

03;10

## Распространение детонационной волны в водородно-воздушных смесях в каналах со звукопоглощающей поверхностью

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

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва  
E-mail: grigorij-bivol@yandex.ru

Поступило в Редакцию 25 февраля 2015 г.

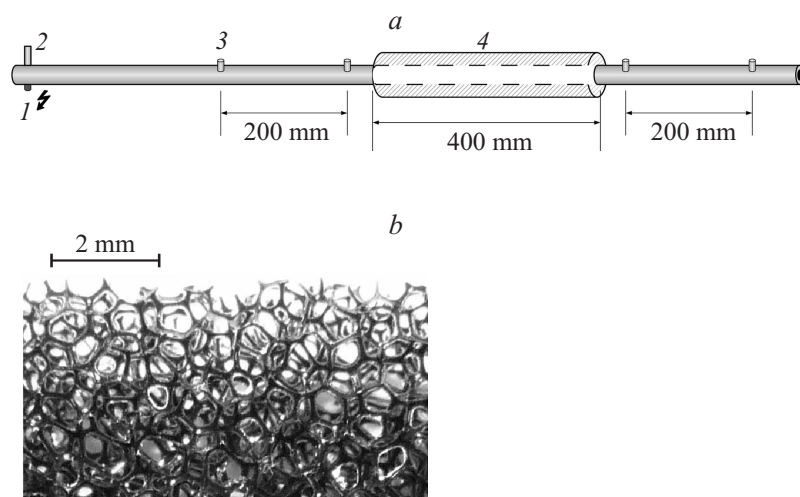
Экспериментально исследовалась возможность использования звукопоглощающих поверхностей для ослабления интенсивности детонационной волны в водородно-воздушных смесях. Эксперименты проводились в цилиндрической детонационной трубе, открытой с одного конца. Иницирование взрывчатой смеси производилось с помощью искрового разрядника, расположенного у закрытого конца детонационной трубы. В качестве звукопоглощающих элементов использовался акустический поролон с открытыми порами размером 0.5 mm и плотностью 0.035 g/cm<sup>3</sup>. Определена степень ослабления интенсивности фронта детонационной волны в зависимости от объемной концентрации водорода.

Одним из основных факторов, приводящих к техногенным катастрофам на объектах атомной промышленности, является взрыв водородно-воздушных смесей в гермооболочке реактора или в реакторном помещении. Образование водорода производится вследствие гидролиза воды в присутствии катализатора (цирконий) при нережимных условиях работы реактора. В отличие от неатомных объектов, взрывоопасная смесь не может быть сброшена в атмосферу из-за возможного содержания в ней радионуклидов. В условиях замкнутого помещения и при отсутствии интенсивного теплоотвода случайно возникший фронт пламени будет распространяться с ускорением. Различные виды неустойчивости на фронте пламени образуют газодинамические возмущения, которые отражаются от границ химического реактора, взаимодействуют друг с другом и приводят к формированию детонационной волны [1]. Экспериментальное исследование воздействия акустического поля на развитие неустойчивостей в области воспламенения приведено, например, в [2].

Помимо химических способов ингибирования детонационного горения [3] одним из методов ослабления интенсивности детонационной волны, ее замедления, и даже распада может быть использование специальных акустически поглощающих элементов конструкций. Механизм воздействия заключается в том, что на подобных поверхностях происходит ослабление поперечных волн, составляющих фронт детонационной волны. Это вызывает разрушение ячеистой структуры детонационного фронта, являющегося важной частью структуры детонационной волны [4,5]. Для смесей с регулярной ячеистой структурой поперечные волны играют основную роль в подавлении детонации [6]. В разбавленных аргоном газовых смесях подавление детонации может происходить также из-за общего искривления фронта горения, вызванного, например, трением на стенках.

Одним из существенных факторов при распространении пламени и формировании детонации является неравномерное распределение концентрации водорода. Поэтому при распространении пламени в каналах со звукопоглощающими поверхностями необходимо учитывать молярный избыток водорода по отношению к воздуху — ER. Цель работы заключалась в определении степени ослабления детонационной волны в водородно-воздушной смеси в цилиндрическом канале с помощью звукопоглощающих покрытий с открытыми порами в зависимости от концентрации водорода.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Цилиндрическая детонационная труба с внутренним диаметром 20 мм и длиной 3300 мм изготовлена из стали. Звукопоглощающая поверхность с внутренним диаметром 20 мм и длиной 400 мм размещалась на расстоянии 2500–2900 мм относительно закрытого конца детонационной трубы. Звукопоглощающая секция представляла собой трубу внутренним диаметром 40 мм, стенки которой были покрыты слоем звукопоглощающего поролон толщиной 10 мм; таким образом, внутренний диаметр канала был таким же, как и в основной трубе. Выбор положения звукопоглощающей секции обусловлен динамикой фронта пламени. В выбранном диапазоне ER непосредственно перед звукопоглощающей секцией происходило формирование детонации. Таким образом, регистрировались параметры детонационной волны перед звукопоглощающей секцией и после этой секции. Система диагностики представлена четырьмя пьезоэлектрическими датчиками давления РСВ113А и четырьмя фотодиодами ФД-256, расположенными попарно в четырех сечениях.

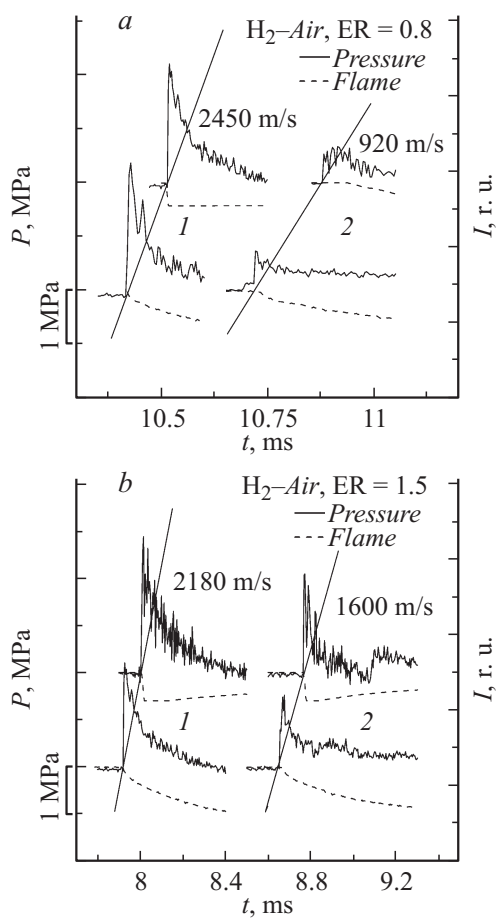


**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки (а): 1 — автомобильная свеча, 2 — магистраль с горючей смесью, 3 — пьезоэлектрические датчики давления и фотодиоды, 4 — секция с пористыми стенками; фотография пористого материала (b).

Две пары датчиков располагались перед звукопоглощающей секцией на расстояниях 300 и 100 мм до секции, и 100 и 300 мм после секции.

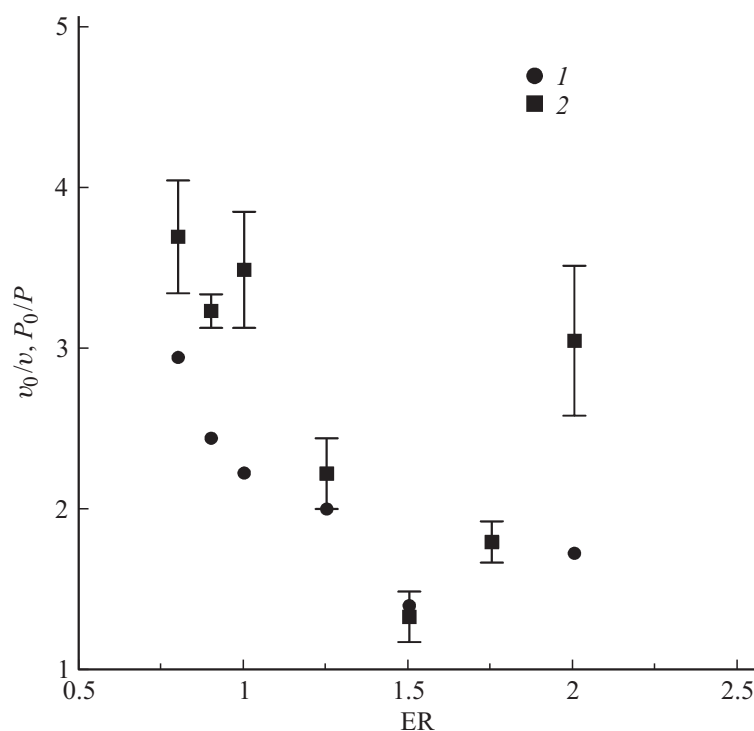
Воспламенение водородно-воздушной смеси осуществлялось с помощью автомобильной свечи у закрытого конца детонационной трубы. Энергия искрового разряда не превышала 0.1 J. В качестве звукопоглощающего материала использовался акустический поролон с открытыми порами. Размер пор составлял порядка 0.5 мм, плотность поролона с учетом объема пор составляла 0.035 г/см<sup>3</sup>. Начальное давление в открытой детонационной трубе равнялось 0.1 МПа, начальная температура — 300 К. Использовалась водородно-воздушная смесь в соотношении ER = 0.8–2.0.

На рис. 2 представлены осциллограммы двух датчиков давления и двух фотодиодов, регистрирующих детонационную или ударную волну после прохождения детонационной волны через гладкую или звукопоглощающую секцию. Результаты приведены для двух соотношений ER: 0.8 и 1.5. Скорость детонационной волны в отсутствие звукопоглощающей секции составляла 2450 м/с для ER = 0.8 и 2180 м/с



**Рис. 2.** Осциллограммы давления и свечения в гладкой трубе (1) и после звукопоглощающей секции (2) в водородо-воздушной смеси для  $ER = 0.8$  (a) и  $ER = 1.5$  (b).

для  $ER = 1.5$ . Давление на фронте детонационной волны равнялось 2.0 и 2.5 МПа соответственно. Интенсивность ударной волны и ее скорость после прохождения звукопоглощающей секции снижались до 0.75 МПа, 920 м/с при  $ER = 0.8$  и до 0.8 МПа, 1200 м/с при  $ER = 2.0$ .



**Рис. 3.** Коэффициент снижения скорости (1) и давления (2) на фронте ударной/детонационной волны после прохождения звукопоглощающей секции в водородно-воздушной смеси.

Помимо ослабления интенсивности волны регистрировался распад детонационной волны на ударную волну и фронт пламени. Разница во времени регистрации фронтов ударной волны и фронта пламени составляла 20–100  $\mu\text{s}$  в исследуемом диапазоне ER 0.8–2.0.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований в диапазоне ER 0.8–2.0. Давление детонационной волны в камере без поролон ( $P_0$ ) составляло 2.3, 2.4, 3, 1.8, 2.6, 2.3 и 2.1 МПа для ER = 0.8, 0.9, 1, 1.25, 1.5, 1.75 и 2 соответственно. Скорость детонационной волны в камере без поролон ( $v_0$ ) составляла 2400, 2200, 2200, 2000, 2180 и 1950 м/с для ER = 0.8, 0.9, 1, 1.25, 1.5 и 2

соответственно. Наименьшее ослабление интенсивности детонационной волны ( $P_{sw0}/P_{sw}$ ) и ее скорости ( $v_0/v$ ) наблюдалось для смесей с мольным избытком водорода  $ER = 1.5$ . Детонационная волна ослаблялась в  $1.3 \pm 0.2$  раза. Скорость уменьшилась в 1.4 раза от исходного значения. При  $ER$ , меньших или больших 1.5, регистрировалось большее ослабление интенсивности ударной волны в 1.8–4.0 раза.

Обнаружено, что наименьшее ослабление интенсивности детонационной волны наблюдается не в стехиометрической смеси водорода с воздухом, а при избытке водорода, в данном случае при  $ER = 1.5$ . Это может быть обусловлено увеличением скорости звука, вызванным увеличением концентрации водорода: в исходной смеси — с 385 м/с ( $ER = 1.0$ ) до 415 м/с ( $ER = 1.5$ ). При распространении фронта детонационной волны в пространстве со звукопоглощающими стенками повышенная скорость звука может оказаться решающим фактором, обеспечивающим отражение поперечных волн, составляющих общий фронт детонационной волны.

На основе приведенных экспериментальных результатов и обсуждений можно сделать вывод о том, что использование звукопоглощающих покрытий в цилиндрическом прямом канале способно привести к распаду детонационной волны. При этом обнаружено, что коэффициент ослабления ударной волны зависит от концентрации водорода. В диапазоне  $ER$  0.8–2.0 коэффициент ослабления изменяется в диапазоне 1.1–4.0. Наименьшее ослабление регистрируется при объемном избытке водорода  $ER = 1.5$ .

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 14-50-00124).

## Список литературы

- [1] *Ivanov M.F., Kiverin A.D., Liberman M.A.* // Phys. Rev. E. 2011. V. 83. P. 056 313.
- [2] *Krivokorytov M.S., Golub V.V., Moralev I.A.* // Tech. Phys. Lett. 2013. V. 39. P. 814–817.
- [3] *Azatyany V.V., Medvedev S.N., Frolov S.M.* // Russian J. Phys. Chem. B. 2010. V. 4. P. 308–320.
- [4] *Dupre G., Peraldi O., Lee J.H.* et al. // Prog. Astronaut. Aeronaut. 1988. V. 114. P. 248–263.
- [5] *Kuznetsov M.S., Alekseev V.I., Dorofeev S.B.* // Shock Waves. 2000. V. 10. P. 217–223.
- [6] *Radulescu M.I., Lee J.H.S.* // Combust. Flame. 2002. V. 131. P. 29–46.