

УДК 536.46

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ВОДОРОДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРОСТРАНСТВО С ПРЕПЯТСТВИЯМИ ПОСЛЕ РАЗРЫВА ОБОЛОЧКИ

Игнатенко Д.Г., Миронов В.Н., к.т.н., Пенязьков О.Г., чл.-корр., Скилондъ А.В.  
Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

e-mail: v.mironov@dnr.itmo.by

*Описана экспериментальная установка для моделирования процессов при разрыве водородных магистралей или сосудов под давлением до 13 МПа. Установлены зависимости интенсивности ударной волны, формирующейся при истечении водорода, и температур за ударными волнами от расстояния до места разрыва. Исследовано взаимодействие формирующейся струи водорода с препятствиями различной конфигурации. Экспериментально доказана возможность самовоспламенения и дефлаграционного взрыва при истечении высоконапорного водорода в пространстве с системой фокусирующих и турбулизирующих преград. Представлены распределения видимой скорости пламени по радиусу очага, максимальные значения которой превышают 110 м/с. Указаны факторы, содействующие взрывному развитию процесса горения, и определены его этапы.*

*The experimental setup for the simulation of rupture process of the hydrogen pipelines or chambers with pressure up to 13 MPa has been described. The dependences of the intensity of the shock wave formed by outflowing hydrogen and temperature behind the shock waves from the distance to the rupture place. The interaction of the hydrogen jet with obstacles of different configurations is investigated. The possibility of autoignition and deflagration explosion when high-pressure hydrogen outflows in space with a system of focusing and turbulating obstacles has been experimentally proved. The distributions of the visible flame velocity on the radius of the hearth, the maximum values are exceeding 110 m/sec. The factors contributing to the explosive development of the combustion process and its stages are determined.*

(Поступила в редакцию 1 декабря 2011 г.)

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы исследования и внедрение альтернативных топлив приобретают все больший вес и значение. Водород в этом качестве особо интересен, поскольку он обладает большей, чем у всех топлив органического происхождения теплотой сгорания на единицу массы 120 МДж/кг, а при его сгорании не образуются газы, ответственные за глобальное потепление (СО, СО<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, и т.д.). Перспектива широкого использования водорода, в первую очередь – в энергетических и двигательных установках, ставит задачи поиска более безопасных и дешевых способов его получения, хранения и транспортировки.

Обладая максимальной энергией на единицу массы, водород имеет достаточно скромные объемные энергетические показатели. Поэтому его преимущества могут быть реализованы лишь при очень высоких давлениях газа. Эксперты прогнозируют уровень давления, при котором будет осуществляться, в частности, хранение и транспорт водорода в районе от 40 до 100 МПа [1]. В то же время, уже сейчас низкая энергия возгорания, широкие пределы воспламенения, высокая удельная теплота сгорания и скорость горения приводят при попадании водорода в атмосферу к многочисленным пожарам и взрывам с тяжелыми последствиями. Ясно, что по мере прогнозируемого роста технологических параметров водорода и развития инфраструктуры водородной энергетики, проблемы обеспечения безопасных условий ее функционирования будут многократно возрастать.

Одной из важных для практических приложений задач водородной безопасности является оценка возможности и условий самовоспламенения и дефлаграционного взрыва высоконапорного водорода при его импульсном аварийном истечении (разрыв трубопровода или сосуда высокого давления, отказ запорно-регулирующей арматуры и т. п.) в загроможденном пространстве [2], т. е. в непосредственной близости от технологического оборудования. Моделированию этих процессов посвящена данная работа.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В работе представлены результаты экспериментов по инициированию воспламенения и дефлаграционного взрыва при взаимодействии импульсной струи высоконапорного водорода с фокусирующими преградами. Рабочий модуль установки представлен на рис. 1.

Корпус модуля 7 изготовлен из нержавеющей стали, внутренний диаметр 80 мм, высота 240 мм. Прижим мембраны 1, верхняя крышка 3 и нижняя крышка 5 модуля выполнены из Ст 45. Используется четыре варианта прижима мембраны 1 с диаметром отверстия  $D$  (формирующего истекающую струю) 6, 9, 12 и 15 мм. Мембрана 2 состоит из нескольких слоев фольги из нержавеющей стали или латуни толщиной 50 и 100 мкм соответственно.

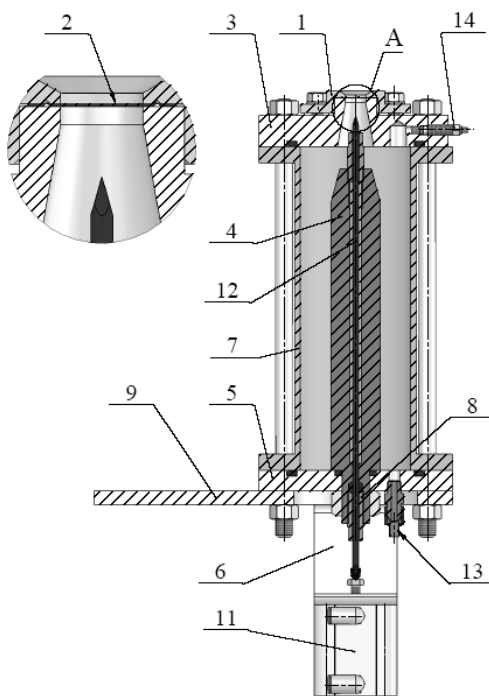


Рисунок 1 – Модуль формирования импульсной водородной струи

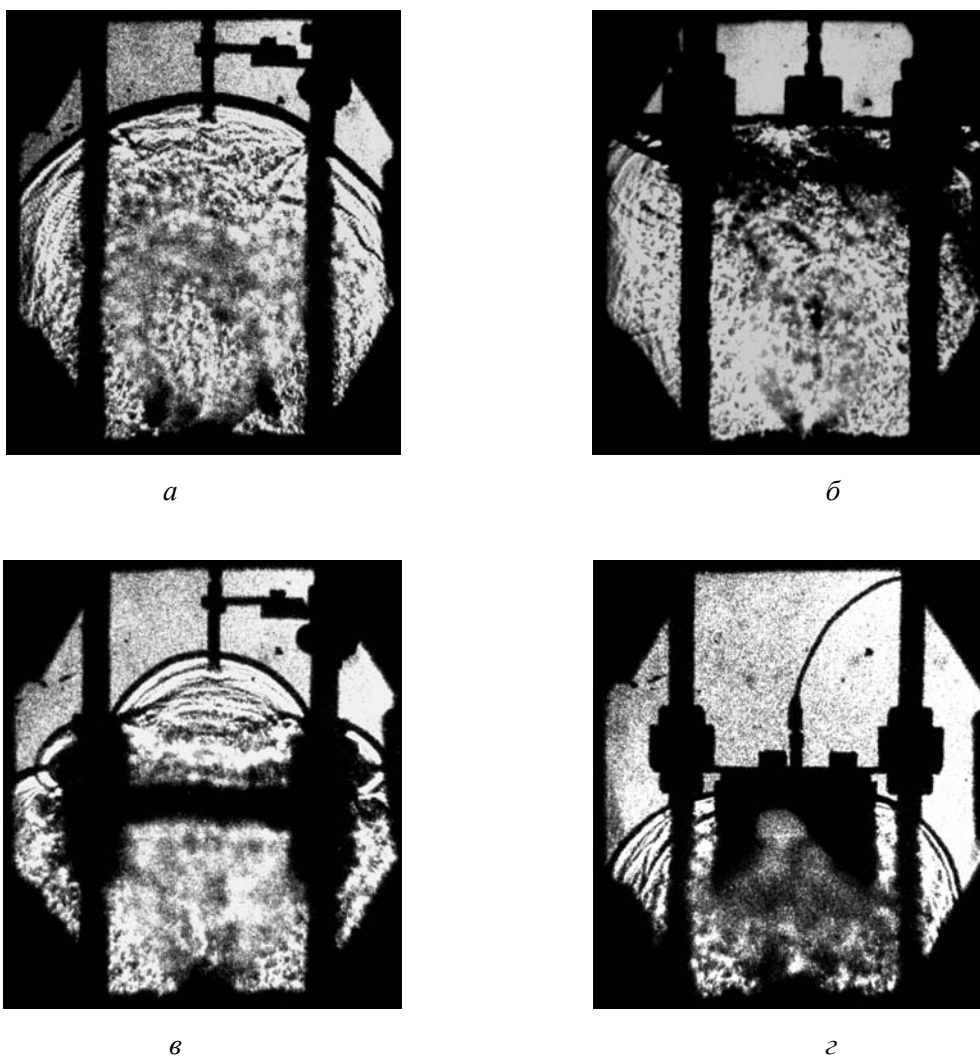
Направляющая 4 с внутренней трубкой, верхним и нижним прижимами 8 обеспечивает перемещение бойка 12 с четырехгранным острием при воздействии на боек штока пневмоцилиндра 11, установленного под нижней крышкой 5 и кронштейном для крепления модуля 9 с помощью скобы 6. Для повышения прочности и безопасности эксплуатации модуля в его конструкции используются стяжные шпильки М12 (6 штук) из Ст 35, четыре из которых имеют, как правило, длину, обеспечивающую установку на пути струи препятствий различной формы и размеров. Подача рабочего газа в модуль осуществляется через штуцер с конической резьбой 1/8" с ниппелем 13.

Структура течения при истечении водорода визуализировалась с помощью теневого прибора ИАБ-451 и фотокамеры PCO Dicom Pro с временем экспозиции до 20 нс. Кроме того,

процессы при взаимодействии истекающего водорода с преградами регистрировались с помощью цифровой камеры Casio EX-F1 с частотой съемки 600 и 1200 кадр/с. Измерение давлений внутри камеры и в различных областях течения производилось пьезоэлектрическими датчиками РСВ «Piezotronics» 113В32, значения температуры и влажности воздуха определялись перед экспериментом с помощью термогигрометра ТГЦ-МГ 4.01.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты проводились при четырех диаметрах отверстия  $D$  и давлениях вытеснения водорода  $P_{\text{в}} = 12-13,5$  МПа. Характерные теньевые картины на начальной стадии истечения представлены на рис. 2.



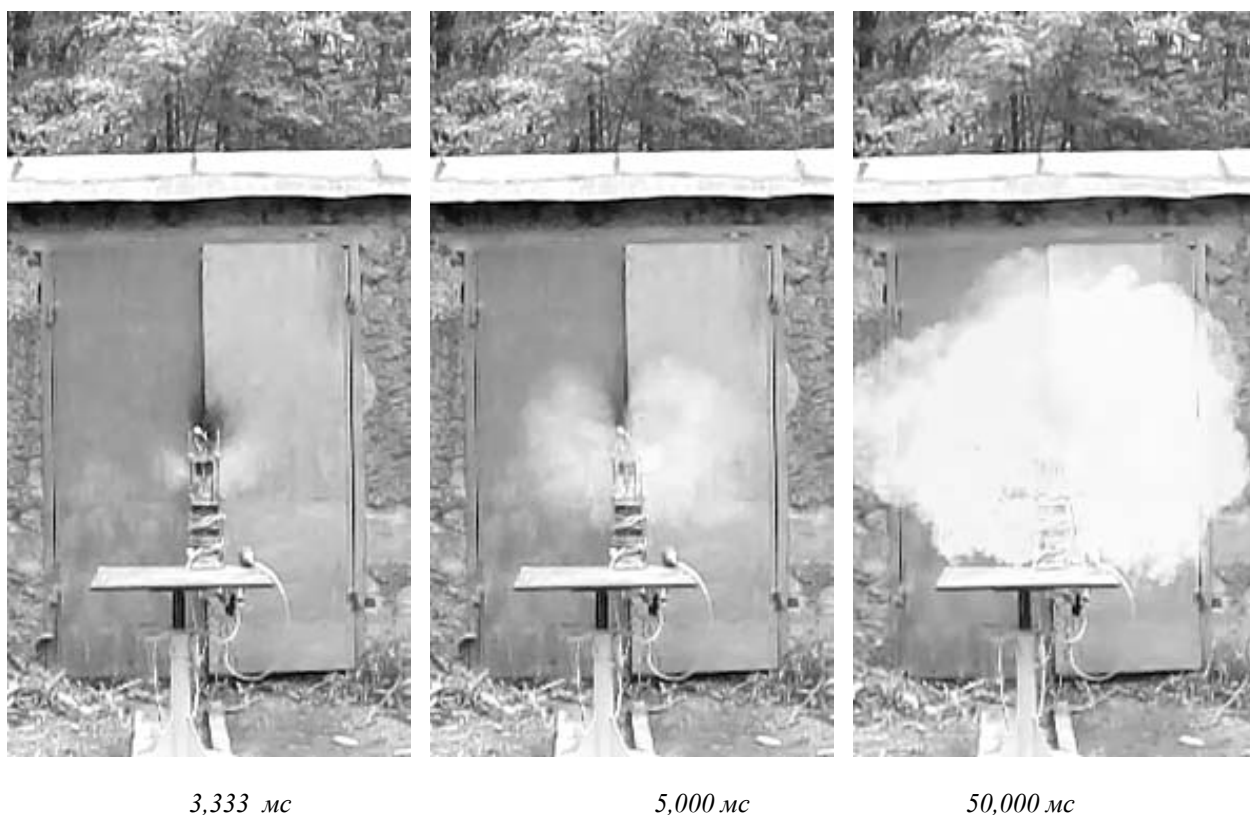
*а – без преграды,  $P_{\text{в}} = 12,5$  МПа,  $D = 15$  мм,  $t = 285$  мкс;  
б – плоскость,  $P_{\text{в}} = 12,5$  МПа,  $D = 9$  мм,  $t = 350$  мкс;  
в – кольцевая обойма с фокусировкой по оси,  $P_{\text{в}} = 13,4$  МПа,  $D = 15$  мм,  $t = 248$  мкс;  
г – внутренний клин диаметром 75 мм,  $P_{\text{в}} = 13,1$  МПа;  $D = 15$  мм,  $t = 191$  мкс.*

**Рисунок 2 – Картины течения после разрыва мембраны на начальной стадии формирования импульсной струи водорода**

При  $D = 6$  мм признаков воспламенения для любых фокусирующих преград не наблюдалось. По одному разу ( $D = 9, 12$  мм) зарегистрировано свечение из полости преграды,

менее выраженное при меньшем диаметре. В таблице представлены результаты серий экспериментов ( $D = 15$  мм) для преград, обеспечивающих эффективное усиление возмущений давления. При этом диаметре отверстия достоверно установлены случаи локального самовоспламенения (когда после фоторегистрации свечения под полостью на последующих кадрах оно отсутствует), а также самовоспламенения и дефлаграционного взрыва в окружающем пространстве (рис. 3).

Эксперименты показывают, что даже при геометрии течения, обеспечившей ранее взрывное развитие процесса, повторить этот результат или хотя бы добиться воспроизводимого локального самовоспламенения не просто. Таким образом, на данный момент можно говорить о стохастическом характере самовоспламенения и дефлаграционного взрыва при импульсном истечении высоконапорного водорода в загроможденное пространство, более вероятном с возрастанием размера разрыва трубы или оболочки.



3,333 мс

5,000 мс

50,000 мс

**Рисунок 3 – Самовоспламенение и дефлаграционный взрыв водорода (опыт № 98)**

На рис. 4 показаны распределения видимой скорости диффузионного пламени  $V$  по радиусу очага  $R_{\text{очаг}}$  (в горизонтальной плоскости), полученные при обработке видеозаписей горения в опытах № 97, 98.

Представленные зависимости удовлетворительно коррелируют друг с другом, что указывает на хорошую воспроизводимость процесса горения в случае его успешного инициирования. Максимальные значения видимой скорости пламени наблюдаются на расстояниях 0,15-0,35 м от оси истечения и составляют 113-117 м/с. Столь большие скорости обусловлены, в частности, формирующимся при обтекании преграды течением высоконапорного водорода со значительной радиальной составляющей вектора скорости.

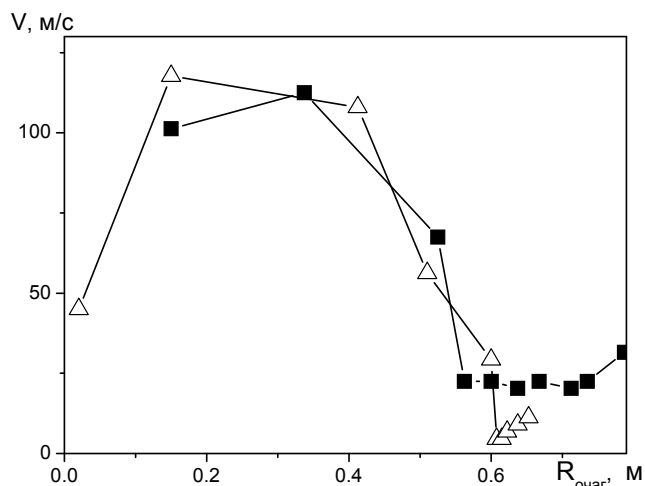
Таблица – Условия и результаты опытов по самовоспламенению и взрыву водорода

Номер опыта	$P_{в}$ , МПа	Тип преграды	$H$ , мм	$\frac{H}{D}$	$h$ , мм	$\frac{h}{D}$	$P_{дат}$ , МПа	Параметры воздуха			Показатель горения
								$t$ , °С	$w$ , %	$\rho$ , г/м <sup>3</sup>	
68	13,1	Внутренний клин с углом 90°, $d_{п}=75$ мм	81	5,4	-	-	4,4	20		<17,3	Нет
114	13,0	Коническая полость с углом 90°, $d_{п}=75$ мм	90	6	33	2,2	5,2	11,9	84	8,8	Нет
78	12,8	Полусферическая полость, $r = 37$ мм	60	4	-	-	2,6	19		<16,3	Нет
69	13,2		75	5	-	-		20		<17,3	2
71	13,0		75	5	-	-	2,7	18		<15,3	Нет
77	12,8		75	5	-	-	3,7	19		<16,3	Нет
79	12,7		90	6	-	-	14,8	20		<17,3	1, а
80	12,7		105	7	-	-	10,1	20		<17,3	1, а
81	12,6		120	8	-	-	4,0	20		<17,3	1, а
82	12,5		90	6	30	2	2,7	19		<16,3	2
93	13,2		90	6	30	2	>3,0	13,8	90	10,7	Нет
94	13,2		90	6	30	2	>3,0	13,2	90	10,4	Нет
95	13,0		90	6	30	2	2,4	17,6	67	10,3	1, а
96	13,0		75	5	36	2,4	2,6	17,7	68	10,6	Нет
97	13,0		105	7	43	2,9		17,3	46	6,6	2
98	13,0		105	7	43	2,9	5,1	17,5	46	6,7	2
99	13,0		105	7	43	2,9	3,3	17,6	48	7,1	1, а
109	13,0		90	6	43	2,9	2,7	21,5	64	12,2	Нет
113	13,0		90	6	33	2,2	2,5	8,7	100	8,5	1, а
110	13,0		120	8	58	3,9	3,2	20,7	66	12,0	1, а
111	13,0		135	9	73	4,9	2,6	19,3	73	12,0	Нет
112	13,0		120	8	58	3,9	2,4	16,5	63	8,7	Нет
123	12,1	105	7	43	2,9		5,5	55	3,4	1, б	
129	12,6	Полусферическая полость из полиметилметакрилата, $r = 37$ мм	90	6	-	-	1,8	6,0	75	5,5	Нет
117	13,0		105	7	43	2,9	6,1	17,6	58	8,6	1, б
115	13,0	Полусферическая полость, $r= 25$ мм	90	6	43	2,9	3,9	13,8	68	8,1	Нет
116	13,0		90	6	43	2,9	2,2	15,0	63	8,0	Нет
124	12,1		105	7	43	2,9	2,7	4,1	52	3,3	1, б
125	12,6		105	7*	43	2,9	3,5	4,3	80	5,2	Нет

Показатели горения: 1 – локальное самовоспламенение (*a* – в полости, *б* – в полости и примыкающей области); 2 – самовоспламенение и дефлаграционный взрыв.

В опытах № 82, 93-95, 116, 124, 125 диаметр гладкого стержня турбулизатора  $d_t = 5$  мм, в остальных опытах турбулизатор – шпилька М4. Материал турбулизаторов и преград (кроме оговоренного случая) – Ст 45.

\* – Ось симметрии полости смещена на 8 мм от оси модуля.

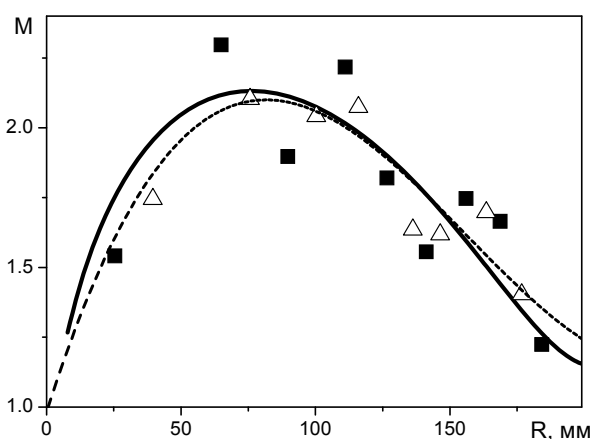


**Рисунок 4 – Распределения скорости горения водородно-воздушной смеси по радиусу очага (опыт № 97 – квадраты, № 98 – треугольники)**

Эксперименты позволили определить основные этапы развития взрывного процесса при образовании разрыва и взаимодействии течения с преградой:

*1. Формирование первичной ударной волны в воздухе (рис. 2, а).*

На рис. 5 представлено распределение числа Маха  $M$  ударной волны в воздухе вдоль оси течения  $R$ , полученное при исследовании истечения водорода через отверстие  $D = 15$  мм в свободное пространство (здесь треугольники и квадраты соответствуют разным схемам обработки результатов по положению ударных фронтов, а две кривые – различным способам их аппроксимации).



**Рисунок 5 – Распределение числа Маха ударной волны в воздухе вдоль оси течения**

Видно, что наибольшая интенсивность волны наблюдается на расстоянии около 70–80 мм от разрыва (около 5 калибров отверстия истечения). Исходя из этих наблюдений, выбирались расстояния от точки истечения до внутренней поверхности используемых преград.

*2. Фокусировка возмущений в полости и смешение ударно-сжатого воздуха внутри полости с высоконапорным водородом (толкающим газом первичного течения).*

Временные зависимости давления на оси фокусирующей поверхности для различных

преград представлены на рис. 3 работы [3], максимальные давления – в таблице, указанные значения для полусферических полостей ниже, чем в фокусе возмущений.

3. *Локальное самовоспламенение (при обеспечении необходимых условий) водородно-воздушной смеси внутри полости (и в примыкающей области – при большом объеме первичной горючей смеси).*

4. *Принудительное воспламенение водородно-воздушной смеси в зоне смешения формирующейся струи при контакте с очагами горения, экспортируемыми из полости.*

## ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных таблицы показывает, что для обеспечения локального самовоспламенения может оказаться достаточным давление  $P_{\text{дат}} = 2,4\text{--}2,5$  МПа (опыты № 95 и 113), в то же время при давлении  $P_{\text{дат}} = 5,4$  МПа (опыт № 66) и 3,9 МПа (опыт № 115) даже свечение из полости не наблюдается. Рассмотрим одну из возможных причин такой нестабильности.

Известным фактором, определяющим задержку воспламенения водорода, является концентрация в водородно-воздушной смеси паров воды [4, 5]. Так, в [4] на основе численного анализа кинетических моделей воспламенения водорода показано, что в зависимости от объемной доли паров воды время задержки воспламенения может как увеличиваться, так и сокращаться. При концентрации воды около 1,5 % эффекты промотирования и ингибирования равны, при больших концентрациях преобладает эффект термического ингибирования.

В наших экспериментах указанной критической концентрации воды (для водородно-воздушной смеси с коэффициентом стехиометрии  $\phi = 1$ ) соответствует плотность паров воды в воздухе  $\rho \approx 16$  г/м<sup>3</sup>; для бедной смеси, вблизи нижнего предела воспламенения, этой критической концентрации воды в смеси соответствует плотность ее паров в воздухе около 12 г/м<sup>3</sup>. Как видно из таблицы, зарегистрированные значения  $\rho$  лежат, как правило, ниже указанных значений. Следовательно, в условиях представленных экспериментов пары воды не могли привести к увеличению задержек воспламенения (по сравнению со случаем сухого воздуха).

В то же время по мере уменьшения плотности паров воды (при удалении от критической величины), времена индукции воспламенения водорода снижаются, таким образом, вероятность его самовоспламенения возрастает, что подтверждается, как правило, данными таблицы.

Рассмотрим, что определяет возможность распространения горения за пределы фокусирующей полости. В работе [3] с этой целью использовались турбулизаторы, наличие которых обеспечило экспорт очагов воспламенения из полости во внешнюю область. Действительно, при отсутствии турбулизирующего элемента горение за пределами фокусирующей преграды наблюдалось только в одном эксперименте (№ 69).

В нескольких случаях при локальном самовоспламенении наличие турбулизаторов не привело к распространению горения во внешнюю область. Возможно, для распространения пламени в область высокоскоростного потока горючей смеси вблизи концентрационных пределов горения необходимо также наличие малых концентраций воды, обеспечивающих значительное уменьшение времени задержки воспламенения. Так, оба случая горения в объеме при контролируемой влажности воздуха имели место при низкой плотности паров воды,  $\rho = 6,7$  г/м<sup>3</sup> (опыты № 97, 98).

Согласно работе [4], минимум задержки воспламенения, обусловленный наличием паров воды, лежит в области  $\rho \leq 1$  г/м<sup>3</sup>. Поскольку в опытах № 123, 124 при  $\rho = 3,4$  г/м<sup>3</sup> ( $> 1$  г/м<sup>3</sup>!) наличие развитых очагов локального самовоспламенения не приводит к горению во внешней области, существуют, по-видимому, и другие, не выявленные пока факторы, определяющие возможность этого процесса.

Предпринята попытка обеспечить экспорт очага воспламенения из полости за счет смещения оси преграды относительно оси течения (опыт № 125). Предполагалось, что центральная, высоконапорная, часть струи сумеет вытеснить очаг самовоспламенения из полост-

ти на периферию зоны смешения с более низкими скоростями течения и более близкой к стехиометрическому составу горючей смесью. Проверить эту идею не удалось из-за отсутствия самовоспламенения водорода, что, возможно, связано с ухудшением фокусировки возмущений при несимметричном взаимодействии первичной ударной волны с поверхностью полусферической полости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые экспериментально доказана возможность самовоспламенения и дефлаграционного взрыва водорода при его импульсном истечении в загроможденное пространство. В данном случае одним из критериев водородной безопасности является отсутствие элементов конструкций, которые могут выступить в качестве фокусирующих возмущения давления поверхностей и турбулизаторов течения, в окрестности опасных с точки зрения разрыва оболочек и магистралей с водородом участков.

Показано, что видимые скорости диффузионного пламени при воспламенении истекающего водорода могут достигать 113-117 м/с. Столь большие значения обусловлены формирующимся при обтекании преграды течением высоконапорного водорода со значительной радиальной составляющей вектора скорости. Этот фактор следует учитывать при оценке возможного огневого воздействия в случаях аварийного импульсного истечения водорода.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ

$H$  – расстояние от мембраны до дна полости преграды, где установлен заподлицо датчик давления;  $h$  – расстояние от мембраны до турбулизатора;  $P_{\text{дат}}$  – максимальное давление, регистрируемое датчиком в полости;  $t$ ,  $w$  и  $\rho$  – параметры воздуха: температура, относительная влажность и плотность паров воды соответственно;  $r$  – радиус полусферической полости;  $d_{\text{п}}$  – внешний диаметр преграды;  $d_{\text{т}}$  – диаметр турбулизатора.

*Работа выполнена в рамках ГППНИ «Водород» по заданию «Водород 14».*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rigas F., Sklavounos S. Evaluation of hazards associated with hydrogen storage facilities // Int. J. Hydrogen Energy. – 2005. – V. 30. – P. 1501–1510.
2. Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. Водород: параметры горения и взрыва. М. : ФМЛ, 2008. – 288 с.
3. Миронов В.Н., Пенязьков О.Г. О динамике импульсного истечения водорода в загроможденное пространство // Горение и взрыв / Под общ. ред. С.М. Фролова. М. : ТОРУС ПРЕСС, 2010. Вып. 3. С. 17–22.
4. Головичев В.И., Димитров В.И., Солоухин Р.И. Численный анализ моделей воспламенения водорода // ФГВ. – 1973. – Т. 9. – № 1. – С. 95–101.
5. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В., Медведев С.П., Хомик С.В. Термогазодинамика горения и взрыва водорода. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 584 с.