

УДК 534.222

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В БОЛЬШИХ ОБЪЕМАХ, ОГРАНИЧЕННЫХ ПОДАТЛИВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Набоко И.М., Бублик Н.П., Гусев П.А., Гуткин Л.Д., Петухов В.А., Солнцев О.И.

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*

[idnaboko@yandex.ru](mailto:idnaboko@yandex.ru)

### Аннотация

Описана оригинальная установка, предназначенная для исследования развития горения (вплоть до сверхзвукового) внутри сферического газового заряда, однородного по концентрации, и распространения последствий этого взрыва в нейтральной демпфирующей среде – воздухе. Излагаются первые результаты экспериментов и их анализ. Отмечены особенности наблюдаемых явлений. Результаты этого этапа работы дают основания для планирования дальнейших экспериментов и совершенствования физической модели реального процесса, моделирующих натурные условия взрывов, и постановке численных исследований.

### STUDY OF EVOLUTION OF HYDROGEN-AIR MIXTURE COMBUSTION IN LARGE VOLUMES BOUNDED BY A COMPLIANT SURFACE

Described is the original installation designed for the study of combustion (up to supersonic one) inside a spherical gas charge with uniform concentration and of propagation of the after-effects of this explosion in the neutral damping medium – air. The first results of experiments and their analysis are presented. The features of the observed phenomena are noted. The results of this phase of investigations give grounds for planning further experiments and improve the physical model of the real process which simulates real conditions of explosions, and for the statement of numerical studies.

### Введение

Исследования проводятся с целью получения экспериментальных данных, необходимых для прогнозирования особенностей возникновения взрывоопасных ситуаций в условиях образования больших объемов водородно-воздушной смеси при аварийных утечках водорода [1, 2, 6, 7]. Повышение достоверности прогнозирования является одной из главных проблем безопасности водородных систем при их использовании в транспортных средствах, силовых установках и энергоустановках, в том числе атомных.

При хранении и использовании водорода его утечка и перемешивание с окружающим воздухом приводят к опасности возникновения горения и взрыва в замкнутых и загроможденных объемах. Характер разрушений и масштаб ущерба при одном и том же количестве воспламенившегося газа может меняться в десятки раз в зависимости от конкретных условий. Для убедительного прогноза степени безопасности технологических процессов в энергосистемах, использующих или допускающих образование водородосодержащих воздушных смесей, необходимы исследования закономерностей и критических условий распространения и гашения пламени и детонационно-подобных волн горения в реакционно-способных газовых смесях в объемах, моделирующих по форме и размерам натурные условия, а также последствия взрыва газового заряда в окружающей нейтральной среде.

В литературе обстоятельно представлены результаты исследования процессов горения в установившихся режимах дефлаграции и детонации; существенно меньше изучены закономерности горения в наиболее опасных для реакционных объемов нестационарных режимах с максимальной нагрузкой в момент возникновения горения и при взрыве [3-5].

Нестационарные процессы горения определяются такими характеристиками как период индукции для смеси, параметры источника воспламенения в конкретных условиях инициирования, энергия и продолжительность иницирующего импульса. Иницирующим источником может быть разряд, прямой поджиг, интенсивное механическое воздействие, а также ударные волны при их взаимодействии и отражении. Необходимо знание координаты зоны максимального выделения энергии относительно начала воспламенения во фронте горения, ширины этой зоны и зависимости перечисленных факторов от параметров смеси. Привлекая необходимую информацию для прогнозирования возможных аварийных ситуаций из литературных источников, следует иметь в виду, что перечисленные характеристики для нестационарных режимов существенно зависят от условий развития процесса и отличаются от тех, которые определяют установившиеся режимы.

Водород характеризуется в классических исследованиях как активно горящий газ и для него характерны малые энергии инициирования горения. Возникшее от слабого источника первичное горение заметно ускоряется на начальных стадиях формирования фронта. Фронт, являясь неустойчивым, порождает возмущения и потоки, которые в замкнутых и полужамкнутых объемах и объемах больших размеров создают зоны с параметрами, достаточными для возникновения вторичных очагов воспламенения и взрыва. Возникающие вторичные нестационарные процессы характеризуются во многих случаях параметрами более высокими, чем параметры установившихся детонационных волн. Такие условия, как показывают исследования, проведенные авторами ранее, реализуются, например, в кумулирующих объемах с жесткими стенками [1, 2]. Результаты численного моделирования этих процессов представлены в [3-6].

Эксперименты проводились в водородно-воздушных смесях, которыми наполнялись шары-зонды, стенки которых эластичны и в условиях развития интенсивного горения разрушаются. Шар-зонд, содержащий газовый заряд, находится в стальной сфере объемом  $900 \text{ м}^3$ , пространство сферы заполнено воздухом при нормальных начальных условиях.

Исследования выполнены при вариации составов газовых смесей и энергии инициирования процессов и могут рассматриваться как соответствующие натурным ситуациям, реализующимся на начальной стадии аварийной утечки  $\text{H}_2$  в очень больших замкнутых объемах, либо в неограниченном пространстве, но в условиях возможности усиления волн, возникающих от неустойчивости фронта первичного горения в зоне достаточной концентрации  $\text{H}_2$  в воздухе и при условии сохранения такой концентрации в течение времени, сравнимого с периодом индукции.

## 1 Условия проведения экспериментов

Исследование горения водородно-воздушных смесей в больших объемах было проведено на установке «Сфера». Установка состоит из испытательной камеры 13ЯЗ диаметром 12 м (рис. 1), внутри которой размещается мягкая оболочка с водородно-воздушной смесью, системы заполнения оболочки газовой смесью заданного состава, системы автоматического контроля и управления подачи парогазовоздушной смеси и системы контроля процессов горения и обработки полученных данных. На рис. 2 приведена принципиальная схема установки.

Исследуемая водородно-воздушная смесь помещалась в объем  $7\text{-}14 \text{ м}^3$ , ограниченный тонкой резиновой оболочкой, имеющей после наполнения газовой смесью форму, близкую к сфере. В качестве резиновой оболочки 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 PROMSS 80F 08 и PROWIRL 72F 15. Погрешность измерения и отсечки объемов направляемых в оболочку газов при объеме смеси  $15 \text{ м}^3$  составляет 2%. Помимо

этого, в системе предусмотрено измерение концентрации водорода в реакционной смеси газоанализатором ИВА-1В с погрешностью 5%.

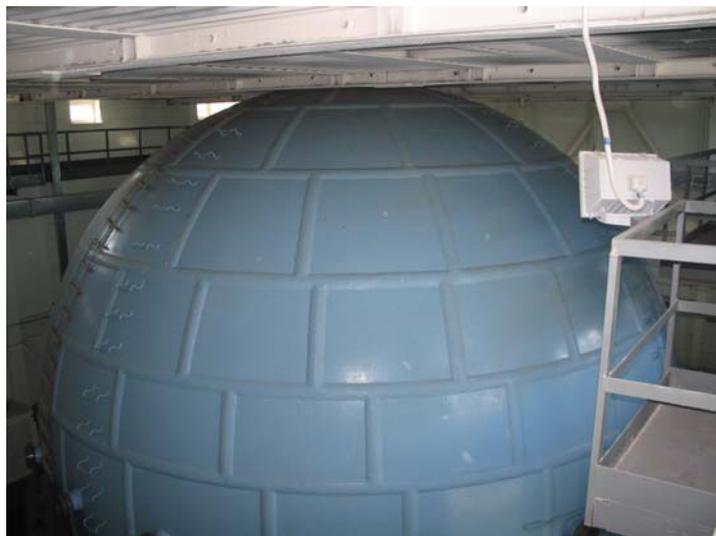


Рис. 1. Взрывная камера 13ЯЗ. Внутренний диаметр – 12 м, объем камеры – 910 м<sup>3</sup>

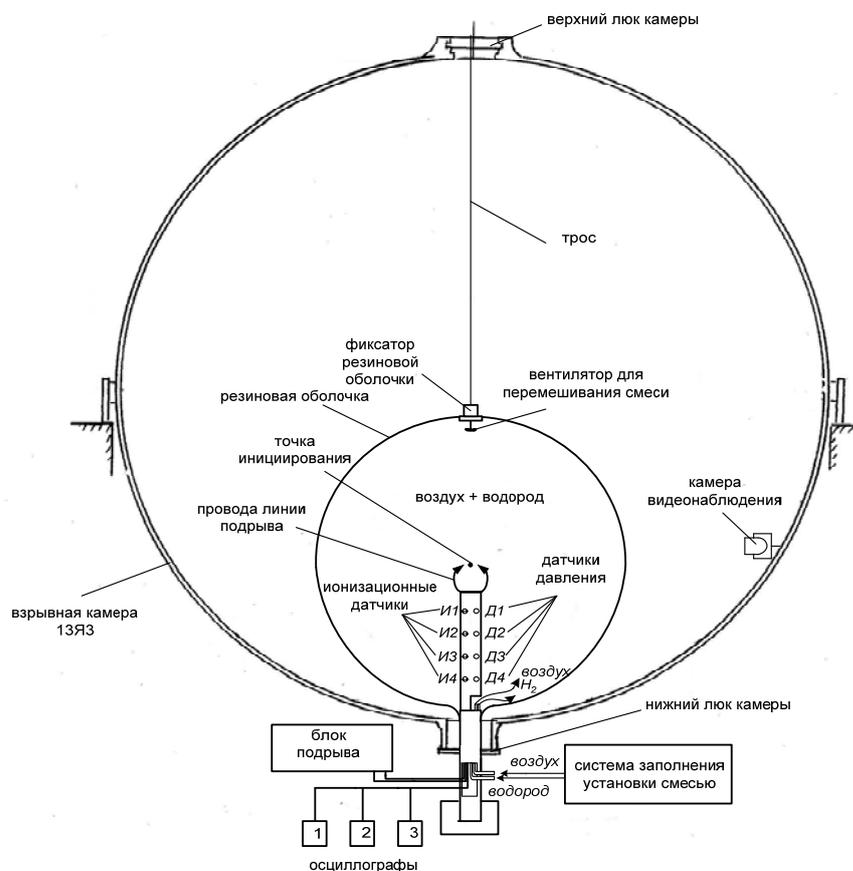


Рис.2. Схема экспериментальной установки

Смесь в реакционном объеме перемешивалась вентилятором в течение 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 сферы различными источниками иницирования (рис. 3):

- а) электровзрывом нихромовой проволоки диаметром 0,1 мм и длиной 12 мм;
- б) зарядом тэна сферической формы,  $m = 0,4$  г;
- в) зарядом тэна сферической формы,  $m = 0,8$  г;
- г) зарядом тэна сферической формы,  $m = 2,7$  г.



Рис.3. Источники иницирования

Иницирование производилось от высоковольтного блока питания, с помощью которого осуществлялся электровзрыв проволочек. В зарядах тэна проволочка проходила по диаметру заряда.

Для измерения параметров, определяющих движение ударных волн и их интенсивность, перемещения фронта пламени, а также для осуществления иницирования газовой смеси в центре сферического объема внутри реакционного объема установлена специальная измерительная планка, схема которой показана на рис. 4.

Планка представляет собой длинный (1,5 м) прямоугольный короб с внешним размером сечения 80x60 мм. Широкие стороны короба сделаны из стальных полос толщиной 8 мм, узкие – из стальных полос толщиной 3 мм. Одна из широких сторон – плоская. Противоположная ей сторона в части, направленной в центр исследуемого объема, наклонена к плоской пластине 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 четыре пары датчиков: ионизационные датчики (рис. 4, а) и датчики импульсного давления (рис. 4, б). Датчики давления фиксируют давления ударных волн в процессе их перемещения вдоль планки, а ионизационные дат-

чики – движение фронта пламени. Устройство ионизационных датчиков представлено на рис. 5., а на рис. 6 – фотография одного из ионизационных датчиков, установленного на измерительной планке. Там же можно видеть торец датчика давления, установленного на планке. В работе использовались пьезоэлектрические датчики импульсного давления фирмы РСВ Piezotronics, США: 113В31 – для измерения давлений в диапазоне от 0,02 кПа до 1380 кПа, чувствительность – 3, 62 мВ/кПа, максимальное давление – 6900 кПа; 113В36 – для измерения давлений в диапазоне от 0,06 кПа до 3450 кПа, чувствительность –  $14,5 \pm 0,07$  мВ/кПа, максимальное давление – 69000 кПа.

Провода линии инициирования смеси проходят внутри короба, где они отделены от измерительных проводов металлической пластиной, и выводятся из герметичного короба в реакционный объем из узких сторон коробки на расстоянии 170 мм от острой вершины короба через уплотнения и подходят с двух сторон к центру сферического объема в металлических трубках. На рис. 7 представлена фотография измерительной планки, а на рис. 8 - показано описанное выше устройство, установленное внутри камеры 13ЯЗ (без резиновой оболочки). После установки источника инициирования натягивалась резиновая оболочка, и начиналось заполнение объема исследуемой газовой смесью. На рис. 9 показан вид реакционного объема с водородно-воздушной смесью с измерительной планкой внутри него перед экспериментом.

Визуализация процесса наполнения шара-зонда газовой смесью, ее инициирования и состояния газового заряда в процессе развития его воспламенения и горения осуществлялось с помощью камеры видеонаблюдения, установленной внутри камеры 13ЯЗ на ее боковой поверхности (см. рис. 2). Кроме того, через иллюминатор диаметром 46 мм в верхнем люке камеры можно регистрировать процесс горения высокоскоростной видеокамерой.

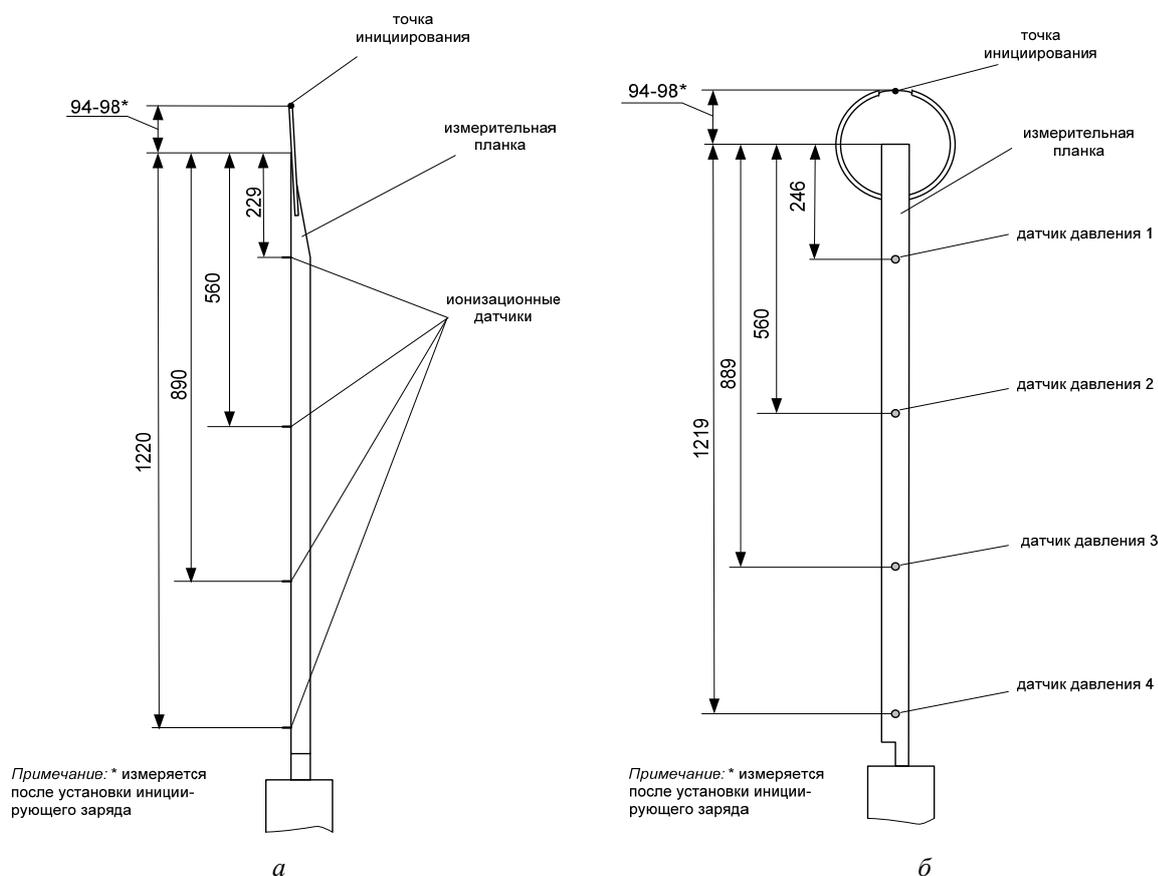
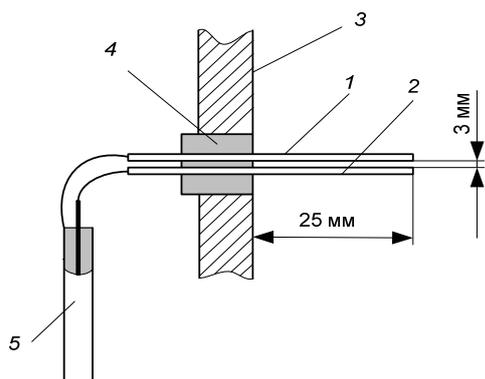


Рис.4. Расположение ионизационных датчиков (а) и датчиков давления (б)



1, 2 – стержневые электроды диаметром 1 мм;  
3 – стенка измерительной планки; 4 – изолятор;  
5 – подводящий экранированный кабель

Рис. 5. Устройство ионизационных датчиков



Рис. 6. Ионизационный датчик, установленный на измерительной планке



Рис. 7. Измерительная планка с установленными внутри ее датчиками

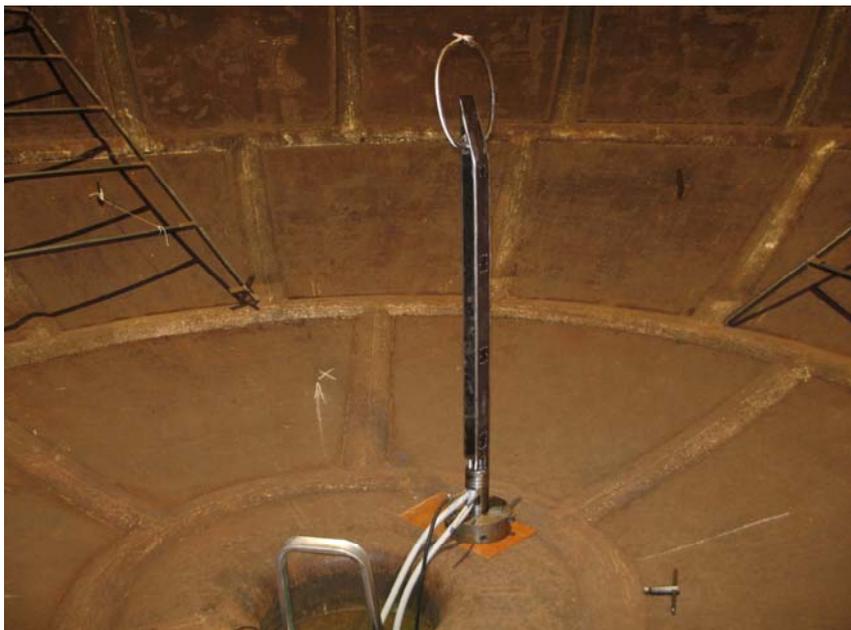


Рис. 8. Измерительная планка установлена внутри взрывной камеры 13Я3



Рис. 9. Фотография резинового шара-зонда, заполненного исследуемой водородно-воздушной смесью и установленного во взрывной камере

## 2 Результаты экспериментов

Датчики давления, размещенные на диагностической планке вдоль диаметра шара - зонда, обеспечивают возможность измерения интенсивности волн и времени их поступления в четыре точки, расположенные по радиусу сферы. Практически в этих же точках с помощью ионизационных датчиков фиксируется момент прихода фронта первичного медленного горения.

На рис. 10 приведены характерные осциллограммы сигналов 4-х датчиков давления и 4-х ионизационных датчиков, полученные в одном из экспериментов.

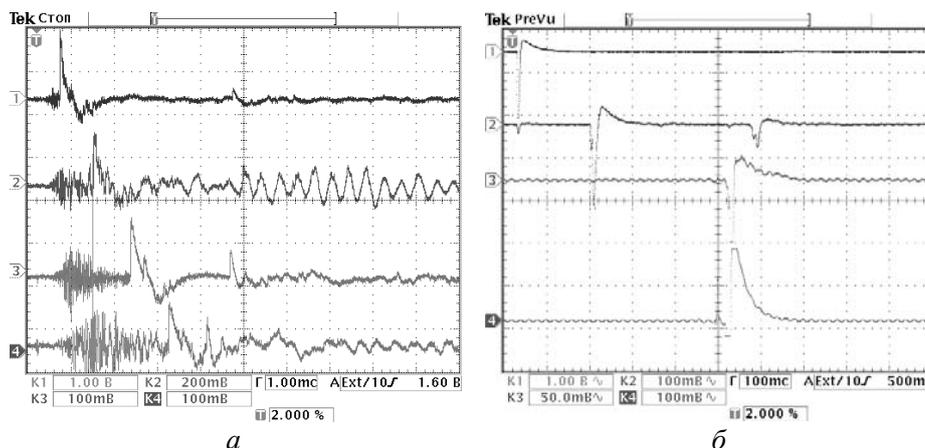


Рис. 10. Осциллограммы сигналов датчиков давления (а) и ионизационных датчиков (б), полученные в одном из экспериментов, при инициировании смеси, содержащей 13% (об.) водорода и 87 % (об.) воздуха, зарядом тэна массой 0,4 г.

В таблице 1 приведены полученные после обработки осциллограмм максимальные давления и время распространения фронта пламени вдоль измерительной планки при горении водородно-воздушных смесей различного состава при разной энергии инициирования.

Таблица 1

**Изменение максимального давления и момента его регистрации, времени распространения фронта пламени вдоль измерительной планки при горении водородно-воздушной смеси различных составов и при разной энергии инициирования**

№ опыта	Энергия, кДж	Содержание H <sub>2</sub> , % (об.)	Объем м <sup>3</sup>	Максимальное давление, регистрируемое датчиками, P <sub>max</sub> , атм, и время его регистрации t, мкс								Момент срабатывания ионизационных датчиков t <sub>и</sub> , мс			
				Д1		Д2		Д3		Д4		И1	И2	И3	И4
				P <sub>max</sub>	t	P <sub>max</sub>	t	P <sub>max</sub>	t	P <sub>max</sub>	t				
4	15.7	31	7	14.14	176	21.3	352	18.48	528	21.1	700	—	—	—	—
8	4.6	31	7	2.88	320	2.787	904	1.341	1620	1.248	2360	0.32	5.88	16.0	28.3
23	4.6	31.0	7.018	4.16	304	1.853	848	1.427	1530	1.278	2260	0.32	4.24	5.62	5.78
13	4.6	16.02	7.0	1.933	460	1.308	1180	1.151	2020	1.103	2900	6.00	57.2	196	195
14	4.6	13.0	7.0	1.737	520	1.258	1280	1.126	2140	1.086	3000	—	0.150	0.414	0.150
17	4.6	16.0	14.07	1.784	456	1.266	1180	1.136	2020	1.108	2880	5.6	16.6	17.7	18.6
18	4.6	16.0	14.01	1.879	432	1.305	1180	1.147	2040	1.114	2900	6.4	54.4	—	166
16	4.6	13.02	14.02	1.723	440	1.261	1240	1.138	2080	1.104	2960	6.0	138	348	486
29	2.3	22	11.087	2.407	472	1.247	1210	1.125	2050	1.036	2900	3030	20.4	23.6	28.2
26	2.3	22	7.0	1.084	820	1.012	1720	—	—	—	—	13.6	23.4	25.8	30.2
28	2.3	22	7.025	>1.2	480	>1.2	1260	>1.145	2100	1.0372	2960	10.0	24.6	48.8	95.6
31	2.3	16	7.244	2.285	512	1.188	1290	1.100	2130	1.025	3000	6.0	69.6	162	155
32	2.3	13	7.041	2.028	576	1.172	1370	1.099	2220	1.027	3140	20.0	872	784	732
33	2.3	13	7.097	2.082	552	1.166	1340	1.095	2210	1.028	3080	11.2	183	502	478
34	0.006	31	7.0	1.038	884	1.0075	1700	1.0054	2560	1.0014	3420	75.2	90.8	93.2	97.2

На рис. 11 приведены несколько кадров, полученных с помощью камеры видеонаблюдения, иллюстрирующие процесс инициирования газового заряда объемом  $7 \text{ м}^3$ , его воспламенение, увеличение зоны горения и разрушение оболочки.

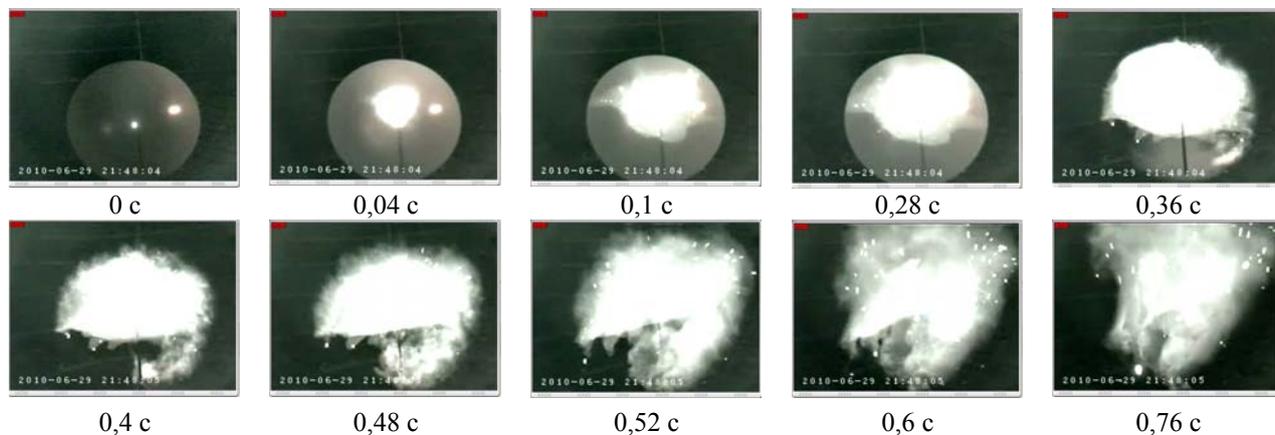


Рис. 11. Горение водородно-воздушной смеси, содержащей 13% водорода, при инициировании ее зарядом тэна массой 0,4 г

Рис. 12 иллюстрирует влияние массы иницирующего заряда на развитие процесса горения водородно-воздушной смеси при одном и том же содержании водорода в смеси, а рис. 13 – влияние концентрации водорода при одинаковой энергии инициирования процесса горения.

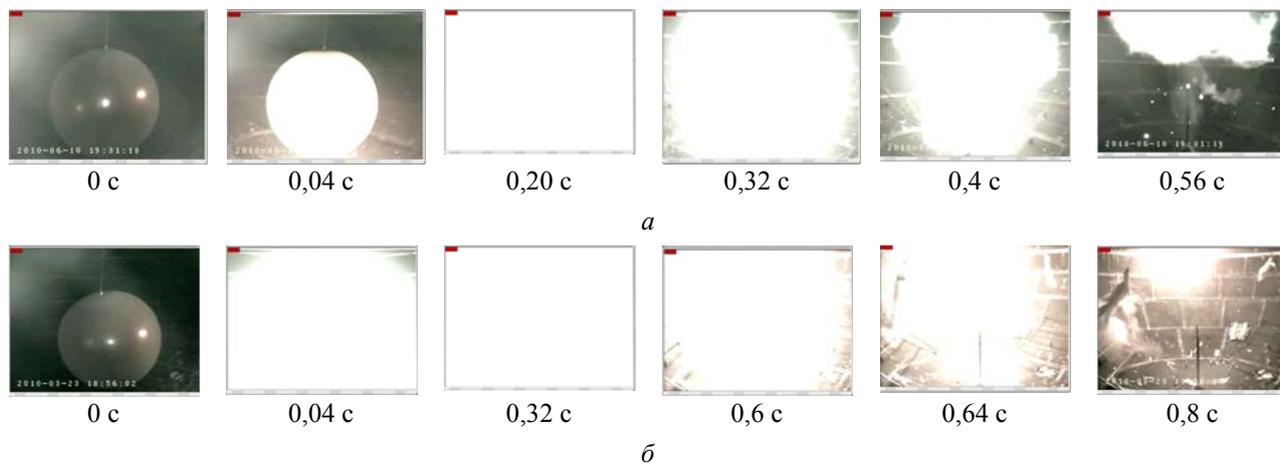


Рис. 12. Процесс развития горения водородно-воздушной смеси, содержащей 22 % (об.) водорода и 78 % (об.) воздуха в сферической оболочке объемом  $7 \text{ м}^3$  при инициировании зарядом тэна 0,4 г (а) и 0,8 г (б)

На рис. 14 показаны несколько кадров, полученных при съемке процесса инициирования и горения газового заряда, содержащего 31 % (об.) водорода в воздухе при инициировании процесса искрой (энергия искры – 1,8 Дж) высокоскоростной камерой через отверстие в верхнем люке.

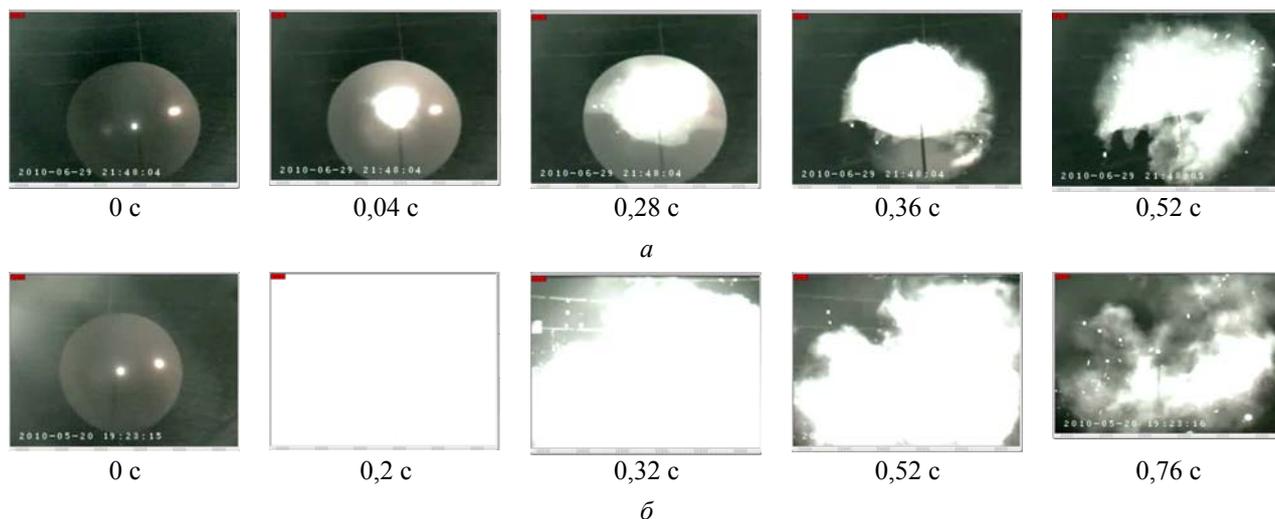


Рис. 13. Процесс развития горения водородно-воздушной смеси в сферической оболочке объемом  $7\text{ м}^3$  при иницировании зарядом тэна 0,4 г при содержании водорода в смеси 13 % (об.) (а) и 25 % (об.) (б)

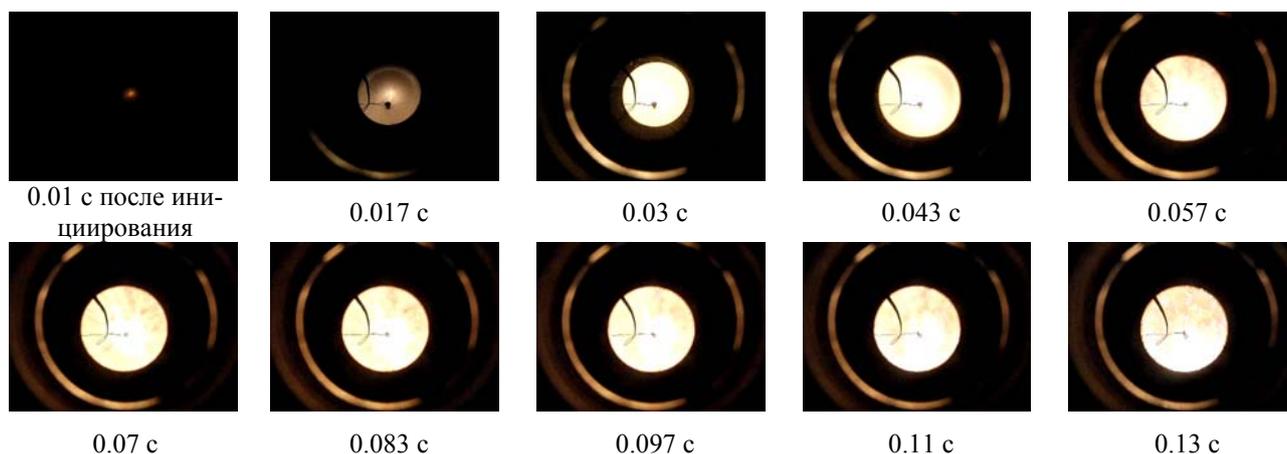


Рис. 14. Процесс развития горения водородно-воздушной смеси (вид сверху)

### 3 Обсуждение результатов

Сопоставление результатов регистрации значений давления в волне перед фронтом пламени, перемещения волны горения вдоль поверхности диагностической планки и фотографий свечения объема газового заряда на разных стадиях горения дает интегральную информацию об особенностях развития процессов горения в большом сферическом объеме. Данные опытов показывают, что на расстоянии  $\sim 1\text{ м}$  от точки иницирования распространение пламени происходит в 15–30 раз медленнее движения волны перед пламенем. Такого различия в показаниях времен поступления соответствующих сигналов с датчиков (см. табл. 1).

Интенсивное горение, для которого характерно свечение, заполняющее всю или большую часть резиновой оболочки, и приводящее в большинстве случаев к ее разрушению, происходит с большой задержкой по отношению к моменту возникновения горения от первоначального источника, иницирующего эксперимент. Интенсивной стадии горения

предшествует зарождение очагов воспламенения, порождаемых возмущениями от неустойчивости его фронта, а роль первичного источника на этой стадии уже мало значима.

Вторичное воспламенение в больших газовых зарядах [7] с большей вероятностью бывает взрывным и при прочих равных условиях – составу смеси и энергии инициирования – развивается сразу в нескольких точках, чем отличается от развития процесса в традиционных по форме лабораторных установках, вместимостью до нескольких литров. Очевидно, что чем больше объем, тем больше очагов и порождаемых ими возмущений и тем интенсивнее интегральное силовое воздействие вторичного взрывного воспламенения, являющегося результатом одновременного взрыва в нескольких точках реакционного объема.

Первоначально газовый заряд сферический, а процесс интенсивной стадии горения никогда не имеет сферической формы. Фронт горения не бывает гладким, его структура не упорядочена как структура фронта первичного горения в трубе до стадии взаимодействия со стенками. Она также принципиально отличается от специфической структуры фронта волны горения на последующих стадиях распространения интенсивно горящих смесей в трубах, перед стадией взрыва, характерного для возникновения детонации. К сожалению, авторы, занимающиеся математическим моделированием процессов перехода дефлограции и детонацию (ДДТ) недостаточно знакомы с данными экспериментов по ДДТ, и, получая в расчетах симметричные картинки, выдают желаемое за действительное (объявляя, что рассчитали переход, не получив стадий развития процесса, без которых переход невозможен). Эти обстоятельства следует иметь в виду, чтобы не ошибаться в выводах вместе с заблуждающимися авторами подобных расчетов.

Несимметричные и «рыхлые» структуры фронтов горения в наших опытах определенно ответственны за характер «волновых пакетов», формирующихся при воспламенении газовых зарядов от иницирующих взрывов взрывчатого вещества. Взрывные волны с короткой положительной фазой имеют интенсивность и структуру, определяемую движением и структурой первичного фронта горения. Они несимметричны, несмотря на первичную симметрию газового заряда и, по-видимому, не предсказуема их структура и характер взаимодействия между ними. На последней стадии эксперимента наблюдается громкий хлопок, который, возможно, связан с вторичным воспламенением, но более определенный ответ возможен после дополнительных исследований с более совершенной системой визуализации. Этот взрыв не порождает стационарную детонацию и может иметь непредсказуемые характеристики, которые и предстоит исследовать в физических и вычислительных экспериментах.

Изложенное выше существенно осложняет прогнозирование процессов в условиях аварийных ситуаций и является предупреждением против непродуманных выводов, формулируемых на основе не поверенных физическими опытами вычислительных экспериментов.

Анализ полученных результатов обнаруживает большую степень случайности в значениях количественных и качественных показателей, характеризующих развитие процесса вторичного взрыва. В силу чего предполагается проведение дополнительных экспериментов для получения представительного массива данных в заявленном диапазоне изменения определяющих параметров. Только представительный массив может обеспечить возможность обобщения результатов с обоснованной оценкой достоверности этого обобщения.

## **Заключение**

Создана установка для исследования процессов горения и взрыва газовых смесей в больших (до  $14 \text{ м}^3$ ) сферических объемах, ограниченных податливой оболочкой, и регистрации прохождения ударных волн и распространения фронта пламени по радиусу сферы.

В условиях, которые реализуются в наших экспериментах, развитие процесса существенно отличается от общепринятой для взрывов сферических газовых зарядов модели «мыльного пузыря» для исходно сферического заряда. Процесс интенсивной стадии горе-

ния до разрушения оболочки несферический, наблюдаемое свечение имеет разные от опыта к опыту контуры, сходные только в общих чертах.

Регистрация развития процесса интегрального свечения с достаточным временным разрешением внутри податливой оболочки (что показано также в [7-9]) обнаруживает существенную связь динамики течения и кинетики процессов развивающегося горения. Структура среды и ее перестройка после инициирования процесса, как показывают анализ и сопоставление регистрируемых параметров, не являются сферически симметричными, имеют сложную завихренную форму и на стадиях эксперимента после разрушения оболочки. Такая картина наблюдается при различной энергии инициирования. Возвратные течения горящего газа способствуют его перемешиванию с окружающим воздухом, определенно влияют на характер горения, ускоряя его в локальных зонах, что характерно для наших экспериментальных условий и подобно процессам в натуральных пожарах при выбросе пламени из помещения через проемы в сооружениях.

Для стадии, предшествующей взрыву и определяющей его развитие, характерны отсутствие симметрии, хаотичность структуры среды и возникновение множественности вторичных очагов воспламенения в локальных зонах с достаточными параметрами. Это определяет случайность протекания газокинетических процессов, к описанию которых, по-видимому, следует привлечь законы флуктуационной кинетики [10].

Проведенные эксперименты показывают, что в условиях взрыва газовых зарядов по последствиям внутри податливой оболочки «эффективны» наряду со стехиометрическими и обедненные водородно-воздушные смеси. Последствия взрыва газового заряда в целом, с привлечением «демпфирующего пространства», как и следует ожидать, определяются объемом заряда, составом смеси и энергией инициирования, при этом разброс результатов очень существенен.

При прогнозировании последствий возможных взрывов газовых зарядов и формировании программ фундаментальных исследований необходимо принимать во внимание натурные условия их реализации. Экспериментальные исследования, проводимые во взрывной камере 13ЯЗ установки «Сфера», и сопоставление их с полученными ранее результатами в «Конусе» и «Пирамиде» [1, 2, 6] показывают принципиальное влияние размеров и формы газового заряда на закономерности процессов взрывного нестационарного горения, его эффективности и опасности.

## Литература

1. Набоко И.М., Петухов В.А., Солнцев О.И., Гусев П.А. Управление горением гомогенных газовых смесей // Химическая физика. 2006. Т.25, № 4, С.4–13.
2. Набоко И.М., Бублик Н.П., Гусев П.А., Петухов В.А., Солнцев О.И. Горение и взрыв водородно-воздушной смеси в условиях, моделирующих элементы объёмов загазованных помещений // Химическая физика. 2009. Т.28, № 5, С.26–33.
3. Ачасов О.В. Применение процессов горения и детонации в энергообменных аппаратах. Диссертация д.ф.-м.н. Минск. 1994.
4. Васильев О.А. Численное моделирование процессов фокусировки ударных волн и детонации в химически неравновесных газах. Диссертация к.ф.-м.н. МАИ. Москва. 1995.
5. Васильев О.А., Минин С.Н., Пушкин Р.М., Смирнов С.С., Соколов А.И. Формирование детонации при фокусировке отраженной ударной волны // Математическое моделирование. 1996. Т.8, № 6, С.61–64
6. Минеев В.Н., Набоко И.М., Паршиков А.Н., Петухов В.А., Фортов В.Е., Гостинцев Ю.А., Гусев П.А. Горение и взрыв в замкнутой конической полости // Теплофизика высоких температур. 1999. Т.37, № 2, С.313–318.

7. Petukhov V.A., Naboko I.M. and Fortov V.E. Explosion hazard of hydrogen–air mixtures in the large volumes // *International Journal of Hydrogen Energy*. V.34, Issue 14, July 2009, P.5924-5931 (doi:10.1016/j.ijhydene.2009.02.064)
8. Набоко И.М., Бублик Н.П., Гусев П.А., Гуткин Л.Д., Петухов В.А., Солнцев О.И. Исследование развития горения водородно-воздушных смесей в больших объемах, ограниченных податливой поверхностью. Актуальные проблемы российской космонавтики. Материалы XXXV Академических чтений по космонавтике. Москва. Январь 2011г. Комиссия РАН. С.282–285.
9. Petukhov V.A., Naboko I.M., Gusev P.A., Solntsev O.I., Bublik N.P., Gutkin L.D. Combustion of hydrogen-air mixtures in large spherical volumes. Abstracts of XXVI Int. Conf. on Interaction of Intense Energy Fluxes with matter, March 1-6, 2011, Elbrus, Russia, Moscow&Chernogolovka&Nalchik, 2011, P. 105
10. Зельдович Я.Б. Флуктуации периода индукции разветвленной цепной реакции // *ДАН СССР*. 1981. Т.257, С.1173.

Статья поступила в редакцию 4 октября 2011 г.