

03.1

Самовоспламенение водородно-воздушной смеси при взаимодействии ударной волны с разрушаемым гранулированным экраном или проницаемой стенкой

© С.В. Головастов, Г.Ю. Бивол, Ф.С. Кулешов, В.В. Голуб

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
E-mail: golovastov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 10 октября 2023 г.

В окончательной редакции 1 декабря 2023 г.

Принято к публикации 1 декабря 2023 г.

Экспериментально изучен процесс самовоспламенения водородно-воздушной смеси при взаимодействии ударной волны с разрушаемым гранулированным экраном или проницаемой стенкой. Стенка изготавливалась из полиуретана, разрушаемый экран изготавливался из кварцевого песка с малым количеством связующего вещества. Определены параметры падающих, отраженных и проходящих ударных волн при начальном давлении 0.02 МПа и объемной концентрации водорода 14%. Определены условия, при которых размещение разрушаемого экрана может быть целесообразным для исключения самовоспламенения смеси.

Ключевые слова: разрушаемый экран, ударная волна, водород, воспламенение.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.05.57185.19763

Одной из актуальных задач взрывобезопасности является снижение последствий взрыва газовых смесей. При ударно-волновом сжатии горючей смеси с ее последующим воспламенением использование разрушаемого экрана является одним из наиболее значимых способов ослабления интенсивности ударной волны [1–3]. В настоящее время взаимодействию ударной волны с песком уделяется пристальное внимание. Воздействие ударной волны на песок изучалось в [4,5], в работе [6] — с гранулированными преградами. В [7] изучена эффективность перфорированных пластин. Определены коэффициенты ослабления ударной волны в зависимости от толщины разрушаемого экрана [8]. При этом большинство опубликованных работ посвящено ослаблению проходящей, а не отраженной ударной волны в инертной среде, как это указано в обзоре [9].

Несмотря на детальное изучение воспламенения водородсодержащих [10,11] и других горючих смесей за отраженными ударными волнами в ударных трубах, взаимодействие ударной волны с разрушаемым гранулированным экраном в горючей среде не рассматривалось. Цель настоящей работы состоит в рассмотрении возможности использования разрушаемого экрана на основе кварцевого песка для предотвращения самовоспламенения водородно-воздушной смеси за отраженной ударной волной. Сравнивалась эффективность экрана из кварцевого песка с эффективностью использования перегородки из пористого полиуретана.

Эксперименты проводились на ударной трубе. Камера высокого давления длиной 2000 мм с внутренним диаметром 50 мм наполнялась гелием. Камера низкого давления с общей длиной 3942 мм и прямоугольным внутренним сечением 40 × 40 мм наполнялась водородно-воздушной смесью.

На рис. 1, *a* представлена схема размещения гранулированного экрана (destructible screen, DS) и пьезоэлектрических датчиков давления. Разрушаемый гранулированный экран или пористая перегородка, представленные на рис. 1, *b*, размещались в камере низкого давления на расстоянии 510 мм от ее закрытого конца. Таким образом, влиянием закрытого конца камеры низкого давления пренебрегалось. Датчики давления #2–#4 регистрировали падающую (incident shock wave, ISW) и отраженную от экрана (reflected shock wave, RSW) ударные волны. Датчики давления #5–#7 регистрировали прошедшую через экран ударную волну (transmitted shock wave, TSW). На рис. 2 представлены типичные осциллограммы датчиков давления при взаимодействии ударной волны с разрушаемым экраном в том случае, когда число Маха падающей ударной волны равнялось $M_1 = 3.18$. Определялись давление P_5 за отраженной ударной волной, давление на фронте падающей P_2 и проходящей P'_2 ударных волн. Для определения условий воспламенения смеси при отражении от твердой стенки и получения эталонных характеристик потока вместо разрушаемого экрана в том же положении размещался неразрушаемый алюминиевый экран.

Воспламенение водородно-воздушной смеси регистрировалось с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) (photomultiplier tube, PMT), размещенного в закрытом конце камеры высокого давления. Использовался оптический фильтр типа ZWB1 с эффективной шириной пропускания 270–370 нм. Динамика разрушаемого экрана регистрировалась высокоскоростной цифровой камерой Phantom Veo 710. Частота регистрации составляла 24 000 fps при разрешении 1216 × 256 и времени экспозиции 1 μ s. Непрерывная подсветка экрана осуществлялась галогеновой лампой мощностью 1000 W.

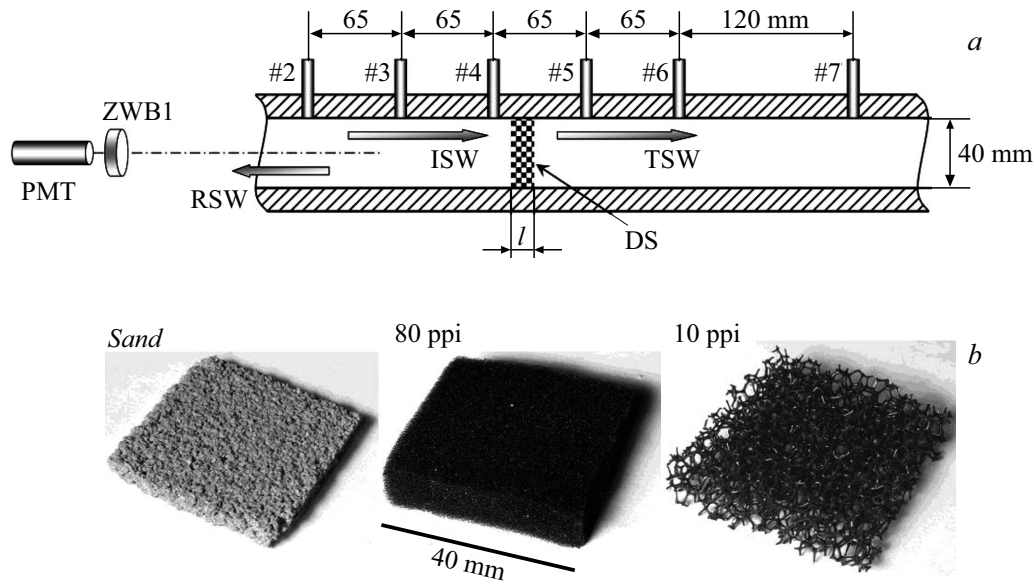


Рис. 1. *a* — схема расположения разрушаемого экрана (DS), датчиков давления (#2–#7) и ФЭУ (PMT) в ударной трубе, l — толщина экрана. *b* — фотографии разрушаемого экрана и полиуретановых стенок.

Разрушаемый экран изготавливался из кварцевого песка со связующим компонентом на основе синей глины в массовом соотношении песок:глина:вода = 10:1:1.3. Использовался песок с размером гранул 0.6–0.8 mm. Проницаемая стенка изготавливалась из полиуретана с открытым типом пор. Такой полиуретан характеризуется плотностью пор на дюйм (pores per inch), которая составляла 10 или 80 ppi. Средние толщины и массы экрана и проницаемой стенки представлены в таблице.

Водородно-воздушная смесь предварительно приготавливалась в отдельном сосуде объемом 31 по парциальным давлениям и перемешивалась вентилятором бесщеточного типа. Максимальное давление в сосуде смешения составляло 0.6 МПа. При проведении предварительных экспериментов использовались три состава: стехиометрическая смесь в объемном соотношении $H_2 : O_2 : N_2 = 2 : 1 : 3.76$ (30 vol.% водорода) и две смеси с соотношениями компонентов $H_2 : O_2 : N_2 = 0.77 : 1 : 3.76$ (14 vol.% водорода) и $H_2 : O_2 : N_2 = 0.59 : 1 : 3.76$ (11 vol.% водорода).

В дальнейшем эксперименты проводились при объемной концентрации водорода 14%. С одной стороны, в такой смеси при начальном давлении $P_1 = 0.02$ МПа воспламенение не возникало за падающей ударной волной в широком диапазоне чисел Маха. С другой стороны, можно определить предельные числа Маха падающей ударной волны, при которых воспламенение возникало за отраженной ударной волной. В таблице представлен диапазон чисел Маха $M_1 = 1.98–2.10$, при котором за отраженной от неразрушаемого экрана ударной волной не регистрировалось самовоспламенение смеси, а также диапазон чисел Маха $M_1 = 2.29–3.44$, при котором самовоспламенение возникало. Температура T_5^* и давление P_5^* за отраженной ударной волной до момента

воспламенения в таких случаях могут быть оценены в одномерном приближении по известным уравнениям газодинамики

$$\frac{T_5^*}{T_{298}} = \frac{[2(\gamma - 1)M_1^2 + (3 - \gamma)][(3\gamma - 1)M_1^2 - 2(\gamma - 1)]}{(\gamma + 1)^2 M_1^2}, \quad (1)$$

$$\frac{P_5^*}{P_1} = \frac{2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1} \frac{(3\gamma - 1)M_1^2 - 2(\gamma - 1)}{(\gamma - 1)M_1^2 + 2}. \quad (2)$$

Здесь $\gamma = 1.4$ — показатель адиабаты для смеси двухатомных газов. В таблице приведены расчетные значения температуры T_5^* . При числах Маха $M_1 = 1.98–2.10$ в отсутствие воспламенения давление за отраженной ударной волной P_5 соответствовало расчетному значению P_5^* . Однако при числах Маха $M_1 = 2.29–3.44$ при последующем воспламенении давление P_5 превышало расчетное на 50–60%. Это повышение давления обусловливается сгоранием ударно-сжатой смеси. На рис. 3 представлена зона горения (светлая область), возникающая за отраженной от экрана ударной волной. Экран при этом полностью разрушается на отдельные гранулы размером 0.6–0.8 mm. Средняя скорость гранул на расстоянии около одного калибра трубы, рассчитанная по последовательным кадрам, составляет около 120 м/с.

При взаимодействии ударной волны с разрушаемым экраном в диапазоне чисел Маха $M_1 = 2.29–2.30$ воспламенение не регистрировалось. При разрушении экрана давление P_5 за отраженной ударной волной составляло 0.9 от расчетного P_5^* , а давление P_2' за проходящей ударной волной составляло 0.4 от первоначального значения P_2 . В случае воспламенения смеси при повышении чисел Маха до значений $M_1 = 2.9–3.44$

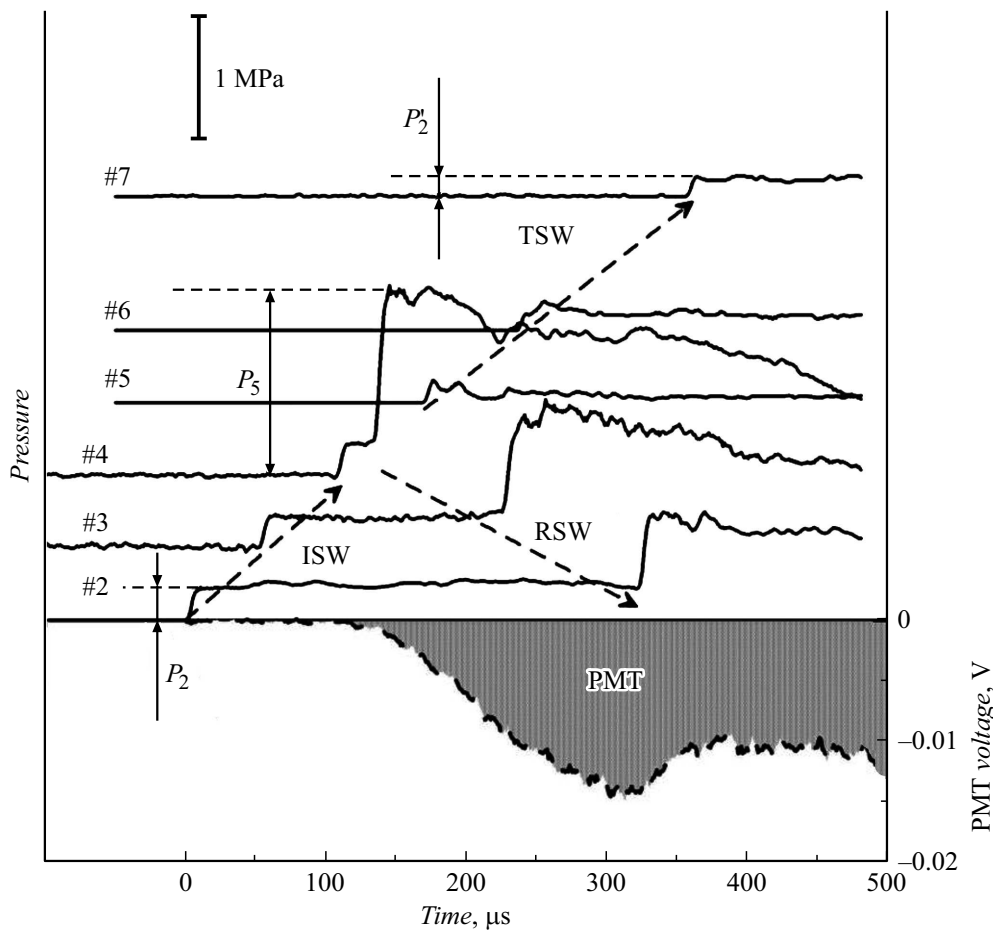


Рис. 2. Осциллограммы ФЭУ и датчиков давления перед разрушаемым экраном (#2–#4) и за экраном (#5–#7), диаграмма ударно-волнового взаимодействия с разрушаемым экраном.

Условия самовоспламенения (символ „+“) или отсутствия самовоспламенения (символ „–“) водородно-воздушной смеси при отражении ударной волны от экрана и параметры отраженной P_5/P_5^* и проходящей P_2'/P_2 ударных волн (число символов соответствует количеству экспериментов)

Тип экрана (толщина l , масса)	Число Маха M_1 падающей ударной волны (температура T_5^*)			
	1.98–2.10 (740–800 K)	2.29–2.30 (910–920 K)	2.9–3.2 (1340–1560 K)	3.28–3.44 (1650–1790 K)
Жесткая стенка	– – – $P_5/P_5^* = 1.0$	++ $P_5/P_5^* = 1.5$	+++ $P_5/P_5^* = 1.5–1.6$	++ $P_5/P_5^* = 1.5$
Песок ($l = 4$ mm, 6–7 g)		– – $P_5/P_5^* = 0.9$ $P_2'/P_2 = 0.4$	++++ $P_5/P_5^* = 1.2–1.4$ $P_2'/P_2 = 0.5–0.6$	+ $P_5/P_5^* = 1.2$ $P_2'/P_2 = 0.6$
Поролон 80 ppi ($l = 10$ mm, 0.6 g)				++ $P_5/P_5^* = 0.9$ $P_2'/P_2 = 0.6$
Поролон 10 ppi ($l = 10$ mm, 0.4 g)				++ $P_5/P_5^* = 0.6–0.9$ $P_2'/P_2 = 1.0–1.2$
Без экрана	– –	– – –	– – – –	– – – – –

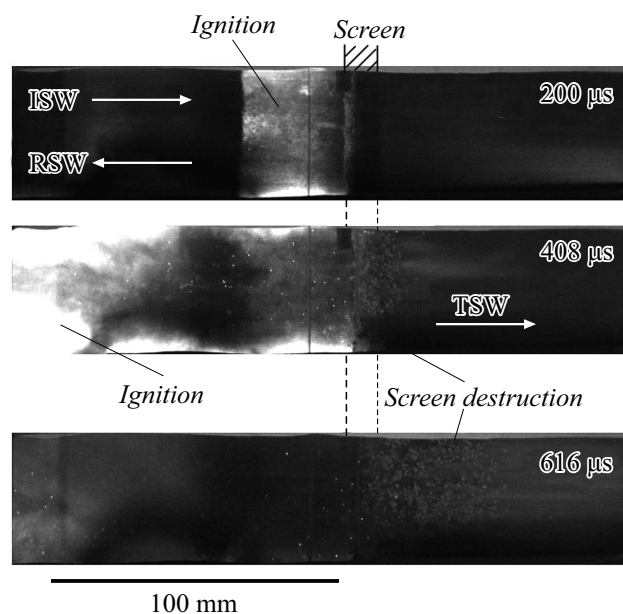


Рис. 3. Последовательные фотографии разрушения экрана и воспламенения горючей смеси за отраженной ударной волной.

давление за отраженной ударной волной повышалось до 1,2–1,4 относительно расчетного. Это давление значительно ниже, чем при воспламенении в результате отражения от жесткой стенки. Давление за проходящей ударной волной составляло 0,5–0,6 от первоначального значения.

Использование полиуретана (поролон) с плотностью пор как 80 ppi, так и 10 ppi вызывало воспламенение водородно-воздушной смеси, несмотря на снижение интенсивности отраженной ударной волны до 0,6–0,9 от расчетного значения (см. таблицу). При использовании пористой перегородки воспламенение происходило внутри нее, а снижение интенсивности отраженной ударной волны определялось проницаемостью перегородки.

При использовании полиуретана с плотностью пор 80 ppi ослабление проходящей ударной волны было сравнимо с ослаблением проходящей ударной волны за разрушаемым экраном. Для перегородки с плотностью пор 10 ppi интенсивность проходящей ударной волны сравнима с интенсивностью падающей ударной волны или может превышать ее на 20%. Это повышение давления обуславливается самовоспламенением горючей смеси при прохождении ударной волны через пористую перегородку.

На основе приведенных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что использование разрушаемого экрана может предотвратить воспламенение водородно-воздушной смеси (14 vol.%) в узком диапазоне чисел Маха падающей ударной волны $M_1 = 2.29–2.30$. При числах Маха M_1 , больших этого значения, нагрев смеси за отраженной ударной волной приводит к воспламенению не только при разрушении

экрана, но и при размещении пористой проницаемой перегородки.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-21-00251 (<https://rscf.ru/project/23-21-00251/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.G. John, K.D. Gardner, F.K. Lu, V.V. Volodin, S.V. Golovastov, V.V. Golub, in *Proc. 25th Int. Symp. on shock waves* (Bangalore, India, 2005), p. 11. https://arc.uta.edu/publications/cp_files/10044.pdf
- [2] Д.З. Хуснутдинов, А.В. Мишуев, В.В. Казеннов, А.А. Комаров, Н.В. Громов, *Аварийные взрывы газозвушных смесей в атмосфере* (Минобрнауки РФ, МГСУ, М., 2014), с. 69.
- [3] Г.Ю. Бивол, В.В. Володин, Ю.В. Жилин, В.М. Бочарников, *TBT*, **57** (1), 146 (2019). DOI: 10.1134/S0040364419010022 [G.Yu. Bivol, V.V. Volodin, Yu.V. Zhilin, V.M. Bocharnikov, *High Temp.*, **57** (1), 130 (2019). DOI: 10.1134/S0018151X19010024].
- [4] H. Lv, Z. Wang, J. Li, *Int. J. Multiph. Flow*, **89**, 255 (2017). DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.07.019
- [5] Y. Sugiyama, M. Izumo, H. Ando, A. Matsuo, *Shock Waves*, **28** (3), 627 (2018). DOI: 10.1007/s00193-018-0813-5
- [6] A. Britan, G. Ben-Dor, O. Igra, H. Shapiro, *Int. J. Multiph. Flow*, **27** (4), 617 (2001). DOI: 10.1016/S0301-9322(00)00048-3
- [7] T. Schunck, D. Eckenfels, *SN Appl. Sci.*, **3** (8), 731 (2021). DOI: 10.1007/s42452-021-04720-3
- [8] О.А. Мирова, А.Л. Котельников, В.В. Голуб, Т.В. Баженова, *TBT*, **53** (1), 145 (2015). DOI: 10.7868/S0040364415010172 [O.A. Mirova, A.L. Kotelnikov, V.V. Golub, T.V. Bazhenova, *High Temp.*, **53** (1), 155 (2015). DOI: 10.1134/S0018151X15010174].
- [9] O. Igra, J. Falcovitz, L. Houas, G. Jourdan, *Prog. Aerosp. Sci.*, **58**, 1 (2013). DOI: 10.1016/j.paerosci.2012.08.003
- [10] А.М. Тереза, Г.Л. Агафонов, Э.К. Андержанов, А.С. Бетев, С.П. Медведев, С.В. Хомик, *Хим. физика*, **41** (8), 66 (2022). DOI: 10.31857/S0207401X2208012X [A.M. Tereza, G.L. Agafonov, E.K. Anderzhanov, A.S. Betev, S.P. Medvedev, S.V. Khomik, *Rus. J. Phys. Chem. B*, **16** (4), 686 (2022). DOI: 10.1134/S1990793122040297].
- [11] В.В. Мартыненко, О.Г. Пенязьков, К.А. Раготнер, С.И. Шабуня, *Инж.-физ. журн.*, **77** (4), 100 (2004). <http://www.itmo.by/jepeter/782005r/7801190.html> [V.V. Martynenko, O.G. Penyaz'kov, K.A. Ragotner, S.I. Shabunya, *J. Eng. Phys. Thermophys.*, **77** (4), 785 (2004). DOI: 10.1023/B:JOEP.0000045164.40205.6f].