

9. *Chengming Gao*. Experimental study on the Ranque-Hilsch vortex tube / Gao Chengming. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2005. – 150 p.
10. *Eiamsa-ard S*. Numerical investigation of the thermal separation in a Ranque-Hilsch vortex tube / S. Eiamsa-ard, P. Promvong // Intern. J. Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50. – P. 821–832.
11. *Бабенко В. В.* Макет вихревых структур течения в вихревой камере / В. В. Бабенко, В. Н. Турик // Прикл. гидромеханика. – 2008. – Т. 10, № 3. – С. 3–19.
12. *Крамской А. В.* Численный метод расчета гидрогазодинамических процессов в вихревой трубке / А. В. Крамской, И. Н. Кудрявцев, И. А. Самохвал // Физико-технические проблемы энергетики и пути их решения 2011: Тез. докл. науч.-техн. конф. – Харьков: Харьков. нац. ун-т им. В. Н. Каразина, 15–16 нояб. 2011. – С. 25.
13. *Chung T. G.* Computational fluid dynamics / T. G. Chung. – New York: Cambridge University Press, 2002. – 1012 p.
14. *Wilcox D. C.* Turbulence modeling for CFD / D. C. Wilcox. – La Canada: DCW Industries, 1994. – 460 p.
15. *Bardina J. E.* Turbulence modeling validation, testing, and development / J. E. Bardina, P. G. Huang, T. J. Coakley // NASA TM 110446. – 1997. – 98 p.
16. *Крамской А. В.* Компьютерное моделирование газодинамических процессов методом конечных объемов : Конспект лекций / А. В. Крамской, И. Н. Кудрявцев, А. И. Пятак. – Харьков: Харьк. нац. автотранс. ун-т, 2005. – 36 с.

Поступила в редакцию  
10.10.11

УДК 614.8

**Ю. П. Ключка**\*

**В. И. Кривцова**\*, д-р техн. наук

**А. И. Ивановский**\*\* , канд техн. наук

\* Национальный университет гражданской защиты Украины  
(г. Харьков, e-mail: worlon@list.ru; e-mail: apbu@rambler.ru)

\*\* Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины  
(г. Харьков, e-mail: apbu@rambler.ru)

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТИ МЕТАЛЛОГИДРИДНОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА**

*Экспериментальным путем получены зависимости изменения давления водорода в патроне с гидридом от времени при его нагревании. Показано, что экспериментальные данные соответствуют теоретическим значениям с отклонением  $\approx 5\%$ .*

*Експериментальним шляхом отримані залежності тиску водню в патроні з гідридом від часу у разі його нагрівання. Показано, що експериментальні дані відповідають теоретичним значенням з відхиленням  $\approx 5\%$ .*

### **Постановка проблемы**

Одним из способов хранения водорода в автомобиле является хранение в связанном состоянии, в частности, с помощью гидридов интерметаллидов [1]. Наиболее перспективным и изученным является интерметаллид  $\text{LaNi}_5$  [2]. Одной из проблем использования этих систем является их пожаровзрывоопасность, обусловленная свойствами водорода и самой системой хранения.

В связи с этим определение изменения характеристик металлгидридного патрона с водородом и времени до его разрушения под воздействием внешнего источника тепла является актуальной задачей.



Рис. 1. Фото гидридного патрона в процессе подготовки к эксперименту

### Анализ последних достижений и публикаций

В работах [2, 3] приведены характеристики металлгидридных систем, динамика выделения водорода из гидрида, а также ряд их теплофизических характеристик. Однако на сегодняшний день отсутствуют результаты испытаний гидридных систем в случае воздействия на них тепловых потоков, например, при пожаре.

В работе [4] получены теоретические оценки времени до разрушения насыщенных гидридных систем с водородом под воздействием повышенной внешней температуры, а также дискретные модели зависимости давления в системе под воздействием температуры окружающей среды, характера ее изменения и степени насыщения гидрида водородом. Однако в работе [4] отсутствуют результаты экспериментальных исследований, которые бы позволили судить об адекватности приведенных моделей.

### Основная часть

Целью данной работы является получение экспериментальным путем зависимостей изменения давления водорода в патроне с металлгидридом, в частности с  $\text{LaNi}_5\text{H}_x$ , при его нагревании и их сравнение с теоретическими значениями [4].

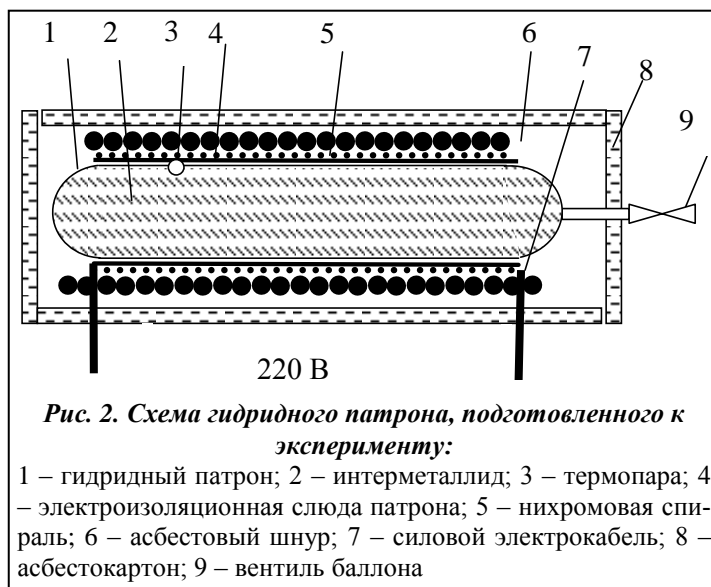
Для проведения эксперимента был использован гидридный патрон диаметром 30 мм и длиной 360 мм, выполненный из стали марки 12Х18Н10Т толщиной 1 мм, заполненный интерметаллидом  $\text{LaNi}_5$  в количестве 800 г (рис. 1).

В качестве измерителя температуры использовался прибор измерительный и регулирующий РТЭ-4.8-11 «Эргос» с погрешностью измерения температуры  $\pm 0,25\%$  и хромель-копелевая термопара – ТХК — Тип L. Давление в патроне измерялось с помощью манометра МТП-160 (0–40 МПа) с классом точности 1,5. Напряжение 220 В подавалось к нагревателю из нихромовой проволоки диаметром 0,8 мм и длиной 14 м. Эксперимент проводился при температурах и временных диапазонах, характерных для пожара [5].

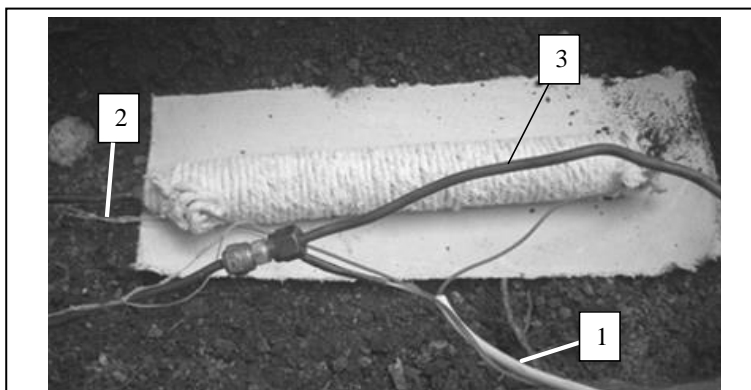
Подготовка гидридного патрона к эксперименту проводилась согласно схеме на рис. 2:

– гидридный патрон 1 с интерметаллидом 2 насыщался водородом (после соответствующего процесса активации [6]);

– к внешней оболочке патрона крепились термопара 3 и патрон



- в цилиндрической его части обматывался электроизоляционной листовой слюдой 4;
- поверхность электроизоляционной слюды наматывалась нихромовая проволока 5;
- поверхность нихромовой обмотки наматывался асбестовый шнур 6;
- к обмотке подключался силовой кабель 7;
- гидридный патрон теплоизолировался с помощью асбестокартон 8.



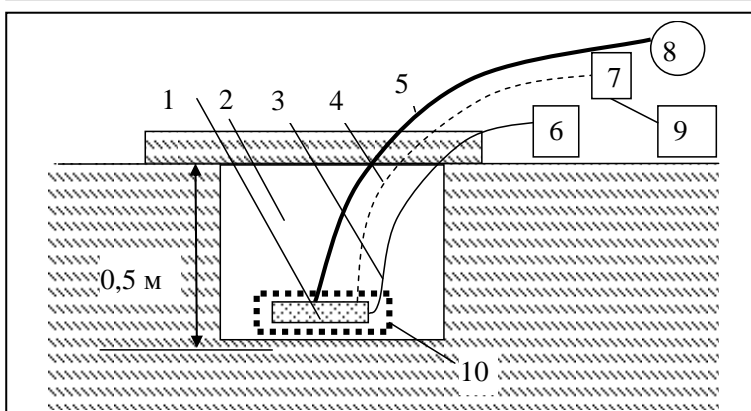
**Рис. 3. Гидридный патрон, подготовленный к эксперименту:**  
1 – силовой электрокабель; 2 – кабель термопары; 3 – магистральная линия к манометру

На рис. 3 приведен гидридный патрон, подготовленный к эксперименту.

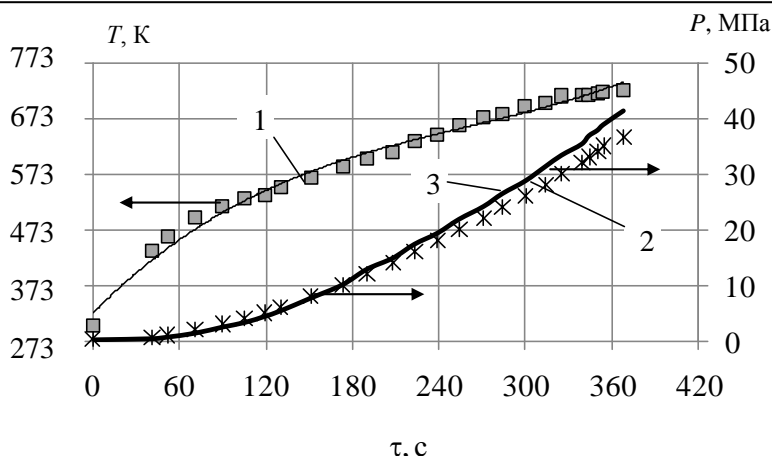
Патрон был уложен горизонтально в приямок глубиной 50 см (рис. 4).

На рис. 5 приведены результаты, полученные при проведении эксперимента.

Из рисунка следует, что по истечении 180 секунд расчетные значения давления становятся немного выше, чем экспериментальные. Это можно объяснить погрешностью измерений температуры и давления, а также погрешностью определения исходной насыщенности гидрида.

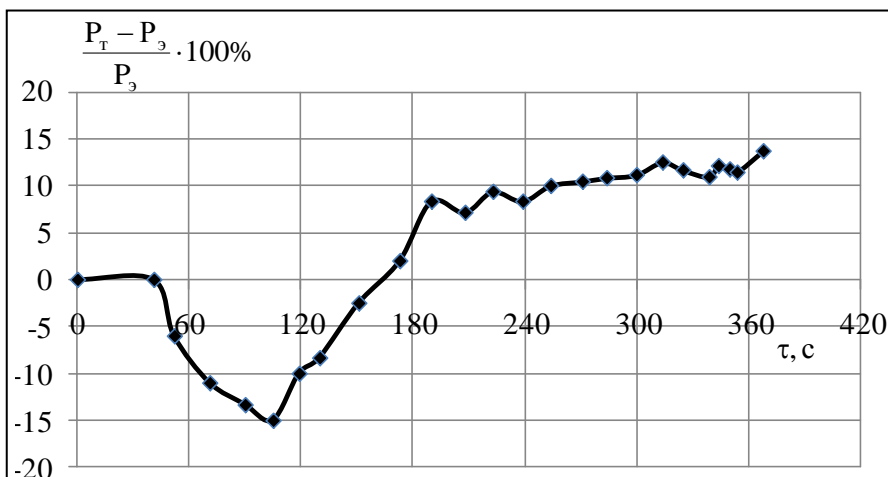


**Рис. 4. Схема экспериментальной площадки:**  
1 – гидридный патрон с насыщенным гидридом; 2 – приямок; 3 – магистральная линия к манометру; 4 – кабель термопары; 5 – силовой электрокабель; 6 – манометр МТП-160; 7 – преобразователь температуры; 8 – источник электропитания 220 В; 9 – персональный компьютер; 10 – теплоизоляция



**Рис. 5. Зависимость изменения температуры и давления водорода в патроне при его нагревании:**

- 1 – экспериментальные значения температуры на стенке патрона; 2 – экспериментальные значения давления в патроне; 3 – расчетное значение давления в соответствии с [4]



**Рис. 6. Относительная погрешность расчетных значений давления водорода в патроне от времени**



**Рис. 7. Фото гидридного патрона после взрыва**

На рис. 6 приведены зависимости относительной погрешности определения давления от времени, а на рис. 7 фото взорвавшегося гидридного патрона в результате эксперимента.

Из рис. 6 следует, что максимальное значение относительного отклонения составляет 15%, а среднее значение – около 5%, что позволяет говорить об адекватности модели, полученной в работе [4].

В ходе эксперимента гидридный патрон взорвался при значениях  $T = 733$  К и  $P = 36,5$  МПа, что говорит о некотором рассогласовании экспериментальных дан-

ных и теоретических. Ожидаемое расчетное давление, при котором разрушится гидридный патрон, составляло  $P = 22,5$  МПа [7]. Разницу экспериментального и теоретического давления разрушения можно объяснить наличием нихромовой обмотки как армирующего слоя на корпусе патрона.

### Выводы

Экспериментальным путем получены зависимости давления водорода в патроне с гидридом  $\text{LaNi}_5\text{H}_x$  при его нагревании, позволившие сделать вывод об адекватности теоретической модели, приведенной в [4]. Показано, что погрешность расчетных значений в соответствии с [4] составляет в среднем 5%.

### Литература

1. Ключка Ю. П. Особенности использования водорода на автомобильном транспорте / В. И. Кривцова, Ю. П. Ключка // Пробл. пожар. безопасности. – 2009. – № 26. – С. 49–61.
2. Мищенко А. И. Применение водорода для автомобильных двигателей / А. И. Мищенко. – Киев: Наук. думка, 1984. – 281 с.
3. Кривцова В. И. Теоретические и экспериментальные пути создания систем хранения и подачи водорода на основе твердых веществ для двигателей и энергетических установок летательных аппаратов: Дис ... д-ра техн. наук. – Харьков, 2001. – 420 с.
4. Ключка Ю. П. Определение времени разрушения гидридного патрона, обусловленного изменением температурных параметров окружающей среды / Ю. П. Ключка // Наук. вісн. будівництва. – 2011. – № 68. – С. 77–80.
5. Клаус Д. П. Роль естественно-научной криминалистики / Дитер Поль Клаус. – М., 1985. – 311 с.

6. *Водород*. Свойства, получение, хранение, транспортировка, применение: Справочное издание / Д. Ю. Гамбург, В. П. Семенов, Н. Ф. Дубовнин и др. – М.: Химия, 1989. – 672 с.
7. *Канторович З. Б.* Основы расчёта химических машин и аппаратов: Изд. третье / З. Б. Канторович. – М.: Машиностроение, 1960. – 738 с.

Поступила в редакцию  
05.12.11

УДК 621.43.662.61

**П. М. Канило**, д-р техн. наук  
**К. В. Костенко**

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины  
(г. Харьков, e-mail: pmk@ipmach.kharkov.ua)

## **СНИЖЕНИЕ КАНЦЕРОГЕННОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

*Проанализировано влияние вида моторных топлив и содержания в них ароматических углеводородов на канцерогенность отработавших газов транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания. Изложены основы минимизации их канцерогенной опасности.*

*Проаналізовано вплив виду моторних палив і вмісту в них ароматичних вуглеводнів на канцерогенність відпрацьованих газів транспортних засобів з двигунами внутрішнього згорання. Викладено основи мінімізації їхньої канцерогенної небезпеки.*

### **Введение**

В настоящее время более 70% энергии, потребляемой во всем мире, производится за счет использования углеводородных топлив (УВТ), особое внимание уделяется экологическим аспектам их сжигания. Продукты сгорания УВТ, в том числе отработавшие газы (ОГ) транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), содержат различные экологически опасные компоненты, регламентируемые Европейскими нормами (Евро-V, 2008 г.): оксид углерода (СО), несгоревшие углеводороды (СН), оксиды азота (NO<sub>x</sub>) и твердые частицы (ТЧ), включающие в основном сажистые частицы (СЧ). Присутствуют в ОГ также оксиды серы, которые регламентируются уровнем содержания серы в УВТ. Кроме перечисленных ингредиентов, в продуктах сжигания УВТ содержится широкий спектр высокостойких супертоксикантов, в том числе канцерогенных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), которые представляют собой группу веществ, состоящих из молекул, содержащих два и более бензольных колец. Отмеченные канцерогенные углеводороды (КУ), а также их производные – нитроканцерогенные ингредиенты, обладающие мутагенными свойствами, могут обуславливать для живых клеток и организмов: иммунотоксичность, генотоксичность, канцерогенность, репродуктивную токсичность (оказывающую негативное воздействие на потомство). Под канцерогенными для человека веществами понимаются вещества, способные вызывать образование у человека доброкачественных или злокачественных опухолей. Мутагенность – это фактор окружающей среды (ОС), способный нарушать генетические программы клеток и вызывать в организме изменение наследственных свойств. Многочисленные эпидемиологические, лабораторные и клинические наблюдения свидетельствуют о наличии причинно-следственной связи между загрязнением ОС и повреждением генетической информации организма человека. По мнению медиков, именно доля КУ в атмосфере больших городов примерно на 80% определяет риск возникновения злокачественных опухолей у людей [1, 2].