

01.1;03.1

Двумерное моделирование ослабления детонационной волны при ее прохождении через область с круговыми препятствиями

© И.А. Бедарев, В.М. Темербеков

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия
E-mail: bedarev@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 24 ноября 2020 г.

В окончательной редакции 25 марта 2021 г.

Принято к публикации 9 апреля 2021 г.

Представлены результаты численного моделирования взаимодействия детонационной волны с круговыми препятствиями, расположенными в шахматном порядке. Расчеты проводились для подготовленной стехиометрической водородно-воздушной смеси. Исследовано влияние количества рядов, шага между ними и масштабных эффектов на подавление детонации. Получены различные режимы ослабления и реинициирования детонации.

Ключевые слова: детонация, подавление, численные методы, водородно-воздушная смесь.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.14.51178.18627

В настоящее время актуален вопрос использования высокоэффективных газообразных топлив для различных энергетических установок. Из-за высокого тепловыделения при окислении горючих газов существует опасность возникновения чрезвычайных ситуаций при их эксплуатации. Аварии с выбросом газообразного горючего зачастую приводят к пожарам и взрывам, в связи с чем большой интерес вызывают исследования, связанные с вопросами взрыво- и пожаробезопасности, в частности работы, направленные на выявление возможности ослабления и подавления газовой детонации, ее инициирования и взаимодействия с различными препятствиями.

Уже имеется ряд работ, в которых исследовалось ослабление детонации, например, облаком инертных частиц [1–3], спиральными препятствиями [4], рядами цилиндров [5]. Внимания также заслуживают работы, связанные с инициированием горения и детонации. Так, в работе [6] изучено влияние препятствий на самовозгорание водорода. В [7] рассмотрено ускорение пламени в каналах с препятствиями. В [8] исследовался механизм инициирования детонации при помощи взаимодействия потока водородно-воздушной смеси с препятствиями.

Целью настоящей работы является разработка численного алгоритма для задачи о взаимодействии детонационной волны с круговыми препятствиями. На основании полученных результатов предполагается сделать первоначальные выводы о возможности подавления детонации в водородно-воздушной смеси, а также определить критерии успешной реализации данного подхода. Ранее была довольно подробно исследована задача о взаимодействии ударных волн с частицами (например, в работе [9]).

В расчетной области (рис. 1) задавалась предварительно перемешанная стехиометрическая смесь водорода

и воздуха с параметрами $T_{st} = 300$ К и $P_{st} = 100$ кПа. Перед препятствиями в качестве начальных условий задавалась предварительно рассчитанная ячеистая детонация. Скорость фронта детонационной волны составляла примерно 1950 м/с. Диаметр окружностей, количество рядов препятствий и шаг между ними варьировались.

Двумерная задача решалась в плоской симметричной постановке в расчетном пакете программ ANSYS Fluent. В рамках математической модели применялись осредненные по Фавру уравнения Навье–Стокса для многокомпонентной газовой смеси. Использовалась приведенная кинетическая схема химической реакции горения водорода в воздухе [10]. Система уравнений дополнялась SST-модификацией $k-\omega$ -модели турбулентности [11]. Для аппроксимации по времени использовалась неявная схема второго порядка, для пространственной аппроксимации — противопотоковая схема второго порядка, метод расщепления вектора потока — AUSM. Адекватность выбранной математической модели была продемонстрирована на примере задачи о формировании режимов наклонной детонации [12].

Предполагается, что для успешного подавления детонации необходимо обеспечить достаточную длину участка L , в котором расположено препятствие, а также пропускную способность зоны препятствий σ_n . Возрастание L и уменьшение σ_n способствуют ослаблению

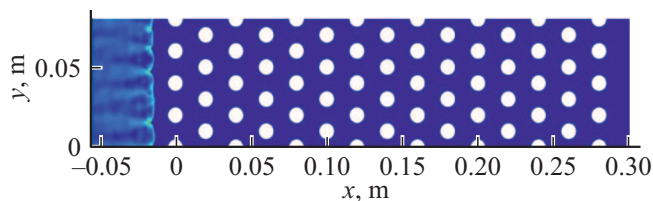


Рис. 1. Расчетная область.

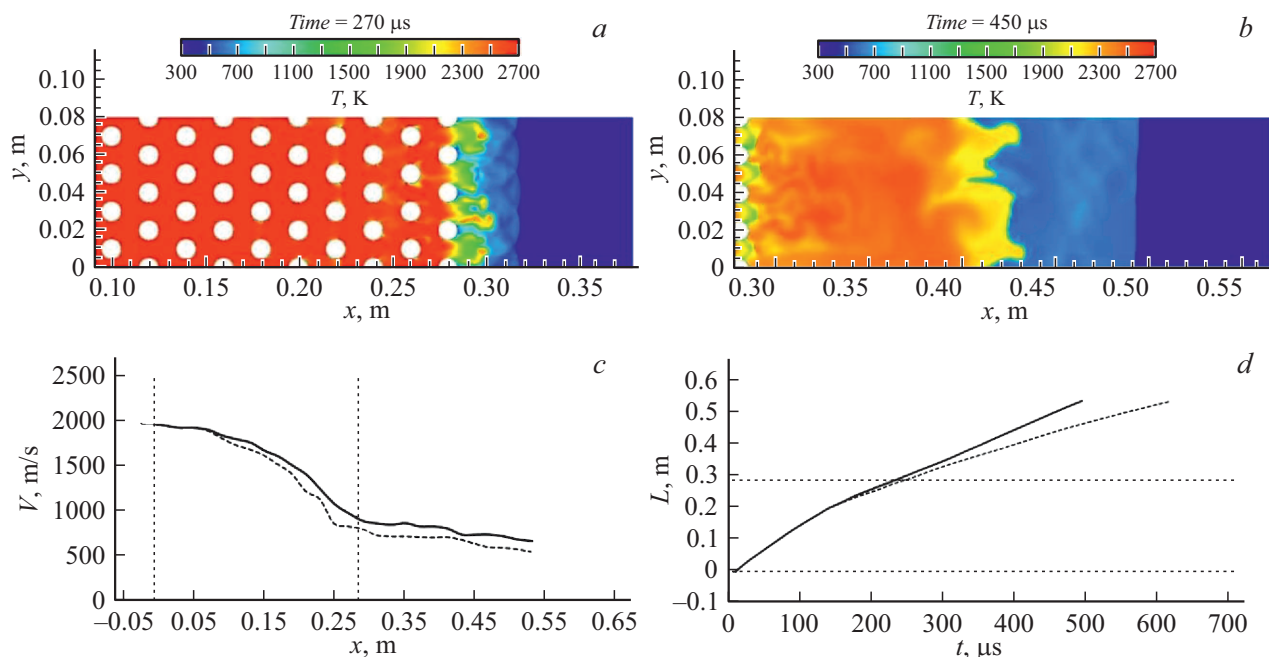


Рис. 2. Результаты расчета для 15 рядов, $d = 10$ mm и $h = 10$ mm. Поля температуры в различные моменты времени (*a*, *b*), изменение скоростей фронта ударной волны (сплошные линии) и фронта продуктов реакции (штриховые линии) от продольной координаты (*c*), положение фронта ударной волны и фронта продуктов реакции в зависимости от времени (*d*).

детонации. Также известно, что на ослабление, срыв и подавление детонации влияют диаметр окружностей d и расстояние между ними h , отнесенные к размеру детонационной ячейки смеси [5]. Под срывом детонации подразумевается разделение фронта детонации на фронт ударной волны и фронт горения. После выхода этой двухфронтной структуры за границу зоны препятствий возможно реиницирование детонации. В том случае, если реиницирования не происходит, можно говорить о подавлении детонационной волны.

Для диаметра цилиндров $d = 10$ mm с шагом $h = 10$ mm срыв детонации осуществляется при длине зоны препятствий $L = 190$ mm (10 рядов), однако температура и давление за фронтом ударной волны способствуют воспламенению смеси, в результате чего детонация реиницируется. При длине участка $L = 285$ mm для 15 рядов препятствий (рис. 2) ударная волна ослабляется настолько, что температура и давление за фронтом ударной волны становятся ниже третьего предела воспламенения водорода в воздухе, и реиницирования детонации не происходит. На рис. 2, *c* представлен график изменения скорости фронта ударной волны и фронта продуктов реакции по мере прохождения детонационной волны по расчетной области, а на рис. 2, *d* — положение фронта ударной волны и фронта продуктов реакции в зависимости от времени; прямыми пунктирными линиями отмечены границы области препятствия. В данном случае пропускная способность препятствия составляет $\sigma_n = 80\%$. При этом диаметр окружностей и расстояние между ними сопоставимы с поперечным размером детонационной ячейки смеси ($\lambda = 10\text{--}15$ mm).

Как указывалось выше, для значительного ослабления детонации помимо протяженности зоны препятствия и его пропускной способности важную роль играет отношение диаметра окружностей и шага между ними к размеру детонационной ячейки смеси. Поэтому в последующем расчете вся решетка была пропорционально увеличена в 2 раза. При этом диаметр составил $d = 20$ mm, пропускная способность не изменилась, шаг между рядами составил $h = 20$ mm, а протяженность препятствия достигла величины $L = 570$ mm. В данном случае, несмотря на увеличение длины участка, при той же пропускной способности не удалось добиться срыва детонации (рис. 3). Для данного случая диаметр окружностей и шаг между ними превышают поперечный размер детонационной ячейки в 1.5–2 раза.

Моделирование позволяет подтвердить вывод, что на ослабление детонации решающее влияние оказывает отношение диаметра препятствий и шага между ними к размеру детонационной ячейки в смеси.

В работе численно исследована задача о взаимодействии детонационной волны с жесткой проницаемой преградой в водородно-воздушной смеси на основе пакета программ ANSYS Fluent. Выявлено, что для уменьшения скорости детонационной волны от $V = 1950$ до 860 m/s и вырождения детонационной волны в ударную в стехиометрической водородно-воздушной смеси при атмосферном давлении достаточно 15 рядов круговых препятствий диаметром 10 mm. При этом расстояние между препятствиями составляет 10 mm, а длина зоны препятствий 285 mm. Волна продуктов реакции продолжает

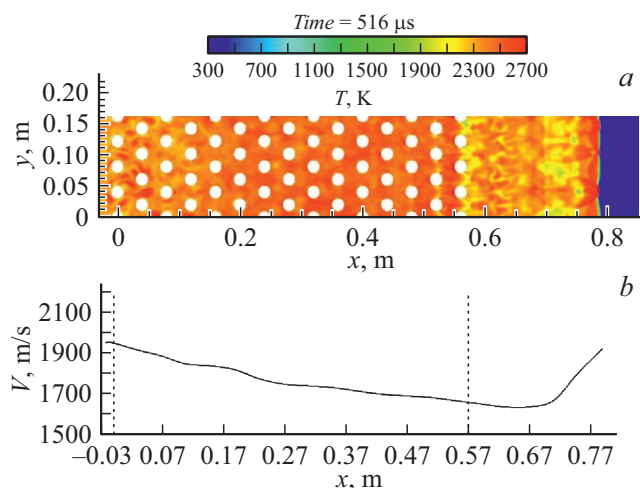


Рис. 3. Результаты расчета для 15 рядов, $d = 20$ mm и $h = 20$ mm. Поля температуры в различные моменты времени (a) и изменение скорости фронта ударной волны в зависимости от продольной координаты (b).

распространяться по расчетной области со скоростью, меньшей, чем скорость ударной волны (рис. 2, c, d).

Результаты наших расчетов, а также экспериментальные данные, описанные в работе [5], позволяют сделать вывод о существовании таких геометрических параметров препятствия, при которых возможно подавление детонации при минимальной его протяженности.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-38-90178.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Д.А. Тропин, А.В. Федоров, *Физика горения и взрыва*, **55** (2), 119 (2019). DOI: 10.15372/FGV20190212
- [2] D.A. Tropin, A.V. Fedorov, *Combust. Sci. Technol.*, **191** (2), 275 (2019). DOI: 10.1080/00102202.2018.1459584
- [3] А.А. Васильев, А.В. Пинаев, А.А. Трубицын, А.Ю. Грачев, А.В. Троцюк, П.А. Фомин, А.В. Трилис, *Физика горения и взрыва*, **53** (1), 11 (2017).
- [4] B. Zhang, H. Liu, C. Wang, *Int. J. Hydrogen Energy*, **42** (33), 21392 (2017). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.201
- [5] A. Makris, A. Papyrin, M. Kamel, G. Kilambi, J.H.S. Lee, R. Knystautas, in *Dynamic aspects of detonations*, ed. by A.L. Kuhl, J.C. Leyer, A.A. Borisov, W.A. Sirignano. Progress in Astronautics and Aeronautics (AIAA, 1993), vol. 153, p. 363.
- [6] P. Li, Q. Duan, L. Gong, K. Jin, J. Chen, J. Sun, *Fuel*, **236**, 1586 (2019). DOI: 10.1016/j.fuel.2018.09.120
- [7] D. Valiev, V. Bychkov, V. Akkerman, C.K. Law, L. Eriksson, *Combust. Flame*, **157** (5), 1012 (2010). DOI: 10.1016/j.combustflame.2009.12.021
- [8] A.M. Coates, D.L. Mathias, B.J. Cantwell, *Combust. Flame*, **209**, 278 (2019). DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.044
- [9] И.А. Бедарев, А.В. Федоров, *Письма в ЖТФ*, **42** (24), 17 (2016). DOI: 10.21883/pjtf.2016.24.44074.16245
- [10] И.А. Бедарев, К.В. Рылова, А.В. Федоров, *Физика горения и взрыва*, **51** (5), 22 (2015). DOI: 10.15372/FGV20150503
- [11] F.R. Menter, *AIAA J.*, **32** (8), 1598 (1994). DOI: 10.2514/3.12149
- [12] И.А. Бедарев, В.М. Темербеков, А.В. Федоров, *Теплофизика и аэромеханика*, **26** (1), 53 (2019). https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=177192&ARTICLE_ID=177199