

С.П. Медведев¹, С.В. Хомик¹, О.Г. Максимова¹, В.Н. Михалкин²,
 В.А. Петухов³, А.Ю. Долгобородов³
 (¹ИХФ РАН, ²Академия ГПС МЧС России, ³ОИВТ РАН;
 e-mail: s_p_medvedev@chph.ras.ru)

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ВОДОРОДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ЕГО ИСТЕЧЕНИИ В ОБЪЁМ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Приведены экспериментальные и расчётные данные об условиях и характеристиках воспламенения смесей водород – воздух, образующихся при истечении водорода из сосудов высокого давления. Полученные результаты могут быть использованы при создании технологий и систем обеспечения техносферной безопасности объектов атомной энергетики и химической промышленности.

Ключевые слова: водород, воспламенение, ударная волна.

S.P. Medvedev, S.V. Khomik, O.G. Maximova, V.N. Mikhalkin,
 V.A. Petukhov, A.Yu. Dolgoborodov

IGNITION OF THE HIGH-PRESSURE HYDROGEN AT ITS OUTFLOW INTO THE OBSTACLE-FILLED SPACE

The paper reports experimental and calculated data on conditions and parameters of ignition of hydrogen – air mixtures generated due to an outflow of hydrogen from the high-pressure vessels. The results of the work can be used for development of technologies and systems to ensure technospheric safety of energy sector and chemical industry.

Key words: hydrogen, ignition, shock wave.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 26 октября 2015 г.

Развитие аварийной ситуации при быстром истечении водорода в атмосферу относится к проблеме воспламенения и горения заранее не перемешанных систем "горючее – окислитель". Вероятная последовательность событий при разрушении ёмкости или трубопровода высокого давления представлена на рис. 1.

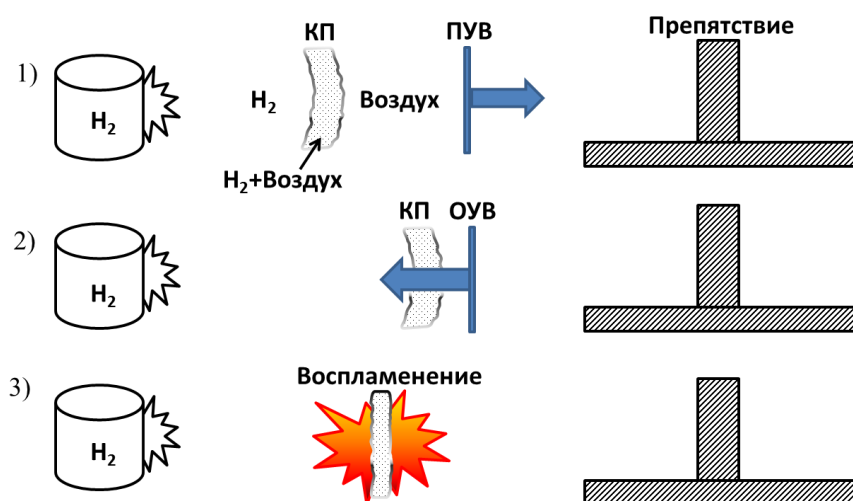


Рис. 1. Этапы развития аварии при быстром истечении водорода высокого давления

На первом этапе в окружающем пространстве формируется *падающая ударная волна (ПУВ)*, за которой распространяется *контактная поверхность (КП)*, отделяющая истекающий водород от ударно-сжатого воздуха. Важной особенностью процесса является диффузионное размытие КП, приводящее к формированию слоя горючей смеси $H_2 + \text{Воздух}$. На втором этапе ПУВ отражается от препятствия. *Отражённая ударная волна (ОУВ)* распространяется навстречу потоку. Взаимодействие ОУВ с областью $H_2 + \text{Воздух}$ на третьем этапе может привести к воспламенению водорода. Параметры описываемого процесса определяются начальным давлением водорода, геометрией и взаимным расположением разлетающегося объёма и препятствия, а также динамикой размытия контактной поверхности. Учитывая сложность теоретического описания явления, целесообразно проведение лабораторных экспериментов в контролируемых условиях с целью получения данных, которые могут быть использованы для валидации расчётных методик, направленных на моделирование крупномасштабных техногенных аварий с участием водорода.

Обзор экспериментальных работ, выполненный в [1], показывает, что в типичной схеме проведения опытов водород высокого давления истекает в окружающий воздух через присоединённые трубки относительно малого диаметра – до 20 мм. Актуальность исследования таких масштабов обусловлена проблемой обеспечения безопасности при хранении водорода в баллонах высокого давления, выходное отверстие которых не превышает несколько миллиметров. При этом, если выброс водорода осуществляется в открытое пространство, то необходимые для воспламенения перепады давления оказываются не ниже 4 МПа.

В [2] показано, что наличие препятствия (частичного перекрытия сечения) на конце тонкой отводящей трубки (диаметр – 8 мм) может облегчить процесс воспламенения за счёт воздействия на контактную границу водород – воздух отражённой ударной волны. Можно предположить, что похожий сценарий воспламенения вероятен и в большом масштабе при аварийном выбросе водорода в ограниченные объёмы (помещения), заполненные воздухом. Следует также учитывать, что в реальных условиях ударная волна отражается, как правило, от поверхности с неровностями в виде выступов и впадин. При этом может происходить образование вторичных волн и их пересечение (фокусировка), приводящее к появлению очагов повышенной температуры и давления.

Обзор работ по воспламенения водородсодержащих смесей в таких условиях, представленный в [1], показывает, что типичной схемой проведения эксперимента является размещение одиночного фокусирующего отражателя в торце ударной трубы. Между тем, на практике препятствия на пути распространения ударной волны могут иметь весьма сложную геометрию с множеством отражающих элементов. В результате инициирование взрывного процесса происходит во многих распределённых в пространстве локальных местах. Такое многоточечное инициирование может быть в ряде случаев более эффективным.

Для выявления закономерностей воспламенения при взаимодействии отражённой ударной волны с контактной границей водород – воздух проведены эксперименты на ударной трубе с использованием высокоскоростной видеосъёмки теневой картины течения. Рис. 2 представляет общий вид разработанной установки со снятыми смотровыми окнами.

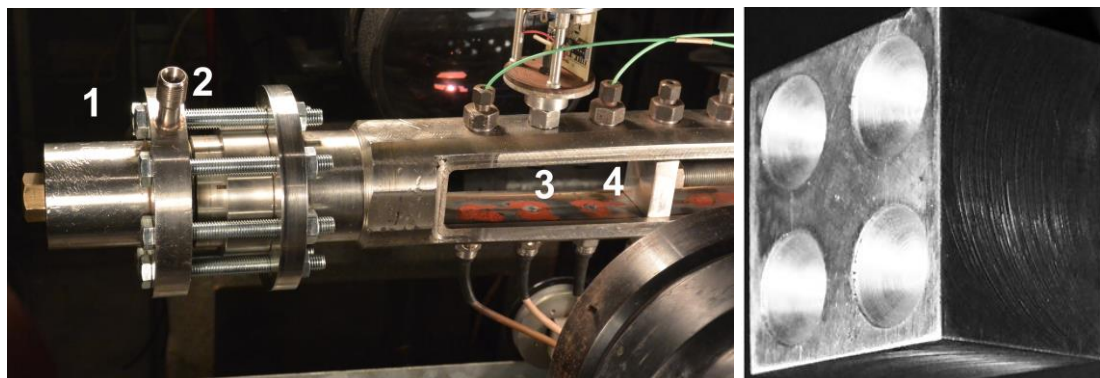


Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования самовоспламенения на контактной границе водород – воздух, инициированного отражённой ударной волной, и отражатель с коническими выемками:
1 – камера высокого давления; 2 – мембранный узел; 3 – измерительная секция (окна демонтированы) с пьезоэлектрическими *датчиками давления (ДД)* Kistler 603В и фотоприёмным устройством; 4 – отражающее препятствие

Камера высокого давления (КВД) диаметром 50 мм и длиной 70 мм заполнялась водородом при давлении до 3 МПа. По технологическим условиям, перед наполнением КВД не откачивалась, поэтому разлетающийся объём содержал небольшое количество воздуха, например, при давлении 2 МПа состав смеси: 95 % H_2 + 5 % Воздух. Смеси водорода со столь незначительным количеством воздуха находятся далеко за богатым пределом распространения пламени, поэтому при упрощённом анализе будем считать, что КВД заполнена чистым водородом. КВД отделена разрывной мембраной от измерительной секции сечением $40 \times 40 \text{ мм}^2$, оборудованной смотровыми окнами и заполненной воздухом при нормальных условиях. Наряду с плоской отражающей поверхностью использовался торец с фокусирующими элементами (4 конуса $\times 90^\circ$), показанный в правой части рис. 2. Одновременная регистрация давления и визуализация теневой картины течения с помощью высокоскоростной видеокамеры Mikrotron-1362 позволяет выявить особенности исследуемого явления.

На рис. 3 приведены примеры картины течения, возникающего при самовоспламенении за фронтом отражённой ударной волны.

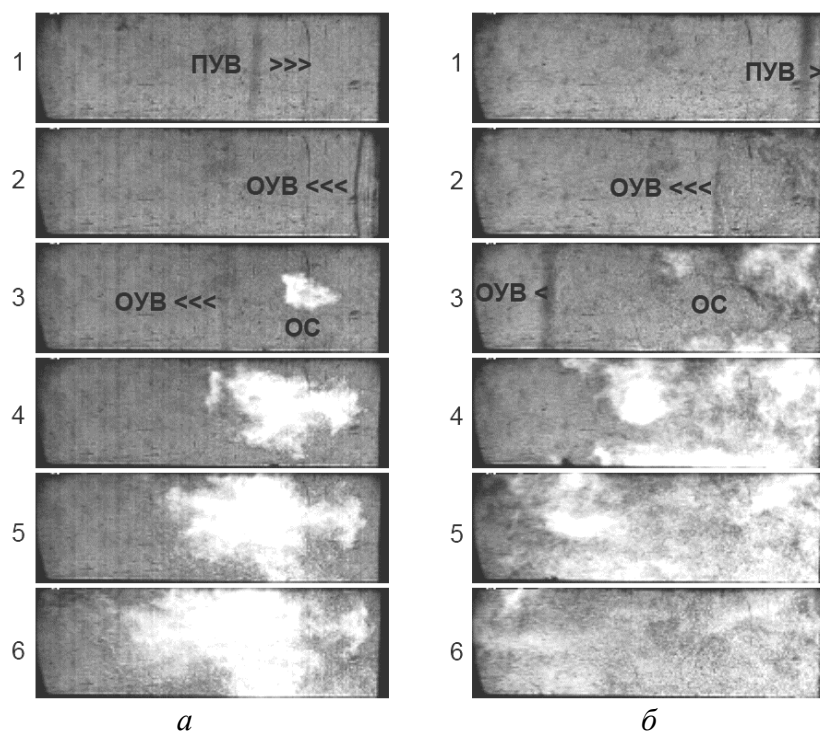


Рис. 3. Результаты визуализации в экспериментах по самовоспламенению на контактной границе водород – воздух, инициированного отражённой ударной волной при $P_0 = 0,1$ МПа. Отражатель с фокусирующими элементами.

Интервал времени между кадрами 75 мкс.

а – давление разрыва мембраны $P_1 = 2,3$ МПа; *б* – $P_1 = 2,8$ МПа

Величина давления разрыва мембраны влияет на место самовоспламенения. При относительно низком давлении ($P_1 = 2,3$ МПа) **очаг самовоспламенения (ОС)** возникает в объёме между отражённой ударной волной и отражающей поверхностью (рис. 3а, кадр 3). После возникновения область воспламенения расширяется со скоростью около 250 м/с. В рассматриваемых условиях скорость падающей ударной волны 760 м/с близка к нижнему пределу – 720 м/с, когда ещё наблюдается воспламенение. При увеличении давления разрыва мембраны до $P_1 = 2,8$ МПа скорость ПУВ возрастает до 970 м/с и картина течения меняется. Самовоспламенение начинается в пристеночном слое (рис. 3б, кадр 3) и через 150 мкс (рис. 3б, кадр 5) охватывает все сечение трубы. Возникающие очаги самовоспламенения обладают значительной яркостью, что может быть следствием высокой температуры продуктов сгорания, как это имеет место с приближением к стехиометрическому составу.

Самовоспламенение на контактной границе оказывает влияние на скорость (интенсивность) отражённой ударной волны. Результаты экспериментов представлены на рис. 4 в координатах: скорость ОУВ – скорость ПУВ.

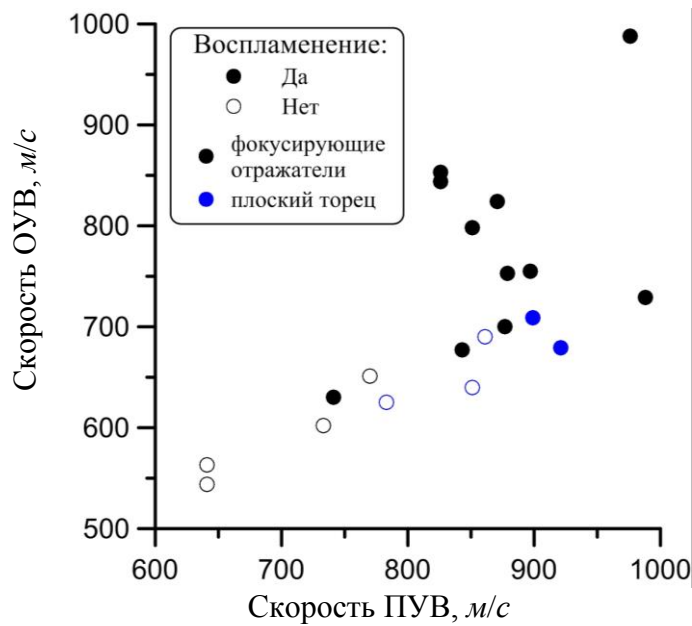


Рис. 4. Параметрическая диаграмма области самовоспламенения на контактной границе водород – воздух

Как видно, нижняя граница области воспламенения отвечает скорости падающей ударной волны около 720 м/с . Отметим, что наличие фокусирующих элементов облегчает инициирование воспламенения. Результаты опытов – теньевые регистрации картины течения и записи давления дают важную информацию о критических условиях воспламенения, но недостаточны для выявления механизма явления. Дополнительные сведения о физико-химических параметрах возникающего течения можно получить из анализа результатов численного моделирования.

Расчёты проведены с учётом особенностей геометрии экспериментальной установки и начальных условий с помощью пакета газодинамического моделирования *GasDynamicsTool (GDT)* [3]. Данный пакет использовался ранее для численного моделирования взаимодействия детонационных и ударных волн с проницаемыми преградами [4-6]. В GDT с помощью модифицированного метода крупных частиц реализована процедура решения уравнений Навье-Стокса с учётом процессов переноса и тепловыделения в результате химической реакции. Скорость брутто реакции "топливо + окислитель \rightarrow продукты" описывается зависимостью от температуры аррениусовского вида через относительные массовые концентрации топлива $[F]$ и окислителя $[O]$:

$$k = A[F]^n [O]^m \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right). \quad (1)$$

Параметры в (1) выбирались с учётом данных по задержке самовоспламенения исследуемой смеси, рассчитанной по детальному реакционному механизму. Моделирование проводилось в двухмерной постановке на прямоугольной и неадаптивной сетке с размером расчётной ячейки $0,1 \text{ мм}$. Число ячеек до $1\,000\,000$ при шаге по времени 10 нс .

На начальном этапе расчётов ставилась задача описания полученных экспериментальных результатов. Для адекватного моделирования процесса смешения водорода и воздуха на контактной границе использовался приём размытия профиля давления (плотности) на начальной стадии процесса в момент распада разрыва. Результаты расчётов приведены на рис. 5 в виде изолиний давления с наложением областей, занятых продуктами взрыва.

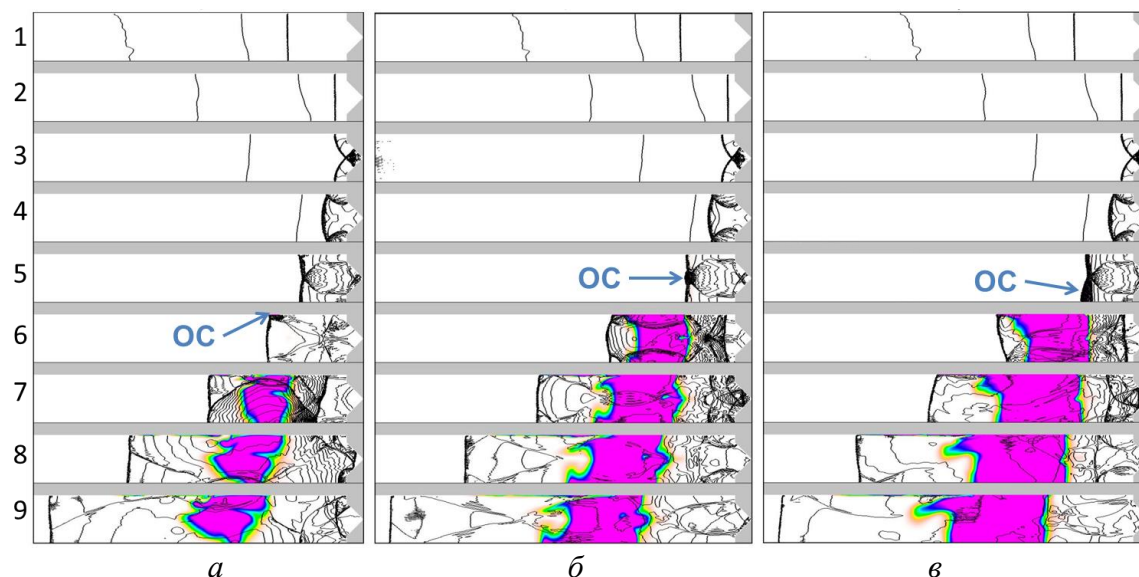


Рис. 5. Расчётное поле течения при самовоспламенении на контактной границе водород – воздух. $P_1 = 2,6$ МПа. Время между кадрами: 20 мкс (а), 200 мкс (б), 2000 мкс (в). Размер расчётной ячейки 0,1 мм (а), 1 мм (б), 10 мм (в). Полуширина канала 20 мм (а), 200 мм (б), 2000 мм (в).
Ось симметрии снизу

Рассмотрен случай отражения от поверхности с фокусирующими элементами. Согласно геометрии экспериментальной установки, расчётная область для рис. 5а имеет размер $0,346 \times 0,025$ м². В верхней части расчётных кадров располагается жёсткая стенка, в нижней части – ось симметрии. Детальный анализ результатов расчётов показывает, что ОС расположен на стенке в том месте размытой КП, где концентрация водорода отвечает минимуму времени индукции при реализуемых давлении и температуре. Поскольку содержание водорода изменяется на ширине контакта от 0 до 1, то в месте самовоспламенения состав водородно-воздушной смеси близок к стехиометрическому.

При проведении численного моделирования необходимо учитывать, что в эксперименте мембрана раскрывается за конечное время, что может существенно повлиять на ширину зоны смешения на контактном разрыве. Тем не менее, выполненный анализ показывает, что, в дополнение к экспериментальным наблюдениям, численные расчёты дают существенную информацию о месте и условиях возникновения и развития очагов самовоспламенения в рассматриваемых течениях водородсодержащих смесей.

Для практических приложений полезно оценить применимость используемой методики для моделирования исследуемого явления в увеличенном масштабе. Выполнены расчёты с пропорциональным увеличением всех линейных размеров в 10 и 100 раз. Результаты этих вычислений представлены на рис. 5б, 5в. Как видно, рост масштаба задачи приводит как к изменению места зарождения очага самовоспламенения, так и к более интенсивному развитию области горения. Тем не менее, в целом, картина течения не изменяется. Следует отметить, что задержка воспламенения при изменении масштаба остаётся постоянной, а место зарождения ОС сдвигается за счёт линейного увеличения размеров

Расчётные профили давления на различных расстояниях от среза отражающего элемента на рис. 6 являются источником дополнительной информации.

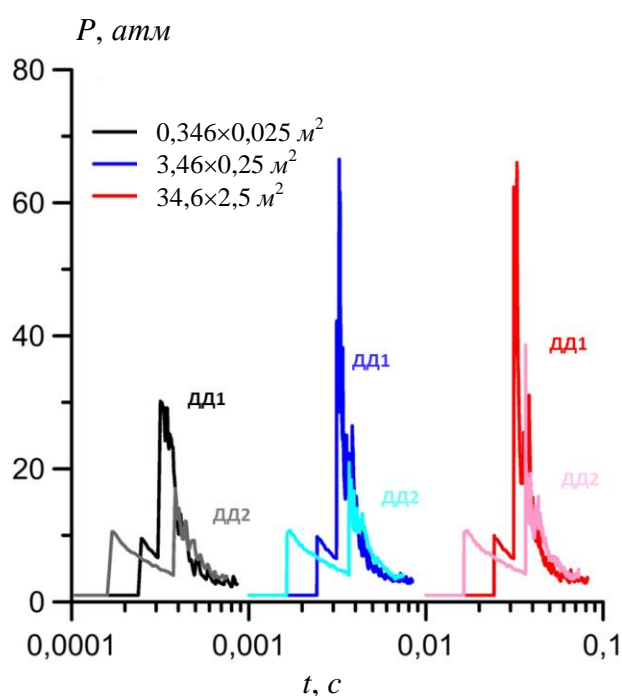


Рис. 6. Расчётные профили давления при различном масштабе

Черные кривые соответствуют условиям экспериментов при расстоянии 18 мм (ДД1) и 98 мм (ДД2) от среза отражающего элемента. Отметим, что изменение масштаба приводит к пропорциональному росту длительности ударно-волновой нагрузки. Из-за менее интенсивного сгорания, в случае минимальных размеров, пиковое давление оказывается в 2 раза ниже, чем при увеличенных масштабах.

Таким образом, экспериментально и теоретически смоделирован сценарий развития аварийной ситуации при истечении в воздух водорода высокого давления, при котором происходит воспламенение на контактной границе водород – воздух, инициированное отраженной ударной волной. По результатам экспериментов определены критические условия воспламенения водорода.

Показано, что численное моделирование адекватно описывает картину воспламенения и может быть использовано для оценок динамических нагрузок при крупномасштабных аварийных ситуациях, связанных с истечением водорода высокого давления. Полученные новые данные об условиях и характеристиках воспламенения смесей водород – воздух могут быть использованы при создании технологий и систем обеспечения безопасности объектов атомной энергетики и химической промышленности.

Экспериментальные исследования выполнены при поддержке Госкорпорации "Росатом" (ГК № Н.4х.44.90.13.1106) в Институте химической физики РАН при участии Академии ГПС МЧС РФ. Расчётно-теоретические исследования проведены за счёт гранта Российского научного фонда (проект №14-50-00124) на базе Объединённого института высоких температур РАН.

Литература

1. *Гельфанд Б.Е., Сильников М.В., Медведев С.П., Хомик С.В.* Термогазодинамика горения и взрыва водорода. СПб.: изд-во Политехнического университета, 2009. 584 с.
2. *Баев В.К., Шумский В.В., Ярославцев М.И.* Самовоспламенение горючего газа, истекающего в среду газообразного окислителя // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19. № 5. С. 73-80.
3. *Зибаров А.В., Бабаев Д.М., Шадский А.М.* GasDynamicsTool 4.0: передовые CFD-технологии для персонального компьютера // САПР и Графика. 2000. № 10. С. 44.
4. *Медведев С.П., Хомик С.П., Гельфанд Б.Е.* Регенерация и подавление детонации водородовоздушной смеси преградой с отверстиями // Химическая физика. 2009. Т. 28. № 12. С. 52-63.
5. *Максимова О.Г., Медведев С.П., Хомик С.В., Агафонов Г.Л.* Инициирование детонации водородно-воздушной смеси при столкновениях полусферических ударных волн // Горение и взрыв. 2012. Вып. 5. С. 125-129.
6. *Хомик С.В., Медведев С.П., Вейссьер Б., Оливье Г., Максимова О.Г., Сильников М.В.* Инициирование и подавление взрывных процессов в водородсодержащих смесях посредством проницаемых преград // Известия Академии наук. Серия химическая. 2014. № 8. С. 1666.