорода в 3,76 раза, то при $\gamma_{\text{ост}} = 0,5$ превышение достигает 8,26 раз.

На рис. 3 приведено расчетное изменение состава воздушной смеси ДМЭ в процессе сгорания при отсутствии остаточных газов [8]. Здесь видно, что количество молекул кислорода за 1 мс уменьшается в $\sim 1,71$ раза. В то же время количество молекул инертных компонентов увеличивается на большую величину частично за счет

диоксида углерода (Z_{CO_2}) и частично за счет воды (Z_{H_2O}). С учетом первоначального количества молекул азота и аргона увеличение составляет 19 %.

По результатам расчетов скорости сгорания, описываемой выражением (1), с учетом влияния инертных составляющих рабочего тела коэффициентом реакционной активности кислорода K_1 , получаемого по выражению (4) и без его учета ($K_1 = 1$), построены графики при различных значениях коэффициента остаточных газов (рис. 4, а). В случае исключения влияния инертных компонентов на условную продолжительность реакции окисления τ_y ($K_1 = 1$) максимальные значения скорости сгорания и моменты ее достижения изменяются незначительно (пунктирные линии на рис. 4, а). А при одновременном учете влияния реагирующих и инертных компонентов с помощью коэффициента K_1 выявлено существенное замедление процесса сгорания (сплошные линии на рис. 4, а).

В случае отсутствия остаточных газов расчетная максимальная скорость сгорания уменьшилась в 1,59 раза в сравнении с расчетами при $K_1 = 1$, а время ее достижения увеличилось в 1,37 раза. При повышении количества остаточных газов отличия в величине и времени достижения максимальной скорости сгорания становятся еще больше. При $\gamma_{\text{ост}} = 0,3$ и 0,5 максимальная скорость сгорания снижается в 2 и 3,08 раз, а время увеличивается в 1,58 и 2,1 раза соответственно.

Для выяснения причины снижения скорости сгорания согласно выражению (1) проанализированы закономерности изменения количества активных молекул топлива Z_E и условной продолжительности реакции их окисления τ_y , вычисляемые по выражениям (2) и (3). Увеличение содержания остаточных газов в рабочей смеси при $K_1 = 1$ приводит к некоторому уменьшению

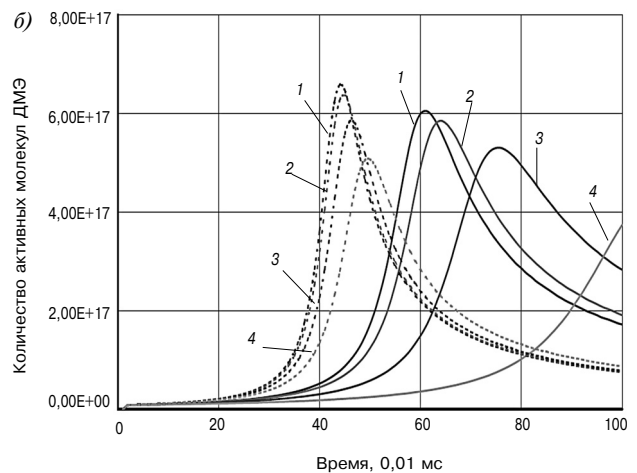
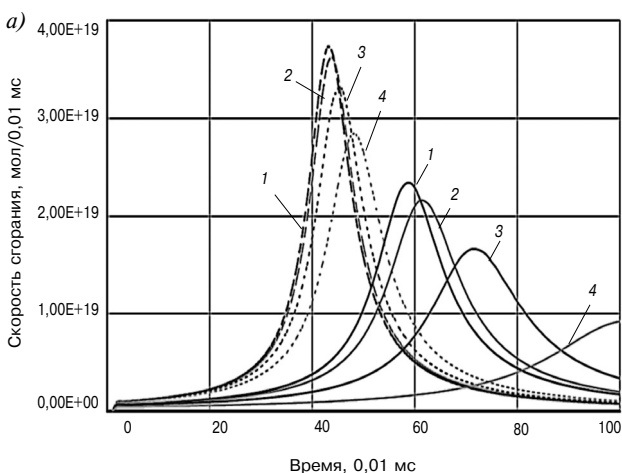


Рис. 4. Результаты расчета сгорания воздушной смеси ДМЭ в КС постоянного объема:

$p = 1,5$ МПа, $T = 700$ К; а — изменение скорости сгорания ДМЭ; б — изменение количества активных молекул ДМЭ; 1 — $\gamma_{\text{ост}} = 0$; 2 — $\gamma_{\text{ост}} = 0,1$; 3 — $\gamma_{\text{ост}} = 0,3$; 4 — $\gamma_{\text{ост}} = 0,5$; сплошные линии — $K_1 = \text{var}$, пунктирные линии — $K_1 = 1$

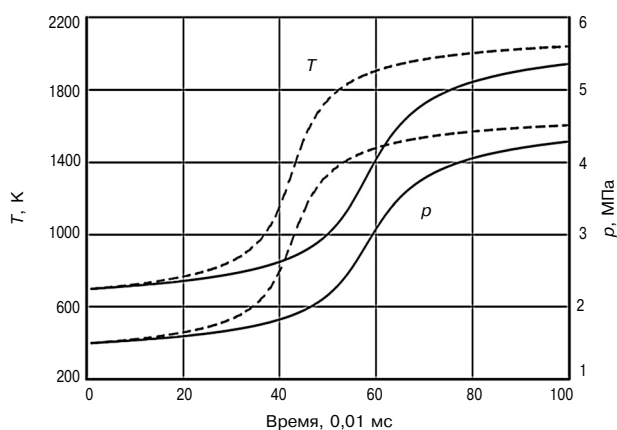


Рис. 5. Изменение давления p и температуры T при сгорании воздушной смеси ДМЭ в КС постоянного объема: $\alpha_{\text{в}} = 2,0$, $p = 1,5$ МПа; $T = 700$ К; $\gamma_{\text{ост}} = 0$; — — $K_1 = \text{var}$; ---- — $K_1 = 1$

текущего количества активных молекул топлива (пунктирные линии на рис. 4, б). Однако при учете влияния инертных компонентов коэффициентом реакционной активности кислорода ($K_1 = \text{var}$) текущее количество активных молекул и особенно момент достижения его максимума изменяются значительно больше (сплошные линии на рис. 4, б). Согласно уравнению (2) в начальной фазе сгорания увеличение количества активных молекул Z_E согласуется с ростом температуры смеси (рис. 5) при $\gamma_{\text{ост}} = 0$. По мере выгорания ДМЭ (уменьшения Z_T) количество его активных молекул снижается, несмотря на продолжающийся рост температуры. Без учета инертных компонентов ($K_1 = 1$) за счет большей интенсивности тепловыделения давление и температура в КС возрастают быстрее и до более высокого уровня (см. рис. 5).

По результатам расчетов построены графики изменения коэффициента реакционной активности кислорода и условной продолжительности окисления активных молекул ДМЭ при различных коэффициентах остаточных газов (рис. 6).

Без учета влияния инертных компонентов ($K_1 = 1$) условная продолжительность окисления активных молекул топлива (пунктирные линии) в период задержки воспламенения на 26 % меньше, чем при учете влияния (сплошные линии) (рис. 6, б). Это приводит к повышению частоты образования и окисления активных молекул топлива, и, соответственно, увеличению скорости сгорания ДМЭ в начальный период продолжительностью 0,4 мс.

Применение коэффициента K_1 позволяет моделировать замедление образования и продолжительности окисления активных молекул топлива в процессе сгорания по мере изменения состава горючей смеси при различных значениях коэффициента остаточных газов. Например, в случае отсутствия остаточных газов ($\gamma_{\text{ост}} = 0$) начальное значение коэффициента реакционной активности кислорода K_1 в течение продолжительности сгорания 1 мс уменьшается в 1,46 раза (рис. 6, а). Это увеличивает условную продолжительность окисления активных молекул топлива (рис. 6, б) и, соответственно, снижает скорость сгорания (рис. 4, а) по сравнению с отсутствием инертных компонентов в 1,32 раза в начале сгорания и в 1,92 раза в конце процесса сгорания (на рис. 6, б окончание сгорания при $K_1 = \text{var}$ не показано).

В результате условная продолжительность реакции окисления активных молекул топлива, определенная с учетом коэффициента K_1 , не

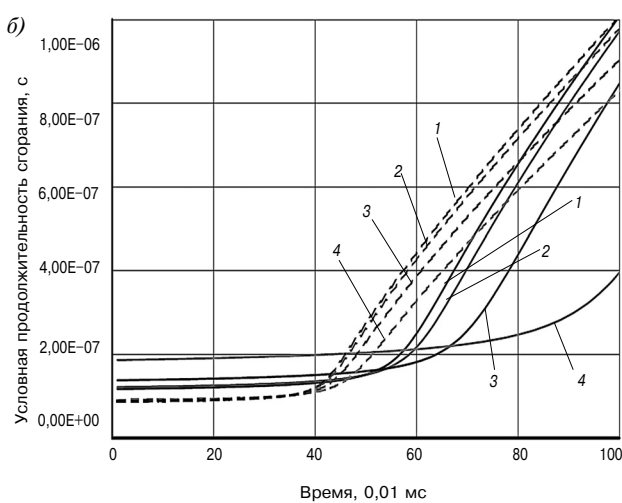
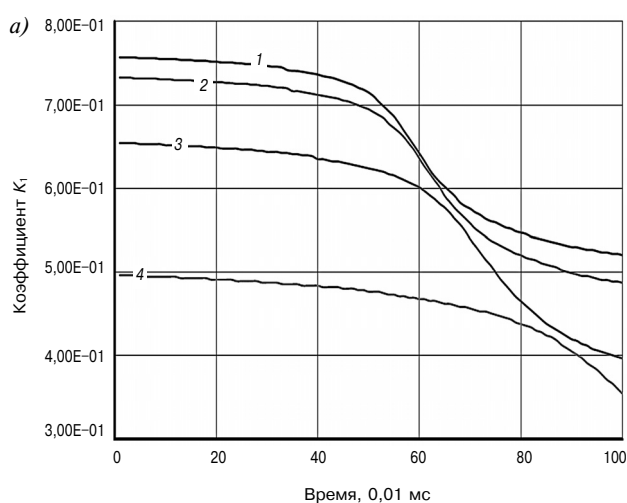


Рис. 6. Результаты расчета сгорания воздушной смеси ДМЭ в КС постоянного объема: $p = 1,5$ МПа, $T = 700$ К; а — изменение коэффициента реакционной активности кислорода K_1 ; б — изменение условной продолжительности окисления активных молекул ДМЭ $\tau_{\text{у}}$: 1 — $\gamma_{\text{ост}} = 0$; 2 — $\gamma_{\text{ост}} = 0,1$; 3 — $\gamma_{\text{ост}} = 0,3$; 4 — $\gamma_{\text{ост}} = 0,5$; — — $K_1 = \text{var}$, ---- — $K_1 = 1$

только больше на 26 % в ПЗВ, но и в процессе сгорания увеличивается быстрее, чем без учета инертных компонентов (рис. 6, б). При максимальном исследованном коэффициенте остаточных газов 0,5 коэффициент реакционной активности кислорода K_1 уменьшается от начального значения 0,496 до менее 0,1, то есть более чем в 5 раз (на рис. 6, а окончание сгорания не показано). Это приводит к значительному затормаживанию процесса сгорания, несмотря на обогащение смеси до $\alpha_v = 1,03$ (см. рис. 2).

После достижения максимального значения скорость сгорания снижается (рис. 4, а), как в случае учета влияния инертных компонентов коэффициентом K_1 ($K_1 = \text{var}$ на рис. 6, а), так и без его учета ($K_1 = 1$). Это происходит вследствие увеличения условной продолжительности реакции окисления активных молекул топлива τ_r (рис. 6, б) и снижения количества активных молекул ДМЭ (рис. 4, б), несмотря на продолжающийся рост температуры (рис. 5, б).

Таким образом, введение коэффициента реакционной активности кислорода K_1 в выражение для определения условной продолжительности реакции окисления активных молекул топлива τ_r позволило моделировать изменение количества активных соударений молекул реагирующих веществ (в единицу времени в единице объема), вызванное увеличением количества инертных молекул, образующихся в процессе сгорания. В результате расчетный процесс сгорания при учете влияния инертных компонентов стал более «мягким» и протяженным во времени. Например, при $\gamma_{\text{ост}} = 0$ расчетный максимум скорости сгорания уменьшился в $\sim 1,6$ раза и сместился по времени на $\sim 37\%$.

Обобщенные результаты влияния коэффициента остаточных газов на показатели процесса сгорания гомогенной воздушной смеси ДМЭ в КС постоянного объема приведены на рис. 7. Здесь видно, что с увеличением коэффициента остаточных газов $\gamma_{\text{ост}}$ максимальные значения скорости сгорания, количества активных молекул топлива, а также давления и температуры в КС уменьшаются, а временные параметры, наоборот, увеличиваются. Учет влияния инертных компонентов коэффициентом реакционной активности кислорода K_1 сделал зависимость этих параметров от содержания остаточных газов в горючей смеси более выраженной, что согласуется с известными данными об их влиянии на процессы воспламенения и сгорания [15].

На основании выполненных расчетных исследований сгорания ДМЭ в КС постоянного объема можно сделать следующие выводы.

1. Применение коэффициента реакционной активности кислорода K_1 позволяет моделировать

замедление образования и продолжительности окисления активных молекул топлива при балластировке окислителя азотом, а также в процессе сгорания по мере изменения состава горючей смеси при различных коэффициентах остаточных газов.

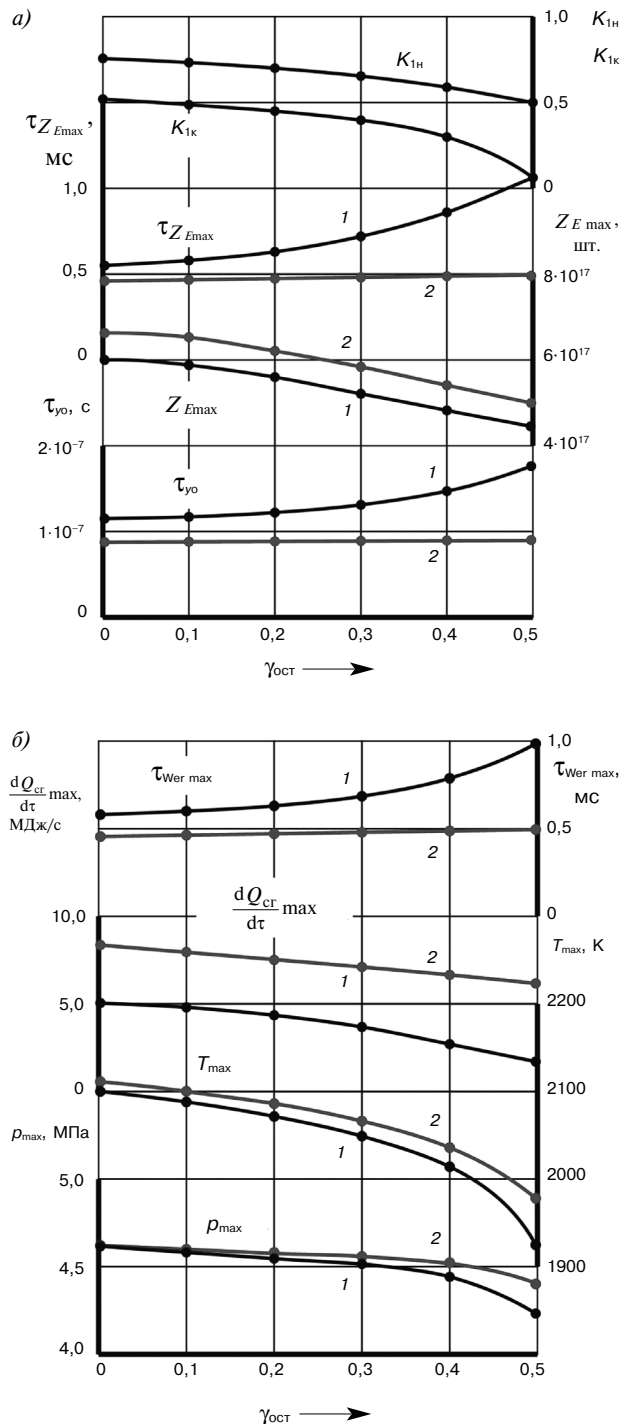


Рис. 7. Влияние коэффициента остаточных газов $\alpha_{\text{ост}}$ на составляющие скорости сгорания (а) и показатели процесса сгорания (б):

1 — $K_1 = \text{var}$ (рис. 6, а); 2 — $K_1 = 1$; начальный состав смеси соответствует рис. 2

2. В процессе сгорания смеси при $\alpha_v = 2,0$ и $\gamma_{\text{ост}} = 0$ коэффициент реакционной активности кислорода снижается от начального значения 0,757, определяемого наличием азота воздуха, до 0,52 (в 1,46 раза) в конце процесса за счет образования продуктов сгорания. Это приводит к уменьшению расчетной скорости сгорания только под действием инертных компонентов в начальный период в 1,32 раза, а в конце сгорания в 1,92 раза.

3. Увеличение содержания инертных компонентов в горючей смеси при повышении коэффициента остаточных газов от 0 до 0,5 приводит к снижению начальной реакционной активности кислорода в 1,53 раза. Одновременное снижение α_v (от 2,0 до 1,03) приводит к уменьшению начального количества молекул кислорода в 1,94 раза. В процессе сгорания количество кислорода и коэффициент его реакционной активности уменьшаются в несколько раз. В результате чего максимальная скорость тепловыделения снижается в 2,53 раза, а время ее достижения увеличивается в 1,71 раза.

4. Разработанная математическая модель влияния инертных компонентов топливно-воздушной смеси на процесс ее сгорания полнее отражает физику этого процесса, что позволяет точнее моделировать его динамику и рабочий цикл НССИ двигателей и исследовать возможные способы их улучшения.

Литература

1. Гусаков С.В., Махмуд Мохамед Эль Гобаши Эль Хагар. Опыт моделирования рабочего процесса ДВС с воспламенением гомогенного заряда от сжатия // Вестник Российского университета дружбы народов. — 2004. — № 2. — С. 25–28. (Сер.: «Инженерные исследования»).

2. Злотин Г.Н., Федянов Е.А., Иткис Е.М., Кузьмин В.Н. Математическое моделирование индикаторного процесса в двигателе с самовоспламенением от сжатия гомогенной метановоздушной смеси / Г.Н. Злотин, // Сборник научных трудов по материалам Международной конференции Двигатель-2007, посвященной 100-летию школы двигателестроения

МГТУ им. Н.Э. Баумана. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, — 2007. — С. 57–61.

3. Chen Z., Konno M., Oguma M., Yanai T. Experimental Study of CI Natural-Gas / DME Homogeneous Charge Engine // SAE Paper 2000-01-0329. — 10 p.

4. Kong S.C. A study of natural gas/DME combustion in HCCI engines using CFD with detailed chemical kinetics // Fuel 86. — 2007. — P. 1483–1489.

5. Flowers D., Aceves S., Smith R. et al. HCCI in a CRF Engine: Experiments and Detailed Kinetic Modeling // SAE Paper 2000-01-0328. — 13 p.

6. Камалтдинов В.Г., Абелиович Е.В., Терехов А.С. Моделирование процесса сгорания в двигателях внутреннего сгорания с воспламенением гомогенного заряда от сжатия // Вестник ЮУрГУ. — 2007. — Вып. 10 — № 25(97). — С. 44–47. (Сер.: «Машиностроение»).

7. Камалтдинов В.Г. Новая модель процесса горения топлива в ДВС // Двигателестроение. — 2008. — № 3 (233). — С. 17–20.

8. Kamaltdinov V. Combustion process modeling in HC-CI engine // SAE Paper 2011-01-1789. — 10 p.

9. Камалтдинов В.Г., Абелиович Е.В. Влияние состава двухкомпонентного топлива на процесс сгорания в двигателе с объемным самовоспламенением от сжатия // Вестник ЮУрГУ. — 2008. — Вып. 12 — № 23 (123). — С. 46–53. (Сер.: «Машиностроение»).

10. Камалтдинов В.Г., Никифоров С.С. Управление рабочим процессом в HCCI двигателе // Двигателестроение. — 2010. — № 3 (241). — С. 3–9.

11. Камалтдинов В.Г., Марков В.А. Расчетное исследование процесса сгорания и показателей рабочего цикла HCCI двигателя, работающего на смеси природного газа и диметилового эфира // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. — 2010. — № 6 (54). — С. 8–15.

12. Камалтдинов В.Г., Марков В.А. Влияние температуры огневой поверхности цилиндра на процесс сгорания и показатели рабочего цикла HCCI двигателя // Грузовик. — 2010. — № 12. — С. 38–47.

13. Камалтдинов В.Г., Марков В.А. Влияние параметров свежего заряда на показатели рабочего цикла HCCI двигателя с наддувом // Известия вузов. — 2011. — № 6. — С. 31–37. (Сер.: «Машиностроение»).

14. Камалтдинов В.Г., Марков В.А. Геометрическая степень сжатия, угол закрытия впускных клапанов и показатели рабочего цикла HCCI // Автомобильная промышленность. — 2011. — № 9. — С. 10–14.

15. Дубовкин Н.Ф. Справочник по теплофизическим свойствам углеводородных топлив и их продуктам сгорания. — М.—Л.: Госэнергоиздат, — 1962. — 288 с.

ПРЕДЛАГАЕМ РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ Ориентировочные тарифы на 1 полугодие 2012 г.

Первая страница обложки	Полноцветная	40 000 руб.
Вторая и третья страницы обложки	Полноцветная	36 000 руб.
Четвертая страница обложки	Полноцветная	38 000 руб.
Внутри журнала из расчета одна страница формата А4	Полноцветная	36 000 руб.
	Черно-белая	30 000 руб.