

УДК 534.2

## ВЛИЯНИЕ ДИАФРАГМЫ НА ПРОХОЖДЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ ДВУХ СМЕСЕЙ

Цз.-М. Ли<sup>1</sup>, К.-М. Чунг<sup>2</sup>, Я.-Ч. Хсу<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный университет Сингапура, 119077 Сингапур<sup>2</sup>Национальный университет Чен-Кунг, 701 Тайнань, Тайвань, kmchung@mail.ncku.edu.tw

Экспериментально исследовано влияние толщины диафрагмы на переход детонационной волны из смеси пропан — кислород (донор) в смесь пропан — воздух (акцептор). Во всех экспериментах наблюдалось ослабление детонационной волны вблизи границы раздела смесей. Наличие диафрагмы приводило к увеличению расстояния, необходимого для повторного инициирования детонационной волны в акцепторе. При толщине диафрагмы меньше 50 мкм скорость распространения волны приближалась к скорости волны в опыте без диафрагмы, в котором использовался клапан со скользящим затвором.

Ключевые слова: переход горения в детонацию, детонация, распространение через границу смесей, диафрагма, пропан/кислород.

DOI 10.15372/FGV20150613

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование самоподдерживающейся детонации представляет интерес как с точки зрения физики процесса, так и в плане практических приложений. Изменение сечения трубы или состава смеси ведет к нестационарным переходным режимам распространения. Эксперименты [1] показали, что энергетическим эквивалентом выхода детонации из трубки в объем можно считать работу расширения продуктов детонации в момент выхода. В [2] установлено, что процесс передачи детонации зависит от разности скоростей реакций и запасов энергии в донорной и акцепторной смесях. Более того, в [3] наблюдались затухание и повторное инициирование в неоднородных газовых смесях. В работах [4–6] детонационная волна (или прошедшая через границу ударная волна) после ослабления вблизи границы раздела повторно инициировалась ниже по потоку. В этих экспериментальных исследованиях для отделения одной смеси от другой использовались диафрагма или клапан со скользящим затвором [7]. Как известно, диафрагма может замедлять распространение детонационной волны и отражение

ударной волны.

В данном исследовании детонационная волна инициировалась в процессе перехода горения в детонацию в круглых гладких трубах разной длины с донорной смесью (пропан/кислород). Исследовались непрерывный переход, повторное инициирование и разрушение падающей детонационной волны в акцепторной смеси пропан/воздух в присутствии диафрагмы и без нее. Установлено, что наличие диафрагмы влияет на распространение волны, и это отражается на отпечатках на закопченной фольге.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты выполняли в гладкой алюминиевой трубе внутреннего диаметра 50.8 мм (рис. 1). Труба разделялась диафрагмой на участок донорной смеси длиной 167.6 ÷ 304.8 мм и участок акцепторной смеси длиной 922 мм. Перед каждым испытанием давление в трубе понижалось до 20 ÷ 30 Па с помощью вакуумного насоса (Leybold PT50).

Пониженное давление контролировалось вакуумметром Leybold Inficon IR090. В качестве донора и акцептора использовались соответственно стехиометрические смеси  $C_3H_8/O_2$  и  $C_3H_8/воздух$  при температуре окружающей среды и атмосферном давлении. Соотношение  $C_3H_8/O_2$  определялось по парциальным давлениям.

© Li Jiun-Ming<sup>1</sup>, Chung Kung-Ming<sup>2</sup>, Hsu Yao-Chung<sup>3</sup>, 2015.

<sup>1</sup>National University of Singapore, 119077 Singapore. <sup>2</sup>Aerospace Science and Technology Research Center, National Cheng Kung University, 711 Tainan, Taiwan. <sup>3</sup>Institute of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University, 701 Tainan, Taiwan.

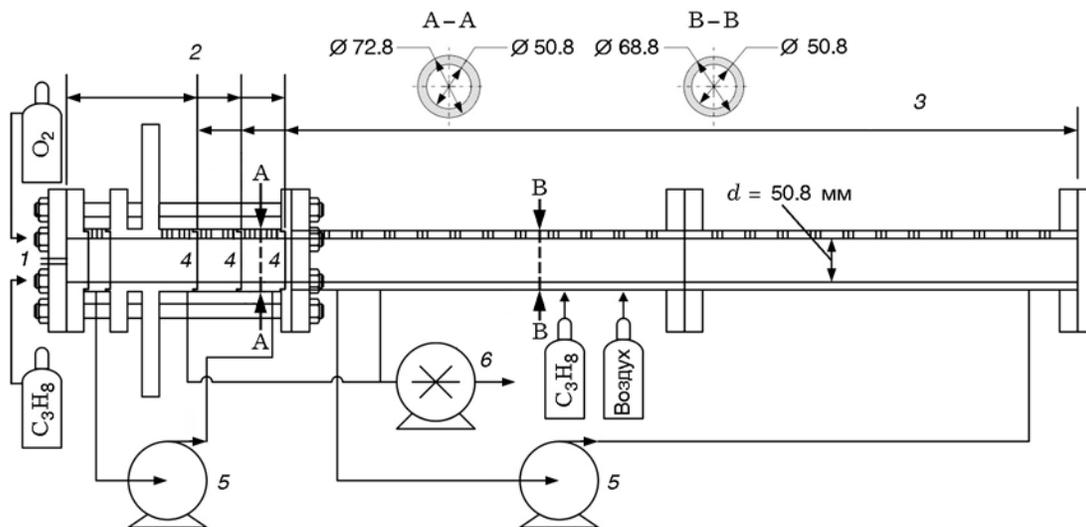


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 — инициирование, 2 — донорная секция, 3 — секция акцептора, 4 — положение диафрагмы, 5 — циркуляционный насос, 6 — вакуумный насос

Чтобы обеспечить однородность смесей, в течение 10 мин работал циркуляционный насос, который за это время прокачивал объем, минимум в шесть раз превосходящий объем трубы. В каждом эксперименте соотношение  $C_3H_8/O_2$  дополнительно проверялось на газовом хроматографе China 9800. Система инициирования состояла из трансформатора (May & Christe z201402e2,  $220 \div 14\,000$  В) и электрического разрядника на закрытом конце. Оценки показывают, что длительность и энергия электрического разряда равны 2 мс и 0.47 Дж соответственно. В результате перехода горения в детонацию возникала падающая детонационная волна. Степень пересжатия ( $D^*$ ), представляющая собой отношение скорости детонационной волны к скорости Чепмена — Жуге, для падающей детонационной волны изменялась в зависимости от длины участка донорной смеси  $L_d$  — расстояния вдоль оси от закрытого торца до диафрагмы.

Смеси  $C_3H_8/O_2$  и  $C_3H_8/воздух$  отделялись друг от друга перегородкой из полиэфирной пленки Shinrex толщиной 9 мкм или Lumigor толщиной 25, 38, 100 мкм. В отдельном эксперименте без перегородки применялся клапан со скользящим затвором (ITT Engineered Valves, XS150). По регламенту производителя время, необходимое для пол-

ного открывания затвора, составляет 0.274 с. Известно, что предварительное открывание затвора, до приближения ударной волны, приводит к формированию граничного слоя с градиентом концентрации. Действие гравитации вызывает деформирование этого граничного диффузионного слоя. Чтобы минимизировать влияние диффузии, искра инициируется через 30 мс после полного открывания клапана. После инициирования падающей детонационной волне требуется  $7.5 \div 9.5$  мс, чтобы достичь границы раздела смесей. Это время меняется в зависимости от расстояния  $L_d$ .

Датчики давления (PCB 113A22, время нарастания 2 мкс), расположенные с интервалом 3.81 см вдоль трубы, позволяли оценивать среднюю скорость распространяющихся волн. Скорость волны определялась по формуле  $u = \Delta L / (\Delta t \pm e_t)$ . Здесь  $\Delta t$  — время прохождения волной промежутка между двумя датчиками,  $\Delta L$  — длина этого промежутка. Неопределенность в измерении времени прохождения волны между двумя датчиками равна  $e_t = \sqrt{e_\tau^2 + e_r^2}$ , где  $e_\tau$  — погрешность, обусловленная тем, что фронт волны не прямоугольный, а имеет конечную протяженность во времени,  $e_r$  — собственное время нарастания в датчике давления [8]. Оценки показали, что неопределенность в измерении скорости детонационной волны равна

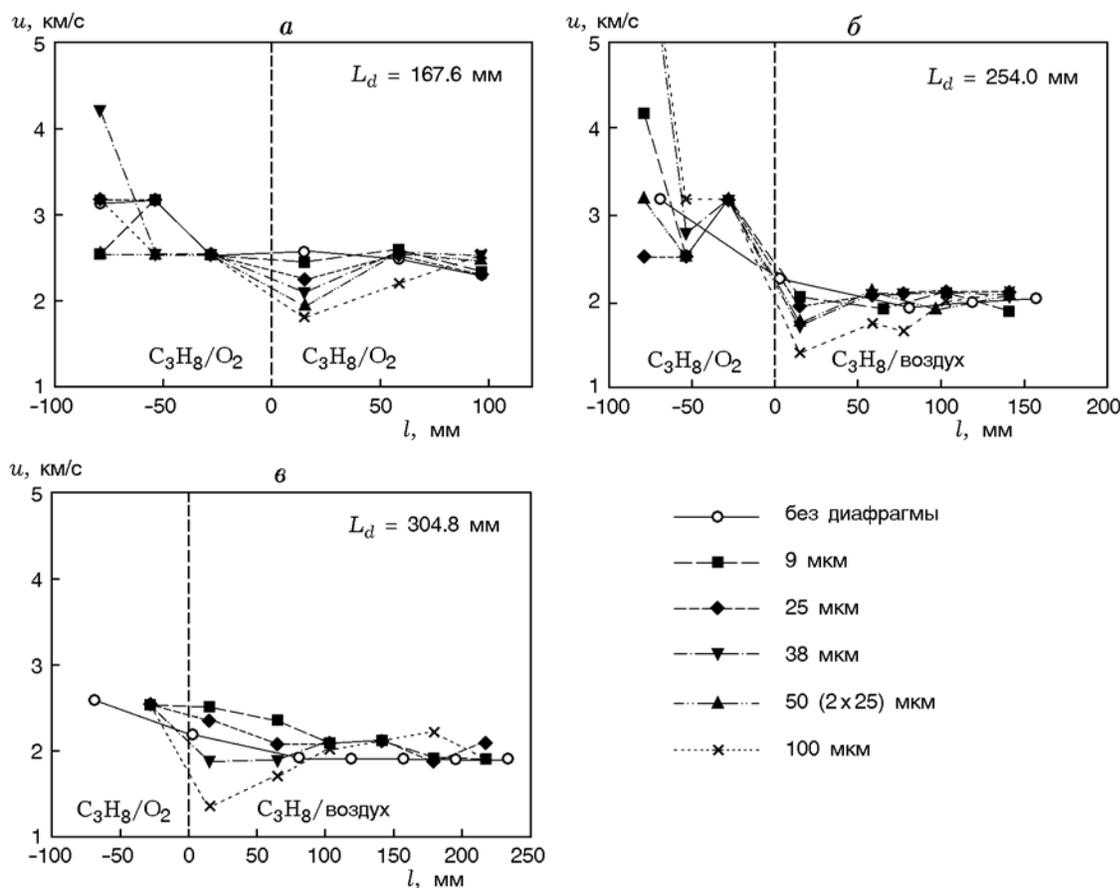


Рис. 2. Влияние диафрагмы на процесс перехода детонационной волны из одной смеси в другую

$8 \div 34$  %.

Для регистрации структуры ячеек после разрушения диафрагмы или полного открывания скользящего затвора внутрь акцептора вставляли рулон закопченной фольги. Для того, чтобы обеспечить оседание сажи на алюминиевый лист размером  $29 \times 47$  см, внутреннюю поверхность листа покрывали силиконовым маслом Dow-Corning DC200 (вязкость 10 сСт), а затем на него осаждался слой сажи от горящего керосина.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На длине участка смеси-донора  $L_d = 167.6$  мм (рис. 2,а) вверх по потоку слева от диафрагмы, разделяющей смеси, наблюдается резкое изменение скорости падающей детонационной волны. Неустойчивое поведение можно объяснить внутренней неоднородностью процесса перехода горения в детонацию, обусловленной присутствием диафрагмы [9]. Вниз по

потоку от границы раздела скорость распространения в случае, если диафрагма тонкая, приближается к скорости в случае со скользящим затвором. Диафрагма большей толщины, например 100 мкм, оказывает более сильное воздействие, чем тонкая. С увеличением длины участка донора ( $L_d = 254$  мм, рис. 2,б) также наблюдается изменение скорости перехода горения в детонацию. При толщине диафрагмы меньше 50 мкм ее влияние на переход волны из смеси  $C_3H_8/O_2$  в смесь  $C_3H_8/воздух$  значительно уменьшается.

Как показано на рис. 2,в, несколько меньшее значение  $D^*$  (1.08) получено в секции смеси-донора благодаря затуханию пересжатой детонации из-за большого расстояния  $L_d$ . Скорость распространения волны вблизи границы смесей зависит как от толщины диафрагмы, так и от степени пересжатия  $D^*$ . Поэтому на расстоянии больше 100 мм за диафрагмой скорость движения волны несколько больше, чем в опыте со скользящим затвором.

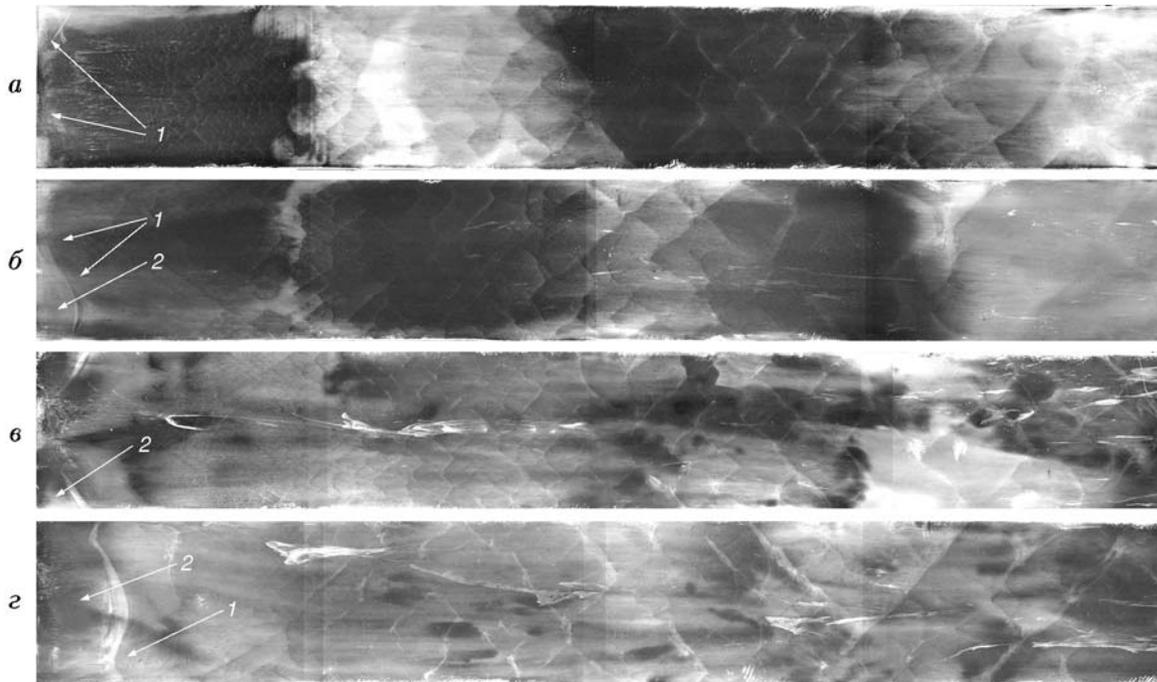


Рис. 3. Регистрация структуры течения на закопченной фольге после разрыва диафрагмы:  $L_d = 254$  мм, толщина диафрагмы: *a* — 9 мкм, *б* — 25 мкм, *в* — 38 мкм, *г* — 100 мкм; 1 — повторное инициирование, 2 — срыв детонации

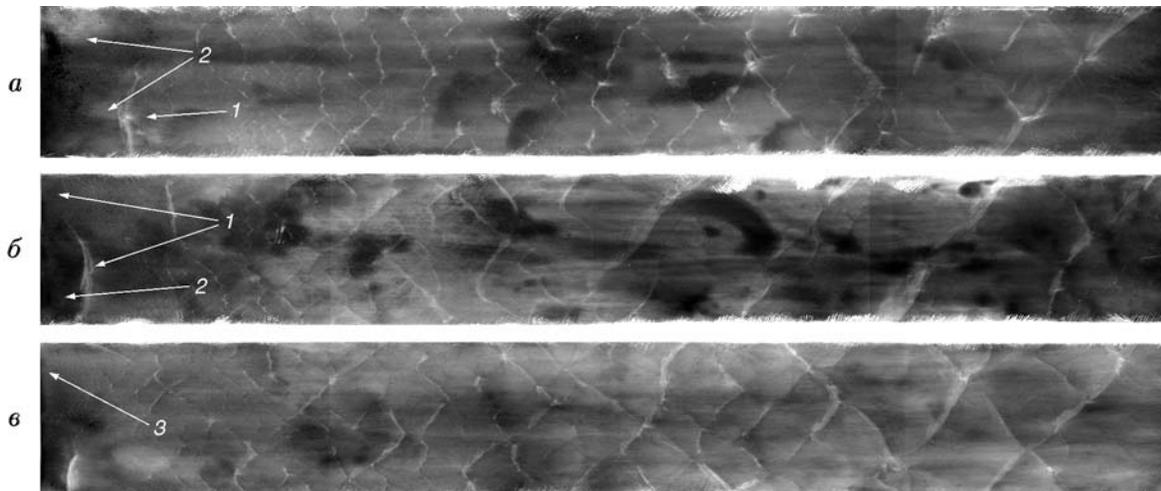


Рис. 4. Регистрация структуры течения на закопченной фольге за скользящим затвором при его полном открывании:

$L_d = 193$  (*a*), 243.8 (*б*), 294.6 мм (*в*); 1 — повторное инициирование, 2 — срыв детонации, 3 — переход в детонацию с мелкоячейстой структурой

Визуализация на закопченной фольге поверхностного течения на участке акцептора (рис. 3) показала, что вблизи границы раздела появляются ячейстые структуры (ширина ячейки  $\leq 1.0$  мм) и затем резко исчезают ниже по потоку, что указывает на первичную де-

тонационную волну, за которой следует ударная волна. Детонационная волна повторно инициируется во всех экспериментах, в которых на закопченной фольге фиксируется структура мелких ячеек. В дальнейшем, по мере того как затухающая детонационная волна распро-

страняется вниз по потоку, ширина ячеек увеличивается. Если говорить о влиянии толщины диафрагмы, то видно, что для повторного инициирования детонационной волны при установке диафрагмы толщиной 100 мкм (рис. 3,з) требуется большая дистанция, чем при диафрагмах меньшей толщины (рис. 3,а–в). Существует корреляция между толщиной диафрагмы и интенсивностью прошедшей ударной волны: интенсивность выше в случае более тонкой диафрагмы, что означает практически полную передачу без полного затухания падающей детонационной волны или ячеистой структуры (см. рис. 3,а).

Следовые отпечатки на закопченной фольге в экспериментах со скользящим затвором показаны на рис. 4. Наблюдаются разрушение, повторное инициирование и затухание прошедшей детонационной волны. Затухание происходит вблизи границы раздела смесей вследствие их неоднородности и скачка концентрации. В работе [9] показано, что степень пересжатия, достигаемая в процессе перехода горения в детонацию в стехиометрической смеси  $C_3H_8/O_2$ , примерно одинакова для трех исследованных участков смеси-донора различной длины  $L_d$ . Для детонационной волны, проходящей из смеси  $C_3H_8/O_2$  в смесь  $C_3H_8/воздух$ , разделенных диафрагмой толщиной  $\leq 38$  мкм, наблюдается небольшое увеличение размера ячейки в направлении ниже по потоку по сравнению с экспериментом со скользящим затвором. Такое отличие можно приписать тому факту, что в присутствии диафрагмы падающая детонационная волна более сильная.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены эксперименты по исследованию перехода детонационной волны из смеси  $C_3H_8/O_2$  в смесь  $C_3H_8/воздух$  в присутствии диафрагмы и без нее. При увеличении длины участка смеси-донора детонационная волна ослабевает. Вследствие скачка концентрации, ниже по течению сразу за границей раздела смесей во всех тестах возникает прошедшая ударная волна. В присутствии диафрагмы

индуцируется более сильная падающая детонационная волна перед границей раздела смесей. При толщине диафрагмы меньше 50 мкм влияние диафрагмы на прошедший сигнал существенно уменьшается: скорость распространения детонационной волны в трубе с диафрагмой приближается к скорости, достигаемой в смесях, разделенных заслонкой скользящего затвора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Васильев А. А.** Распространение газовой детонации при одновременном изменении сечения трубы и состава смеси // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 2. — С. 142–147.
2. **Kuznetsov M. S., Dorofeev S. B., Efimenko A. A., Alekseev V. I., Breitung W.** Experimental and numerical studies on transmission of gaseous detonation to a less sensitive mixture // Shock Waves. — 1997. — V. 7. — P. 297–304.
3. **Kuznetsov M. S., Alekseev V. I., Dorofeev S. B., Matsukov I. D., Boccio J. L.** Detonation propagation, decay and reinitiation in nonuniform gaseous mixtures // Proc. Combust. Inst. — 1998. — V. 27. — P. 2241–2247.
4. **Campbell C., Littler W. B., Whitworth C. C.** The measurement of pressures developed in explosion waves // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. — 1932. — V. 137. — P. 380–396.
5. **Berets D. J., Greene E. F., Kistiakowsky G. B.** Gaseous detonations. I. Stationary waves in hydrogen-oxygen mixtures // J. Amer. Chem. Soc. — 1950. — V. 72. — P. 1080–1086.
6. **Mooradian A. J., Gordon W. E.** Gaseous detonation. I. Initiation of detonation // J. Chem. Phys. — 1951. — V. 19. — P. 1166.
7. **Lieberman D. H., Shepherd J. E.** Detonation interaction with a diffuse interface and subsequent chemical reaction // Shock Waves. — 2007. — V. 16. — P. 421–429.
8. **Lu F. K., Ortiz A. A., Li J. M., Kim C. H., Chung K. M.** Detonation of shock and detonation wave propagation by cross correlation // Mech. Systems Signal Proces. — 2009. — V. 23. — P. 1098–1111.
9. **Li J. M., Lai W. H., Chung K. M., Lu F. K.** Experimental study on transmission of an overdriven detonation wave from propane/oxygen to propane/air // Combust. Flame. — 2008. — V. 154. — P. 331–345.

Поступила в редакцию 25/VI 2014 г.