

03

Детонация горючего газового цилиндра при фокусировке падающей ударной волны

© П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин[†]

Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

[†] E-mail: sutyurin@imec.msu.ru

Поступило в Редакцию 28 августа 2019 г.

В окончательной редакции 28 августа 2019 г.

Принято к публикации 30 августа 2019 г.

На основе уравнений Эйлера численно исследуется двумерное взаимодействие ударной волны в воздухе с эллиптической областью (двумерным газовым пузырем), заполненной пропан-кислородной смесью с примесью тяжелого газа. Горение пропана моделируется одностадийной аррениусовской кинетикой. Обнаружены три различных режима воспламенения: прямое инициирование детонации достаточно сильной волной, детонация вблизи тройной точки при преломлении менее интенсивной волны и детонация в области фокусировки еще более слабой волны. Последний режим наблюдается только для существенно вытянутых пузырей. Определена зависимость режима инициирования детонации от числа Маха волны и отношения диаметров пузыря. Показано, что за счет удлинения пузыря критическое число Маха может быть существенно снижено по сравнению со случаем прямого инициирования.

Ключевые слова: ударная волна, газовый пузырь, фокусировка, кумуляция, газовая детонация, воспламенение.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.23.48719.18022

Взаимодействие ударных волн с локальными неоднородностями имеет место во многих течениях: от космических процессов со сверхновыми звездами до систем высокоскоростного сгорания и инерционного термоядерного синтеза. Такие течения часто исследуются на основе задачи о взаимодействии ударной волны с газовым пузырем (shock-bubble interaction, SBI), в том числе химически реагирующим (RSBI), включающей широкий спектр ударно-волновых эффектов, типов неустойчивостей и видов волн реакции. Начиная с первых экспериментов [1] эта задача активно исследуется в последние годы. В недавнем цикле численных исследований [2–4] было обнаружено существенное влияние начального давления смеси и интенсивности падающей волны на тип воспламенения пузыря: дефлаграцию или детонацию, а также существенное уменьшение интенсивности перемешивания газов в результате воздействия волны реакции.

Известно несколько ключевых явлений, сопутствующих взаимодействию ударной волны с газовым пузырем: неоднородное ускорение и деформация пузыря, генерация завихренности, турбулентное перемешивание газов и фокусировка поперечных скачков уплотнения. Последний эффект представляет особый интерес в связи с инициированием горения газовых смесей и поэтому также активно исследуется в настоящее время. Известно, что все основные параметры задачи (интенсивность падающей волны, плотность газа в пузыре и его форма) играют важную роль при определении режима преломления волны и интенсивности фокусировки [5]. В общем

случае для плотных и вытянутых пузырей реализуется более интенсивный внутренний режим преломления (type I [6]), при котором фокусировка поперечных скачков более интенсивна, чем во внешнем режиме (type II), и, что не менее важно, пиковые значения давления и температуры газа достигаются внутри пузыря. Аналогичный эффект наблюдается при взаимодействии ударной волны с локальным облаком мелкодисперсной пыли [7].

Опираясь на эти данные, можно предположить, что форма пузыря будет играть важную роль и при воспламенении горючей смеси за счет преломления и фокусировки падающей волны. В настоящей работе численно исследуется взаимодействие ударной волны с эллиптическим реагирующим газовым пузырем в двумерной плоской постановке.

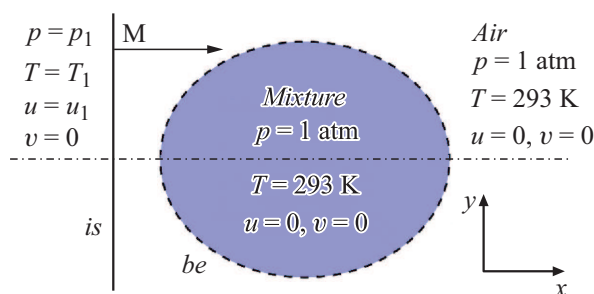


Рис. 1. Схема начальных условий: *is* — исходная ударная волна, *be* — граница пузыря (газового цилиндра). Штрихпунктирной линией отмечена плоскость симметрии задачи.

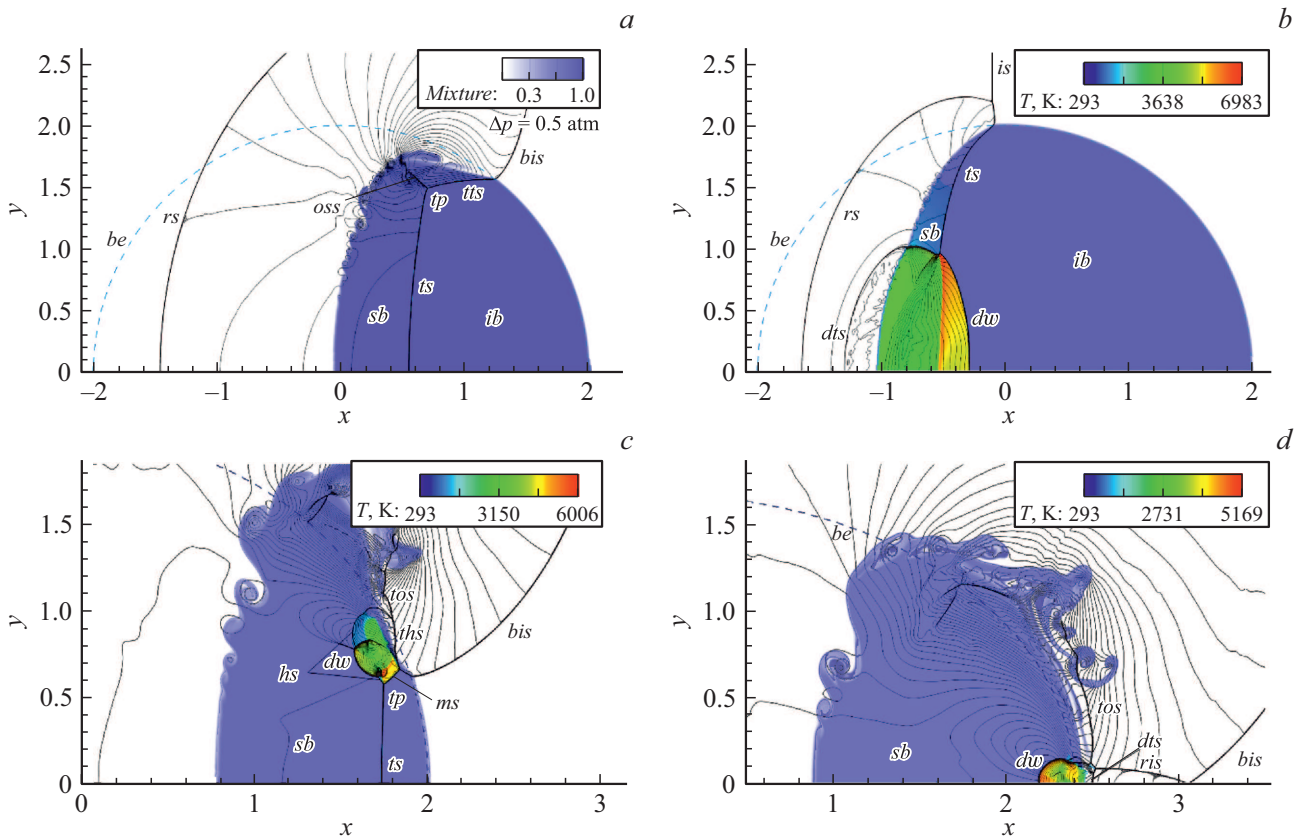


Рис. 2. Преломление ударной волны (а) и различные режимы инициирования детонации газовой смеси: прямой при $M = 3.4$ (b); при преломлении волны, $M = 3.0$ (c); при фокусировке волны, $M = 2.7$, $\eta = 1.44$ (d). Представлена верхняя половина течения, приведены изолинии давления, цветом (или градациями серого в печатной версии статьи) показана массовая доля горючей смеси и температура газа (только значения $T > 1100$ K); *ib*, *sb* — невозмущенная и ударно-сжатая части пузыря; *bis* — выпуклая часть падающей волны; *rs*, *ts* — отраженный и прошедший скачки; *tts*, *oss* — поперечные вторичные скачки; *tp* — тройная точка; *dw* — детонационная волна; *ms* — ножка Маха; *hs* — индуцированные тепловыделением скачки; *ris* — отраженный от плоскости симметрии скачок *bis*; *dts* — вызванная детонацией ударная волна в воздухе; *tos*, *ths* — вышедшие в воздух волны *oss* и *hs* соответственно.

Нестационарные течения смеси совершенных газов моделируются с помощью уравнений Эйлера

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho_i \\ \rho u \\ \rho v \\ H - p \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} \rho_i u \\ p + \rho u^2 \\ \rho uv \\ Hu \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{pmatrix} \rho_i v \\ \rho uv \\ p + \rho v^2 \\ Hv \end{pmatrix} = 0,$$

где ρ_i — плотности газовых компонентов, $\rho = \sum \rho_i$ — общая плотность смеси, u , v — компоненты скорости газа вдоль декартовых осей x , y соответственно, а давление p и полная энтальпия единицы объема газа H вычисляются следующим образом:

$$p = \sum \rho_i \frac{R}{\mu_i} T, \quad H = \sum \rho_i (c_{pi} T + h_{0i}).$$

Здесь T — абсолютная температура, R — универсальная газовая постоянная, а μ_i , c_{pi} , h_{0i} — молярные массы, удельные теплоемкости и энтальпии образования компонентов.

Термодинамические параметры шести используемых газовых компонентов (C_3H_8 , O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , Xe)

приведены в [8]. Реакция горения пропана моделируется одностадийной аррениусовской кинетикой Westbrook–Dryer [9].

Для численного моделирования применяется метод конечных объемов типа „MUSCLE“ с линейной реконструкцией величин на границах расчетных ячеек, ограничителем ван Лира и HLLC-методом решения задачи о распаде разрыва, обеспечивающий второй порядок аппроксимации решения по времени и пространству. Используется равномерная квадратная расчетная сетка со стороной ячейки в $12 \mu m$, обеспечивающая 5–6 ячеек на зону реакции в детонационной волне.

На рис. 1 приведены начальные условия задачи. Ударная волна распространяется слева направо по покоящемуся воздуху (одна часть O_2 , четыре части N_2 по объему) в нормальных условиях, содержащему эллиптическую область, заполненную стехиометрической горючей газовой смесью (одна часть C_3H_8 , пять частей O_2 , пять частей N_2 , пятнадцать частей Xe по объему). Плотность смеси превышает плотность окружающего

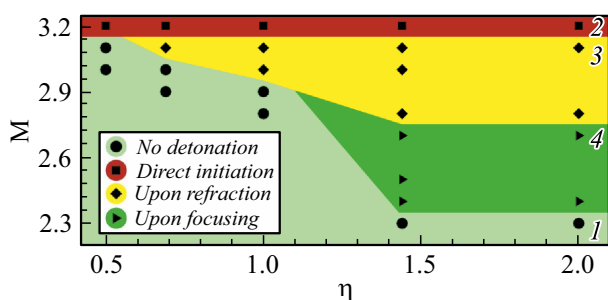


Рис. 3. Зависимость режима воспламенения от числа Маха M и отношения диаметров пузыря η . Каждый символ соответствует одному расчету, некоторые промежуточные значения опущены. 1 — нет детонации, 2 — прямое инициирование, 3 — детонация при преломлении, 4 — при фокусировке.

воздуха в 3.1 раза, что обеспечивает достижимость внутреннего режима фокусировки волны [5]. Однородное состояние воздуха за волной определяется числом Маха M с помощью соотношений Ренкина–Гюгионо. Геометрия сечения цилиндра задается отношением диаметров эллипса $\eta = d_x/d_y$, при этом площадь сечения постоянна и равна 12.6 cm^2 , что соответствует круглому цилиндру ($\eta = 1$) диаметром 4 см.

За счет отставания ударной волны ts (рис. 2, *a*), прошедшей в пузырь, от наружной волны is внутри пузыря формируются поперечные скачки уплотнения tts , oss и тройная точка tp , движущиеся по диагонали к плоскости симметрии течения. В зависимости от параметров течения тройная точка tp и скачок tts достигают плоскости снаружи или внутри пузыря [5,6], при этом наблюдается резкое повышение давления и температуры газа в локальной области. Опираясь на эти данные, можно ожидать, что существует как минимум три различных режима детонационного воспламенения пузыря: прямое инициирование детонации смеси достаточно сильной волной, воспламенение вблизи тройной точки tp при меньшем числе Маха волны и воспламенение в области фокусировки еще более слабой волны.

В проведенных расчетах прямое инициирование детонации наблюдается при $M \geq 3.2$. Детонационная волна dw (рис. 2, *b*) формируется у левого края пузыря вскоре после прохождения волны в смесь, затем обгоняет волну ts и распространяется далее в режиме Чепмена–Жуге, полностью поглощая реагирующую смесь. При этом фронт детонационной волны имеет характерную ячеистую структуру с шириной ячейки около 0.5 мм.

При меньших числах Маха температура за прошедшей волной ts недостаточна для прямого воспламенения смеси. В процессе преломления волны формируется зона интенсивного тепловыделения вблизи тройной точки tp , индуцирующая скачки hs и ths , распространяющиеся по смеси и по воздуху снаружи пузыря соответственно. При взаимодействии скачка hs с вторичным скачком внутри пузыря формируется самоподдерживающаяся де-

тонационная волна dw (рис. 2, *c*), которая затем проходит по всему деформированному пузырю.

Для еще более слабых волн ($M \leq 2.9$) тепловыделение вблизи тройной точки недостаточно, и детонации для круглых пузырей не наблюдается. Однако для вытянутых пузырей ($\eta > 1$) инициируется детонация за счет фокусировки поперечных скачков и тройных точек в горючей смеси вблизи правого полюса пузыря (рис. 2, *d*).

На основе проведенного параметрического исследования для $2.0 \leq M \leq 3.5$ и $0.5 \leq \eta \leq 2.0$ можно качественно оценить зависимость режима инициирования детонации от этих параметров (рис. 3). Для сплюснутых пузырей ($\eta = 0.5$) наблюдается только прямое инициирование при $M \geq 3.2$. С увеличением η появляются не прямые режимы инициирования: сначала вблизи тройной точки при $\eta = 0.7$, а затем и при фокусировке скачков при $\eta = 1.44$. Критическое число Маха, достаточное для детонации, при этом уменьшается примерно на 35%: с $M = 3.2$ до 2.4. При дальнейшем удлинении пузыря существенных изменений не наблюдается.

На основе численного моделирования взаимодействия ударной волны с эллиптической областью (пузырем) горючей газовой смеси показано, что режим инициирования детонации смеси и критическая интенсивность падающей волны существенно зависят от формы пузыря. Примененная модель не включает эффекты вязкости, теплопроводности и диффузии, а также не учитывает времени индукции реакции горения, поэтому границы областей параметров, соответствующих конкретным режимам воспламенения, определены лишь приблизительно. Однако с большой долей вероятности можно считать, что основной эффект — существенное снижение критического числа Маха при удлинении пузыря — имеет под собой реальную основу. Этот эффект, в частности, может быть использован для повышения эффективности прямоточных высокоскоростных систем сгорания с инициированием горения за счет взаимодействия струи топливной смеси со стационарной косою ударной волной.

Финансирование работы

Работа выполнена в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (МК-3012.2019.1) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-01-00793).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Haehn N., Ranjan D., Weber C., Oakley J., Rothamer D., Bonazza R.* // *Combust. Flame.* 2012. V. 159. N 3. P. 1339–1350.
- [2] *Diegelmann F., Tritschler V., Hickel S., Adams N.* // *Combust. Flame.* 2016. V. 163. P. 414–426.
- [3] *Diegelmann F., Hickel S., Adams N.* // *Combust. Flame.* 2016. V. 174. P. 85–99.
- [4] *Diegelmann F., Hickel S., Adams N.* // *Combust. Flame.* 2017. V. 181. P. 300–314.
- [5] *Georgievskiy P.Yu., Levin V.A., Sutyurin O.G.* // *Shock Waves.* 2015. V. 25. N 4. P. 357–369.
- [6] *Ray J., Samtaney R., Zabusky N.* // *Phys. Fluids.* 2000. V. 12. N 3. P. 707–716.
- [7] *Георгиевский П.Ю., Левин В.А., Сутырин О.Г.* // *Письма в ЖТФ.* 2016. Т. 42. В. 18. С. 17–24.
- [8] TRC Thermodynamic Tables. Thermodynamic Research Center Texas, A&M University, College Station, TX, 1998.
- [9] *Westbrook C., Dryer F.* // *Prog. Energy Combust. Sci.* 1984. V. 10. N 1. P. 1–57.