

УДК 662.612.31

## ВАЛИДАЦИЯ УПРОЩЕННОГО КИНЕТИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ НАКЛОННЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В АЦЕТИЛЕНОКИСЛОРОДНЫХ СМЕСЯХ

И. А. Бедарев, В. М. Темербеков

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,  
630090 Новосибирск, bedarev@itam.nsc.ru

Представлена методология расчета задачи об иницировании детонации в ацетиленокислородных смесях сферой малого диаметра, летящей со скоростью, превышающей скорость детонации Чепмена — Жуге. Выполнено тестирование приведенной кинетической схемы химических реакций по экспериментальным данным о времени задержки воспламенения, скорости распространения детонации и размерах детонационной ячейки смеси. В экспериментах реализованы режимы наклонной детонации и горения ацетиленокислородной смеси, разбавленной аргоном, в диапазоне давления смеси  $21.1 \div 60.7$  кПа. Проведена оценка энергии иницирования детонации быстролетящим телом, которая показала соответствие аналитических, расчетных и экспериментальных данных. На основе этой оценки выполнены расчеты иницирования наклонной детонации быстролетящим телом в ацетиленовоздушной смеси. Получена корреляция между реализуемыми численно режимами течения и аналитическими оценками.

Ключевые слова: быстролетящее тело, наклонная детонация, численное моделирование, детонационная ячейка, ацетилен — кислород, ацетилен — воздух, энергия иницирования.

DOI 10.15372/FGV2023.9409

EDN IIWTUO

### ВВЕДЕНИЕ

Настоящее исследование является продолжением работ [1–3], в которых иницирование детонации быстролетящим телом (БЛТ) осуществлялось в водородокислородных смесях. На этих задачах были отлажены численный алгоритм и математическая модель в рамках программного комплекса ANSYS Fluent, а также приведенная кинетическая схема химических реакций горения и детонации водорода в кислороде.

Актуальность исследований данной задачи связана с определением условий иницирования и стабилизации детонации, поиском стационарных решений, нахождением зависимости установившейся скорости распространения от начальных условий [4]. Подобного рода исследованиям посвящено множество работ, берущих свое начало с середины прошедшего столетия и продолжающихся по сей день [5–9]. Во многих исследованиях таких задач в качестве рабочего газа используются водородокислородные смеси. При этом, несмотря на общую тенденцию к декарбонизации, существует необходимость создания и отладки численных алгоритмов и упрощенных кинетических схем для углеводородов и, в частности, для таких газов, как ацетилен. Этот газ и его смеси применяются для газовой сварки, резки металлов, в качестве источника света, для получения технического углерода, уксусной кислоты, этилового спирта, различных растворителей, пластмасс, каучука и т. д. [10]. Сжиганием ацетилена также получают различные формы углерода [11–13], в том числе

ультрадисперсного и нанодисперсного углерода, образующегося при детонационном горении [14, 15]. Ацетиленокислородные смеси также используются для детонационного напыления различных материалов [16]. Авторы цитированных выше и многих других работ отмечают, что использование смесей на основе ацетилена требует строгого соблюдения техники безопасности в связи с высокой детонационной способностью ацетилена как в смеси с окислителем [17], так и без него [18].

Таким образом, актуальным представляется изучение вопросов взрыво- и пожаробезопасности при использовании ацетиленсодержащих соединений [19], в частности численное моделирование горения и детонации ацетилена, а также создание и отладка кинетических схем химических реакций его горения [20]. Решение этих задач позволит в будущем проводить расчеты сложных явлений при горении и детонации ацетиленсодержащих смесей и получать достоверные результаты с максимальной экономией расчетных ресурсов.

Опыт предыдущих исследований [21] показал, что для адекватного воспроизведения экспериментальных картин течения и получения достоверных численных результатов [1, 2] вполне возможно использовать простые кинетические схемы с одной реакцией. Такой подход позволяет существенно экономить вычислительные ресурсы и проводить большее количество вариантов расчетов по сравнению с использованием детальных механизмов. Таким образом, целью настоящей работы является создание численного алгоритма расчета детонационных течений с использованием упрощенного одностадийного кинетического механизма горения ацетилена с кислородом и воздухом. Решение этой задачи позволит в будущем получать достоверные результаты по горению и детонации ацетиленсодержащих смесей с максимальной экономией расчетных ресурсов.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ

Моделирование проводилось в двумерной осесимметричной постановке с использованием уравнений Навье — Стокса для многокомпонентной смеси:

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \vec{j}_i + \chi_i, \quad i = 1, \dots, 4, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \left( k \nabla T - \sum_{i=1}^n h_i \vec{j}_i + \bar{\tau} \vec{v} \right). \quad (3)$$

Здесь  $\rho$  — плотность;  $\vec{v}$  — вектор скорости;  $Y_i$  — массовая концентрация  $i$ -го компонента смеси;  $p$  — статическое давление;  $k$  — теплопроводность;  $h$  — энтальпия;  $\vec{j}_i$  — диффузионный поток  $i$ -го компонента газовой смеси;  $\chi_i$  — источниковый член за счет химической реакции;  $\bar{\tau}$  — тензор напряжений, выражаемый как

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{v} I \right],$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость,  $I$  — единичный тензор; дифференциальный оператор  $\nabla$  задается для двумерного случая осевой симметрии;  $E$  — полная энергия, определяемая в виде

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2};$$

$h$  — энтальпия смеси, рассчитываемая через сумму энтальпий образования отдельных компонентов:

$$h = \sum_{i=1}^n Y_i h_i, \quad h_i = \int_{T_0}^T c_{p,i} dT,$$

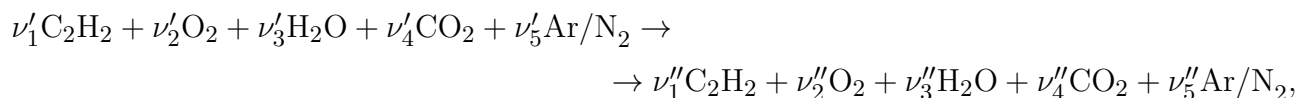
$Y_i$ ,  $h_i$  и  $c_{p,i}$  — массовая концентрация, энтальпия и теплоемкость  $i$ -го компонента смеси.

Эта система уравнений дополнялась уравнением состояния многокомпонентного идеального газа:

$$p = \rho \frac{R}{M_w} T,$$

а также SST-модификацией  $k$ - $\omega$ -модели турбулентности. Здесь  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $M_w$  — молярная масса смеси газов.

Химические превращения описывались с помощью приведенной кинетической схемы горения ацетилена. Эта схема аналогична разработанному и отлаженному авторами ранее упрощенному механизму горения водорода [21, 22]. Для используемой в настоящей работе кинетики горение смеси ацетилена и кислорода описывалось одной интегральной необратимой брутто-реакцией:



где  $\nu$  — стехиометрические коэффициенты, определяющие состав смеси:  $\nu'_1 = 1$ ,  $\nu'_2 = 2.5$ ,  $\nu'_3 = \nu'_4 = 0$ ,  $\nu''_1 = \nu''_2 = 0$ ,  $\nu'_3 = 1$ ,  $\nu'_4 = 2$ ,  $\nu'_5 = \nu''_5 = 3.5$  (для Ar),  $\nu'_5 = \nu''_5 = 9.5$  (для N<sub>2</sub>). Уравнения химической кинетики можно записать в следующем виде:

$$\chi_i = -\nu_i \mu_i \chi, \quad i = 1, \dots, 4, \quad (4)$$

$\nu_i = \nu'_i - \nu''_i$ ,  $\mu_i$  — молярная масса  $i$ -го компонента, г/моль,  $\chi$  — скорость химической реакции, зависящая от плотности, концентрации и температуры смеси,  $\chi = kT^w \left(\frac{\rho Y_1}{\mu_1}\right)^m \left(\frac{\rho Y_2}{\mu_2}\right)^n \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ . Константами, которые нужно определить в этой модели, являются:  $k$  — предэкспоненциальный множитель,  $E_a$  — энергия активации,  $m$ ,  $n$ ,  $w$  — показатели степени,  $Q$  — теплота химической реакции.

Задача решалась в пакете ANSYS Fluent. Для аппроксимации по времени использовалась неявная схема второго порядка, для пространственной аппроксимации — противопотоковая схема второго порядка, метод расщепления вектора потока — AUSM. С целью экономии вычислительных ресурсов в расчетах использовалась подвижная адаптивная сетка, которая сгущалась по градиенту плотности.

## 2. ВАЛИДАЦИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Для корректного моделирования задач об инициировании детонации необходимо отладить используемую кинетическую схему химических реакций по времени задержки воспламенения  $t_{ign}$ , скорости детонационной волны  $D$ , а также по размеру  $\lambda$  детонационной ячейки смеси. Правильное воспроизведение этих параметров позволяет получать сложные режимы течения, наблюдаемые экспериментально. На рис. 1 представлены результаты верификации описанной выше кинетической схемы по экспериментальной [23–26] зависимости времени задержки воспламенения стехиометрической ацетиленокислородной смеси, разбавленной аргоном или азотом, от температуры  $T$ . Отметим, что эксперименты [24, 26]

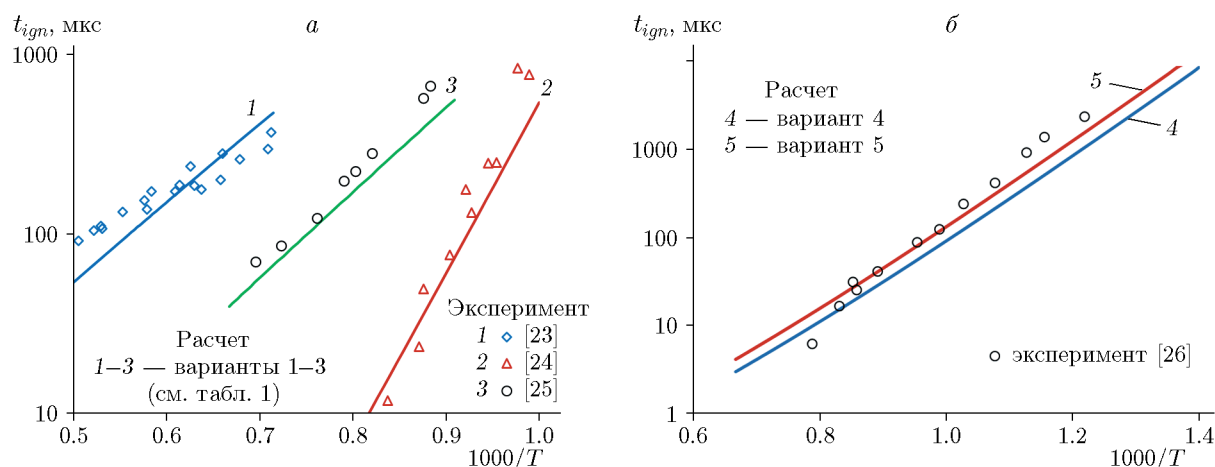


Рис. 1. Валидация кинетической схемы по экспериментальным данным о времени задержки воспламенения ацетиленокислородной смеси, разбавленной аргоном (а) [23–25], и ацетиленовоздушной смеси [26] (б)

Таблица 1

Константы кинетической схемы в различных вариантах расчета

| Вариант расчета | $k$              | $E_a$ , кДж/моль | $m$  | $n$  | $w$ |
|-----------------|------------------|------------------|------|------|-----|
| 1               | $3.0 \cdot 10^6$ | 100              | 0.95 | 0.9  | 1.1 |
| 2               | $2.0 \cdot 10^6$ | 120              | 0.95 | 0.9  | 1.1 |
| 3               | $1.8 \cdot 10^7$ | 110              | 0.95 | 0.9  | 1.1 |
| 4               | $1.8 \cdot 10^6$ | 110              | 0.95 | 0.9  | 1.1 |
| 5               | $0.8 \cdot 10^6$ | 110              | 0.9  | 0.85 | 1.1 |

проводились при повышенных давлениях  $p$ . Значения констант для всех расчетных случаев приведены в табл. 1. Показано, что варьированием этих констант при заданных массовых концентрациях и температуре можно получить хорошее согласование расчетных и экспериментальных значений времени задержки воспламенения.

Далее проводился подбор тепловыделения реакции для корректного моделирования скорости распространения детонационной волны (ДВ). На рис. 2 представлена зависимость скорости ДВ от массового содержания ацетилена в воздухе, построенная по экспериментальным [27] и расчетным данным. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что корректное предсказание скорости детонации возможно как при меняющихся в зависимости от температуры значениях коэффициентов теплоемкости, так и при постоянных ее значениях. В случае независимости теплоемкости от температуры энтальпия образования веществ умножалась на коэффициент 0.56, а в случае зависимости теплоемкости от температуры — на 0.71. Подбор тепловыделения позволяет правильно воспроизводить скорость ДВ в бедных и стехиометрических смесях, а для богатых смесей расчетные значения скорости оказываются заниженными. Также проведена валидация по скорости распространения ДВ в ацетиленокислородной смеси, разбавленной аргоном. Нужно отметить, что тепловыделение следует корректировать при изменении химического состава смеси. В экспериментальной работе [28] приведены результаты измерения скорости ДВ в ацетиленокислородной смеси при начальном давлении  $21 \div 61$  кПа. Ни-

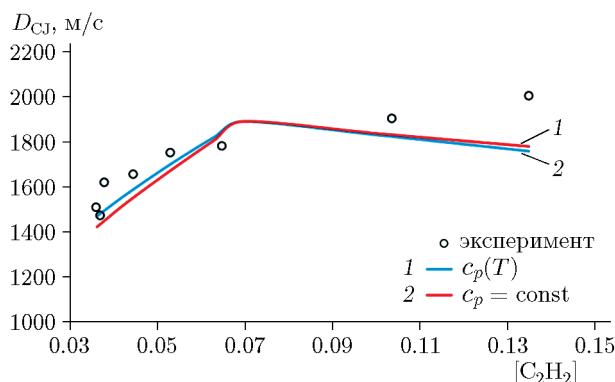


Рис. 2. Зависимость скорости распространения детонационной волны в ацетилено-воздушной смеси от массового содержания  $C_2H_2$

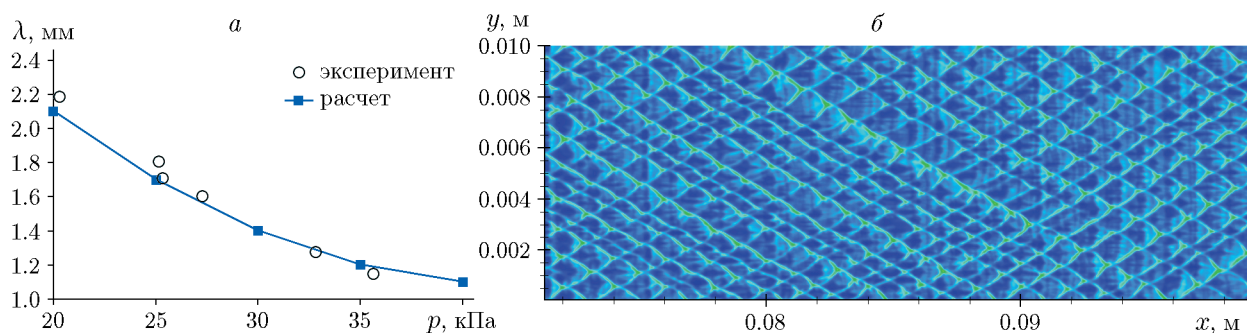


Рис. 3. Зависимость размера детонационной ячейки ацетиленокислородной смеси, разбавленной аргоном, от начального давления (а) и поля максимумов плотности ацетиленокислородной смеси, разбавленной аргоном, при  $p_{st} = 40$  кПа (б)

же, в § 3, будет проведено сравнение расчетных данных с результатами эксперимента, которое демонстрирует в том числе корректное предсказание скорости распространения детонации в стехиометрической ацетиленокислородной смеси, разбавленной аргоном. Кроме того, для подбора тепловыделения можно использовать результаты расчетов скорости ДВ с применением детальных кинетических схем.

Выполнена валидация кинетической схемы и алгоритма расчета размера детонационной ячейки. Из рис. 3 следует, что для стехиометрической ацетиленокислородной смеси, разбавленной аргоном, результаты измерения размера детонационной ячейки в экспериментах [29] при различных начальных давлениях хорошо согласуются с расчетом. На рис. 3 представлены траектории тройных точек в ацетиленокислородной смеси при начальном давлении 40 кПа. Видно, что в результате расчета удается добиться не только правильного

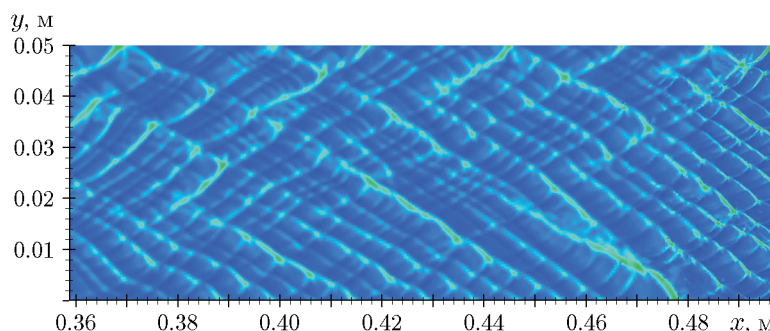
Таблица 2

| Размеры детонационной ячейки в ацетиленовоздушной смеси |        |              |                |                |          |
|---------------------------------------------------------|--------|--------------|----------------|----------------|----------|
| Смесь                                                   | $\phi$ | $T_{st}$ , К | $p_{st}$ , кПа | $\lambda$ , мм | Источник |
| $C_2H_2$ + воздух                                       | 1      | 293          | 101.3          | 9.2            | [30]     |
| $C_2H_2$ + воздух                                       | 1.03   | 293          | 101.3          | 5.8            | [31]     |
| $C_2H_2$ + воздух                                       | 1      | 298.15       | 101.3          | 5.3            | [32]     |

Таблица 3

Размеры детонационной ячейки в стехиометрической  
ацетиленокислородной смеси, разбавленной азотом

| Смесь                | $K$ , % | $T_{st}$ , К | $p_{st}$ , кПа | $\lambda$ , мм | Источник |
|----------------------|---------|--------------|----------------|----------------|----------|
| $C_2H_2 + O_2 + N_2$ | 74.7    | 293          | 101.3          | 11.4           | [33]     |
| $C_2H_2 + O_2 + N_2$ | 73.4    | 293          | 101.3          | 12.2           | [34]     |
| $C_2H_2 + O_2 + N_2$ | 75.2    | 293          | 101.3          | 11.9           | [35]     |

Рис. 4. Поля максимумов плотности ацетиленовоздушной смеси при  $p_{st} = 100$  кПа

размера детонационной ячейки, но и получить достаточно регулярную ячеистую структуру, характерную для смесей, сильно разбавленных аргоном.

Для ацетиленовоздушной смеси (ацетиленокислородной, разбавленной азотом) не удалось найти экспериментальных данных при различных начальных давлениях. В табл. 2, 3 представлены данные о размерах  $\lambda$  детонационной ячейки в ацетиленовоздушной смеси при начальном давлении 101.3 кПа [30–32] и в стехиометрической ацетиленокислородной смеси, разбавленной азотом до значений, близких к воздуху [33–35]. Анализ этих данных ( $\phi$  — коэффициент избытка топлива,  $p_{st}$ ,  $T_{st}$  — начальное давление и температура,  $K$  — степень разбавления) позволяет сделать вывод о значительной нерегулярности детонационной ячейки в ацетиленовоздушной смеси, размер ячейки варьируется от 5 до 12 мм. На рис. 4 представлены траектории тройных точек для ацетиленовоздушной смеси при начальном давлении 100 кПа. Результаты расчета показывают наличие нерегулярности детонационной ячейки, диапазон ее размеров  $5 \div 10$  мм.

В результате валидации кинетической схемы химических реакций горения ацетилена в кислороде получены следующие значения констант:  $k = 1.8 \cdot 10^9$ ,  $E_a = 110$  кДж/моль,  $w = 1.1$ ,  $m = 0.95$ ,  $n = 0.9$ .

### 3. РЕЖИМЫ НАКЛОННЫХ ДВ И ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ

Для проверки адекватности математической модели и численного алгоритма, как и в наших предыдущих исследованиях [1, 2], за основу была взята работа [28], в которой приведены результаты экспериментальных исследований данными авторами режимов инициирования наклонных ДВ. В работе [28] инициирование ДВ осуществлялось в стехиометрической ацетиленокислородной смеси, разбавленной аргоном. Скорость полета БЛТ превышала скорость Чепмена — Жуге  $D_{CJ}$  для используемой смеси. В расчетной модели тело считается неподвижным (рис. 5), а на вход в область подается предварительно перемешанная стехиометрическая ацетиленокислородная смесь со следующими параметрами:

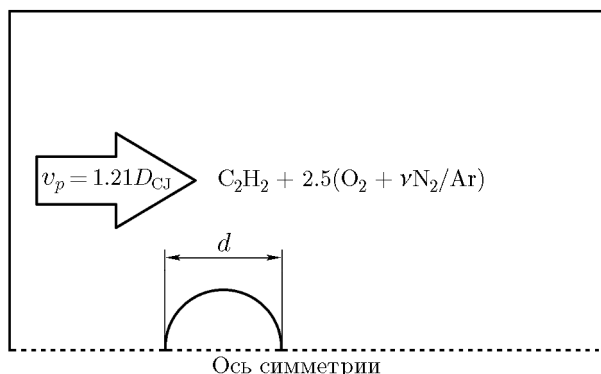


Рис. 5. Схема моделируемой области

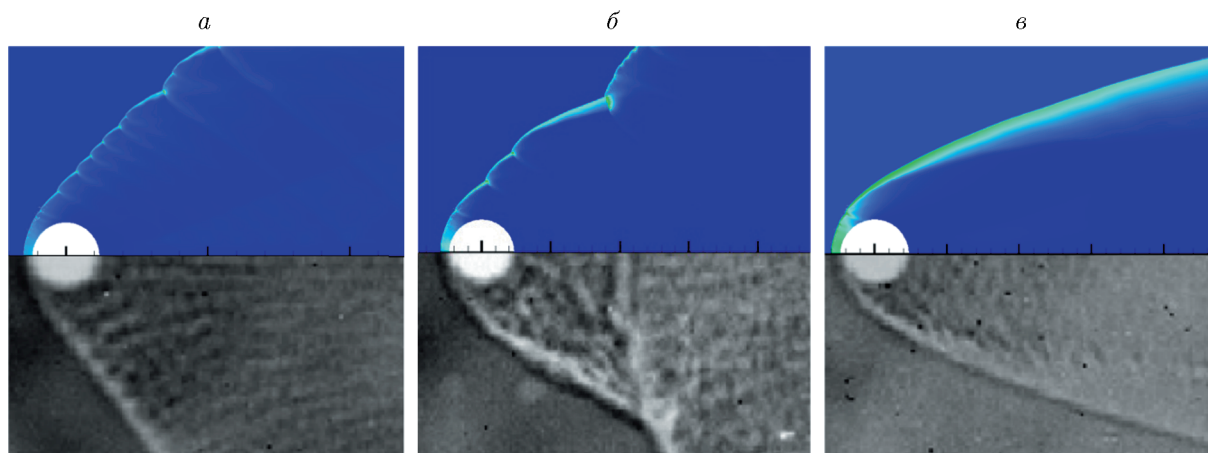


Рис. 6. Режимы горения (в) и детонации (а, б) ацетиленокислородной смеси: результаты расчета (вверху) и экспериментальные теньевые фотографии (внизу)

скорость  $v_p = 1.21 D_{CJ}$ , статическая температура  $T_{st} = 281 \div 286$  К, статическое давление  $p_{st} = 21.1 \div 40.5$  кПа. Диаметр БЛТ составлял  $d = 4.763$  мм.

На рис. 6 приведено сравнение полученных численно режимов наклонных ДВ (а, б) и ударно-инициированного горения (в) с экспериментальными теньевыми изображениями из работы [28]. Получено хорошее количественное и качественное согласие расчетных (поля плотности сверху на рис. 6) и экспериментальных данных (теньевые фотографии снизу на рис. 6). Показаны стабилизированная наклонная ДВ с прямолинейным профилем при давлении 40.5 кПа (а), стабилизированная наклонная ДВ типа «соломенная шляпа» при давлении 31.4 кПа и режим ударно-инициированного горения при давлении 21.1 кПа. Помимо сходства картин течения, расчетные размеры детонационной ячейки близки к экспериментальным при каждом начальном давлении.

Далее проводилась оценка энергии инициирования детонации. В рассматриваемом случае инициирования наклонной детонации (цилиндрическая симметрия) критерий инициирования формулируется следующим образом [8]: работа сил аэродинамического сопротивления на единицу длины при движении БЛТ по взрывчатой смеси должна превышать минимальную энергию цилиндрического инициирования многофронтной детонации. В предыдущих исследованиях [2, 3] подобная оценка проводилась для водородокислородных смесей. В работе [3] дано подробное описание используемого подхода. В настоящей

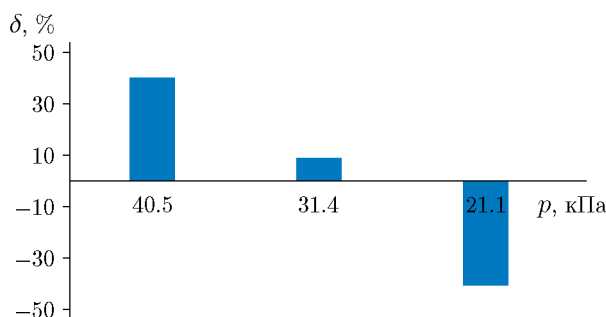


Рис. 7. Отклонение подводимой энергии от критической для БЛТ диаметром  $d = 4.763$  мм при  $p_{st} = 21.1 \div 40.5$  кПа

работе рассчитывалось отклонение подводимой энергии от критической по формуле

$$\delta = \frac{E_{\text{подв}} - E_{\text{кр}}}{E_{\text{кр}}} \cdot 100 \%,$$

где  $E_{\text{подв}}$  — работа сил аэродинамического сопротивления на единице длины,  $E_{\text{кр}}$  — минимальная энергия цилиндрического инициирования многофронтной детонации.

Диаграмма на рис. 7 иллюстрирует отклонение подводимой энергии от критической по результатам расчета, представленным на рис. 6. Оценка энергии инициирования показывает, что при инициировании стабилизированной наклонной детонации при давлении  $p_{st} = 40.5$  кПа (см. рис. 6,а) подводимая энергия почти на 40 % превышает критическое значение. Уменьшение начального давления  $p_{st} = 31.4$  кПа приводит к увеличению размера детонационной ячейки в смеси и, как следствие, критической энергии инициирования детонации. В результате реализуется режим «соломенная шляпа» со стабилизированной наклонной ДВ (см. рис. 6,б), при котором отклонение подводимой энергии от критической составляет около 10 %. При дальнейшем уменьшении начального давления до  $p_{st} = 21.1$  кПа критическая энергия инициирования детонации оказывается значительно выше работы сил аэродинамического сопротивления, что приводит к невозможности инициирования детонации и реализации режима ударно-инициированного горения (см. рис. 6,в).

Проведена оценка энергии инициирования детонации в стехиометрической ацетиленовоздушной смеси и последующее моделирование инициирования наклонной ДВ быстролетящим телом в диапазоне диаметров БЛТ (шара)  $d = 20 \div 50$  мм при скоростях

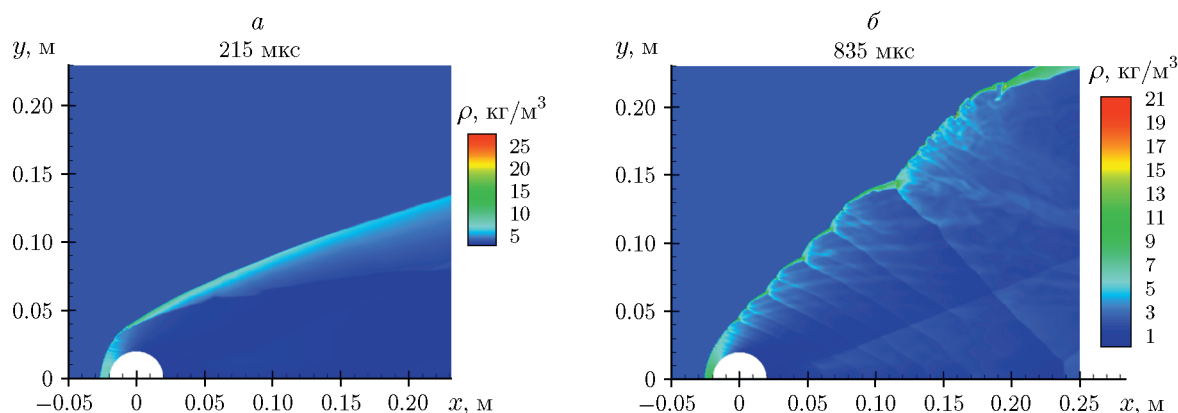


Рис. 8. Поля плотности при  $v_p = 1.24D_{CJ}$  (а) и  $v_p = 1.3D_{CJ}$  (б)

$1.24 \div 1.3$  от скорости Чепмена — Жуге при давлении 200 кПа. Прямое инициирование наклонной детонации происходит при скорости  $1.3D_{СЖ}$  и диаметре шара не менее 40 мм. Столь большие размеры тела связаны с тем, что детонационная ячейка в данном случае — сильнонерегулярная. Размер детонационной ячейки этой смеси находится в диапазоне  $4 \div 8$  мм. Ранее проведенные исследования показали, что для прямого инициирования наклонной детонации диаметр тела должен превышать размер ячейки примерно в три раза. Таким образом, можно сделать вывод, что для сильнонеустойчивой детонации размер тела, необходимый для прямого инициирования наклонной детонации, нужно оценивать по верхнему пределу размера детонационной ячейки. На рис. 8 представлены расчетные поля плотности при инициировании детонации телом диаметром 40 мм в двух случаях: при  $v_p = 1.24D_{СЖ}$  и  $v_p = 1.3D_{СЖ}$ . Результаты предварительной оценки энергии инициирования детонации показывают, что в первом случае подводимая энергия меньше критической примерно на 5 % и реализуется режим ударно-инициированного горения (рис. 8, а), во втором же случае, наоборот, подводимая энергия превышает критическую на 5 % и реализуется режим наклонной детонации. Таким образом, изменяя подводимую энергию на 10 %, можно добиться инициирования и стабилизации наклонной детонации. Стоит отметить, что в случае ацетиленовоздушной смеси в наклонной ДВ наблюдается значительная нерегулярность детонационной ячейки и, как следствие, значительная нестационарность получаемых структур наклонной ДВ. В процессе развития течения возможно образование двух различных режимов наклонной ДВ, которые с течением времени будут сменять друг друга. На рис. 8 видно, как режим «соломенная шляпа» сменяется наклонной ДВ с прямолинейным профилем.

## ВЫВОДЫ

- Разработана численная методика расчета инициирования и стабилизации детонации быстролетящим телом в ацетиленокислородных смесях, разбавленных аргоном или азотом, на базе расчетного комплекса ANSYS Fluent.
- Выполнена верификация кинетической схемы химических реакций горения ацетилена в кислороде по экспериментальным данным о времени задержки воспламенения, скорости распространения детонации и размерах детонационной ячейки смеси.
- Проведено тестирование математической модели по экспериментальным данным о формировании режимов наклонных детонационных волн в стехиометрической ацетиленокислородной смеси, разбавленной аргоном. Получены три режима: 1) стабилизированная наклонная детонационная волна при давлении 40.5 кПа; 2) стабилизированная наклонная детонационная волна типа «соломенная шляпа» при давлении 31.4 кПа; 3) режим ударно-инициированного горения при давлении 21.1 кПа.
- Выполнена оценка энергии инициирования детонации, возбуждаемой быстролетящим телом, в ацетиленокислородной смеси, разбавленной аргоном. Анализ полученных результатов показал хорошее согласование расчетных данных с аналитической моделью.
- На основе аналитической зависимости проведена оценка энергии инициирования детонации ацетиленовоздушной смеси быстролетящим телом в зависимости от скорости полета тела. Результаты последующих расчетов режимов наклонной детонации показали согласование получаемых численных результатов с аналитическими оценками.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-00861, <https://rscf.ru/project/22-29-00861/>).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бедарев И. А., Темербеков В. М., Федоров А. В. Моделирование режимов наклонных детонационных волн, возникающих при инициировании детонации снарядом малого диаметра // Теплофизика и аэромеханика. — 2019. — Т. 26, № 1. — С. 63–73. — EDN: PMKQOO.
2. Bedarev I. A., Temerbekov V. M. Estimation of the energy of detonation initiation in a hydrogen-oxygen mixture by a high-velocity projectile // Thermal Sci. — 2021. — V. 25, N 5. — P. 3889–3897. — DOI: 10.2298/TSCI210115180B.
3. Бедарев И. А., Сыроватень А. А., Темербеков В. М. Численное моделирование формирования наклонной детонации быстролетящим телом в водород-воздушной смеси // Физика горения и взрыва. — 2024. — Т. 60, № 1. — С. 18–28. — DOI: 10.15372/FGV2022.9237. — EDN: JAUALK.
4. Powers J. M. Oblique detonations: theory and propulsion applications // Combustion in High-Speed Flows / J. Buckmaster, T. L. Jackson, A. Kumar (Eds). — Dordrecht: Springer, 1994. — V. 1. — P. 345–371. — (ICASE/LaRC Interdisciplinary Series in Science and Engineering). — DOI: 10.1007/978-94-011-1050-1\_12.
5. Зельдович Я. Б., Шляпинтох В. Я. Воспламенение взрывчатых газовых смесей в ударных волнах // Докл. АН СССР. — 1949. — Т. 65. — С. 871–874.
6. Gilinskii S. M., Zapryanov Z. D., Chernyi G. G. Supersonic flow of a combustible gas mixture past a sphere // Fluid Dynamics. — 1966. — V. 1, N 5. — P. 4–8. — DOI: 10.1007/BF01022141.
7. Левин В. А., Марков В. В. Возникновение детонации при концентрированном подводе энергии // Физика горения и взрыва. — 1975. — Т. 11, № 4. — С. 623–633.
8. Васильев А. А. Основные результаты исследований детонационного горения газовых смесей, возбуждаемого быстролетящим телом // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 5. — С. 85–102. — EDN: YJIPIF
9. Журавская Т. А., Левин В. А. Стабилизация детонационного горения высокоскоростного потока горючей газовой смеси в плоском канале // Изв. РАН. МЖГ. — 2015. — № 2. — С. 117–128. — EDN: TOMRMZ.
10. Миллер С. А. Ацетилен, его свойства, получение и применение. — Л.: Химия, 1969. — Т. 1.
11. Мансуров З. А. Сажеобразование в процессах горения (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 6. — С. 137–156. — EDN: NXVGPL.
12. Мансуров З. А. Получение наноматериалов в процессах горения // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 5. — С. 77–86. — EDN: PDIUEJ.
13. Васильев А. А., Пинаев А. В. Образование углеродных кластеров в волнах горения и детонации газовых смесей // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 48, № 3. — С. 81–94. — EDN: JZGBVR.
14. Штерцер А. А., Ульяницкий В. Ю., Батраев И. С., Громилов С. А., Окотруб А. В., Сапрыкин А. И. Диагностика структуры и состава ультрадисперсного углерода, полученного детонационным способом // Журн. структур. химии. — 2014. — Т. 55, № 5. — С. 1031–1034. — DOI: 10.1134/S0022476614050291. — EDN: YGKZPJ.
15. Шайтанов А. Г., Суровикин Ю. В., Резанов И. В., Штерцер А. А., Ульяницкий В. Ю., Васильев А. А., Лихолобов В. А. Получение и исследование нанодисперсного углерода при сжигании ацетилена в проточной детонационной трубе // Журн. прикл. химии. — 2018. — Т. 91, № 12. — С. 1751–1759. — DOI: 10.1134/S0044461818120095. — EDN: SLLYIH.
16. Гавриленко Т. П., Ульяницкий В. Ю. Использование пропан-бутана в установках детонационного напыления // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 1. — С. 92–98. — EDN: NRFVJT.

17. **Солоухин Р. И.** Детонация ацетилена // ПМТФ. — 1960. — Т. 1, № 1. — С. 18–20.
18. **Емельянов А. В., Еремин А. В., Фортов В. Е.** Формирование детонационной волны при термическом разложении ацетилена // Письма в ЖЭТФ. — 2010. — Т. 92, № 2. — С. 101–105. — EDN: MTAZZN.
19. **Вогман Л. П., Простов Е. Н., Зуйков В. А., Кондратюк Н. В., Зуйков А. В.** Основы предотвращения горения и детонации ацетилена в оборудовании // Материалы XXXV междунар. науч.-практич. конф. «Актуальные проблемы пожарной безопасности». — М., 2023. — С. 470–477.
20. **Яковенко И. С., Ярков А. В., Тюрнин А. В., Тереза А. М., Новицкий А. О., Кривошеев П. Н.** Оценка возможностей современных кинетических механизмов окисления ацетилена для моделирования нестационарных процессов горения // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. — 2022. — № 5 (104). — С. 62–85. — DOI: 10.18698/1812-3368-2022-5-62-85. — EDN: WKPCXX.
21. **Бедарев И. А., Рылова К. В., Федоров А. В.** Применение детальных и приведенных кинетических схем для описания детонации водородовоздушных смесей с разбавителем // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 5. — С. 22–33. — DOI: 10.15372/FGV20150503. — EDN: UMUJFX.
22. **Tropin D. A., Bedarev I. A.** Problems of detonation wave suppression in hydrogen-air mixtures by clouds of inert particles in one- and two-dimensional formulation // Combust. Sci. Technol. — 2021. — V. 193, N 2. — P. 197–210. — DOI: 10.1080/00102202.2020.1763323.
23. **Eiteneer B., Frenklach M.** Experimental and modeling study of shock-tube oxidation of acetylene // Int. J. Chem. Kinet. — 2003. — V. 35, N 9. — P. 391–414. — DOI: 10.1002/kin.10141.
24. **Fournet R., Bauge J. C., Battin-Leclerc F.** Experimental and modeling of oxidation of acetylene, propyne, allene and 1,3-butadien // Int. J. Chem. Kinet. — 1999. — V. 31, N 5. — P. 361–379. — DOI: 10.1002/(SICI)1097-4601(1999)31:5<361::AID-KIN6>3.0.CO;2-K.
25. **Hidaka Y., Hattori K., Okuno T., Inami K., Abe T., Koike T.** Shock-tube and modeling study of acetylene pyrolysis and oxidation // Combust. Flame. — 1996. — V. 107, N 4. — P. 401–417. — DOI: 10.1016/S0010-2180(96)00094-6.
26. **Lokachari N., Burke U., Ramalingam A., Turner M., Hesse R., Somers K. P., Beeckmann J., Heufer K. A., Petersen E. L., Curran H. J.** New experimental insights into acetylene oxidation through novel ignition delay times, laminar burning velocities and chemical kinetic modeling // Proc. Combust. Inst. — 2019. — V. 37, N 1. — P. 583–591. — DOI: 10.1016/j.proci.2018.07.027.
27. **Льюис Б., Эльбе Г.** Горение, пламя и взрывы в газах. — М.: Мир, 1968.
28. **Maeda S., Inada R., Kasahara J., Matsuo A.** Visualization of the non-steady state oblique detonation wave phenomena around hypersonic spherical projectile // Proc. Combust. Inst. — 2011. — V. 33, N 2. — P. 2343–2349. — DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.066.
29. **Desbordes D.** Transmission of overdriven plane detonations: Critical diameter as a function of cell regularity and size // Dynamics of Explosions / A. Borisov, A. L. Kuhl, J. R. Bowen, J.-C. Leyer (Eds). — 1988. — V. 114. — P. 170–185. — DOI: 10.2514/5.9781600865886.0170.0185.
30. **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. — DOI: 10.1016/0010-2180(82)90028-1.
31. **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 detonability limits // Dynamics of Shock Waves, Explosions, and Detonations / R. I. Soloukhin, A. K. Oppenheim, N. Manson, J. R. Bowen (Eds). — 1985. — V. 94. — P. 23–37. — DOI: 10.2514/5.9781600865695.0023.0037.

32. **Tieszen S. R., Stamps D. W., Westbrook C. K., Pitz W. J.** Gaseous hydrocarbon-air detonations // *Combust. Flame.* — 1991. — V. 84, N 3-4. — P. 376–390. — DOI: 10.1016/0010-2180(91)90013-2.
33. **Knystautas R., Lee J. H., Guirao C. M.** The critical tube diameter for detonation failure in hydrocarbon-air mixtures // *Combust. Flame.* — 1982. — V. 48, N 1. — P. 63–83. — DOI: 10.1016/0010-2180(82)90116-X.
34. **Lee J. H. S., Knystautas R., Guirao C.** The link between cell size, critical tube diameter, initiation energy and detonability limits // *Fuel-Air Explosions* / J. H. S. Lee, C. M. Guirao (Eds). — Waterloo: Univ. of Waterloo Press, 1982. — P. 157–187.
35. **Murray S. B., Lee J. H.** The influence of physical boundaries on gaseous detonation waves // *Dynamics of Explosions* / J.-C. Leyer, R. I. Soloukhin, J. R. Bowen (Eds). — 1986. — V. 106. — P. 329–355. — DOI: 10.2514/5.9781600865800.0329.0355.

*Поступила в редакцию 17.10.2023.*

*После доработки 10.11.2023.*

*Принята к публикации 29.11.2023.*

---