

03

## Детонация горючего газового цилиндра при фокусировке падающей ударной волны

© П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин<sup>†</sup>

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

<sup>†</sup> 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.

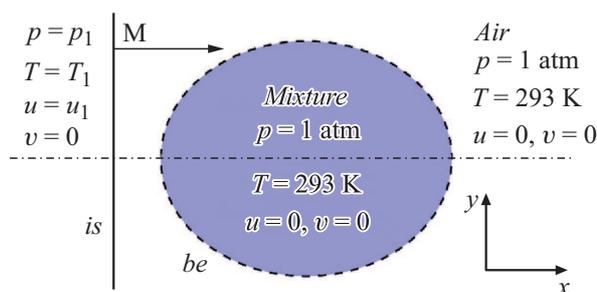
DOI: 10.21883/PJTF.2019.23.48719.18022

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.

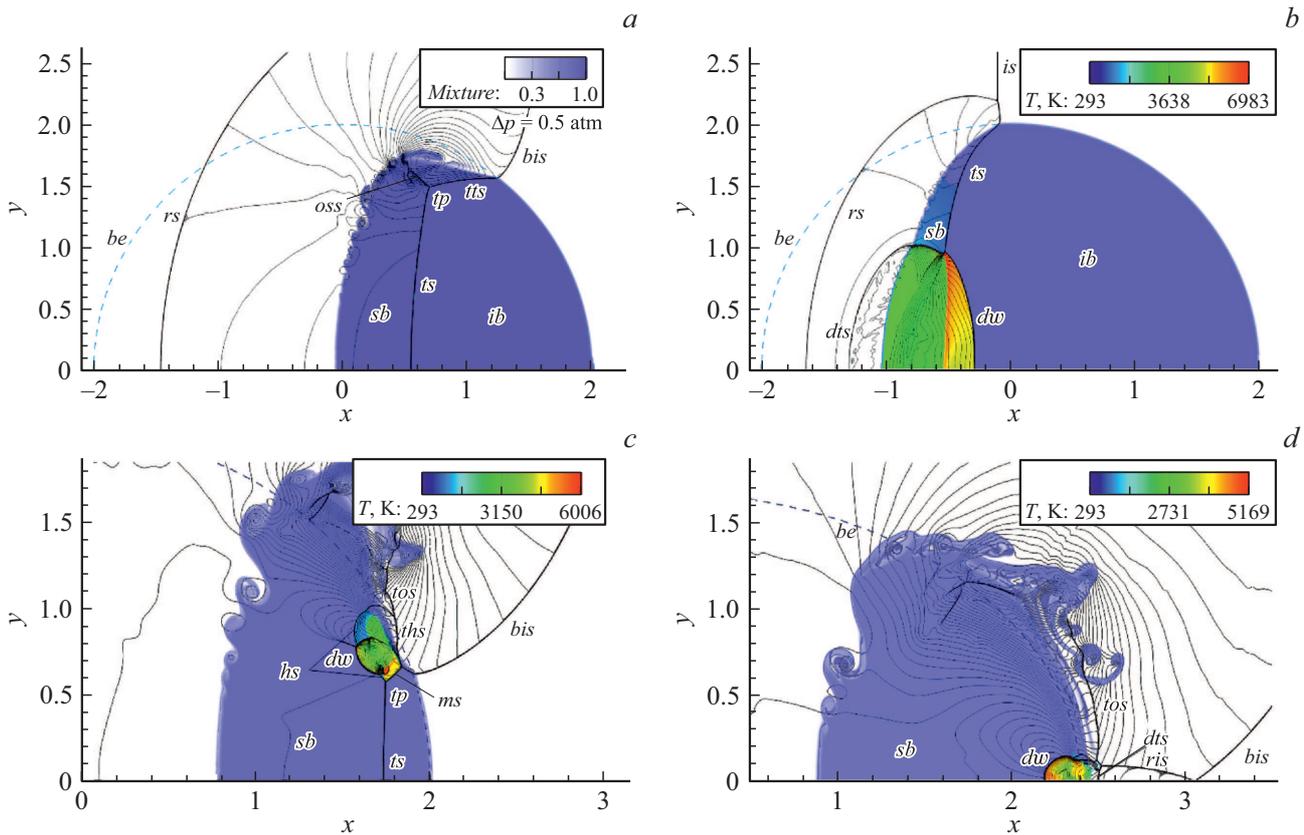
Известно несколько ключевых явлений, сопутствующих взаимодействию ударной волны с газовым пузырем: неоднородное ускорение и деформация пузыря, генерация завихренности, турбулентное перемешивание газов и фокусировка поперечных скачков уплотнения. Последний эффект представляет особый интерес в связи с 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  $\rho_i$  — 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:

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

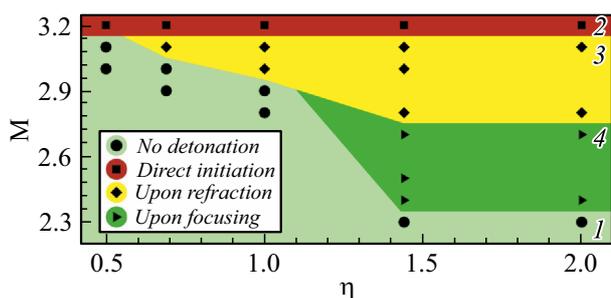
Здесь  $T$  — абсолютная температура,  $R$  — универсальная газовая постоянная, а  $\mu_i$ ,  $c_{pi}$ ,  $h_{0i}$  — молярные массы, удельные теплоемкости и энтальпии образования компонентов.

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  $\eta$ . 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–Гюгонио. Геометрия сечения цилиндра задается отношением диаметров эллипса  $\eta = d_x/d_y$ , при этом площадь сечения постоянна и равна  $12.6 \text{ cm}^2$ , 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  $\eta$  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.