

*Ю.П. Ключка, к.т.н., ст. научн. сотр., докторант, НУГЗУ,
В.И. Кривцова, д.т.н, профессор, НУГЗУ,
В.Г. Борисенко, к.ф.-м.н., доцент, НУГЗУ,
А.И. Ивановский, к.т.н., с.н.с., зам. нач. отд., ИПМаш НАНУ*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАМЕНИ ПРИ ВЗРЫВЕ ВОДОРОДА ИЗ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ

Проведен эксперимент по определению зависимости объема пламени при взрыве от массы водорода. Полученные экспериментальные значения позволили сделать вывод об адекватности теоретической модели.

Ключевые слова. Водород, гидрид, давление, объем, эксперимент, температура, взрыв, пламя.

Постановка проблемы. Хранение водорода в форме гидридов интерметаллидов является одним из способов его хранения на автотранспорте [1, 2]. При этом параметры системы хранения определяются исходя из характеристик автомобиля, таких как масса автомобиля, потребляемый расход водорода, наличие рекуперационной установки и т.д.

Одним из недостатков использования этих систем является их пожаровзрывоопасность, обусловленная свойствами водорода и самой системой хранения. В связи с этим, определение последствий разрушения этих систем под воздействием внешнего источника тепла, является актуальной проблемой.

Анализ последних достижений и публикаций. При авариях различного рода емкостей может образовываться облако газовой среды (ГВС), в котором при определенных условиях может развиваться детонационный или дефлаграционный взрыв, генерирующий взрывную ударную волну (ВУВ) [3, 4].

В работе [5] приводятся результаты исследования развития процессов горения и взрыва в связи с вопросами безопасности работы с реакционноспособной водородо-воздушной смесью. В результате проведения экспериментальных исследований с водородо-воздушной смесью установлено, что последствия нештатных ситуаций, возникающих при утечке водорода в помещении и непредвиденных выбросах в реакционные объемы, необходимо оценивать, моделируя конкретные натурные условия.

В работе [6] описывается установка для исследования процессов горения и взрыва газовых смесей в сферических объемах (до

14 м³), ограниченных податливой оболочкой, и регистрации прохождения ударных волн и распространения фронта пламени по радиусу сферы. Установлено, что при прогнозировании последствий возможных взрывов водородо-воздушных смесей необходимо принимать во внимание натурные условия их возникновения.

Однако, на сегодняшний день отсутствуют сведения о параметрах горения (взрыва) водородо-воздушных смесей, образование которых возможно в результате разрушения гидридных систем хранения водорода, например при пожаре.

Постановка задачи и ее решение. Целью данной работы является получение экспериментальным путем параметров взрывов облаков водородовоздушных смесей и их сравнение с теоретическими значениями [3, 7].

С этой целью были проведены эксперименты по определению геометрических параметров «огненного шара». Для проведения эксперимента были использованы гидридные патроны выполненные из стали и заполненные интерметаллидом LaNi₅ диаметром 38мм и длиной 240 мм (7,15 г водорода), диаметром 30мм и длиной 360 мм (12 г водорода). На рис. 1 приведена схема экспериментальной площадки и фото взрыва водородо-воздушной смеси в результате разрушения гидридной системы хранения водорода под воздействием внутреннего избыточного давления.

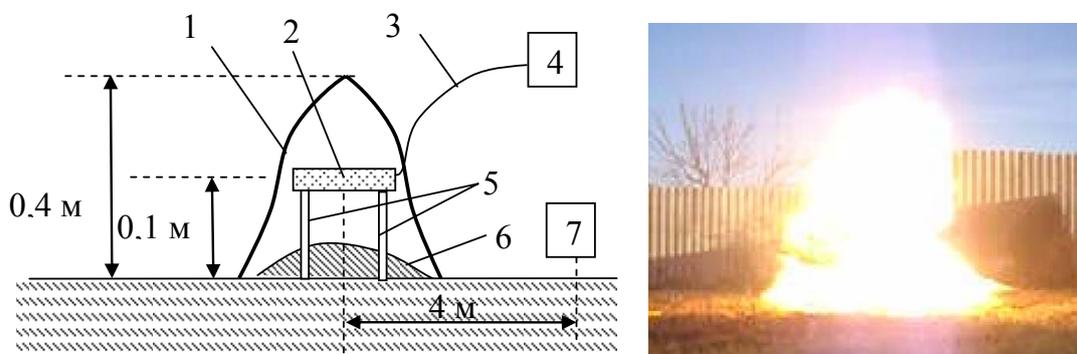


Рис. 1 – Схема экспериментальной площадки и фото взрыва водорода: 1 – пламя костра; 2 – гидридный патрон с насыщенным гидридом; 3 – магистральная линия к манометру; 4 – манометр МТП-160; 5 – металлические опоры для гидридного патрона; 6 – горючее вещество; 7 – фотоаппарат Nikon L10

Примем допущение, что форма пламени симметрична относительно вертикальной оси, тогда форму контура пламени можно описать в виде

$$r_h = f(h) \quad (1)$$

где: r_h – радиус пламени в горизонтальной плоскости на высоте h , $h \in [0; H]$, м; H – высота пламени, м.

Тогда объем пламени будет равен

$$V = \pi \int_0^H (f(h))^2 dh. \tag{2}$$

В табл. 1 приведены размеры пламени водорода на фотографиях. В данной таблице приведены значения для гидридного патрона диаметром 40 мм и длиной 150 мм, при этом в нем находилось 7,15 г водорода.

Таблица 1 – Параметры пламени взрыва водорода на фотографии

№ кадра на видео	Параметры взрыва на фото	
	Высота пламени, см	Диаметр пламени, см
1	11	7,8
2	13,5	9

С целью определения параметров взрыва, рассмотрим фото взрыва с его привязкой к геометрическим параметрам местности и расположению фотоаппарата относительно места взрыва. На рис. 2 приведена геометрическая интерпретация схемы экспериментальной площадки со взрывом.

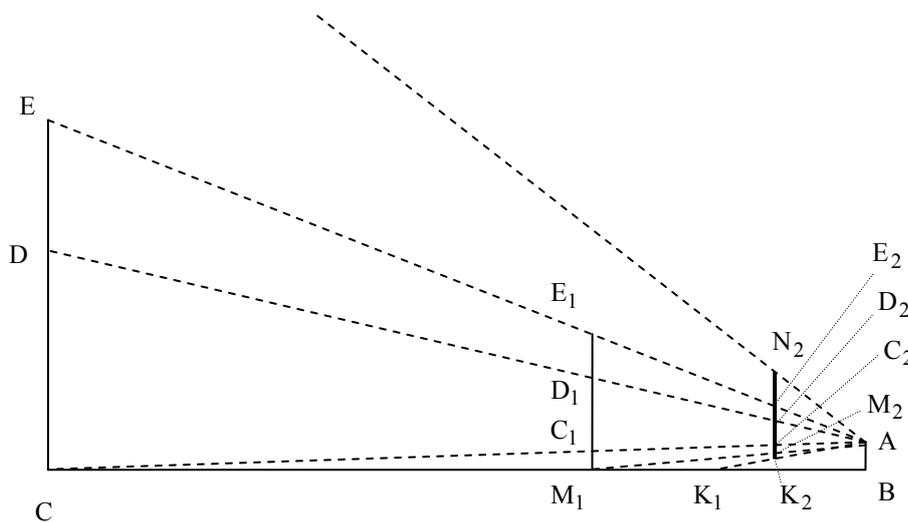


Рис. 2 – Схема экспериментальной площадки со взрывом: $CD=2,5$ м – высота ориентира, $CM_1=10$ м – расстояние от ориентира до центрапламени, $M_1B=4$ м, $AB=0,2$ м, M_1E_1 – высота пламени, $M_2E_2 = 0,135$ м– высота пламени на фотографии, $C_2D_2=0,07$ м – высота ориентира на фотографии, $\angle N_2AK_2$ – угол обзора фотоаппарата.

Из треугольника ABC следует, что $\operatorname{tg}\angle ACB = 0,2/14 = 0,142$. Исходя из того, что $\angle ACB < 1^\circ$, примем допущение $\angle ACE = 90^\circ$. Тогда из треугольников DCA и D_2C_2A можно записать

$$\frac{DC}{AC} = \frac{D_2C_2}{AC_2}. \quad (3)$$

Из треугольников DCA и D_2C_2A можно записать

$$\frac{E_1C_1}{AC_1} = \frac{E_2C_2}{AC_2}. \quad (4)$$

Подставив (3) в (4) получим зависимость для определения C_1E_1

$$E_1C_1 = \frac{DC \cdot E_2C_2 \cdot AC_1}{AC \cdot D_2C_2}, \quad (5)$$

$$E_1C_1 = \frac{2,5 \cdot E_2C_2 \cdot 4}{14 \cdot 0,07} = 10,2 \cdot E_2C_2. \quad (6)$$

В таблице 2 приведены максимальные параметры пламени взрыва водорода для случаев взрыва 7,15 г и 12 г водорода.

Таблица 2 – Максимальные параметры пламени при взрыве водородо-воздушной смеси

№	Параметры взрыва		
	Высота пламени, м	Объем, м ³	Масса водорода, г
1	1,5	1,34	12
2	1,38	0,8	7,15

В соответствии с [7] диаметр пламени для смеси водорода с воздухом можно определить исходя из выражения

$$D_s = 5,33 \cdot m^{0,327}, \quad (7)$$

где m – масса водорода, кг.

Тогда объем огненного шара будет равен

$$V_s = 79,2 \cdot m^{0,981}. \quad (8)$$

На рисунке 3 приведена зависимость (8), а также экспериментальные точки с табл. 3.

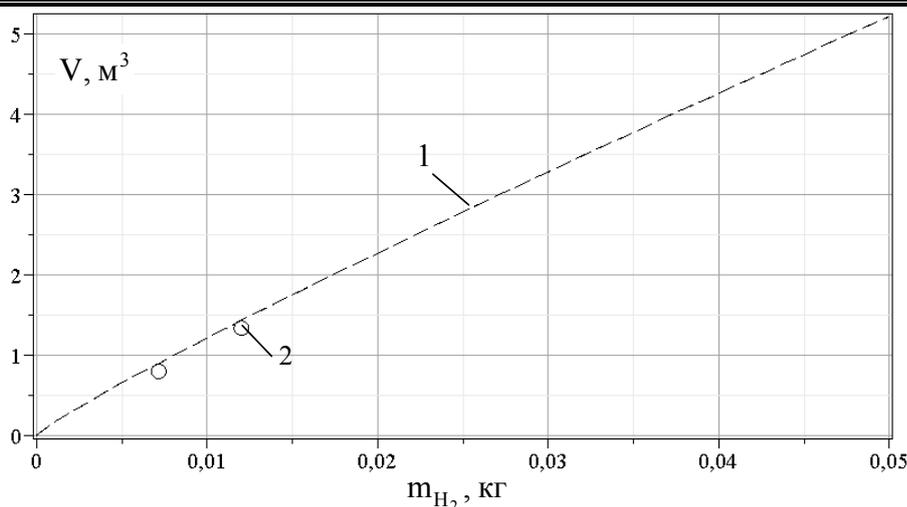


Рис. 3 – Зависимость объема пламени и газо-воздушной смеси от массы водорода: 1 – зависимость объема пламени («огненного шара») от массы водорода; 2 – экспериментальные значения объема пламени от массы водорода

На рисунке 4, в соответствии с (8), приведены зависимости объема пламени от массы гидрида в системе хранения водорода и концентрации водорода в гидриде.

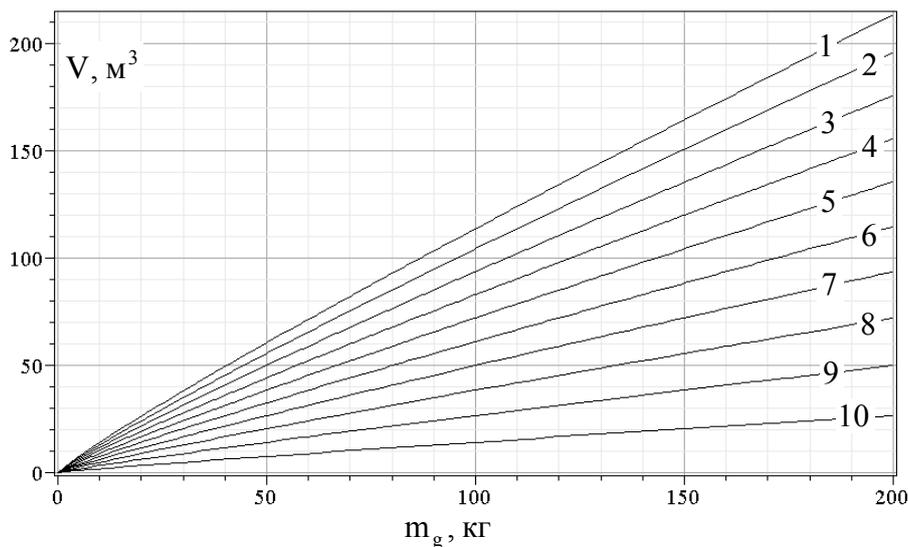


Рис. 4 – Зависимость объема пламени от массы гидрида и концентрации (θ) водорода в гидриде: 1 – $\theta=1$; 2 – $\theta=0,9$; 3 – $\theta=0,8$; 4 – $\theta=0,7$; 5 – $\theta=0,6$; 6 – $\theta=0,5$; 7 – $\theta=0,4$; 8 – $\theta=0,3$; 9 – $\theta=0,2$; 10 – $\theta=0,1$

Из рис. 3 следует, что полученные экспериментальные данные объема пламени, с погрешностью до 12%, совпадают с теоретическими значениями, полученными в соответствии с (8).

Выводы. Проведен эксперимент по определению зависимости объема пламени от массы водорода при его взрыве. Полученные экспериментальные значения позволили сделать вывод об адекватности теоретической модели, приведенной в [7]. Установлено, что интер-

металлид LaNi_5 , находящийся в системе хранения водорода, не оказывает существенное влияние на объем пламени при взрыве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузык Б.Н. Россия: стратегия перехода к водородной энергетике / Б.Н. Кузык, Ю.В. Яковец; Авт. предисл. С.М. Миронов – М.: Институт экономических стратегий, 2007. – 400 с.

2. Ключка Ю.П. Особенности использования водорода на автомобильном транспорте / В.И. Кривцова, Ю.П. Ключка // Проблемы пожарной безопасности. – 2009. – № 26. – С. 49–61.

3. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия РБ Г-05-039-96

4. Архипов В.А., Синогина Е.С. Горение и взрывы. Опасность и анализ последствий: Уч. пособие. Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2008. – 156 с.

5. Набоко И.М., Бублик Н.П., Гусев П.А., Петухов В.А., Солнцев О.И. Горение и взрыв водородно-воздушной смеси в условиях моделирующих элементов объёмов загазованных помещений // Химическая физика. 2009. Т.28, № 5, С.26–33.

6. 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. Физико-химическая кинетика в газовой динамике

7. ГОСТ Р12.3.047-98 ССБТ «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля». – М.: Изд-во стандартов, 1998 г.

nuczu.edu.ua

Ю.П. Ключка, В.И. Кривцова, В.Г. Борисенко, О.И. Ивановський

Визначення параметрів полум'я при вибуху водороду з металогідридних систем зберігання

Проведено експеримент по визначенню залежності обсягу полум'я при вибуху від маси водню. Отримані експериментальні значення дозволили зробити висновок про адекватність теоретичної моделі.

Ключові слова. Водень, гідрид, тиск, об'єм, експеримент, температура, вибух, полум'я.

Yu.P. Klyuchko, V.I. Krivtsova, V.G. Borisenko, A.I. Ivanovskiy

Defining the parameters of the flame in the explosion of the conduit metal hydride storage systems

An experiment to determine the dependence of the flame in the explosion of the mass of hydrogen. The experimental values are allowed to make a conclusion about the adequacy of the theoretical model.

Keywords. Hydrogen, hydride, pressure, volume, experiment, temperature, explosion, fire.