

УДК 534.222.2 + 536.46 + 661.215.1

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДВУХ- И ТРЕХТОПЛИВНЫХ ГОРЮЧИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МЕТАНА, УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ И ВОДОРОДА

А. А. Васильев^{1,2}, В. А. Васильев¹¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, gasdet@hydro.nsc.ru²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Представлены данные о параметрах взрыва и детонации двух- и трехтопливных смесей метана, угольной пыли и водорода (с кислородом и воздухом) при варьировании соотношения между топливными компонентами. Новизна числового и графического массивов определяется неизвестными ранее данными о критической энергии инициирования детонации, характерном размере детонационных ячеек, скорости детонации и энерговыделении в детонационных волнах. Проанализированы не только стехиометрические двух- и трехтопливные системы, но и обогащенные и обедненные системы на основе исследуемых топливных компонентов.

Ключевые слова: многотопливные системы, инициирование, критическая энергия, шахтные взрывы, детонационные ячейки, бифуркационные структуры, обедненные и обогащенные смеси, взрывоопасность, экология, снижение «углеродного следа».

DOI 10.15372/FGV20230304

ВВЕДЕНИЕ

Управление химическими реакциями — глобальная задача химической кинетики не только с точки зрения научного знания, но и для практического применения, например при разработке нового поколения импульсных детонационных двигателей, работающих в режиме высокочастотного инициирования горючей смеси. Как правило, в каждом конкретном случае эта задача решается путем добавления в систему дополнительных веществ (ингибиторов или промоторов), которые способны повлиять на традиционный ход химической реакции. В настоящее время идея эффективных добавок приобрела большой интерес и с экологической точки зрения: для снижения вредных примесей в продуктах, для уменьшения углеродного следа и перехода на водородную энергетику, для ослабления воздействия продуктов реакции на человека и окружающую среду, в вопросах экономической эффективности добавок и т. д. С энергетической точки зрения роль добавок важна при работе на обедненных составах горючих смесей (экономия горючего, снижение тепловой нагрузки на двигатель и

т. д.). В плане безопасности важное значение имеют добавки, предотвращающие несанкционированное развитие аварийной ситуации, например антидетонационные добавки к бензину и керосину различных марок для автомобильного и авиационного транспорта. Особого внимания требуют проблемы взрывобезопасности на АЭС (водородная безопасность), заводах по сжижению природного газа (СПГ), трубопроводах, газозаправочных станциях и газохранилищах, при использовании горючих газов в производстве, на транспорте и в быту (помещения с газовыми плитами), при возгорании метана в угольных шахтах и т. д.

Смесевые многотопливные системы — это газовые и гетерогенные смеси, в состав которых входят два или более индивидуальных топливных компонента. Хорошо известными многокомпонентными топливами являются бензин, керосин, дизельное топливо, в составе которых содержится множество индивидуальных углеводородов. В двухтопливных смесях обнаружен новый класс двухразмерных (бифуркационных) структур детонационных ячеек (например, [1]).

Для горючих многотопливных систем сразу же возникают нетривиальные вопросы: как выражаются кинетические параметры для таких систем через параметры кинетики для индивидуальных топливных компонентов и как они меняются при изменении соотношения между топливами?

Работа выполнена в рамках проекта «Фундаментальные исследования процессов горения и детонации применительно к развитию основ энерготехнологий» Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение от 29.09.2020 № 075-15-2020-806).

© Васильев А. А., Васильев В. А., 2023.

Исследования кинетических аспектов инициирования детонационных процессов в многотопливных системах начаты на рубеже столетий и включены в Программу фундаментальных исследований государственных академий наук РФ на 2020–2030 гг. Часть результатов этих исследований опубликована в отечественной и зарубежной печати. В данной статье, кроме упоминания об уже опубликованных результатах, приведены новые данные о системах метан — угольная пыль и метан — угольная пыль — водород.

Такие важные характеристики горючих систем, как энергия надежного воспламенения смеси на крейсерских и форсажных режимах работы двигателей или на режимах розжига и эксплуатации энергетических горелок, безопасная работа в шахтах, опасных по содержанию газов и пыли, и т. д., определяются не только энергией инициатора при тепловом механизме воспламенения, но и кинетическими параметрами смеси. Чрезвычайно важным является четкое представление о протекающих физических процессах при горении, взрывах и детонации, а также корректное моделирование течений с химическими реакциями. К настоящему времени специалистами по химической кинетике разработаны детальные схемы превращения исходных компонентов в продукты реакции, состоящие из нескольких тысяч элементарных реакций (пример — тяжелые углеводороды) для промежуточных атомов, молекул и радикалов. А возрастающая производительность современной вычислительной техники, дополненная алгоритмами решения огромных систем нелинейных уравнений химической кинетики, в принципе позволяет рассчитать динамику химической реакции (при некоторых дополнительных идеализациях расчетных алгоритмов).

Но даже для процесса дозвукового горения в эту схему до сих пор вносятся новые дополнительные реакции, поскольку расчеты далеко не всегда согласуются с имеющимися экспериментальными данными (например, по количеству какого-то конечного компонента). Что касается расчета сверхзвуковой детонации, то простое использование такой схемы с кинетическими коэффициентами, определенными для элементарных реакций процесса горения, дает, как правило, результаты, заметно отличающиеся от экспериментальных данных. Это наглядно продемонстрировано в [2] на примере постепен-

ного разбавления топливно-кислородных смесей азотом и переходом к топливно-воздушным смесям. Для большинства исследованных однотопливных систем наблюдается увеличение расхождения экспериментальных и расчетных величин по мере роста концентрации азота. Возможная причина такого расхождения — использование кинетических коэффициентов, определенных из экспериментов по горению и экстраполированных на детонационные условия.

Проблема априорного определения кинетических коэффициентов для условий детонации до сих пор не решена, и на сегодняшний день приходится говорить лишь о качественном (уменьшение, постоянство, увеличение) соотношении расчетных и экспериментальных значений детонационных параметров, количественно они заметно расходятся. Такое состояние обусловлено в том числе трудностями экспериментального определения кинетических параметров детонации в силу того, что структура детонационного течения для промежуточных атомов, молекул и радикалов сильно отличается от классических модельных представлений (одномерные модели Михельсона — Чепмена — Жуге и Гриба — Зельдовича — Неймана — Дёринга с гладкими фронтами) из-за своей сильной локальной неоднородности и нестационарности.

Поэтому наряду с детальными схемами кинетики, требующими многосуточных расчетов на суперкомпьютерах, продолжают разрабатываться упрощенные схемы интегрального (осредненного) превращения исходной смеси в продукты. Из учебников по кинетике (например, [3–7]) хорошо известно простейшее уравнение Аррениуса для скорости химической реакции W в смеси $n_A A + n_B B + \dots + n_G G + \dots$ как функции, пропорциональной произведению концентраций реагирующих веществ

$$W(T, c) = \frac{dc}{dt} = k(T)F(c) > 0,$$

$$F(c) = c_A^{n_A} c_B^{n_B} \dots c_G^{n_G} \dots$$

с температурной зависимостью константы скорости реакции

$$k(T) = k_0 \exp(-E_a/RT).$$

Используемый в литературе термин «константа» для $k(T)$ оказался неудачным, поскольку и k_0 зависит от температуры: $k_0 = \varphi(T)$!

В задачах взрыва и детонации (например, для «обобщенной» реагирующей системы $A \rightarrow B$, модель осредненной кинетики) вместо скорости химической реакции W (размерность $[c^{-1}]$) чаще всего используется характерная задержка воспламенения смеси $\tau = 1/W$ (или характерный индукционный период τ [с]), которая для «обобщенной» реакции однотопливной смеси представляется формулой

$$\tau = \frac{A \exp(E_a/RT)}{[f]^{n_1} [o]^{n_2} [in]^{n_3}}, \quad (1)$$

где E_a — энергия активации «лимитирующей» реакции индукционного периода; R — универсальная газовая постоянная; T — температура смеси в зоне индукции; в квадратных скобках — концентрации компонентов однотопливной смеси: f — топливо, o — окислитель, in — инертная добавка; A и n_i — численные коэффициенты.

В данной статье продолжено обсуждение кинетических аспектов применительно к процессам взрыва и детонации многотопливных систем. Представлены новые данные для ряда двухтопливных систем, а также обсуждены эти вопросы применительно к трехтопливным смесям. В качестве индивидуальных топливных компонентов рассмотрены газообразные метан и водород, а также твердофазный углерод C_c .

В [8, 9] при анализе двухтопливных смесей было отмечено, что традиционные попытки описания задержек воспламенения путем включения концентраций обоих топливных компонентов исходной смеси в формулу типа (1), например, в следующем виде:

$$\tau = \frac{A \exp(E_a/RT)}{[f_1]^{n_1} [f_2]^{n_2} [o]^{n_3} [in]^{n_4}}, \quad (2)$$

наталкиваются на новую неприятную расчетную особенность: величина τ формально стремится к бесконечности (а не к конечной величине) при $[f_2] \rightarrow 0$ и $[f_1] \rightarrow 0$ (переход к обычной однотопливной системе). Более того, неясным является выбор коэффициентов A и E двухтопливной системы и их взаимосвязь с аналогичными величинами для индивидуальных топливных компонентов. При модернизации формулы (1) для двухтопливных систем в [10] и [8, 9] в качестве базового был выбран принцип оптимального осреднения числовых множеств за счет использования среднегеометрического значения $\hat{\chi}_{12} = \sqrt{\chi_1 \chi_2}$ из рассматриваемых величин. Например, для двухкомпо-

нентного топлива $n_{f_1} f_1 + n_{f_2} f_2$ аппроксимационная формула для задержки воспламенения двухтопливной горючей смеси определялась через молярные концентрации индивидуальных топливных компонентов $\zeta = n_{f_1}/(n_{f_1} + n_{f_2})$ в виде

$$\tau = \tau_{f_1}^\zeta \tau_{f_2}^{(1-\zeta)}. \quad (3)$$

Такая формула обеспечивает на границах $\zeta = 0$ и $\zeta = 1$ асимптотическое совпадение величин A и E двухтопливной системы с индивидуальным для каждого топлива набором этих коэффициентов. В области $0 < \zeta < 1$ такого вида формула обеспечивает переменность коэффициентов A и E двухтопливной системы при различных соотношениях ζ индивидуальных топлив между собой. Формула (3) — своеобразное «среднее геометрическое», привязанное к значениям на границах.

Для модернизации (1) и (2) в [9] была предложена следующая формула:

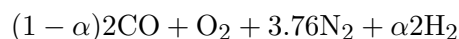
$$\tau = \frac{A \exp(E_a/RT)}{[f_1 + f_2]^{n_i} [o]^{n_3} [in]^{n_4}}. \quad (4)$$

Формула (4) не имеет математических особенностей при стремлении концентраций индивидуальных топлив к нулю.

1. КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТОНАЦИИ ДВУХТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ

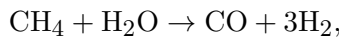
1.1. Системы на основе оксида углерода и водорода

Представление задержки воспламенения двухтопливной системы в виде «среднего геометрического» задержек воспламенения индивидуальных топлив позволяет проанализировать детонационные характеристики наиболее интересных горючих систем и получить данные о таких важнейших параметрах детонации, как размер детонационной ячейки и критическая энергия инициирования. На первом этапе предлагаемый способ описания кинетики периода индукции проанализирован на двухтопливных системах, представляющих собой смесь оксида углерода с воздухом, в которую в качестве второго топлива добавляется водород H_2 , ацетилен C_2H_2 , этилен C_2H_4 или гексан C_6H_{14} . Установлено, например, для двухтопливной смеси

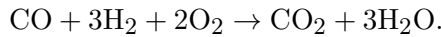


стехиометрического состава, что, несмотря на качественное уменьшение расчетных и экспериментальных величин детонационных ячеек a при увеличении концентрации добавляемого водорода, экспериментальные величины a количественно оказываются заметно меньшими, особенно в области малых концентраций водорода (малые значения α) [11, 9].

Смесь топливных компонентов CO и H₂, получаемых при паровой конверсии метана



известна как синтез-газ и является примером двухтопливной системы. При добавлении к такому синтез-газу кислорода систему можно сделать стехиометрической взрывчатой смесью с классическими продуктами реакции — углекислым газом и водой:



Эту же смесь можно представить как двухтопливную суперпозицию стехиометрических составов для индивидуальных топливных компонентов:

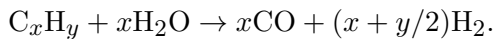
$$\alpha(2\text{CO} + \text{O}_2) + (1 - \alpha)(2\text{H}_2 + \text{O}_2).$$

Для этой системы из двух стехиометрических смесей (указанных в скобках) соотношение горючее/окислитель

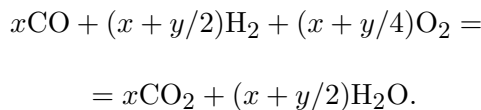
$$\varphi = \frac{2\alpha + 2(1 - \alpha)}{\alpha + (1 - \alpha)} = 2$$

не зависит от α и совпадает с $\varphi_{st} = 2$ для каждой из них.

Паровая конверсия произвольного углеводорода (например, авиационного керосина) идет по уравнению



При добавлении кислорода смесь становится стехиометрической согласно уравнению



Для этой смеси соотношение горючее/окислитель

$$\varphi = \frac{x + x + y/2}{x + y/4} = 2,$$

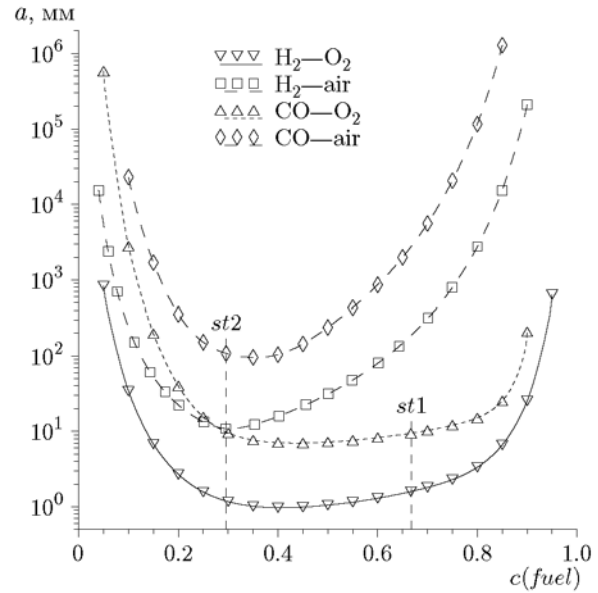


Рис. 1. Размер детонационной ячейки в зависимости от молярной концентрации топливного компонента (водород или оксид углерода) в смесях с кислородом или воздухом:

штриховые вертикальные линии $st1$ и $st2$ соответствуют стехиометрическому соотношению топлива/окислитель в кислородных и воздушных смесях

т. е. сохраняется как для классического синтез-газа из метана.

Подробно вопрос о газодинамических параметрах детонации двухтопливной системы синтез-газа как композиции из CO и H₂ проанализирован в [12]. На рис. 1 дополнительно к сведениям, опубликованным в [12], приведены данные о детонационных ячейках смесей этих индивидуальных компонентов с кислородом и воздухом. Отметим, что аналогичные зависимости критической энергии инициирования детонации E_3 этих же смесей качественно похожи на зависимости размера ячеек a . На рис. 2 дополнительно к [12] представлены зависимости критической энергии инициирования детонации двухтопливных систем из CO и H₂ в смеси с кислородом при двух типичных условиях: 1) смешиваются две стехиометрические смеси индивидуальных топлив $\alpha(2\text{CO} + \text{O}_2) + (1 - \alpha)(2\text{H}_2 + \text{O}_2)$ с изменяющимся соотношением между ними ($0 \leq \alpha \leq 1$); 2) различное количество водорода добавляется к стехиометрической смеси оксида углерода с кислородом $(2\text{CO} + \text{O}_2) + \beta 2\text{H}_2$.

Если в первом варианте критическая энергия инициирования E_3 монотонно уменьшает-

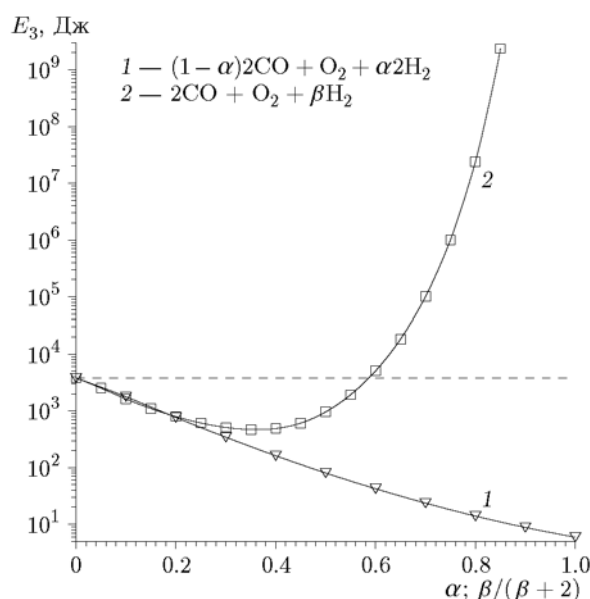


Рис. 2. Критическая энергия иницирования сферической детонации при смешении стехиометрических смесей $\text{CO}-\text{O}_2$ и H_2-O_2 в горючую систему при различном соотношении между смесями ($0 \leq \alpha \leq 1$, линия 1) и при добавлении к стехиометрической смеси $\text{CO}-\text{O}_2$ только водорода (линия 2, с экстремумом) в зависимости от доли β водорода в топливе

ся с увеличением α от значений, типичных для смеси $2\text{CO} + \text{O}_2$, до величин, типичных для водородно-кислородной смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, то во втором случае характер изменения E_3 заметно иной. При небольших добавках водорода β значения E_3 снижаются, но затем E_3 проходит через минимум и начинает заметно возрастать. Это обусловлено тем, что при добавлении H_2 в систему возрастает дефицит кислорода, т. е. двухтопливная система становится переобогащенной топливными компонентами. В свою очередь, хорошо известно, что при уходе от стехиометрии к концентрационным пределам (нижнему или верхнему) критическая энергия иницирования (а также размер детонационной ячейки) заметно возрастает (по типичной U-образной зависимости). Подобное поведение хорошо видно, например, на рис. 1, где вертикальными штриховыми линиями с индексами $st1$ и $st2$ отмечены стехиометрические концентрации индивидуальных топлив в топливно-кислородных и топливно-воздушных смесях соответственно. Для представленного на рис. 2 поведения E_3 в случае второго варианта (линия 2) минимум E_3 для данной двухтопливной системы наблюдается при $\alpha \approx 1/3$, когда со-

отношение CO/H_2 примерно равно 2/1. Проведенные расчеты подтвердили экспериментальный факт о промотирующей роли малых добавок водорода на иницирование смеси $\text{CO}-\text{O}_2$, заключающейся в снижении критической энергии иницирования по сравнению со смесью без H_2 .

Вышесказанное — один из примеров использования водородосодержащих и даже инертных соединений (в данном случае — водяного пара) для трансформации трудноиницируемых индивидуальных топлив (CH_4 , CO , углеводороды) в более сложные, но более активные многотопливные смеси.

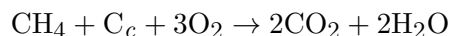
1.2. Системы на основе метана и углерода

Интересным и важным примером двухтопливной системы является смесь метана CH_4 и углерода C_c (твердофазная угольная пыль), типичная для шахтных условий.

Среди горючих газов метан занимает особое положение: он является основным компонентом месторождений природного и попутного газов, его запасы в метаногидратных залежах на дне морей и в зоне вечной мерзлоты намного превышают разведанные запасы газовых и газонефтяных месторождений. Среди предельных углеводородов $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ метан обладает максимально плотной упаковкой атомов (тетраэдрическая структура) и минимальной реакционной способностью.

Несмотря на низкую реакционную способность метана его огромные запасы уже давно поставили задачу его вовлечения в промышленное производство, в том числе с помощью промотирования его активности.

Метан CH_4 и углерод C_c (твердофазная угольная пыль) в смеси с кислородом образуют двухтопливную систему



со стехиометрическим соотношением

$$\varphi_{st} = (1 + 1)/3 = 0.667.$$

Эту смесь можно представить как двухтопливную суперпозицию стехиометрических составов: $\alpha(\text{CH}_4 + 2\text{O}_2) + (1 - \alpha)(\text{C}_c + \text{O}_2)$. Для такой системы из двух стехиометрических смесей (указанных в скобках) соотношение горючее/окислитель

$$\varphi = \frac{\alpha + (1 - \alpha)}{2\alpha + (1 - \alpha)} = \frac{1}{1 + \alpha}$$

не является постоянной величиной при изменении α и совпадает с индивидуальными значениями $\varphi_{st}(\text{CH}_4) = 1/2 = 0.5$ и $\varphi_{st}(\text{C}_c) = 1/1 = 1$ для каждой из них только при граничных значениях $\alpha = 0$ и $\alpha = 1$ соответственно.

Следует обратить внимание на то, что метан в исходном состоянии является газом, но в процессе реакции и превращения его в СО и СО₂ метановый углерод должен предварительно «потерять» атомы водорода Н, потому в системе какое-то время может находиться не только твердофазный углерод от угля, но и газообразный углерод от метана. В [13, 14] представлены расчетные и экспериментальные данные об основных газодинамических параметрах горения, взрыва и детонации (давление, температура, концентрация, соотношение между топливными компонентами) двухтопливной системы метана CH₄ и углерода C_c в кислородных и воздушных смесях при широкой вариации исходных параметров системы. Там же представлены дополнительные данные для стехиометрических смесей углерод/кислород и углерод/воздух, когда углерод одновременно находится в двух вышеуказанных состояниях при меняющихся соотношениях между углеродными фазами $\eta C_g + (1 - \eta)C_c + \text{O}_2(+3.76\text{N}_2)$ (индекс для газа g) и конденсированной (c). Данные представлены в зависимости от молярной концентрации конденсированной фазы углерода: $c = (1 - \eta)/2$ для кислородной смеси и $c = (1 - \eta)/5.76$ для воздушной; $c = 0$ ($\eta = 1$) соответствует газовой фазе углерода, $c = 1$ ($\eta = 0$) — твердофазному углероду. Скорость распространения детонационной волны в смесях твердофазного углерода, давление и температура продуктов существенно ниже по сравнению с газофазным углеродом за счет дополнительных потерь энергии на фазовый переход (при возгонке из твердого состояния в газообразное).

Отметим, что представленные в [13, 14] газодинамические параметры получены в рамках химической термодинамики с условием химического равновесия продуктов детонации и для их расчета не требуется знания кинетических констант. Кинетические данные необходимы для расчета размера детонационной ячейки a и пропорциональных этому размеру параметров, в первую очередь — критической энергии инициирования детонации E_ν , например сферической E_3 . Следует особо подчеркнуть, что в специализированной литературе

по угольной тематике кинетические параметры, описывающие воспламенение угольной пыли, имеют весьма большой разброс, например, энергия активации E_a в формуле Аррениуса для различных марок угля составляет от 75 до 167 кДж/моль (примерно $18 \div 40$ ккал/моль, двукратный разброс). Энергия активации для антрацита 140 кДж/моль примерно совпадает с аналогичной величиной для метана $E_a = 33\,200$ кал/моль. Потому в [13, 14] приближенные оценки для угольной пыли как углерода в виде антрацитовой пыли C_c были рассчитаны при кинетических параметрах, типичных для метана.

В данной статье выполнены дополнительные расчеты E_3 и параметров детонации данной двухтопливной системы, в том числе с уточненным значением энергии активации антрацита $E_a = 31\,530$ кал/моль.

В [14] представлены предварительные данные о размере детонационных ячеек a и критической энергии инициирования сферической детонации E_3 в случае, когда две стехиометрические смеси метана и угольной пыли с кислородом (и метана и угольной пыли с воздухом) объединяются в единую двухтопливную систему $\beta(\text{CH}_4 + 2\text{O}_2) + (1 - \beta)(\text{C}_c + \text{O}_2)$ или $\beta(\text{CH}_4 + 2\text{air}) + (1 - \beta)(\text{C}_c + \text{air})$. При изменении соотношения между стехиометрическими смесями ($0 \leq \beta \leq 1$) размеры детонационных ячеек объединенной двухтопливной смеси и критической энергии инициирования изменяются в несколько раз, но не больше чем на порядок.

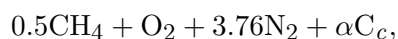
На рис. 3 представлены рассчитанные в данной работе зависимости размера детонационных ячеек a и критической энергии инициирования сферической детонации E_3 в двухтопливной системе метана и угольной пыли в смеси с воздухом от молярной концентрации угольной пыли $c(\text{C})$ для двух вариантов: линия 1 — смешиваются стехиометрические смеси:



молярная концентрация углерода в смеси

$$c(\text{C}) = \frac{\beta}{5.76\beta + 10.52(1 - \beta)} = \frac{\beta}{10.52 - 4.76\beta};$$

линия 2 — к стехиометрической смеси метана с воздухом добавляется угольная пыль:



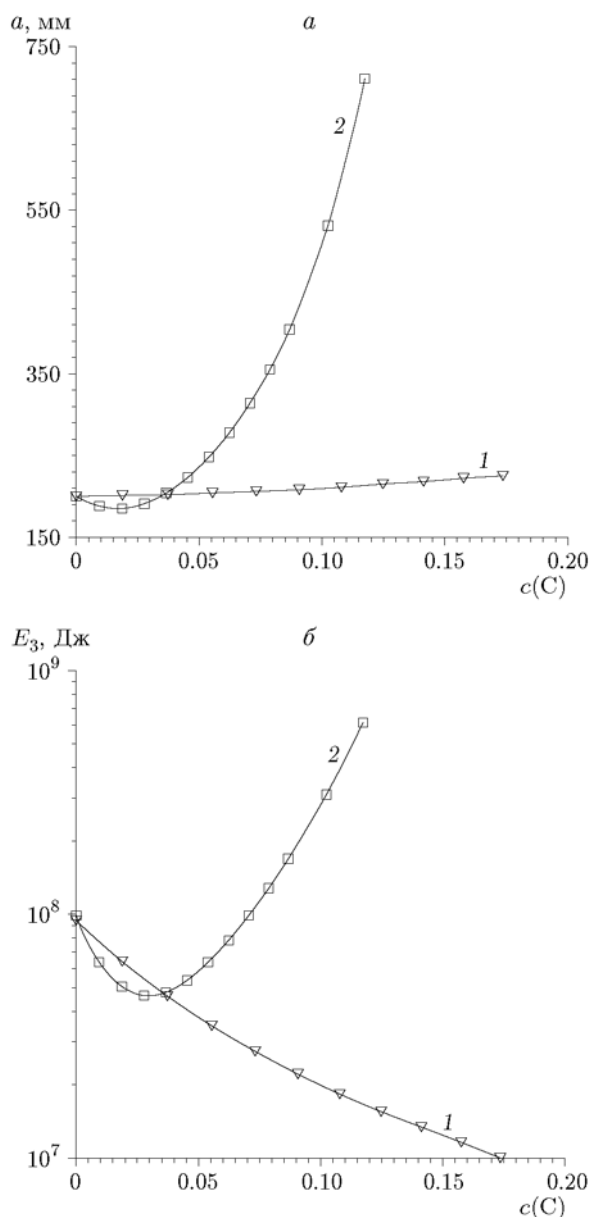


Рис. 3. Размер детонационной ячейки (a) и критическая энергия инициирования сферической детонации (b) в горючей системе из стехиометрических смесей CH_4 —воздух и C_c —воздух при различном соотношении между смесями (линия 1) и при добавлении к стехиометрической смеси CH_4 —воздух только угольной пыли (линия 2 с экстремумом) в зависимости от доли угольной пыли в топливе

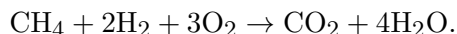
молярная концентрация $c(C) = \alpha/(\alpha + 5.26)$. В первом варианте размер ячеек для стехиометрических однопаливных смесей метана и углерода с воздухом меняется незначительно при изменении β ($0 \leq \beta \leq 1$, $0 \leq c(C) \leq 0.174$ (последняя точка линии 1, $a \approx 200$ мм), а во

втором варианте зависимость $a(c)$ характеризуется профилем с минимумом и последующим заметным увеличением a .

Аналогичные закономерности наблюдаются и для критической энергии инициирования E_3 , причем минимумы a и E_3 сдвинуты друг относительно друга. Точки на линии 2 при $c(C) > 0.13$ не приведены на рис. 3, б, так как из-за сильного сжатия графика по вертикальной оси они выходят за границы поля рисунка ($E_3 \approx 3 \cdot 10^{13}$ Дж при $c(C) = 0.35$). Важным является не изменение E_3 , а само значение E_3 — на уровне 23 кг инициирующего заряда ВВ для стехиометрической метановоздушной смеси и на уровне 2.4 кг для стехиометрической угольно-воздушной смеси. К последнему значению 2.4 кг ВВ следует относиться лишь как к оценочной величине, поскольку реальная система угольная пыль — воздух является гетерогенной и процесс ее химического реагирования существенно отличается от гомогенных газовых систем. Тем не менее приводимые завышенные значения E_3 однозначно свидетельствуют о том, что в шахтах, где присутствуют только метан и угольная пыль (без каких бы то ни было дополнительных углеводородов), реальная аварийная ситуация всегда развивается из низкоскоростного горения с последующим ускорением фронта пламени и усилением волны. Приведенные данные демонстрируют, что как смеси индивидуальных топлив метан и угольная пыль с кислородом или воздухом, так и их двухтопливная композиция являются трудноиницируемыми детонационными системами.

1.3. Системы на основе метана и водорода

Метан может образовывать двухтопливные системы с водородом: стехиометрические реакции



Метановодородная система представляется в виде стехиометрических смесей

$$\alpha(\text{CH}_4 + 2\text{O}_2) + (1 - \alpha)(2\text{H}_2 + \text{O}_2),$$

для такой системы

$$\varphi = \frac{\alpha + 2(1 - \alpha)}{2\alpha + (1 - \alpha)} = \frac{2 - \alpha}{1 + \alpha}$$

не является постоянной величиной при изменении α и не совпадает с $\varphi_{st}(\text{CH}_4) = 1/2 = 0.5$ и

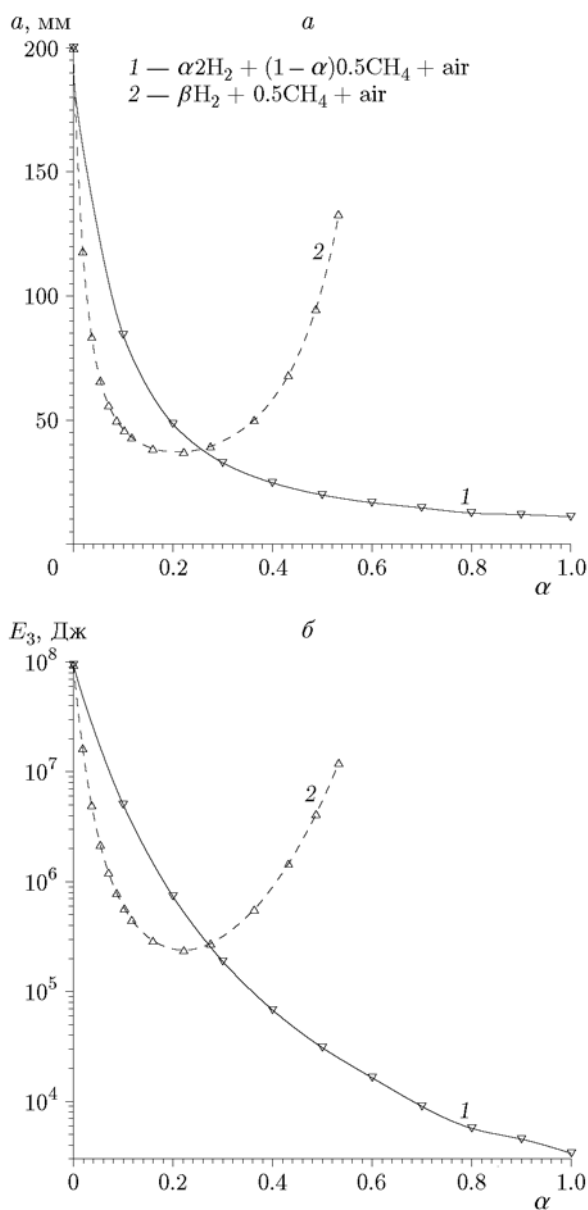


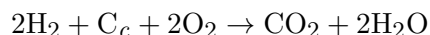
Рис. 4. Размер детонационной ячейки (*a*) и критическая энергия инициирования сферической детонации (*E₃*) в горючей системе из стехиометрических смесей CH_4 —воздух и H_2 —воздух при различном соотношении между смесями (линия 1) и при добавлении к стехиометрической смеси CH_4 —воздух только водорода (линия 2 с экстремумом) в зависимости от доли водорода в топливе

$\varphi_{st}(\text{H}_2) = 2/1 = 2$ для каждой из них. На рис. 4 для примера приведены зависимости размера детонационной ячейки *a* и критической энергии инициирования сферической детонации *E₃* от молярной доли водорода в смеси для случаев, когда смешиваются две стехиометриче-

ские смеси (линия 1) и когда к стехиометрической метановоздушной смеси добавляется чистый водород (линия 2). Следует обратить внимание на то, что при малых значениях α в данной двухтопливной смеси изменение размера ячейки наблюдается практически в четыре раза, а энергия инициирования уменьшается более чем на два порядка. Такое поведение в сравнении с рассмотренными выше двухтопливными системами позволяет сделать вывод о сильном промотирующем влиянии малых добавок водорода на инициирование метана. Поэтому в шахтах, наряду с метановым контролем, необходимо вводить водородный контроль, поскольку именно водород может быть первичным воспламенившимся газом при возникновении аварийной ситуации. Именно водородный очаг пламени может затем воспламенить метановую смесь, а впоследствии метановое пламя воспламенит и угольную пыль. Выполненные расчеты подтверждают вероятность возможного развития подобной аварийной ситуации в шахтных условиях.

1.4. Системы на основе углерода и водорода

Для углеводородной двухтопливной системы ситуация аналогична: эта система



представляется в виде стехиометрических смесей

$$\alpha(\text{C}_c + \text{O}_2) + (1 - \alpha)(2\text{H}_2 + \text{O}_2),$$

для такой системы

$$\varphi = \frac{\alpha + 2(1 - \alpha)}{\alpha + (1 - \alpha)} = 2 - \alpha$$

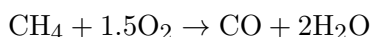
не является постоянной величиной при изменении α и не совпадает с $\varphi_{st}(\text{C}_c) = 1/1 = 1$ и $\varphi_{st}(\text{H}_2) = 2/1 = 2$ для каждой из них.

Качественно зависимости размера ячеек и критической энергии инициирования детонации двухтопливной системы угольная пыль — водород похожи на приведенные на рис. 4 зависимости для системы метан — водород и на рисунке не приводятся.

1.5. Двухтопливные обедненные и обогащенные системы

Наряду со стехиометрическими системами, представляют интерес обогащенные и обедненные составы. На практике для надежности протекания реакции в таких системах рекомендуется использовать составы, достаточно удаленные от концентрационных пределов.

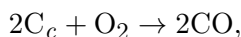
Среди обогащенных составов в качестве базового для оценок разумно выбирать составы, конечным продуктом которых является оксид углерода CO (угарный газ). Тогда для метана обобщенное уравнение реакции сводится к виду



с соотношением горючее/окислитель

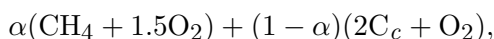
$$\varphi_{upr}(\text{CH}_4) = 1/1.5 = 0.667 > \varphi_{st}(\text{CH}_4) = 0.5,$$

а для углерода —



$$\varphi_{upr}(\text{C}_c) = 2/1 = 2 > \varphi_{st}(\text{C}_c) = 1.$$

Двухтопливная система из обогащенных метаноуглеродных составов описывается уравнением



тогда

$$\varphi = \frac{\alpha + 2(1 - \alpha)}{1.5\alpha + (1 - \alpha)} = \frac{2 - \alpha}{1 + 0.5\alpha}.$$

Видно, что и для такой системы из обогащенных смесей величина φ не является постоянной при изменении α и не совпадает с $\varphi_{upr}(\text{C}_c) = 2$ и $\varphi_{upr}(\text{CH}_4) = 0.667$ для каждой из них.

При выборе базовых обедненных смесей следует иметь в виду, что концентрационные пределы топливно-воздушных смесей существенно уже пределов топливно-кислородных смесей. Например, для метановоздушной смеси в качестве нижнего концентрационного предела принята величина $\approx 5\%$ при стехиометрической концентрации метана $\approx 10\%$. С учетом вышеотмеченного замечания о надежности протекания химической реакции в данной работе для оценок в качестве базового обедненного состава выбраны составы, концентра-

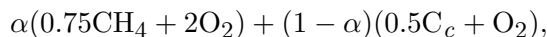
ции которых являются средними между стехиометрической и предельной величинами, т. е. $0.75\text{CH}_4 + 2(\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2)$ и $0.75\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$. Тогда

$$\varphi_{low}(\text{CH}_4) = 0.75/2 = 0.375 < \varphi_{st}(\text{CH}_4) = 0.5,$$

а эквивалентное отношение $0.375/0.5 = 0.75$. Аналогичные соображения для углеродного топливного компонента привели к выбору смеси $0.5\text{C}_c + \text{O}_2$ в качестве базовой в обедненном диапазоне, для этой смеси

$$\varphi_{low}(\text{C}_c) = 0.5/1 = 0.5 < \varphi_{st}(\text{C}_c) = 1.$$

Двухтопливная система из обедненных метаноуглеродных составов описывается уравнением



тогда

$$\varphi = \frac{0.75\alpha + 0.5(1 - \alpha)}{2\alpha + (1 - \alpha)} = \frac{0.5 + 0.25\alpha}{1 + \alpha}.$$

Видно, что и для такой системы из обедненных смесей величина φ не является постоянной при изменении α и не совпадает с $\varphi_{low}(\text{C}_c) = 0.5$ и $\varphi_{low}(\text{CH}_4) = 0.375$ для каждой из них.

Следует отметить, что в большинстве вышеприведенных примеров двухтопливных композиций соотношение горючее/окислитель оказывается переменным, изменяясь между величинами, соответствующими $\alpha = 0$ и $\alpha = 1$.

В табл. 1 представлены некоторые расчетные параметры детонации двухтопливных систем метан — углерод из двух стехиометрических (индекс *st*), обогащенных (индекс *upr*) и обедненных (индекс *low*) смесей, а также комбинированных систем из обогащенно-обедненных смесей (индексы *upr-low* и *low-upr*). Топлива смешиваются с кислородом или воздухом в равных пропорциях, состав воздуха $\text{air} = \text{O}_2 + 3.76\text{N}_2$. Приведены давление p_v , температура T_v и удельное энерговыделение горючей системы Q_v при взрыве в объеме, скорость детонационной волны D_0 , давление p_d и температура T_d продуктов детонации, удельное энерговыделение горючей системы Q_d при детонации, размер детонационной ячейки a , критическая энергия инициирования сферической детонации E_3 . В табл. 2 аналогичные данные приведены для двухтопливных систем, в которых меняется соотношение между смешиваемыми смесями:

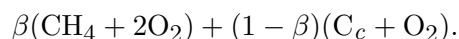


Таблица 1

Смесь	p_v , МПа	T_v , К	Q_v , кал/г	D_0 , м/с	p_d , МПа	T_d , К	Q_d , кал/г	a , мм	E_3 , Дж
$\text{CH}_4 + 3\text{O}_2 + \text{C}_c$ (<i>st</i>)	13.6	3 574	2 428	2 325	26.4	3 767	2 350	3.6	65
$2\text{CH}_4 + 5\text{O}_2 + 4\text{C}_c$ (<i>upp</i>)	13.1	3 574	3 892	2 434	25.3	3 791	3 812	5	71
$\text{CH}_4 + 4\text{O}_2 + \text{C}_c$ (<i>low</i>)	12.9	3 489	2 050	2 205	25	3 675	1 979	3.8	87
$2\text{CH}_4 + 5\text{O}_2 + 1.5\text{C}_c$ (<i>upp_low</i>)	14.3	3 582	2 331	2 387	27.7	3 777	2 250	3.4	66
$\text{CH}_4 + 4\text{O}_2 + 2.667\text{C}_c$ (<i>low_upp</i>)	12.4	3 636	3 561	2 302	24	3 840	3 482	4.6	45
$\text{CH}_4 + 3\text{air} + \text{C}_c$ (<i>st_CO2</i>)	9.5	2 644	946	1 840	18.1	2 836	912	157	$1.55 \cdot 10^7$
$2\text{CH}_4 + 5\text{air} + 4\text{C}_c$ (<i>CO_upp</i>)	8.7	2 367	1 368	1 826	16.4	2 630	1 362	343	$6.00 \cdot 10^7$
$\text{CH}_4 + 4\text{air} + \text{C}_c$ (<i>low</i>)	8.7	2 385	767	1 746	16.4	2 601	750	353	$2.07 \cdot 10^8$
$2\text{CH}_4 + 5\text{air} + 1.5\text{C}_c$ (<i>upp_low</i>)	9.7	2 662	921	1 866	18.5	2 861	888	139	$1.23 \cdot 10^7$
$\text{CH}_4 + 4\text{air} + 2\text{C}_c\beta$ (<i>low_upp</i>)	9.3	2 683	1 313	1 846	17.7	2 889	1 281	163	$8.02 \cdot 10^6$

Таблица 2

β	p_v , МПа	T_v , К	Q_v , кал/г	D_0 , м/с	p_d , МПа	T_d , К	Q_d , кал/г	a , мм	E_3 , Дж
Смесь $\beta(\text{CH}_4 + 2\text{O}_2) + (1 - \beta)(\text{C}_c + \text{O}_2)$									
0	10.4	3 776	4 664	2 133	19.9	3 999	4 592	5.8	25
0.1	11	3 665	4 067	2 170	21.2	3 872	3 994	5.6	39
0.2	11.8	3 625	3 568	2 215	22.6	3 825	3 494	5	47
0.3	12.4	3 602	3 138	2 256	24	3 798	3 061	4.5	53
0.4	13.1	3 586	2 761	2 292	25.2	3 780	2 683	4	59
0.5	13.6	3 574	2 428	2 325	26.4	3 767	2 350	3.6	65
0.6	14.2	3 565	2 132	2 353	27.5	3 757	2 053	3.3	72
0.7	14.7	3 558	1 867	2 379	28.5	3 749	1 787	3	79
0.8	15.2	3 552	1 628	2 402	29.4	3 743	1 548	2.7	87
0.9	15.6	3 547	1 412	2 422	30.3	3 738	1 331	2.5	98
1.0	14.8	3 541	1 218	2 390	29.3	3 725	1 140	2.3	112
Смесь $\beta(\text{CH}_4 + 2\text{air}) + (1 - \beta)(\text{C}_c + \text{air})$									
0	8.7	2 706	1 657	1 788	16.5	2 899	1 622	204	$7.67 \cdot 10^6$
0.1	8.9	2 681	1 464	1 799	16.8	2 871	1 428	195	$9.41 \cdot 10^6$
0.2	9.1	2 668	1 303	1 812	17.2	2 859	1 268	184	$1.09 \cdot 10^7$
0.3	9.2	2 659	1 166	1 822	17.5	2 849	1 132	174	$1.25 \cdot 10^7$
0.4	9.4	2 651	1 048	1 832	17.8	2 842	1 014	165	$1.40 \cdot 10^7$
0.5	9.5	2 644	946	1 840	18.1	2 836	912	157	$1.55 \cdot 10^7$
0.6	9.6	2 638	855	1 847	18.3	2 831	822	149	$1.7 \cdot 10^7$
0.7	9.7	2 633	775	1 854	18.5	2 827	742	141	$1.86 \cdot 10^7$
0.8	9.8	2 629	704	1 860	18.7	2 824	671	134	$2.01 \cdot 10^7$
0.9	9.9	2 625	640	1 865	18.8	2 820	607	127	$2.17 \cdot 10^7$

2. КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ ТРЕХТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ МЕТАН — УГЛЕРОД (УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ) — ВОДОРОД

Большинство исследований кинетики, горения и детонации выполнено для смесей индивидуального топлива с окислителем (монотопливные смеси). Хотя широко используемые топлива типа бензина и керосина из множества индивидуальных компонентов также исследованы достаточно подробно и даже представляются некоторой обобщенной формулой типа C_xH_y , тем не менее таких данных обычно недостаточно для прогнозной экстраполяции поведения такой системы на новые условия использования (например, бензин одинаковой марки, но разных НПЗ или же с разных АЗС). Часто для многотопливных смесей требуются дополнительные исследования и анализ кинетических и теплофизических коэффициентов переноса, критических условий зажигания смеси и инициирования детонации, концентрационных и геометрических пределов горения и детонации и т. д.

Система метан — углерод (угольная пыль) — водород является типичной для угольных шахт, при этом углерод в исходном состоянии представляет собой твердофазную субстанцию, а водород — один из газов, выделяющийся из угольного пласта.

Если при переходе к трехтопливным системам действовать по аналогии с алгоритмом перехода от однотопливных систем к двухтопливным, то задержку воспламенения трехтопливной системы для смеси $\alpha(2H_2 + O_2) + \beta(CH_4 + 2O_2) + (1 - \alpha - \beta)(C_c + O_2)$ следует определить в виде

$$\tau = \tau_{f1}^{\zeta_1} \tau_{f2}^{\zeta_2} \tau_{f3}^{(1-\zeta_1-\zeta_2)},$$

где $\zeta_i = n_{fi}/(n_{f1} + n_{f2} + n_{f3})$. Например, для водорода

$$\zeta_{H_2} = \frac{2\alpha}{2\alpha + \beta + 1 - \alpha - \beta} = \frac{2\alpha}{\alpha + 1},$$

для метана

$$\zeta_{CH_4} = \frac{\beta}{2\alpha + \beta + 1 - \alpha - \beta} = \frac{\beta}{\alpha + 1},$$

для углерода

$$\zeta_C = \frac{1 - \alpha - \beta}{2\alpha + \beta + 1 - \alpha - \beta} = \frac{1 - \alpha - \beta}{\alpha + 1}.$$

«Среднегеометрическое» значение для трехтопливной системы определяется как

$$\hat{\chi}_{123} = \sqrt[3]{\chi_1 \chi_2 \chi_3}.$$

В [15–17] показано, что метан и углерод относятся к топливам с трудноиницируемым детонационным режимом распространения, в то время как энергия инициирования детонации в водородных смесях оказывается на много порядков меньше, что позволяет считать водород легкоиницируемым топливом. Поэтому данную трехтопливную систему можно заменить двухтопливной из легкоиницируемого водорода и «осредненного» трудноиницируемого топлива метан — углерод.

В табл. 3 приведены расчетные данные для случая, когда водород в качестве третьего топливного компонента добавляется к двухтопливной системе из стехиометрических смесей одинаковой концентрации (окислителем является кислород или воздух), а в табл. 4 — когда водород добавляется к двухтопливной системе из обогащенных или обедненных смесей одинаковой концентрации (данные приведены для воздуха).

Ниже на рисунках представлены зависимости основных параметров детонации от молярной доли водорода в смеси: на рис. 5 — скорости детонации D_0 , давления p_d и температуры продуктов детонации T_d , на рис. 6 — удельного энергосодержания смеси Q_g , размера детонационной ячейки a , критической энергии инициирования сферической детонации E_3 . На рис. 7 критическая энергия инициирования приведена в безразмерном виде: $\varepsilon = (E_3)_{H_2}/(E_3)_{H_2=0}$ (на значение при нулевой концентрации водорода). Видно, что характер изменения параметров детонации при возрастании доли водорода заметно изменяется при уходе от стехиометрических составов как в сторону обогащения смеси, так и в сторону ее обеднения.

На рис. 8 представлены данные об изменении величины ε для каждого типа смесей (обогащенной, стехиометрической и обедненной) на примере топливно-кислородных и топливно-воздушных смесей. Хорошо видно отсутствие подобия безразмерных величин при переходе от кислорода к воздуху. Последний рисунок четко демонстрирует максимальную эффективность добавок водорода к обедненным смесям метана с угольной пылью (уменьшение ε на несколько порядков).

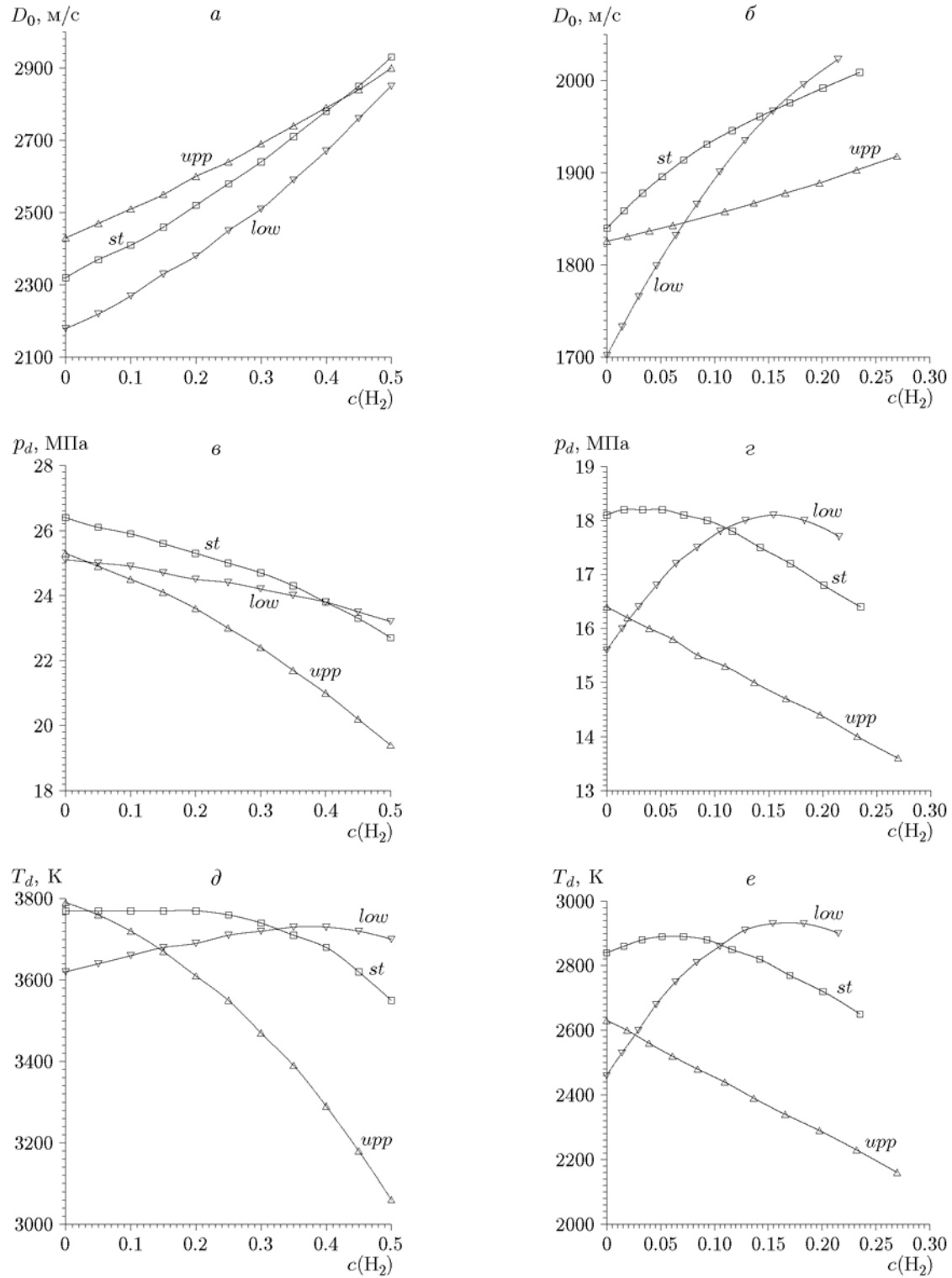


Рис. 5. Скорость детонации (*a*, *б*), давление (*в*, *г*) и температура продуктов детонации (*д*, *е*) в зависимости от молярной доли водорода в смеси:

a, *в*, *д* — топливно-кислородные смеси, *б*, *г*, *е* — топливно-воздушные; линии *upp* соответствуют обогащенным, *st* — стехиометрическим, *low* — обедненным трехтопливным смесям

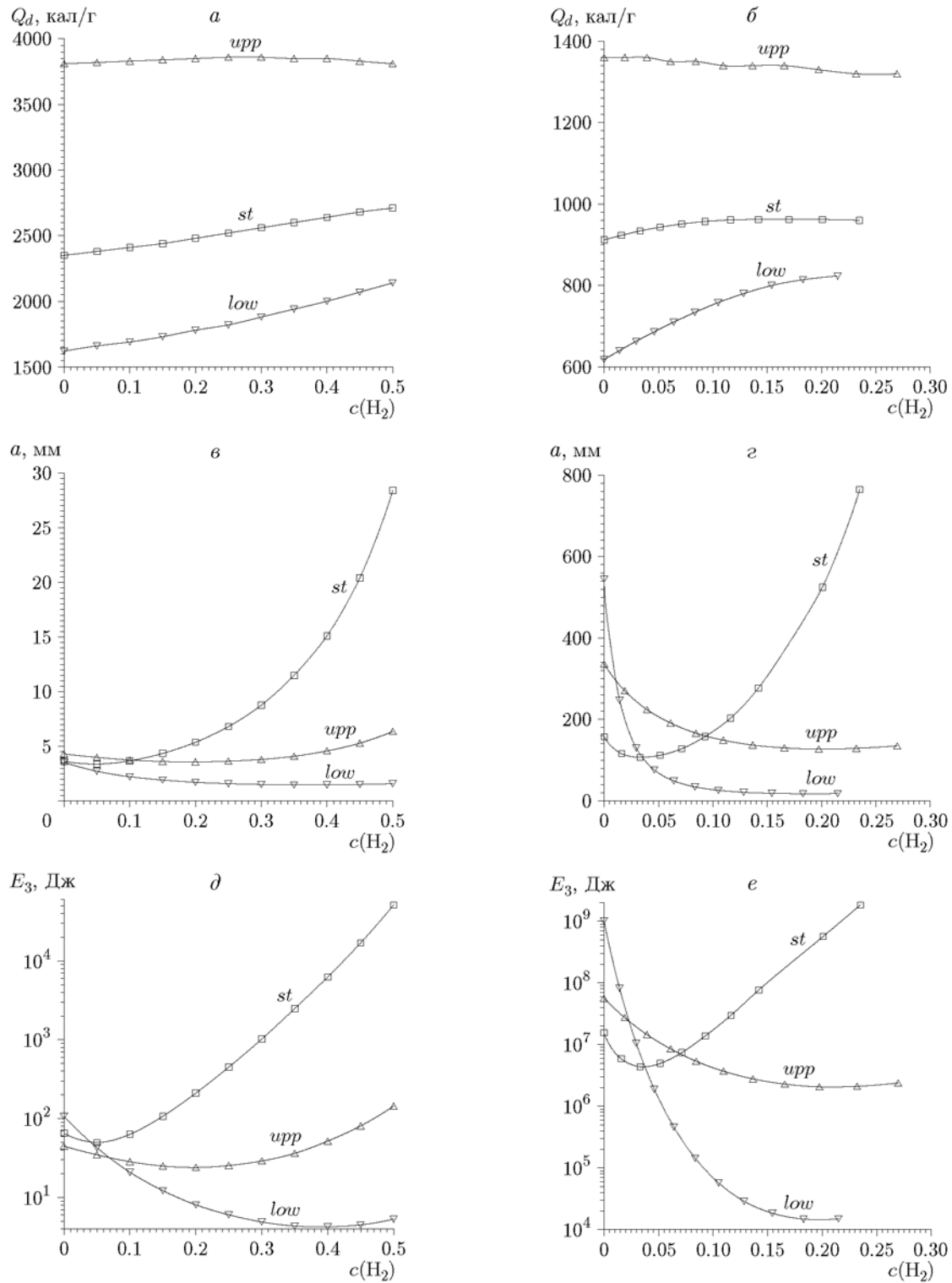


Рис. 6. Удельное энерговыделение смеси (*a*, *б*), размер детонационной ячейки (*в*, *г*) и критическая энергия инициирования сферической детонации (*д*, *е*) в зависимости от молярной доли водорода в смеси:

a, *в*, *д* — топливно-кислородные смеси, *б*, *г*, *е* — топливно-воздушные; линии *upp* соответствуют обогащенным, *st* — стехиометрическим, *low* — обедненным трехтопливным смесям

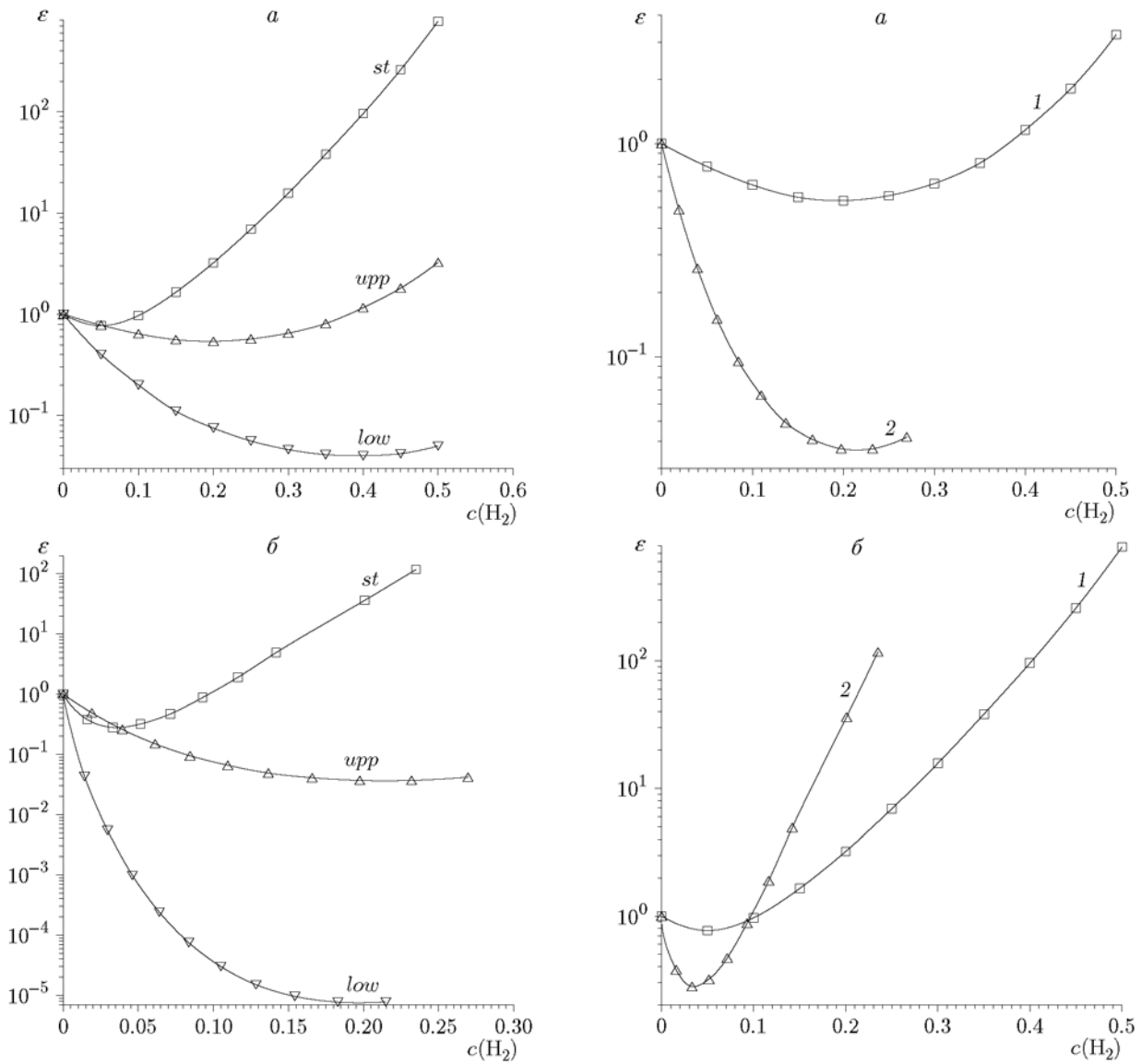


Рис. 7. Безразмерная критическая энергия инициирования топливно-кислородных (*a*) и топливно-воздушных (*б*) смесей от молярной доли водорода в смеси:

линии *upp* соответствуют обогащенным, *st* — стехиометрическим, *low* — обедненным трехтопливным смесям

Рис. 8. Изменение безразмерной энергии обогащенной (*a*), стехиометрической (*б*) и обедненной (*в*) топливно-кислородных (линии 1) и топливно-воздушных (2) смесей

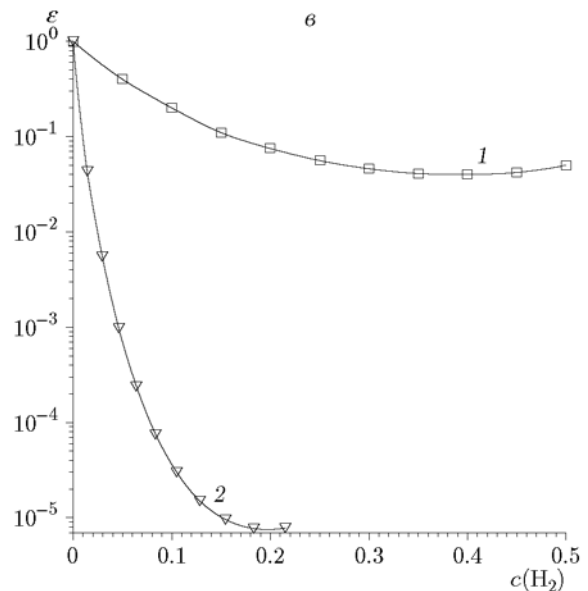


Таблица 3

δ	p_v , МПа	T_v , К	Q_v , кал/г	D_0 , м/с	p_d , МПа	T_d , К	Q_d , кал/г	a , мм	E_3 , Дж
Смесь $\delta\text{H}_2 + \beta(\text{CH}_4 + 2\text{O}_2) + (1 - \beta)(\text{C}_c + \text{O}_2)$									
0	13.6	3574	2428	2325	26.4	3767	2350	3.6	65
0.26	13.5	3576	2459	2368	26.1	3770	2378	3.4	50
0.56	13.4	3577	2492	2415	25.9	3772	2409	3.7	63
0.88	13.3	3576	2528	2465	25.6	3771	2442	4.4	107
1.25	13.1	3571	2567	2519	25.3	3767	2478	5.4	210
1.67	13	3560	2608	2577	25	3757	2516	6.8	449
2.14	12.8	3542	2651	2639	24.7	3740	2555	8.8	1021
2.69	12.6	3515	2694	2706	24.3	3714	2596	11.5	2483
3.33	12.4	3474	2737	2777	23.8	3675	2637	15.1	6241
4.09	12.1	3417	2778	2852	23.2	3621	2677	20.4	16870
5	11.8	3340	2814	2932	22.7	3549	2713	28.4	51030
Смесь $\delta\text{H}_2 + \beta(\text{CH}_4 + 2\text{air}) + (1 - \beta)(\text{C}_c + \text{air})$									
0	9.5	2644	946	1840	18.1	2836	912	157	$1.56 \cdot 10^7$
0.26	9.6	2666	958	1859	18.2	2860	923	116	$5.87 \cdot 10^6$
0.56	9.6	2680	968	1878	18.2	2878	934	107	$4.36 \cdot 10^6$
0.88	9.6	2682	975	1896	18.2	2889	943	112	$4.94 \cdot 10^6$
1.25	9.5	2672	980	1914	18.2	2889	951	128	$7.40 \cdot 10^6$
1.67	9.4	2649	981	1931	18	2878	957	158	$1.38 \cdot 10^7$
2.14	9.4	2615	981	1946	17.8	2854	961	203	$2.97 \cdot 10^7$
2.69	9.2	2572	979	1961	17.5	2819	962	277	$7.67 \cdot 10^7$
3.33	9.1	2521	976	1976	17.2	2773	962	319	$1.19 \cdot 10^8$
4.09	8.9	2464	973	1992	16.8	2717	962	525	$5.64 \cdot 10^8$
5	8.7	2398	970	2009	16.4	2652	960	765	$1.83 \cdot 10^9$

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Представлены численные и графические результаты по важнейшим газодинамическим параметрам взрыва и детонации двухтопливных систем оксид углерода — водород, метан — углерод (угольная пыль), метан — водород, углерод (угольная пыль) — водород в смеси с кислородом и воздухом при варьировании соотношения между топливными компонентами.

Предложен и апробирован подход к построению формулы для задержки воспламенения многотопливных систем τ_{Σ} как среднегеометрического значения τ для индивидуаль-

ных топлив. Предложенный алгоритм модернизации кинетических данных позволил, кроме газодинамических параметров, рассчитать размеры детонационных ячеек и критическую энергию инициирования детонации.

Установлено, что для двухтопливных систем из стехиометрических смесей индивидуальных топливных компонентов параметры системы непрерывно меняются от одной однотопливной смеси к другой однотопливной смеси при изменении соотношения между топливными компонентами. При этом изменение параметров тем больше, чем больше разница в задержках воспламенения индивидуальных топ-

Таблица 4

δ	p_v , МПа	T_v , К	Q_v , кал/г	D_0 , м/с	p_d , МПа	T_d , К	Q_d , кал/г	a , мм	E_z , Дж
Смесь $\delta\text{H}_2 + \beta(\text{CH}_4 + 1.5\text{air}) + (1 - \beta)(2\text{C}_c + \text{air})$									
0	8.7	2367	1368	1826	16.4	2630	1362	336	$5.62 \cdot 10^7$
0.29	8.6	2335	1364	1831	16.2	2596	1359	270	$2.73 \cdot 10^7$
0.61	8.5	2300	1361	1837	16	2560	1356	224	$1.45 \cdot 10^7$
0.97	8.4	2264	1357	1843	15.8	2522	1352	191	$8.49 \cdot 10^6$
1.375	8.2	2226	1353	1850	15.5	2482	1348	166	$5.35 \cdot 10^6$
1.83	8.1	2185	1348	1858	15.3	2439	1344	149	$3.69 \cdot 10^6$
2.36	8	2140	1344	1867	15	2392	1340	137	$2.77 \cdot 10^6$
2.96	7.8	2093	1339	1878	14.7	2341	1336	130	$2.28 \cdot 10^6$
3.67	7.7	2041	1334	1889	14.4	2286	1331	127	$2.06 \cdot 10^6$
4.50	7.5	1984	1327	1903	14	2225	1325	129	$2.10 \cdot 10^6$
5.5	7.3	1921	1320	1918	13.6	2158	1318	135	$2.38 \cdot 10^6$
Смесь $\delta\text{H}_2 + \beta(0.75\text{CH}_4 + 2\text{air}) + (1 - \beta)(0.5\text{C}_c + \text{air})$									
0	8.3	2235	629	1702	15.6	2458	618	545	$1.92 \cdot 10^9$
0.45	8.5	2311	654	1733	16	2532	640	247	$8.22 \cdot 10^7$
0.94	8.7	2388	680	1766	16.4	2605	663	130	$1.05 \cdot 10^7$
1.5	8.9	2465	708	1799	16.8	2677	686	76	$1.89 \cdot 10^6$
2.12	9.1	2540	736	1832	17.2	2745	710	49	$4.60 \cdot 10^5$
2.83	9.2	2609	765	1866	17.5	2809	734	34	$1.44 \cdot 10^5$
3.64	9.4	2668	792	1901	17.8	2865	758	26	$5.73 \cdot 10^4$
4.58	9.5	2710	816	1935	18	2908	780	21	$2.88 \cdot 10^4$
5.67	9.5	2724	834	1967	18.1	2931	800	18	$1.84 \cdot 10^4$
6.95	9.4	2706	843	1996	18	2927	814	18	$1.48 \cdot 10^4$
8.5	9.3	2660	847	2023	17.7	2895	823	18	$1.50 \cdot 10^4$

лив (системы метан — водород, оксид углерода — водород). Для топлив с близкими задержками воспламенения изменение параметров заметно меньше (система метан — углерод).

Установлено, что при добавках второго топливного компонента в стехиометрическую однопаливную смесь характер изменения важнейших параметров (размер детонационной ячейки, критическая энергия инициирования, температура) меняется на противоположный и в соответствующих профилях появляются экстремумы. Такое поведение обусловлено тем, что двухтопливная смесь становится обедненной по мере увеличения содержа-

ния второго топлива. Характер изменения параметров двухтопливной смеси на противоположный свидетельствует о существовании оптимальности системы по соотношению индивидуальных топливных компонентов.

Представлены численные и графические результаты по важнейшим газодинамическим параметрам взрыва и детонации трехтопливных систем метан — углерод (угольная пыль) — водород в смеси с кислородом и воздухом при варьировании соотношения между топливными компонентами. Проанализированы не только стехиометрические системы, но и обогащенные и обедненные трехтопливные системы.

Установлено, что при увеличении доли водорода профили параметров трехтопливных систем для стехиометрических, обедненных и обогащенных составов различаются не только количественно, но и качественно. Различие в профилях наблюдается и при переходе от топливно-кислородных к топливно-воздушным системам. Более того, различаются профили и при переходе к обезразмеренным параметрам (на их значения при нулевой концентрации водорода), что свидетельствует об отсутствии подобия в характере влияния водорода на трехтопливные системы стехиометрического, обогащенного и обедненного типов.

Расчеты подтвердили известный из эксперимента факт о сильном промотирующем влиянии малых добавок водорода на инициирование смесей $\text{CO}-\text{O}_2$. Предсказано аналогичное промотирующее воздействие водорода на метановые смеси и особенно сильное — на обедненные системы метана и угольной пыли, проявляющееся в уменьшении на несколько порядков критической энергии инициирования детонации. Последний результат заставляет обратить внимание на недостаток существующих инструкций по газовому контролю в угольных шахтах (только метан) и необходимости их пересмотра с целью введения дополнительного контроля за водородом (а также другими легкоинициируемыми топливами типа ацетилена, этилена), наличие которого существенно увеличивает вероятность воспламенения и развития аварийной ситуации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А. А., Васильев В. А., Троцюк А. В. Бифуркационные структуры газовой детонации // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 2. — С. 88–100.
2. Васильев А. А. О влиянии азота на параметры многофронтной детонации // Физика горения и взрыва. — 1998. — Т. 34, № 1. — С. 79–83.
3. Westbrook C. K. Chemical kinetics in gaseous detonations // Fuel-Air Explosions / J. H. S. Lee, C. M. Guirao (Eds). — Univ. Waterloo Press, 1982. — P. 189–242.
4. Заманский В. М., Борисов А. А. Механизм и промотирование самовоспламенения перспективных топлив // Итоги науки и техники. Сер. Кинетика и катализ. — М.: ВИНТИ, 1989. — Т. 19.
5. Бажин Н. М., Иванченко В. А., Пармон В. Н. Термодинамика для химиков. — М.: Химия, КолосС, 2004.
6. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. — М.: Физматлит, 2003.
7. Бабушок В. И., Дакданча А. Н. Глобальные кинетические параметры для высокотемпературных газозажигательных реакций // Физика горения и взрыва. — 1993. — Т. 29, № 4. — С. 48–80.
8. Vasil'ev A. A. Determination of induction time in multi-fuels systems // Proc. of the 3rd Asia-Pacific Conf. on Combustion (ASPACC-2001). — Seoul, Korea: Seoul National Univ., 2001. — P. 493–496.
9. Васильев А. А. Задержка воспламенения в многотопливных смесях // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 3. — С. 42–46.
10. Cheng R. K., Oppenheim A. K. Autoignition in methane-hydrogen mixtures // Combust. Flame. — 1984. — V. 58, N 2. — P. 125–139. — DOI: 10.1016/0010-2180(84)90088-9.
11. Austin J. M., Shepherd J. E. Detonations in hydrocarbon fuel blends // Combust. Flame. — 2003. — V. 132, N 1-2. — P. 73–90. — DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00422-4.
12. Васильев А. А. Детонационные свойства синтез-газа // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 6. — С. 90–96.
13. Васильев А. А., Васильев В. А. Расчетные и экспериментальные параметры горения и детонации смесей на основе метана и угольной пыли // Вестн. Науч. центра по безопасности работ в угольной пром-сти. — 2016. — Вып. 2. — С. 8–39.
14. Васильев А. А. Характеристики горения и детонации метанугольных смесей // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 4. — С. 48–59.
15. Vasil'ev A. A. Safety aspects of combustible gases and vapours // Defence Industries: Science and Technology Related Security: Impact of Conventional Munition on Environment and Population / P. C. Branco, H. Schubert, J. Campos (Eds). — Dordrecht: Springer, Kluwer Acad. Publ., 2004. — P. 37–63.
16. Vasil'ev A. Dynamic parameters of detonation // Shock Waves Science and Technology Reference Library. — V. 6: Detonation Dynamics / F. Zhang (Ed.). — Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. — P. 213–279.
17. Васильев А. А. Ячеистые структуры многофронтной детонационной волны и инициирование (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 9–30.

Поступила в редакцию 06.07.2022.

После доработки 25.08.2022.

Принята к публикации 07.09.2022.