

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1

# УГЛЕВОДОРОДНЫЕ ТОПЛИВА: ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ

А. А. Васильев<sup>1,2</sup>, В. А. Васильев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, gasdet@hydro.nsc.ru

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Для предельных  $C_nH_{2n+2}$  (от метана ( $n = 1$ ) до эйкозана ( $n = 20$ )) и непредельных  $C_nH_{2n}$  (от этилена ( $n = 2$ ) до эйкозена ( $n = 20$ )) углеводородов, метанола и этанола как основных компонентов «биотоплива», а также монотоплив как источника бифуркационных структур многофронтной детонации представлены данные о важнейших параметрах горения и детонации: волновых скоростях, давлениях и температурах продуктов, удельном энерговыделении смеси. Приведены также данные о критических энергиях инициирования как мере взрывоопасности горючих систем: чем меньше энергия, тем более опасна смесь. Данные получены для смесей каждого индивидуального углеводорода с кислородом и воздухом в широком диапазоне изменения начальных параметров: давления, температуры, концентрации топливного компонента и его фазового состояния.

Ключевые слова: инициирование, критическая энергия, детонационные ячейки, безопасность, экология, альтернативные топлива, базы данных.

DOI 10.15372/FGV20200605

## ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие масштабы использования горючих веществ (гомогенных или гетерогенных) повышают актуальность задачи обеспечения их взрывобезопасности на производстве, при хранении, транспортировке.

Традиционно в качестве меры взрывоопасности горючих систем принимается критическая энергия инициирования: чем меньше энергия, тем более опасна смесь. В качестве критической энергии при пороговом характере инициирования типа «да» — «нет» обычно принимается значение энергии, обеспечивающее в серии экспериментов 100%-е возбуждение пламени или детонации. Например, критическая энергия зажигания  $E_{flame}$  (во всяком случае, при искровом воспламенении) традиционно выступает как основной параметр пожароопасности смеси.

Обычно зависимость критической энергии инициирования от каких-либо параметров смеси (концентрации топливного компонента в смеси, начального давления или температуры, длительности разряда, межэлектродного расстояния и т. д.) имеет U-образную форму с минимумом для большинства исследован-

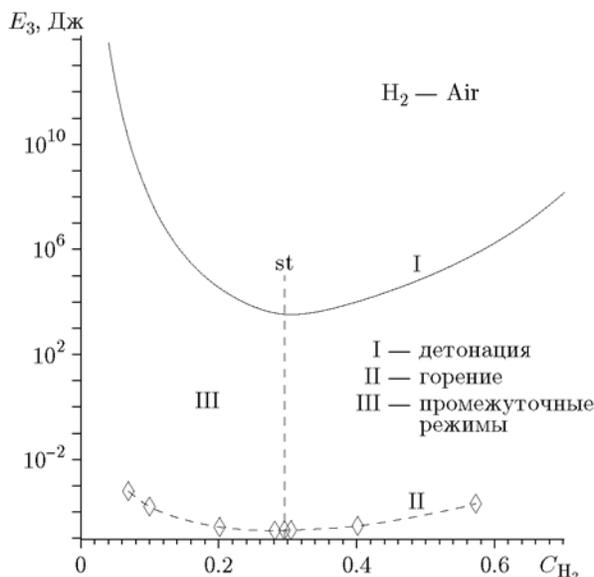


Рис. 1. Минимальная энергия воспламенения смеси (границная линия II), прямого инициирования сферической детонации (область I) и возбуждения промежуточных между горением и детонацией режимов (область III) в зависимости от молярной концентрации топливного компонента в смеси

ных смесей. Например, на рис. 1 представлены критические энергии возбуждения (зажигания) сферического пламени (выше кривой II) и прямого инициирования сферической детонации (сплошная линия I и область выше нее) для смесей водород — воздух в зависимости от молярной доли водорода. Вертикальная штриховая прямая соответствует стехиометрическому соотношению водорода с воздухом. Область III между линиями I и II соответствует возбуждению режимов, промежуточных между низкоскоростным ламинарным горением и высокоскоростной самоподдерживающейся детонацией. Поскольку переход горения в детонацию (ПГД), как и инициирование, носит тоже пороговый характер типа «да» — «нет», то граничная линия осуществления режимов ПГД должна лежать между кривыми I и II. Особо следует подчеркнуть, что критические энергии воспламенения (ламинарное пламя, основной механизм распространения — теплопроводность и диффузия) оказываются на много порядков меньше критических энергий инициирования детонации (ударно-волновое возбуждение). Например, для стехиометрической смеси водород — воздух энергия воспламенения при нормальных условиях  $E_{flame} \approx 0.02$  мДж, а энергия инициирования детонации  $E_* \approx 3360$  Дж. Малые значения  $E_{flame}$  свидетельствуют о легкости воспламенения горючих смесей при возникновении аварийных ситуаций.

Для корректного прогнозирования возможных последствий при возникновении чрезвычайного возгорания облака горючей смеси необходимо корректное моделирование всего газодинамического и кинетического сценария развития несанкционированного взрыва — от возбуждения ламинарного пламени, через его турбулилизацию и ускорение, формирование волн сжатия и головной ударной волны, возможный переход от горения к детонации до его завершающей стадии с формированием взрывных волн в окружающей среде, термическим воздействием, образованием токсичных веществ и т. д.

#### ПАРАМЕТРЫ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ: ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА И КИНЕТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

На сегодняшний день известно несколько отечественных и зарубежных компьютерных программ для расчета параметров горения и детонации газовых смесей (например, АСТРА, ИВТАН-ТЕРМО, СЕМКИН, GRI-Mech и

др.). В рамках модели идеальности газовых компонентов и продуктов их реакции [1–7], а также в предположении химического равновесия продуктов рассчитываются основные газодинамические параметры — волновая и массовая скорости, давление и температура продуктов, их равновесный состав и т. д. Однако такой важнейший параметр, как критическая энергия инициирования смеси, необходимый при описании взрывоопасности горючих систем, в вышеуказанных программах не рассматривается.

Аналогичная программа «Безопасность», предназначенная для расчета параметров горения и детонации гомогенных и гетерогенных горючих систем, была разработана в предыдущие годы в лаборатории газовой детонации Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН. Отличительной чертой программы является возможность расчета размера детонационной ячейки  $a$  и критической энергии инициирования смеси  $E_*$  с привлечением кинетических данных [8–16]. С учетом того, что энергия инициирования детонации  $E_{*\nu}$  может быть определена через характерный размер структуры многофронтной детонационной волны (ДВ) — размер ячейки  $a$ , этот размер  $a$ , наряду с  $E_{*\nu}$ , представляет одну из важнейших характеристик смеси (индекс  $\nu = 1, 2, 3$  соответствует плоской, цилиндрической и сферической симметрии).

Основная сложность при использовании любых программ заключается в том, что кинетические данные, необходимые для расчета  $E_*$  и  $a$ , как правило, определяются из ударно-волновых экспериментов по воспламенению смесей (определение задержки воспламенения  $\tau$ ) или из экспериментов со стационарным горением (определение скорости нормального горения  $S_n$ ), а затем экстраполируются на область параметров, типичных для условий детонации. Анализ, касающийся наиболее часто используемых при исследованиях смесей, свидетельствует, что простая экстраполяция кинетических данных из области горения на область детонации далеко не всегда приводит к удовлетворительному согласованию расчетных и экспериментальных величин. Чаще приходится сталкиваться с ситуацией, когда наблюдаются заметные отклонения между расчетом и экспериментом, возрастающие по мере удаленности областей горения и детонации. Но даже при корректно подобранных кинетических

данных смеси существует возможность неточного предсказания  $E_*$ , обусловленная тем, что на сегодняшний день известно свыше 20 методик (моделей) с конечными инженерными формулами для оценки энергии инициирования.

Перед началом расчетов трудно по виду кинетических и энергетических формул отдать предпочтение той или иной формуле или модели. Поэтому одной из особенностей программы «Безопасность» является то, что для расчета критической энергии инициирования  $E_*$  задействованы все известные модели (несмотря на увеличение времени счета и количества подпрограмм). А из кинетических данных предпочтение отдается той формуле, которая наиболее удачно согласовывает расчетные и экспериментальные данные по совокупности всех размерных параметров горючей смеси: геометрических, динамических, энергетических.

Накопленный к настоящему времени расчетный и экспериментальный материал свидетельствует [16], что предпочтение при расчетах следует отдавать четырем моделям: а) многоточечного инициирования (МТИ-модель), б) дифракционного реинициирования многофронтной детонации (ДРМД-модель), в) «поверхностной энергии» (ПЭ-модель), г) инициирования гетерогенной и газовой детонации (ИГГД-модель). Эти четыре модели лучше остальных описывают известный на сегодняшний день экспериментальный материал по энергии инициирования детонации [16].

За истекшие годы с помощью программы «Безопасность» последовательно проводился анализ взрывоопасности различных смесей [16–27], с которыми происходили чрезвычайные ситуации. Например, исследовалась безопасность водорода как эффективного экологического топлива (водородный двигатель для авиационной и ракетно-космической отрасли; водородная безопасность АЭС при авариях реактора и попадании воды в его высокотемпературную зону с последующим ее разложением на водород и кислород; безопасность мощных электролизеров опреснительных установок с возможным разложением воды на основные компоненты горючей смеси водород — кислород; безопасность помещений с аккумуляторными батареями подводных лодок и каталитическими дожигателями в них; безопасность водородных топливных элементов); безопасность новых альтернативных топлив (синтез-газ как смесь водорода с оксидом углерода) и т. д. Не

меньше проблем и с другими топливами: взрывы метана в шахтах, взрывы бытового газа в помещениях, взрывы природного газа на трубопроводах и компрессорных станциях, взрывы сжиженного газа при транспортировке.

В известных из литературы данных о задержках воспламенения  $\tau$  различных топлив наблюдается заметный разброс (до порядка). Такой разброс приводил к значительной неопределенности всех геометрических и динамических характеристик детонации, пропорциональных  $\tau$ . Более того, для многих топлив данных о задержке вообще нет, и нужно находить нестандартные пути выбора кинетических параметров при прогнозных оценках взрывоопасности данной смеси.

Подобная проблема выбора кинетических констант для неисследованных топлив возникла при расчете параметров детонационной опасности предельных углеводородов  $C_nH_{2n+2}$ , где каждый последующий элемент гомологического ряда отличается на  $CH_2$ -группу. Это позволяет использовать принцип аддитивности при расчете базовых термодинамических потенциалов и ожидать определенного подобия в поведении однотипных параметров горения и детонации среди элементов данного класса (что продемонстрировано в [7]), в том числе — для их задержек воспламенения.

Проблема выбора  $\tau$  для предельных углеводородов была проанализирована в [22] и предложен следующий подход. Для горючих систем, содержащих основные атомы С, Н, О, N, наряду с известными кинетическими данными для каждого индивидуального углеводородного топлива при оценках была проверена также схема с участием «оторванных» от углеводорода атомов водорода при их последующем взаимодействии с кислородом (воздухом) в рамках детальной кинетической схемы окисления (с ведущими реакциями разветвления цепи  $H + O_2 \rightarrow OH + O$  и  $H_2 + O \rightarrow OH + H$  и соответствующими этим реакциям формулами для задержки воспламенения). С «водородными задержками» были рассчитаны параметры горения и детонации смесей в ряду  $C_nH_{2n+2}$  и проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных о параметрах детонации метана, этана, пропана, бутана и т. д., свидетельствующее (за исключением метана) о достаточно хорошем их согласии. Отметим, что водородная кинетика предсказывает относительно малое увеличение критической энер-

гии инициирования предельных углеводородов в смеси с воздухом (от 15 г ТНТ для этана до 500 г для эйкозана при стехиометрическом соотношении). И лишь для метана водородная кинетика предсказывает массу заряда около 1 г ТНТ (как для водородно-воздушной смеси), в то время как индивидуальная кинетика метана — около 17 кг ТНТ (экспериментального подтверждения этой величины до сих пор нет). О заметном отклонении многих параметров метана, как родоначальника предельных углеводородов, можно прочитать в «Химической энциклопедии» или «Справочнике химика».

В данной работе представлены результаты комплексных расчетных и экспериментальных исследований горения и детонации смесей, топливом в которых выступают непредельные углеводороды  $C_nH_{2n}$ , биотоплива, а также некоторые монотоплива, которые могут в виде добавок к традиционным смесям приводить к формированию бифуркационных (многомерных) структур многофронтной детонации. Представлены также дополнительные к [22] данные о параметрах предельных углеводородов  $C_nH_{2n+2}$ .

### ПРЕДЕЛЬНЫЕ И НЕПРЕДЕЛЬНЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика расчета важнейших параметров детонации, включая размер ячейки  $a$  и критическую энергию инициирования  $E_{*v}$ , подробно изложена в [16] и положена в основу компьютерной программы «Безопасность». Расчеты ведутся в предположении идеальности газовых компонентов и химического равновесия продуктов. В качестве стандартного состояния выбраны значения  $p_0 = 10^5$  Па (1.0 атм) и  $T_0 = 298$  К, расчеты проведены также при других давлениях и температурах.

Для банка термодинамических данных программы «Безопасность» были предварительно рассчитаны коэффициенты полиномов для энтальпии и энтропии непредельных (и предельных) углеводородов в диапазоне температур, типичных для процессов горения и детонации. В качестве стартовых использованы табличные данные [1–7] для этих веществ в диапазоне температур  $298.15 \div 1500$  К.

Многие углеводородные топлива и добавки к смесям (например, водяной пар, тяжелые углеводороды) при аварийной ситуации могут находиться как в газовой фазе, так и в виде капель диспергированной жидкости. Влия-

ние жидкой фазы, строго говоря, должно учитываться в рамках модели гетерогенной газожидкой среды со своим уравнением состояния для жидких компонентов. Однако приближенная оценка влияния жидкой фазы может быть сделана и в рамках модели идеального газа при следующих допущениях: жидкая фаза представляется в виде мелкодисперсного распыленного облака капель с пренебрежимо малыми размерами, когда можно пренебречь всеми физическими релаксационными процессами (ускорение, дробление, срыв микрокапель с границы погранслоя), а энтальпия и энтропия исходного жидкого компонента «подправляется» на величины, соответствующие фазовому переходу жидкость — газ (при данной температуре). В такой постановке часть химической энергии смеси будет затрачена на фазовый переход, что повлечет за собой изменение основных параметров горения и детонации (в той или иной мере, заранее трудно предсказуемой).

Основные исследования данной работы посвящены смесям, топливом в которых выступают непредельные углеводороды  $C_nH_{2n}$  (от этилена до эйкозена). Базовая особенность непредельных углеводородов — наличие двойной связи  $C=C$ . Как и для топлив метанового ряда, только первые ( $n = 2 \div 4$ ) представители ряда непредельных водородов являются газообразными при нормальных условиях (этилен, пропилен, бутен), остальные ( $n = 5 \div 20$ ) — жидкие. Экспериментальные исследования проведены только для газообразных компонентов, для жидких компонентов сведения о детонационных параметрах практически отсутствуют. Для непредельных углеводородов (как и для предельных) свойственна сложность кинетической схемы, которая уже сейчас включает около 2000 элементарных реакций (содержит, как минимум, около 4000 коэффициентов в формулах для скоростей прямых и обратных реакций — энергию активации и предэкспоненциальный множитель). К сожалению, точность кинетических коэффициентов для расчетов детонационного превращения оказывается невысокой. Как правило, эти коэффициенты определяются из экспериментальных данных по горению топлив и затем экстраполируются на условия детонации в надежде на их достоверность. Неудивительно, что даже для многократно исследованных топлив ряда непредельных углеводородов (этилен, пропилен, бутен) существует значительный разброс данных по вре-

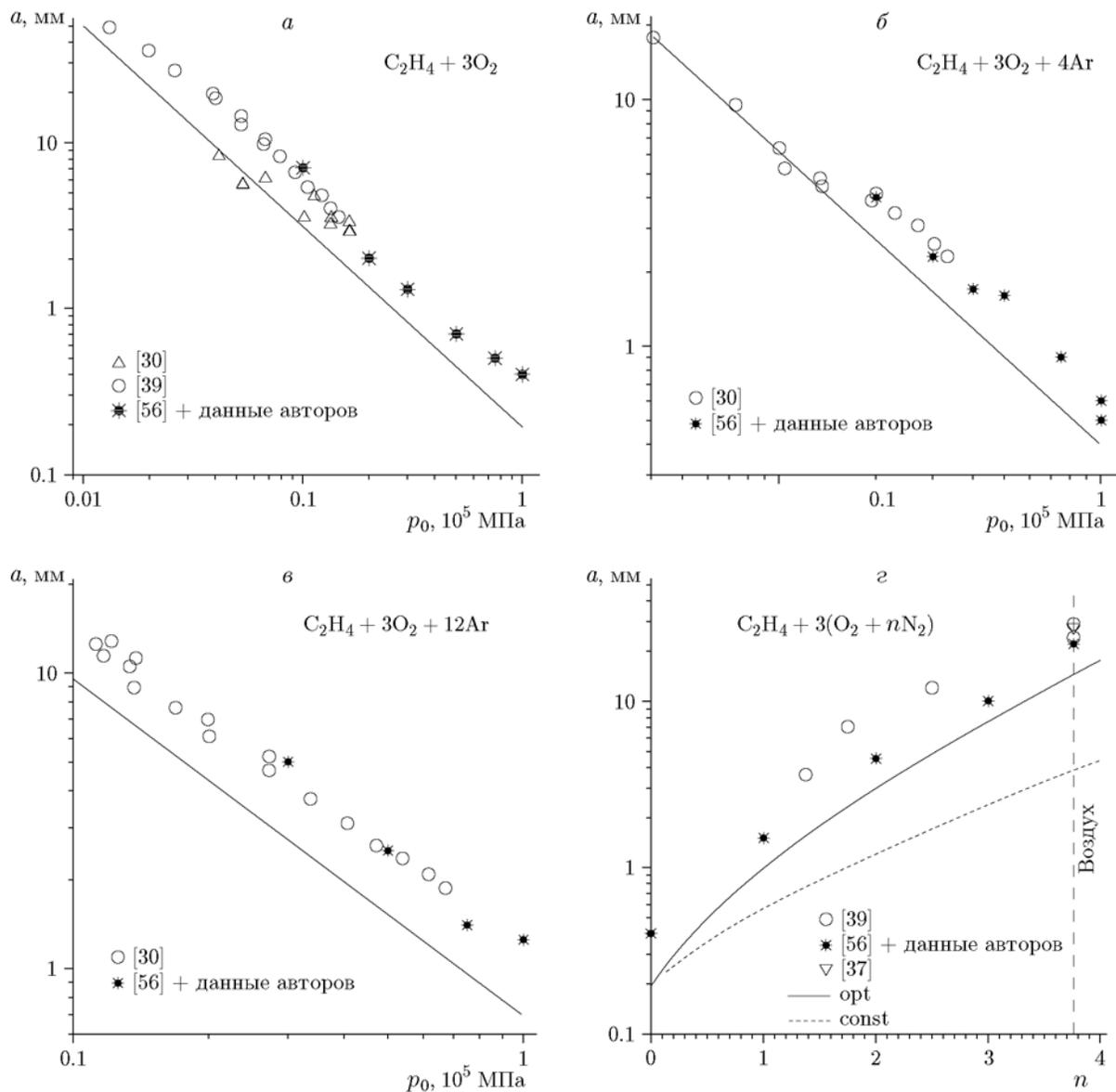


Рис. 2. Зависимость размера детонационной ячейки от начального давления для стехиометрической смеси этилена с кислородом при разбавлении аргоном (а-в) и азотом (г):

точки — данные экспериментов, линии — расчет

мени задержки воспламенения в условиях детонации. Для остальных представителей ряда непредельных углеводородов данных практически нет. В то же время для практических целей всегда необходимы прогнозные оценки по использованию того или иного топлива и степени его взрывоопасности. Потому актуальность данного исследования не вызывает сомнений.

На первом этапе для первых представителей непредельных углеводородов были задействованы коэффициенты формулы Аррениуса для их индивидуальных задержек воспламе-

ния. Из различного набора этих коэффициентов удалось подобрать такие, которые предсказывают минимальное отклонение от экспериментальных значений.

Экспериментальные исследования касались в основном измерения размера детонационной ячейки и «диаметра дифракции» в трубах и каналах различных размеров. Напомним, что при распространении ДВ в области резкого изменения геометрического размера заряда (например, в области перехода ДВ из трубы в полупространство ( $\nu = 3$ ) или из узко-

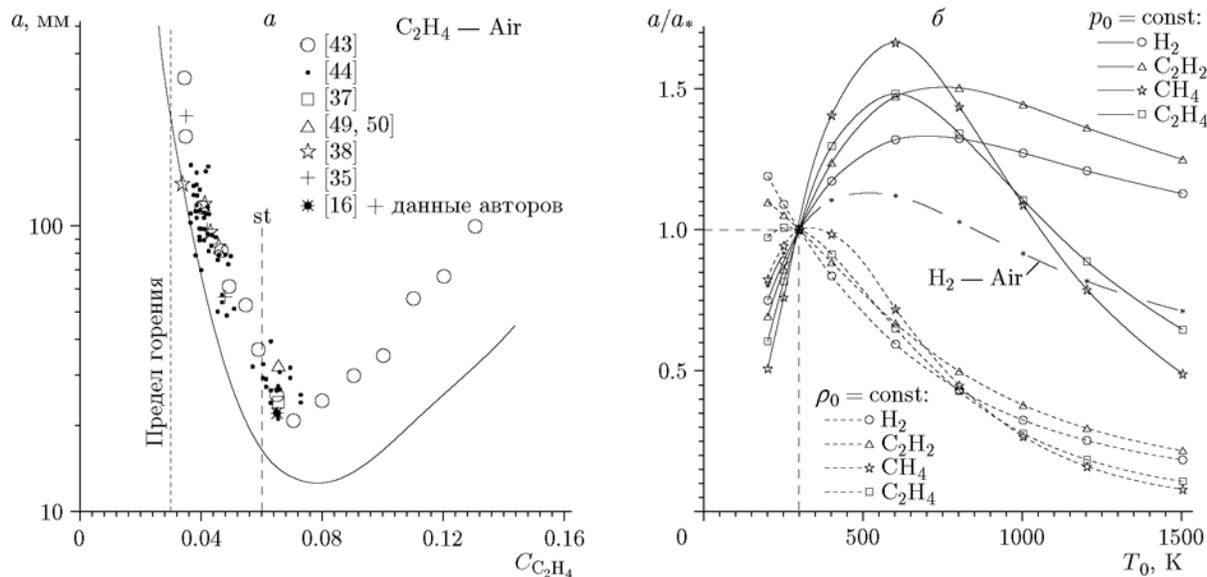


Рис. 3. Зависимость размера детонационной ячейки от молярной концентрации этилена в смесях этилена с воздухом (а) и от начальной температуры смеси (б):

точки — данные экспериментов, линии — расчет; б — сплошные линии — расчет при сохранении начального давления смеси, пунктирные линии — при сохранении начальной плотности; размер ячейки  $a(T_0)$  обезразмерен на величину ячейки при комнатной температуре  $T_0 = 298$  К; штрихпунктирная линия — расчет для водородно-воздушной смеси

го канала в более широкий ( $\nu = 2$ )) возникает сложное нестационарное течение, получившее обобщенное название дифракции ДВ. В горючих газовых смесях дифракционное явление сопровождается разрушением и восстановлением упорядоченной ячеистой структуры многофронтной ДВ. Для топливно-кислородных смесей, типичных для лабораторных исследований, эксперименты проводились, как правило, при пониженном начальном давлении, когда размер ячеек достаточно большой (порядка миллиметра и больше) и легко регистрируется на следовых отпечатках. С точки зрения опасности основной интерес представляют взрывы при атмосферном давлении, требующие особых способов регистрации мелкоячеистой структуры («двойная экспозиция») в топливно-кислородных смесях или крупномасштабных высокозатратных полигонных исследований для топливно-воздушных смесей. Небольшое количество экспериментальных исследований касалось измерения критической энергии инициирования. В данной работе использованы все известные на сегодняшний день экспериментальные данные об анализируемых параметрах [16–56].

Для наиболее изученного представителя непредельных углеводородов — этилена — на

рис. 2–4 представлены основные расчетные и экспериментальные зависимости. На рис. 2 показано изменение размера ячейки в стехиометрической топливно-кислородной смеси: рис. 2,а — в зависимости от начального давления  $p_0$ , рис. 2,б,в — при разбавлении этой смеси аргоном, рис. 2,г — при разбавлении азотом. Для топливно-воздушных смесей влияние концентрации этилена на размер ячейки иллюстрирует рис. 3,а. На рис. 3,б приведены данные об относительном изменении размера ячейки при варьировании начальной температуры (по сравнению с базовой). Из рис. 3,б четко видна разница в поведении  $a/a_*$  в зависимости от того, какой параметр — давление  $p_0$  или плотность  $\rho_0$  — поддерживается постоянным при изменении температуры  $T_0$ . На рис. 4 приведены аналогичные данные для критического диаметра дифракции ДВ: от начального давления (рис. 4,а), при разбавлении азотом (рис. 4,б), от концентрации этилена в топливно-воздушной смеси (рис. 4,в). Наконец, на рис. 4,г представлены данные по инициированию сферической детонации, вместо  $E_3$  даны массы инициирующих зарядов взрывчатого вещества  $m_3$  (в граммах тротила) [16–56].

Зависимости скорости детонации  $D_0$ , температуры  $T$ , давления продуктов  $p$ , удельного

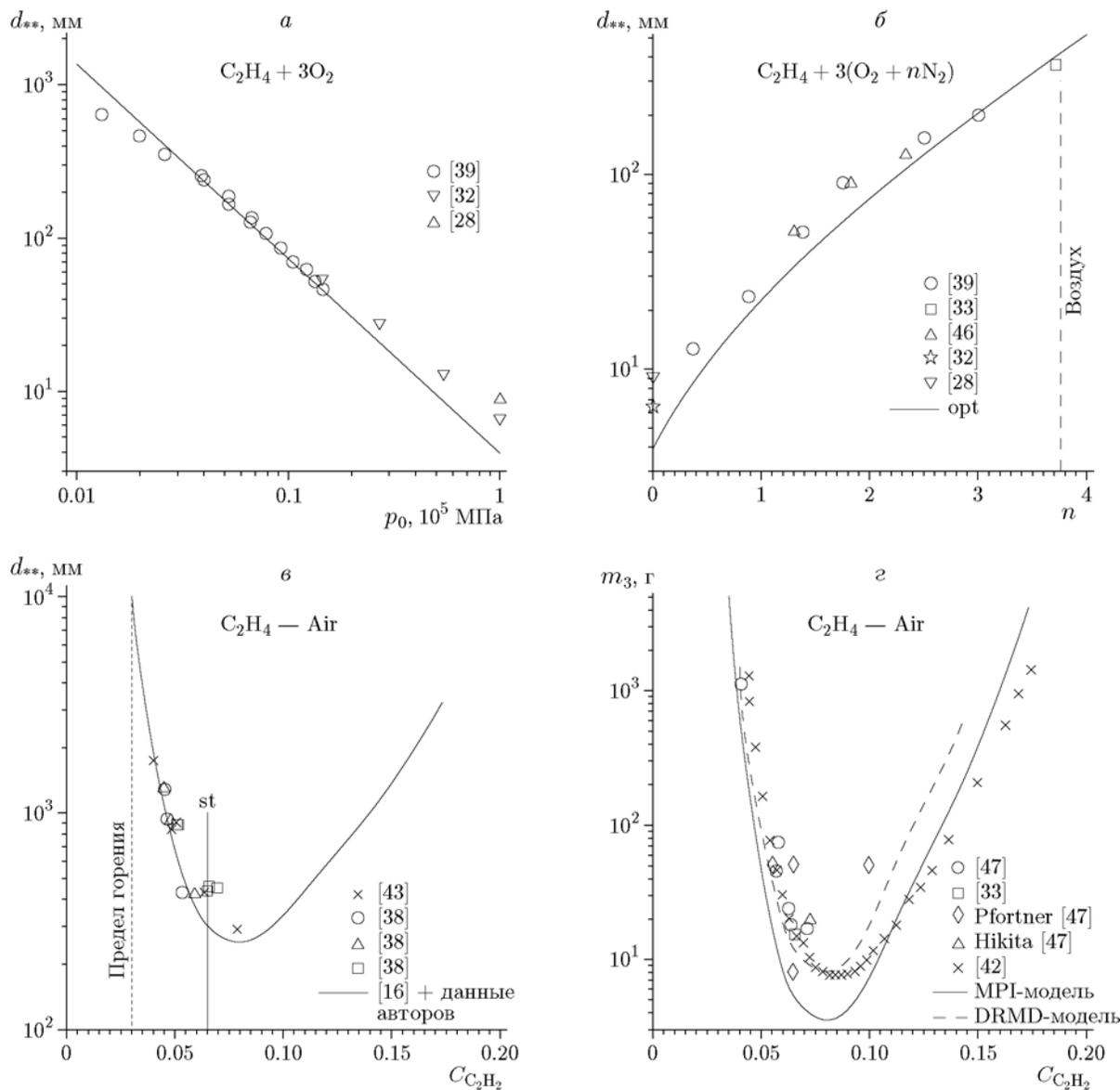


Рис. 4. Зависимость критического диаметра дифракции от начального давления (а) этиленокислородной стехиометрической смеси, от степени разбавления смеси азотом (б), от молярной концентрации этилена в смеси (в), а также зависимость массы инициирующего заряда ВВ для инициирования сферической детонации в этиленовоздушных смесях от молярной концентрации этилена в смеси (г):

точки — данные экспериментов, линии — расчет

химического энерговыделения  $Q$  от молярной концентрации топлива в смеси  $C$  имеют характерные U-образные профили с максимумами как для топливно-кислородной, так и для топливно-воздушной смеси на основе этилена, пропилена и бутилена. При этом U-образные профили размера детонационной ячейки  $a$  и критической энергии инициирования детонации  $E_*$  имеют минимумы. Для этилена на-

блюдается вполне удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных значений. К сожалению, уже для следующего представителя непредельных углеводородов — пропилена — из известных кинетических коэффициентов не удастся выбрать такие, которые продемонстрировали бы согласие с экспериментальными данными. Известные кинетические коэффициенты в лучшем случае обеспечивают согла-

Таблица 1

Смесь	$D_0$ , м/с	$P_d$	$T_d$ , К	$P_V$	$T_V$ , К	$T_p$ , К	$T_{df}$ , К	$E_3$ , Дж	$a$ , мм
$C_2H_4 + 3O_2$	2374	33.4	3937	16.9	3733	3175	3034	$2.46 \cdot 10^{-1}$	0.48
$C_3H_6 + 4.5O_2$	2353	35.8	3914	18.1	3712	3151	3013	$3.53 \cdot 10^{-1}$	0.53
$C_4H_8 + 6O_2$	2347	37.3	3909	18.8	3708	3143	3005	$5.24 \cdot 10^{-1}$	0.59
$C_5H_{10} + 7.5O_2$	2344	38.3	3906	19.3	3705	3138	3000	$6.98 \cdot 10^{-1}$	0.65
$C_6H_{12} + 9.5O_2$	2341	39	3904	19.6	3703	3134	2997	$8.71 \cdot 10^{-1}$	0.69
$C_7H_{14} + 10.5O_2$	2340	39.5	3903	19.9	3702	3132	2994	$1.04 \cdot 10^0$	0.73
$C_8H_{16} + 12O_2$	2338	39.9	3902	20.1	3701	3130	2993	$1.22 \cdot 10^0$	0.77
.....									
$C_{10}H_{20} + 15O_2$	2337	40.4	3901	20.4	3700	3127	2990	$1.80 \cdot 10^0$	0.86
.....									
$C_{20}H_{40} + 30O_2$	2333	41.6	3898	20.9	3697	3122	2985	$4.21 \cdot 10^0$	1.15
$C_2H_4$ — Air (st)	1824	18.4	2924	9.4	2734	2368	2190	$3.16 \cdot 10^4$	22
$C_3H_6$ — Air (st)	1811	18.5	2888	9.4	2698	2333	2152	$7.87 \cdot 10^4$	29.5
$C_4H_8$ — Air (st)	1806	18.6	2876	9.5	2686	2321	2138	$1.48 \cdot 10^5$	36.3
$C_5H_{10}$ — Air (st)	1804	18.6	2868	9.5	2678	2313	2130	$2.32 \cdot 10^5$	42
$C_6H_{12}$ — Air (st)	1802	18.7	2863	9.6	2672	2307	2124	$3.26 \cdot 10^5$	47
$C_7H_{14}$ — Air (st)	1801	18.7	2859	9.6	2669	2304	2120	$4.29 \cdot 10^5$	51.4
$C_8H_{16}$ — Air (st)	1800	18.7	2856	9.6	2666	2301	2117	—	—
.....									
$C_{10}H_{20}$ — Air (st)	1798	18.8	2853	9.6	2662	2297	2113	$8.19 \cdot 10^5$	63.5
.....									
$C_{20}H_{40}$ — Air (st)	1796	18.8	2845	9.6	2654	2289	2104	$2.52 \cdot 10^6$	92.3

сование лишь отдельного параметра, а не всей совокупности, и только в достаточно узкой области варьируемых параметров.

Потому для расчета параметров детонационной опасности остальных представителей ряда непредельных углеводородов был использован прием, примененный ранее для расчета предельных углеводородов [22]. Суть его в следующем: для большинства горючих систем, содержащих основные атомы С, Н, О, N, вместо кинетических данных для каждого индивидуального топлива при оценках используется схема для водородной кинетики с ведущей ролью радикала ОН (см. выше).

С водородной кинетикой были рассчитаны параметры горения и детонации непредельных углеводородов (алкенов) в смеси с кислородом

и воздухом ( $Air = O_2 + 3.76N_2$ ). В табл. 1 представлены некоторые данные для стехиометрических (по  $CO_2$ ) топливно-кислородных и топливно-воздушных смесей: скорость детонации  $D_0$ , давление  $P_d = p_d/p_0$  и температура  $T_d$  продуктов детонации, давление  $P_V$  и температура  $T_V$  продуктов мгновенного взрыва в бомбе ( $V_0 = const$ ), температура  $T_p$  продуктов горения в режиме  $p_0 = const$ , температура  $T_{df}$  дефлаграционного горения (точка касания к нижней ветви адиабаты энерговыделения), критическая энергия иницирования сферической детонации  $E_3$ , размер ячейки многофронтной детонации  $a$ .

Для полноты изложения и сравнения в табл. 2 представлены аналогичные данные для предельных углеводородов (алканов). Для при-

Таблица 2

Смесь	$D_0$ , м/с	$P_d$	$T_d$ , К	$P_V$	$T_V$ , К	$T_p$ , К	$T_{df}$ , К	$E_3$ , Дж	$a$ , мм
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$	2390	29.3	3725	14.8	3541	3053	2921	200	2.8
$\text{C}_2\text{H}_6 + 3.5\text{O}_2$	2369	34	3800	17.2	3609	3084	2950	0.54	0.6
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$	2357	36.2	3827	18.3	3634	3094	2960	0.62	0.62
$\text{C}_4\text{H}_{10} + 6.5\text{O}_2$	2350	37.5	3841	18.9	3646	3099	2964	0.78	0.67
$\text{C}_5\text{H}_{12} + 8\text{O}_2$	2346	38.4	3851	19.4	3655	3102	2967	0.76	0.66
$\text{C}_6\text{H}_{14} + 9.5\text{O}_2$	2343	39	3858	19.7	3661	3104	2969	0.93	0.7
$\text{C}_7\text{H}_{16} + 11\text{O}_2$	2342	39.5	3863	19.9	3665	3106	2971	1.33	0.79
$\text{C}_8\text{H}_{18} + 12.5\text{O}_2$	2340	39.9	3866	20.1	3669	3107	2972	1.54	0.82
.....									
$\text{C}_{10}\text{H}_{22} + 15.5\text{O}_2$	2338	40.4	3872	20.4	3674	3109	2973	3.3	1.1
* $\text{C}_{10}\text{H}_{22} + 15.5\text{O}_2$	2302	39.2	3814	19.7	3622	—	—	1.5	0.9
.....									
$\text{C}_{20}\text{H}_{42} + 30.5\text{O}_2$	2334	41.6	3883	20.9	3684	3113	2977	3.1	1.1
$\text{CH}_4 - \text{Air (st)}$	1803	17.2	2778	8.8	2585	2224	2031	$4.31 \cdot 10^3$	11.1
$\text{C}_2\text{H}_6 - \text{Air (st)}$	1802	18	2812	9.2	2620	2257	2068	$7.70 \cdot 10^4$	29.1
$\text{C}_3\text{H}_8 - \text{Air (st)}$	1800	18.2	2821	9.3	2629	2266	2078	$1.39 \cdot 10^5$	35.3
$\text{C}_4\text{H}_{10} - \text{Air (st)}$	1798	18.4	2823	9.4	2632	2268	2081	$2.23 \cdot 10^5$	41.2
$\text{C}_5\text{H}_{12} - \text{Air (st)}$	1797	18.5	2826	9.4	2635	2271	2084	$3.17 \cdot 10^5$	46.3
$\text{C}_6\text{H}_{14} - \text{Air (st)}$	1796	18.6	2828	9.5	2637	2272	2086	$4.24 \cdot 10^5$	51
$\text{C}_7\text{H}_{16} - \text{Air (st)}$	1796	18.6	2229	9.5	2638	2274	2087	$5.39 \cdot 10^5$	55.2
$\text{C}_8\text{H}_{18} - \text{Air (st)}$	1796	18.6	2830	9.5	2639	2274	2088	$6.65 \cdot 10^5$	59.2
.....									
$\text{C}_{10}\text{H}_{22} - \text{Air (st)}$	1795	18.7	2831	9.6	2640	2276	2089	$8.52 \cdot 10^5$	65.2
.....									
$\text{C}_{20}\text{H}_{42} - \text{Air (st)}$	1794	18.8	2834	9.6	2643	2278	2092	$2.48 \cdot 10^6$	92.9

мера звездочкой в табл. 2 отмечен вариант расчета для жидкого  $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$  в исходном состоянии, а строчкой выше — для газообразного состояния. Видно вполне объяснимое снижение параметров детонации, обусловленное затратами части химической энергии на фазовый переход жидкость — газ, но незначительное из-за малости энергии фазового перехода по сравнению с тепловой энергией топлива.

На рис. 5 для сравнения представлены скорости детонации, температуры и давления продуктов детонации для предельных и непредель-

ных углеводородов в стехиометрических смесях с кислородом (слева) и воздухом (справа). Видны незначительные различия детонационных скоростей в топливно-кислородной смеси, давлений в продуктах детонации топливно-кислородной и топливно-воздушной смесей, в то же время температуры в продуктах предельных и непредельных углеводородов различаются заметно (в топливно-кислородной смеси выше, чем в топливно-воздушной).

На рис. 6 для стехиометрических топливно-воздушных смесей представлены

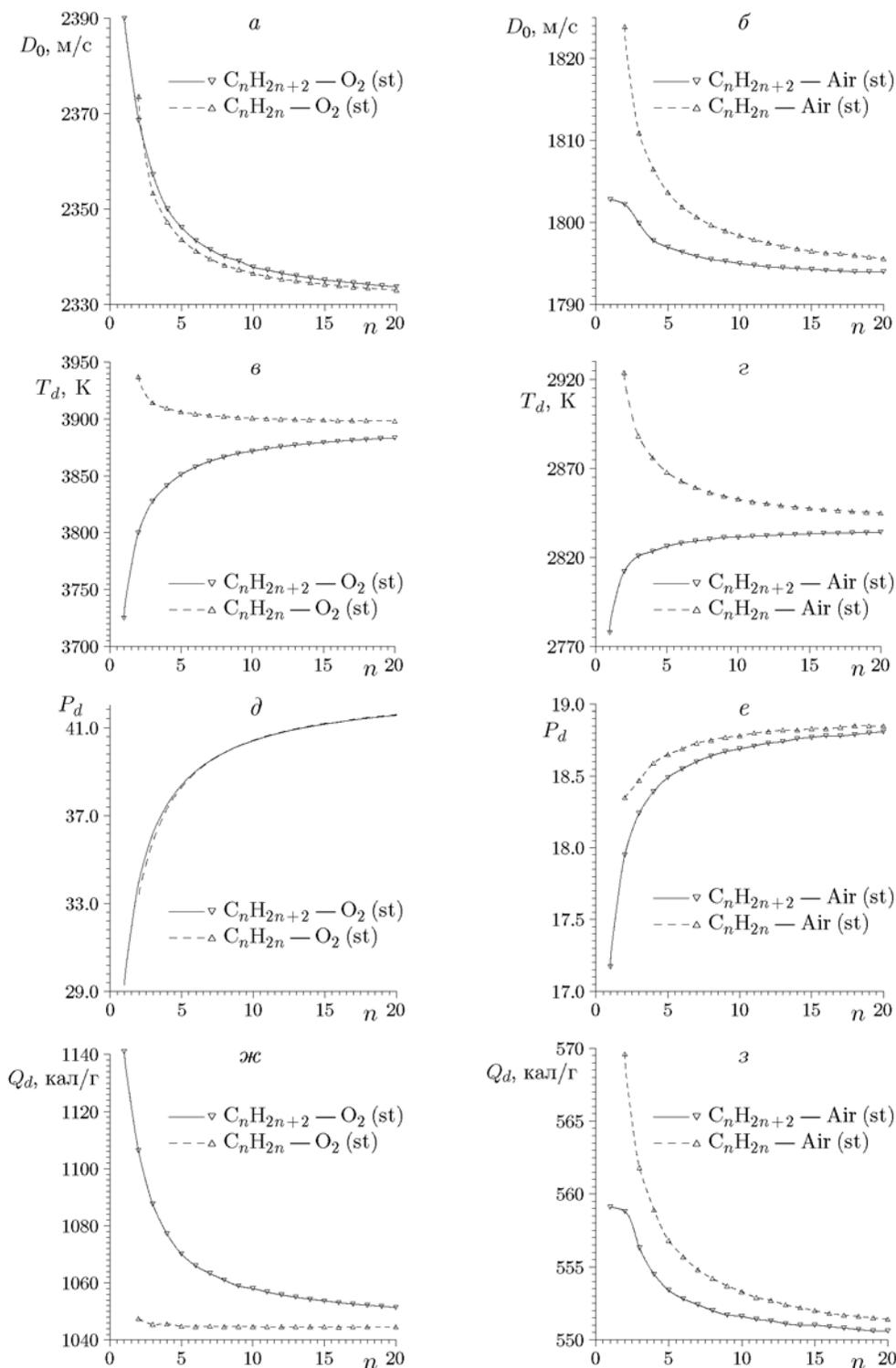


Рис. 5. Расчетные скорость детонации (*a*, *б*), температура продуктов (*в*, *г*), давление ( $P_d = p_d/p_0$ ) продуктов детонации (*д*, *е*) и энергвыделение смеси (*ж*, *з*) предельных  $C_nH_{2n+2}$  и непредельных  $C_nH_{2n}$  углеводородов в стехиометрической смеси с кислородом и воздухом в зависимости от индекса  $n$  в формуле углеводородного топлива

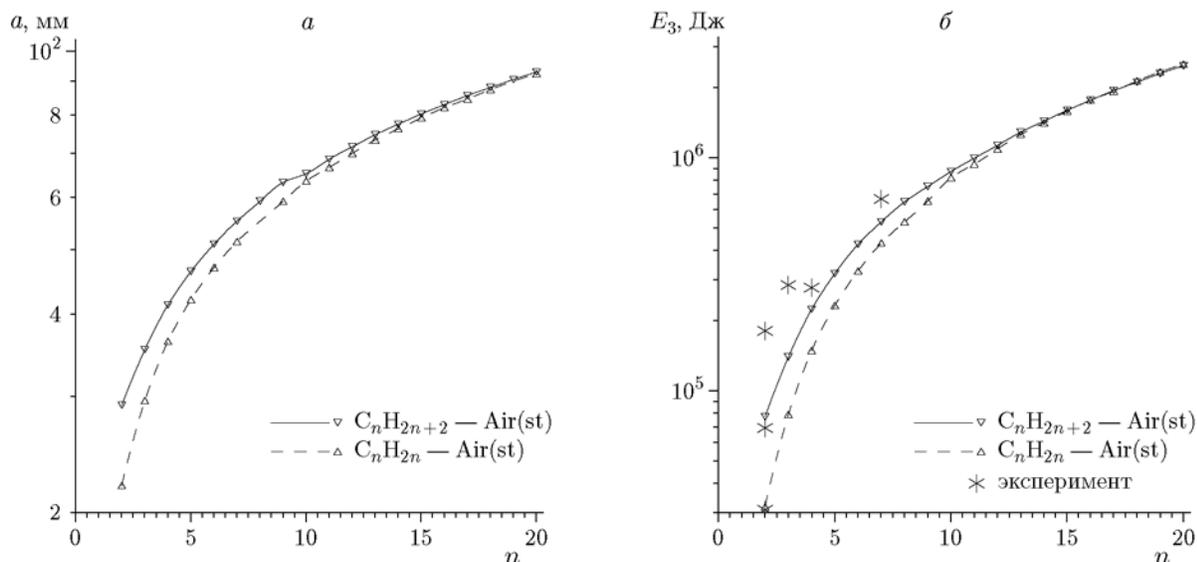


Рис. 6. Расчетные размер детонационной ячейки (а) и критическая энергия иницирования сферической детонации (б) для предельных  $C_nH_{2n+2}$  и непредельных  $C_nH_{2n}$  углеводородов в стехиометрической смеси с воздухом в зависимости от индекса  $n$  в формуле углеводородного топлива

данные расчета размера детонационной ячейки  $a$  и критической энергии иницирования сферической детонации ( $E_3$  совместно с экспериментальными точками). Видно, что совпадение расчетных и экспериментальных значений критической энергии иницирования  $E_3$  вполне удовлетворительное, что, в свою очередь, служит дополнительным аргументом в пользу корректности выбора водородной кинетики в качестве базовой для расчета параметров детонации предельных и непредельных углеводородов, особенно тяжелых. Исключение — метан с его особыми свойствами как родоначальника предельных углеводородов.

### БИОТОПЛИВА, МОНОТОПЛИВА

В данной работе представлены результаты предварительных исследований, посвященных смесям на основе биотоплива (биодизеля), как одного из альтернативных нефти и газу источников энергии. Основное требование — возможность эквивалентной замены традиционного топлива на биотопливо, без отрицательных последствий для работы двигателя. Особенность биотоплива, основой которого являются метанол и этанол, — наличие присадок, образующихся при технологической переработке различных растительных материалов (кукуруза, сахарный тростник, многолетние травы, масличная пальма, просо, быстрорастущая

ива, водоросли). Очистка биотоплива от присадок представляет собой высокочрезвычайно затратную процедуру и в настоящее время является экономически невыгодной по сравнению с производством традиционных топлив.

С учетом того, что даже для чистых метанола и этанола существуют лишь немногочисленные кинетические данные по задержке воспламенения (например, [9, 10]), наличие присадок создает основные трудности при выборе базовых коэффициентов кинетической схемы сгорания биотоплива. Эти трудности не удалось преодолеть в полной мере до сих пор, поскольку влияние большинства присадок на задержку воспламенения метанола и этанола экспериментально практически не исследовано. Более того, не всегда очевидна роль добавки с точки зрения кинетических характеристик (промотор — ингибитор — инертное вещество).

Как и для предельных и непредельных углеводородов, на первом этапе были адаптированы термодинамические данные метанола и этанола (как основных компонентов биотоплива) для области температур, типичных для горения и детонации.

На рис. 7 в качестве примера представлены параметры ДВ в смесях метанол — кислород при варьировании соотношения топливо/окислитель. На оси  $X$  отложена молярная доля (концентрация) топлива в смеси  $C_{fuel}$ . Стехиометрическая молярная концентра-

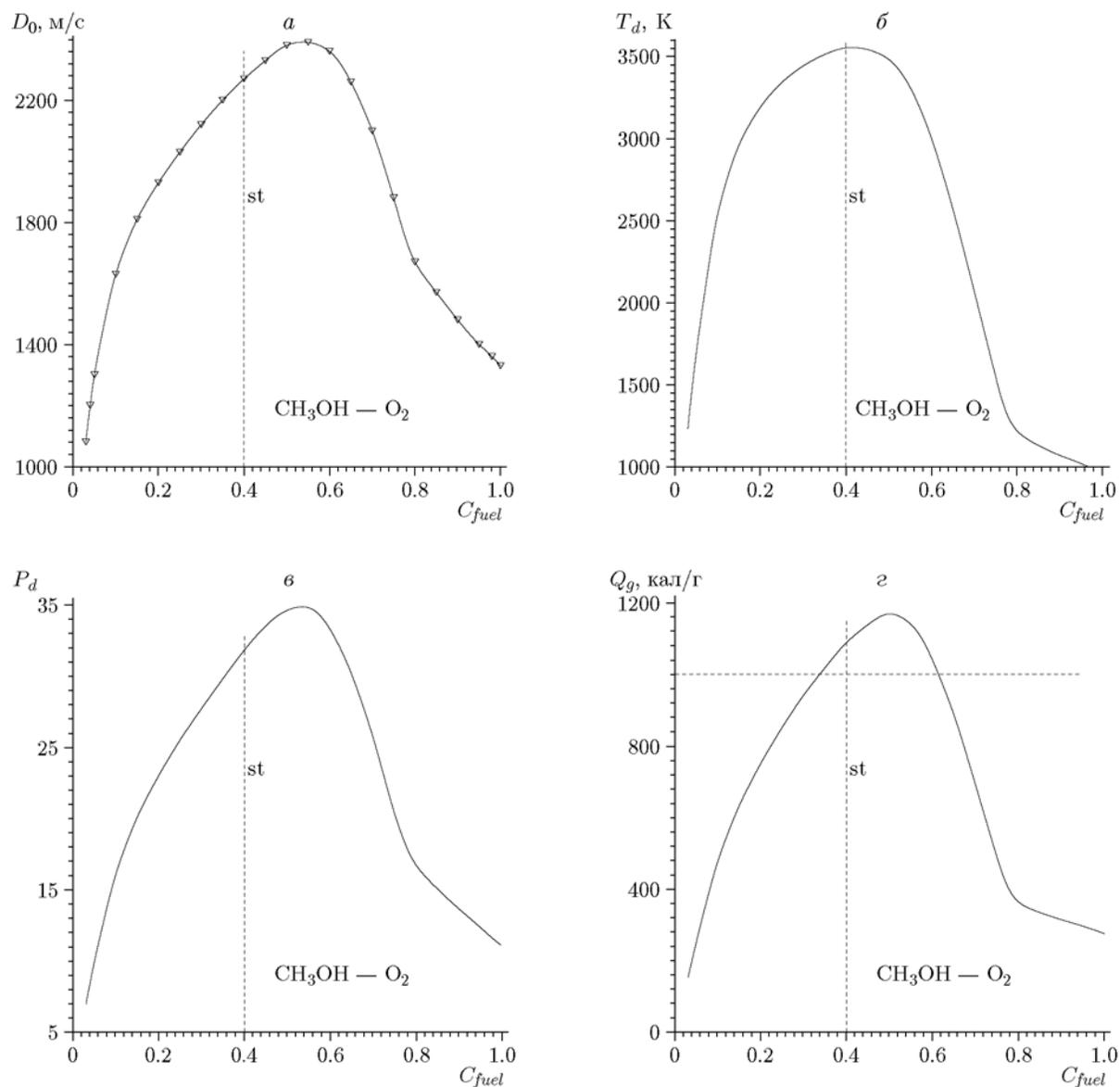


Рис. 7. Расчетные скорость детонации (а), температура продуктов (б), давление ( $P_d = p_d/p_0$ ) продуктов детонации (в) и энергосодержание смеси (г) в зависимости от молярной концентрации метанола в смеси:

пунктирные вертикальные линии соответствуют стехиометрическому составу метанола с кислородом, горизонтальная пунктирная линия  $Q = 1000$  кал/г соответствует тротиловому эквиваленту

ция метанола в смеси с кислородом при окислении до  $CO_2$   $C^* = 0.40$ , при окислении до  $CO$   $C^* = 0.50$ . Всем зависимостям присущ характерный U-образный вид с максимумами (или минимумами) вблизи стехиометрии и убыванием (или возрастанием) при удалении от стехиометрии и приближении к концентрационным пределам. Скорость ДВ, давление и температура продуктов и т. д. заметно уменьшаются при переходе к пределам, в то время как размер

ячейки и критические энергии инициирования заметно возрастают. Для этанола и пропанола наблюдается аналогичный (качественно) характер зависимостей, представленных на рис. 7 для метанола (с некоторым сдвигом вдоль осей: этанол  $C^* = 0.25$ , пропанол  $C^* = 0.18$ ).

В табл. 3 представлены некоторые данные по скорости детонации  $D_0$ , температуре продуктов  $T_d$ , давлению продуктов  $p_d$ , удельному энергосодержанию  $Q_g$  для смесей метана, мета-

Таблица 3

Смесь	$D_0$ , м/с	$T_d$ , К	$P_d$	$Q_g$ , кал/г
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$	2390	3725	29.3	1140
$\text{CH}_3\text{OH} + 1.5\text{O}_2$	2270	3549	31.8	1092
$\text{CH}_3\text{OH} + 1.5\text{O}_2 + 0.25\text{N}_2\text{O}$	2224	3525	31.5	1029
$\text{CH}_3\text{OH} + 1.5\text{O}_2 + 0.25\text{NH}_3$	2327	3532	31.9	1134
$\text{CH}_3\text{OH} + 1.5\text{O}_2 + 0.25\text{H}_2\text{S}$	2117	3318	29.3	1139
$\text{CH}_3\text{OH} - \text{Air (st)}$	1802	2756	18.2	576
$\text{CH}_4 - \text{Air (st)}$	1801	2780	17.2	555
$\text{CH}_3\text{OH}$	1327	964	11.1	275
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	1158	886	12.4	239
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3\text{O}_2$	2286	3680	35.6	1074
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3\text{O}_2 + 0.4\text{NH}_3$	2337	3657	35.5	1115
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} - \text{Air (st)}$	1792	2780	18.4	561
$\text{C}_2\text{H}_6 - \text{Air (st)}$	1802	2812	18	559
$\text{C}_2\text{H}_6 + 3.5\text{O}_2$	2369	3801	34	1084

нола, этана, этанола с добавками аммиака, азота, сероводорода. Следует отметить, что чистые метанол и этанол способны детонировать без присутствия кислорода или воздуха, т. е. являются монотопливными с положительным энерговыделением. Такие добавки интересны с точки зрения возникновения бифуркационных ячеистых структур (см. [23, 25, 27]).

Стехиометрические смеси метана и метанола с кислородом при одинаковом количестве атомов С, Н, О в исходной смеси демонстрируют заметные различия в параметрах детонации. В воздушных смесях различия существенно меньше. По-разному влияют и добавки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Представлены новые данные о параметрах горения и детонации смесей непредельных углеводородов  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$  (от этилена ( $n = 2$ ) до эйкозена ( $n = 20$ )) с кислородом и воздухом.

- Из-за отсутствия кинетических данных о задержке воспламенения значительного большинства непредельных водородов в качестве базовой для оценок размера детонационных ячеек и критической энергии инициирования выбрана водородная кинетика с ведущей ролью радикала  $\text{OH}$ . Сравнение расчетных и экспериментальных величин подтвердило корректность подобного подхода.

- Представлены новые расчетные данные о параметрах горения и детонации смесей метанола (этанол) с кислородом и воздухом в широком диапазоне начальных параметров (концентрации топливных компонентов и стехиометрического соотношения, давления, температуры).

- Представлены новые расчетные данные для смесей метанол (этанол) — кислород (воздух) — добавки  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ . Эти добавки могут быть перспективными с точки зрения бифуркационных структур.

- Расчетные значения основных параметров, включая размер детонационных ячеек, критический диаметр «дифракции», критическую энергию инициирования, хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными, что свидетельствует о правомерности замены кинетики индивидуальных углеводородов на водородную кинетику в гомологических рядах алканов и алкенов.

- Полученные данные о параметрах горения и детонации, критических условиях инициирования, составе продуктов и т. д. являются новыми страницами банка взрывоопасности горючих смесей.

- Программа «Безопасность» может быть рекомендована к широкому использованию при расчетах газодинамических течений, сопро-

вождаемых химическими реакциями, в области давлений и температур, характерных для процессов горения как традиционно используемых, так и перспективных топлив. Программа постоянно пополняется новыми термодинамическими, кинетическими и экспериментальными данными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гурвич Л. В., Хачкурузов Г. А., Медведев В. Ф. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справочник / под ред. В. П. Глушко. — М.: Изд-во Академии наук, 1962.
2. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справ. изд. В 4 т. / под ред. В. П. Глушко. — М.: Наука, 1979. — Т. I–II.
3. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П., Худяков В. А. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник. Т. I: Методы расчета / под ред. В. П. Глушко. — М.: ВИНТИ, 1971.
4. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник в 5 т. — М.: ВИНТИ АН СССР, 1971.
5. Вукалович М. П., Кириллин В. А., Ремизов С. А. Термодинамические свойства газов. — М.: ГНТИ машиностроительной и судостроительной литературы, 1953.
6. Сталл Д., Вестрам Э., Зинке Г. Химическая термодинамика органических соединений. — М.: Мир, 1971.
7. Киреев В. А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. — М.: Химия, 1970.
8. Вестбрук Ч., Уртъев П. Применение химической кинетики для определения критических параметров газовой детонации // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 6. — С. 65–76.
9. Заманский В. М., Борисов А. А. Механизм и прототипирование самовоспламенения перспективных топлив // Итоги науки и техники. Сер. Кинетика. Катализ. — М.: ВИНТИ, 1989.
10. Zamansky V. M., Borisov A. A. Promotion of high-temperature self-ignition // Prog. Energy Combust. Sci. — 1992. — V. 18. — P. 297–325.
11. Бабушок В. И., Дакданча А. Н. Глобальные кинетические параметры для высокотемпературных газофазных реакций // Физика горения и взрыва. — 1993. — Т. 29, № 4. — С. 48–80.
12. Варнатц Ю., Маас У., Дибл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. — М.: Физматлит, 2003.
13. Vasil'ev A. A., et al. Correctness of kinetic data for prediction of multifront detonation: effect of nitrogen // CD: Proc. of the 21st ICDERS, Poitiers, France, 2007.
14. Васильев А. А. Задержка воспламенения в многотопливных смесях // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 3. — С. 42–46.
15. Васильев А. А. О надежности кинетических данных при использовании их в оценках параметров многофронтной детонации // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 3. — С. 89–94.
16. Vasil'ev Anatoly A. Dynamic parameters of detonation // Shock Wave Science and Technology Reference Library. V. 6: Detonation Dynamics / F. Zhang (Ed.). — Springer, 2012.
17. Vasil'ev A. A. Detonation hazards of gaseous mixtures // Prevention of Hazardous Fires and Explosions. The Transfer to Civil Applications of Military Experiences / V. E. Zarko et. al. (Eds). — Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1999. — P. 93–108.
18. Vasil'ev A. A., Valishev A. I., Vasil'ev V. A., Panfilova L. V., Topchian M. E. Hydrogen accidents and their hazard // Prevention of Hazardous Fires and Explosions. The Transfer to Civil Applications of Military Experiences / V. E. Zarko, V. Weiser, N. Eisenreich, A. A. Vasil'ev (Eds). — Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1999. — P. 151–165.
19. Васильев А. А., Валишев А. И., Васильев В. А., Панфилова Л. В. Характеристики горения и детонации гидразина и его метилпроизводных // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 3. — С. 81–96.
20. Васильев А. А. Детонационные свойства синтез-газа // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 6. — С. 90–96.
21. Васильев А. А. Энергетические аспекты иницирования бытовых газов // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 1. — С. 96–101.
22. Васильев А. А. Детонационные свойства предельных углеводородов // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 6. — С. 82–90.
23. Васильев А. А., Васильев В. А., Троцюк А. В. Бифуркационные структуры газовой детонации // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 2. — С. 88–100.
24. Vasil'ev A. A., Vasiliev V. A. Hazards of hydrogen and synthetic gas // Explosion dynamics and hazards / S. M. Frolov, F. Zhang, P. Wolanski (Eds). — Moscow: Torus Press, 2010.
25. Васильев А. А. Монотопливо как источник бифуркационных свойств многотопливных систем // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 2. — С. 14–23.
26. Васильев А. А. Ячеистые структуры многофронтной детонационной волны и иницирование (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 9–30.
27. Васильев А. А., Васильев В. А. Иницирование многотопливных смесей с бифуркационными структурами // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 6. — С. 3–12.

28. **Зельдович Я. Б., Когарко С. М., Симонов Н. Н.** Экспериментальное исследование сферической газовой детонации // Журн. техн. физики. — 1956. — Т. 26, № 8. — С. 1744–1768.
29. **Когарко С. М., Адушкин В. В., Лямин А. Г.** Исследование сферической детонации газовых смесей // Физика горения и взрыва. — 1965. — Т. 1, № 2. — С. 22–34.
30. **Strehlow R. A., Engel C. D.** Transverse waves in detonation: II. Structure and spacings in  $H_2-O_2$ ,  $C_2H_2-O_2$ ,  $C_2H_4-O_2$  and  $CH_4-O_2$  systems // AIAA J. — 1969. — V. 7, N 3. — P. 492–496.
31. **Edwards D. H., Hooper G., Morgan J. M.** An experimental investigation of the direct initiation of spherical detonation // Acta Astronaut. — 1976. — V. 3, N 1-2. — P. 117–130.
32. **Matsui H., Lee J. H.** On the measure of the relative detonation hazards of gaseous fuel-oxygen and air mixtures // Symp. (Int.) Combust. — 1979. — V. 17, N 1. — P. 1269–1280.
33. **Bull D. C., Elsworth I. E., Hooper G.** Initiation of spherical detonation in hydrocarbon-air mixtures // Acta Astronaut. — 1978. — V. 5, N 11. — P. 997–1008.
34. **Murray S. B., Gottlieb J. J., Coffey C., Moen I. O., Lee J. H., Remboutsikas D.** Direct initiation of detonation in unconfined ethylene-air mixtures — Influence of bag size // 7th Symp. Mil. App. Blast Sim. — 1982. — P. 6.3(b)(1–28).
35. **Moen I. O., Donato M., Knystautas R., Lee J. H.** The influence of confinement on the propagation of detonations near the detonability limits // Symp. (Int.) Combust. — 1981. — V. 18, N 1. — P. 1615–1622.
36. **Bull D. C.** Towards an understanding of the detonability of vapour clouds // Fuel-Air Explosions: Proc. Int. Conf. on Fuel-Air Explosions / J. H. S. Lee, C. M. Guirao (Eds). — Univ. of Waterloo Press, 1982.
37. **Bull D. C., Elsworth J. E., Shuff P. J., Metcalfe E.** Detonation cell structures in fuel/air mixtures // Combust. Flame. — 1982. — V. 45, N 1. — P. 7–22.
38. **Moen I. O., Murray S. B., Bjerketvedt D., Rinnan A., Knystautas R., Lee J. H.** Diffraction of detonation from tubes into a large fuel-air explosive cloud // Symp. (Int.) Combust. — 1982. — V. 19, N 1. — P. 635–644.
39. **Knystautas R., Lee J. H., Guirao C. M.** The critical tube diameter for detonation failure in hydrocarbon-air mixtures // Combust. Flame. — 1982. — V. 48. — P. 63–83.
40. **Lee J. H., Knystautas R., Guirao C.** The link between cell size, critical tube diameter, initiation energy and detonability limits // Fuel-Air Explosions: Proc. Int. Conf. on Fuel-Air Explosions / J. H. S. Lee, C. M. Guirao (Eds). — Univ. of Waterloo Press, 1982.
41. **Benedick W. B.** Review of large scale fuel-air explosion tests and techniques // Fuel-Air Explosions: Proc. Int. Conf. on Fuel-Air Explosions / J. H. S. Lee, C. M. Guirao (Eds). — Univ. of Waterloo Press, 1982.
42. **Elsworth J. E., Shuff P. J., Ungut A.** «Galloping» gas detonations in the spherical mode // Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations. — N.-Y., 1983. — P. 130–150. — (Prog. Astronaut. Aeronaut.; V. 94).
43. **Knystautas R., Guirao C., Lee J. H., Sulmistras A.** Measurement of cell size in hydrocarbon-air mixtures and predictions of critical tube diameter, critical initiation energy and detonation limits // Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations. — N.-Y., 1983. — P. 23–37. — (Prog. Astronaut. Aeronaut.; V. 94).
44. **Murray S. B., Lee J. H.** On the transformation of planar detonations to cylindrical detonation // Combust. Flame. — 1983. — V. 52, N 3. — P. 269–289.
45. **Murray S. B., Lee J. H.** The influence of yielding confinement on large-scale ethylene-air detonations // Prog. Astronaut. Aeronaut. — 1984. — V. 94. — P. 80–103.
46. **Liu Y. K., Lee J. H., Knystautas R.** Effect of geometry on the transmission of detonation through an orifice // Combust. Flame. — 1984. — V. 56, N 2. — P. 215–225.
47. **Benedick W. B., Guirao C. M., Knystautas R., Lee J. H.** Critical charge for the direct initiation of detonation in gaseous fuel-air mixtures // Prog. Astronaut. Aeronaut. — 1986. — V. 106. — P. 181–202.
48. **Murray S. B., Lee J. H.** The influence of physical boundaries on gaseous detonation waves // Prog. Astronaut. Aeronaut. — 1986. — V. 106. — P. 329–355.
49. **Borisov A. A., Khomic S. V., Mikhalkin V. N.** Detonation of unconfined and semiconfined charges of gaseous mixtures // Prog. Astronaut. Aeronaut. — 1991. — V. 133. — P. 118–132.
50. **Borisov A. A., Khomic S. V., Mikhalkin V. N., Saneev E. V.** Critical energy of direct detonation initiation in gaseous mixtures // Prog. Astronaut. Aeronaut. — 1991. — V. 133. — P. 142–155.
51. **Tieszen S. R., Stamps D. W., Westbrook C. K., Pitz W. J.** Gaseous hydrocarbon-air detonations // Combust. Flame. — 1991. — V. 84, N 3. — P. 376–390.
52. **Алексеев С. П., Мацуков Д. И., Яхимович В. Н.** Детонационная ячейка в неограниченном бензиновоздушном аэрозоле // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28, № 5. — С. 92–96.
53. **Kaneshige M., Shepherd J.** Detonation Database. — California Inst. of Technology, 1997.
54. **Austin J. M., Shepherd J. E.** Detonations in hydrocarbon fuel blends // Combust. Flame. — 2003. — V. 132. — P. 73–90.

55. **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: Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 2004.
56. **Vasil'ev A. A.** Cell size as the main geometric parameter of multifront detonation wave // J. Propul. Power. — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1245–1260.

*Поступила в редакцию 09.01.2020.  
Принята к публикации 19.02.2020.*

---