

Исследования сферической детонации водородно-воздушных смесей в области критической точки

В. А. Петухов¹, Н. П. Бублик¹, П. А. Гусев¹, О. И. Солнцев¹ и
А. А. Шевченко^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

² Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, ул. Косыгина, 4 корпус 1, Москва 119334, Россия

E-mail: arsshevchenko@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 27 июня 2019 г.

Аннотация. Проведены исследования прямого инициирования детонации водородно-воздушных смесей в больших объемах ($\sim 7 \text{ м}^3$). Впервые показано, что сферическая детонация водородно-воздушных смесей возникает при инициировании ее энергией 4.6 кДж. Показано, что критическая энергия инициирования (минимальная энергия инициирования, при которой возникает сферическая детонация) меньше ранее признанной (7.8 кДж). <https://doi.org/10.33849/2019111>

1. ВВЕДЕНИЕ

Водород как вещество с высокой теплотворной способностью в настоящее время привлекает повышенное внимание научного сообщества. В связи с чем вопросы безопасности его использования в промышленных целях снова приобрели актуальность. Пример аварии на Фукусиме отчетливо показал, что предотвращение подобных аварий в дальнейшем является приоритетной задачей. Накоплен обширный экспериментальный и теоретический материал по режимам горения и многим вопросам, связанным с пониманием и моделированием опасных процессов истечения водорода и формирования пожаро-взрывоопасных смесей водорода с воздухом. Однако некоторые важные с точки зрения практики естественнонаучные проблемы остаются слабоизученными. Речь идет о прямом инициировании детонации водородно-воздушных смесей. Несмотря на большое количество работ, посвященных теме возникновения детонационных режимов в газовых смесях, в большей части этих статей исследовалась детонация в трубах, а исследования по развитию сферической детонации проводились в устройствах сравнительно небольшого размера объемом в десятки литров, причем окислителем в основном был кислород. Для исследования смесей, в которых окислителем является воздух, нужны значительно большие устройства, объемом в несколько кубических метров и более.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследование детонации водородно-воздушных смесей в больших объемах было проведено на установке Сфера. Установка состоит из взрывной камеры 13ЯЗ внутренним диаметром 12 м (рисунок 1), внутри которой размещается мягкая оболочка с водородно-воздушной смесью; системы заполнения оболочки газовой смесью заданного состава; системы автоматического контроля и контроля различных процессов горения и обработки полученных данных. На рисунке 2 приведена принципиальная схема установки.

Исследуемая водородно-воздушная смесь помещалась в объем 7 м^3 , ограниченный тонкой резиновой оболочкой, имеющей после наполнения газовой смесью форму, близкую к сфере. В качестве резиновой обо-

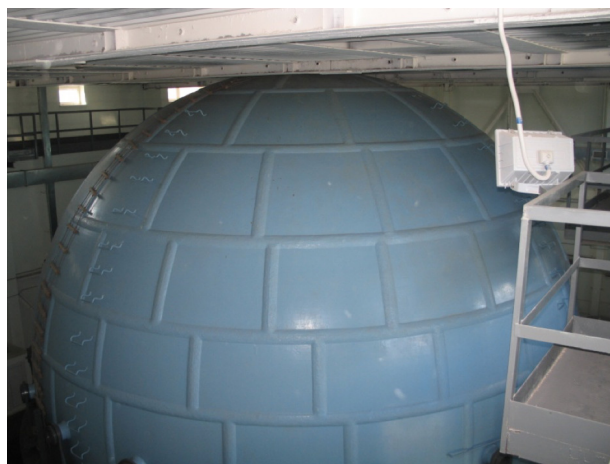


Рисунок 1. Взрывная камера 13ЯЗ. Внутренний диаметр 12 м, объем камеры 910 м^3 .

лочка использовались метеорологические шары-зонды. Оболочка располагалась внутри взрывной камеры 13ЯЗ. Водород и воздух подавались в оболочку попеременно в количестве, необходимом для получения нужного состава смеси. Количество газа, поступающего в реакционный объем, измерялось с помощью высокоточных расходомеров PROMASS 80F 08. Погрешность измерения и отсечки объемов направляемых в оболочку газов составляет 0.75%. Смесь в реакционном объеме перемешивалась вентилятором в процессе заполнения объема и затем еще в течение 30–40 минут, затем вентилятор отключался и смесь выдерживалась в течение 30 минут для успокоения движения газа внутри реакционного объема и дальнейшего выравнивания состава. Иницирование смеси осуществлялось в центре реакционного объема сферическим зарядом тэна массой 0.8 г и 0.4 г (соответствующая энергия инициирования 4.6 и 2.3 кДж). Иницирование производилось от высоковольтного блока питания, с помощью которого осуществлялся электровзрыв проволоочек, установленных по диаметру сферического заряда тэна.

Для измерения параметров, определяющих движение ударных волн и их интенсивность, а также для осуществления инициирования газовой смеси, в центре сфе-

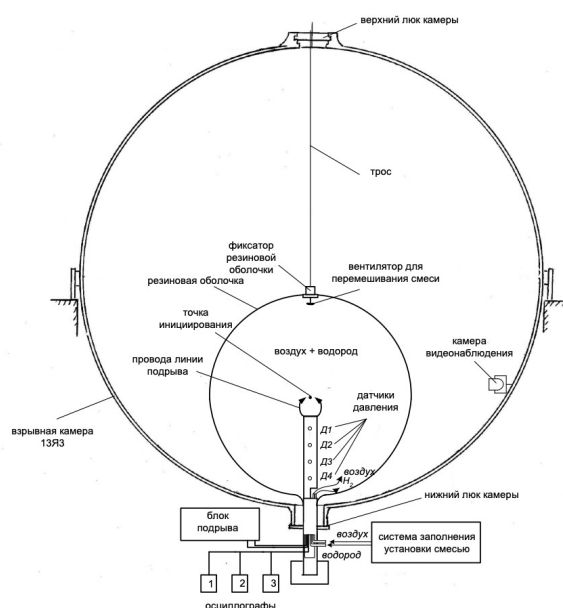


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки.



Рисунок 3. Фотография измерительной планки, установленной внутри камеры 13ЯЗ.

рического объема внутри реакционного объема установлена специальная измерительная планка, фотография которой показана на рисунке 3. Планка представляет собой длинный (1.4 м) прямоугольный короб с внешним размером сечения 80х60 мм. Одна из широких сторон плоская и направлена к месту расположения инициирующего заряда. Противоположная ей сторона наклонена к ней и вместе они образуют клин с заостренной вершиной с углом при вершине 15° . Другой конец короба соединяется со стаканом-горловиной, на который надевается горловина резиновой оболочки и через который из реакционного объема выводятся провода от датчиков и линии подрыва.

На широкой плоской пластине закреплены датчики импульсного давления, фиксирующие давления ударных волн в процессе их перемещения вдоль планки. Сигналы регистрировались цифровыми осциллографами типа Tektronix. Провода линии подрыва проходят внутри короба, где они отделены от измерительных проводов металлической пластиной, и выводятся из герме-

тичного короба в реакционный объем из узких сторон короба через уплотнения и в металлических трубках подходят с двух сторон к месту инициирования. После установки источника инициирования на короб натягивалась резиновая оболочка, и начиналось заполнение объема исследуемой газовой смесью. Визуализация процесса наполнения шара-зонда газовой смесью, ее инициирования и состояния газового заряда в процессе развития его воспламенения осуществлялось с помощью камеры видеонаблюдения, установленной внутри камеры 13ЯЗ на ее боковой поверхности. Более подробное описание установки приведено в [1].

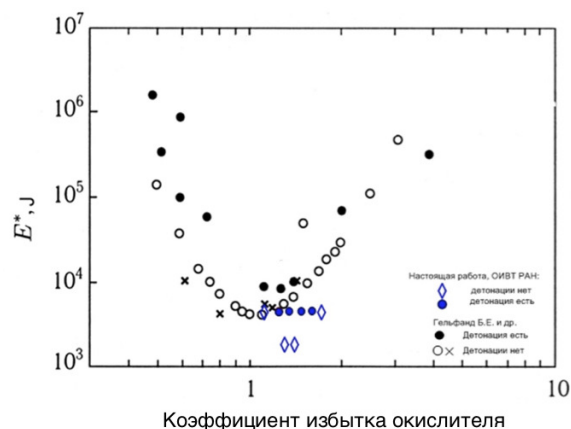
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В настоящей работе было проведено исследование возникновения сферической детонации водородно-воздушной смеси при прямом инициировании энергией 2.3 и 4.6 кДж с содержанием водорода в диапазоне от 32 до 42% (об.). В таблице 1 приведены результаты проведенных экспериментов. На основании этих данных определены границы кривой возникновения сферической детонации при ее инициировании энергией 4,6 кДж. На рисунке 4 приведена концентрационная зависимость возникновения сферической детонации в водородно-воздушных смесях при прямом инициировании, взятая из монографии [2]. На этом графике собраны данные работ [3–7]. Эти данные обозначены черными символами. На этот же рисунок синими кружками и ромбами нанесены данные, полученные в нашей работе. Вид кривой близок к параболе. В водородно-воздушных смесях минимальная навеска, инициирующая переход в детонацию по данным работ [5, 6], равна 1.86 г. тротила, что в пересчете на энергию составляет 7.8 кДж. Эта энергия рассматривалась как минимальная энергия возникновения сферической детонации. При этом минимум кривой критической энергии инициирования смещен в область богатых смесей. В работе [6] он достигается при 35% (об.) H_2 . В настоящей работе сферическая детонация в смесях с содержанием H_2 в диапазоне от 34 до 40% (об.) возникала при энергии 4.6 кДж, что почти в 2 раза меньше ранее принятой. При энергии инициирования 2.3 кДж возникает процесс горения, который распространяется с дозвуковой скоростью. Из полученных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что минимум критической энергии инициирования лежит в области от 4.6 до 2.3 кДж.

При энергии инициирования больше чем 4.6 кДж вдали от пограничной кривой колебательный процесс при прямом инициировании детонации заканчивался на расстоянии от места инициирования ~ 90 см и на двух последних датчиках давления получались стабильные результаты. При энергии инициирования 4.6 кДж первый датчик фиксировал давление, превышающее детонационное, а колебательный процесс продолжался до последнего датчика, причем фиксируемые давления значительно превышали детонационные. При этой энергии инициирования все результаты можно считать пограничными, так как при энергии 2.3 кДж и содержании водорода 36 и 37% (об.) детонация не возникала, а концентрационная зависимость возникновения сферической детонации в водородно-воздушных смесях при прямом инициировании имеет u-образный вид. Полученные результаты имеют большое значение для изуче-

Таблица 1. Среднее избыточное давление вдоль измерительной планки в зависимости от энергии инициирования и содержания H_2

Опыт	1	2	3	4	5	6	7	8
Содержание H_2 , % (об.)	32	34	36	38	40	42	36	37
Энергия инициирования, кДж	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	2.3	2.3
Среднее избыточное давление, m_{ax} , атм	3.3	19.45	25.6	27.5	21.7	1.91	0.36	0.25

**Рисунок 4.** Концентрационная зависимость возникновения сферической детонации в водородно-воздушных смесях при прямом инициировании.

ния процессов горения водородно-воздушных смесей и для обеспечения безопасности промышленных предприятий, использующих водород в больших объемах или на которых он образуется в результате нарушения технологического цикла, например, на АЭС.

4. ВЫВОДЫ

Проведено исследование развития детонации в водородно-воздушных смесях при ее прямом иницииро-

вании в объемах $\sim 7 \text{ м}^3$, ограниченных тонкой резиновой оболочкой. Впервые показано, что сферическая детонация водородно-воздушных смесей с содержанием водорода в диапазоне от 32 до 42% (об.) возникает при инициировании ее энергией 4.6 кДж. Было также показано, что при энергии инициирования 2.3 кДж детонация не возникала, поэтому можно сделать вывод, что критическая энергия инициирования лежит в диапазоне 2.3–4.6 кДж и она меньше ранее признанной, равной 7.8 кДж. Полученные результаты имеют большое значение для газодинамики горения и для безопасности предприятий, использующих водород в больших объемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Набоко И М, Бублик Н П, А Гусев П, Гуткин Л Д и А Петухов В 2012 *Физ.-хим. кин.* **1**
2. Гельфанд Б Е, Попов О Е и Чайванов Б Б 2008 *Водород: параметры горения и взрыва* (Физматлит)
3. Atkinson R, Bull D C and Shuff P J 1980 *Combust. Flame* **39** 287–300
4. Guirao C M, Knystaustas R, Lee J and Benedick W 1982 *Proceed. Combust. Inst.* **19** 583–590
5. Макеев В И, Гостинцев Ю А и Строгонов В В 1983 *ФГВ* **19** 548–550
6. Алдушкин В В, Гостинцев Ю А и Фортов В Е 1995 *Хим. Физика* **14** 59–102
7. Benedick W, Guirao C M, Knystaustas R and Lee J 1986 *Prograss Astronaut.* **106** 181–202