

УДК 614.8

*Ключка Ю.П., канд. техн. наук, докторант, НУГЗУ,
Кривцова В.И., д-р техн. наук, проф., НУГЗУ,
Борисенко В.Г., канд. физ.-мат. наук, доц., НУГЗУ*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА БАЛЛОНОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВОДОРОДОМ ДО МОМЕНТА ИХ РАЗРУШЕНИЯ

Получены регрессионные модели длительности нагрева баллона с водородом (из стекловолокна и базальтоволокна) до момента его разрушения. Определены границы областей для баллонов трех типов, обуславливающих возможное разрушение баллона. Установлено, что баллон из базальтового волокна является лучшим выбором с точки зрения возможного разрушения в случае воздействия на него повышенных температур, а из стекловолокна – худшим.

Ключевые слова: сжатый водород, баллон, численный эксперимент, факторы

Постановка проблемы. Сжатый водород (до 70 МПа [1]) является одним из перспективных экологически чистых энергоносителей для транспорта будущего.

Однако такие характеристики данных систем хранения водорода, как высокое давление, большая плотность водорода, а также малая толщина стенок баллона повышают их опасность. В связи с этим определение времени нагрева баллона до момента его разрушения в результате внешнего воздействия, является важным фактором безопасного хранения водорода на автомобильном транспорте.

Анализ последних исследований и публикаций. Во время возникновения и развития пожара на транспортном средстве происходит изменение температуры водорода в баллоне вследствие нагрева его стенок.

В работах [2-3] показано, что значение температуры в автомобиле и скорость развития пожара зависят от многих параметров, таких как: место его возникновения; тип автомобиля; наличие дополнительных ЛВЖ; открытые или закрытые окна и т.д. В работе [4] предложен алгоритм определения критических значений давления и температуры водорода, а также температуры стенок

баллона в зависимости от температурных параметров окружающей среды и времени их воздействия.

В [5], при определении времени до разрушения стального баллона, в процессе проведения вычислительного эксперимента, использовалось следующее выражение для функции отклика

$$\tau_r = M(T_{pg}, V_{\delta}, \rho_{H_2}, \tau_n), \quad (1)$$

где T_{pg} – температура продуктов горения; ρ_{H_2} – плотность водорода; V_{δ} – объем баллона; τ_n – время достижения $T_{pg(\max)}$.

Постановка задачи и ее решение. Целью данной работы является получение моделей длительности нагрева композиционного баллона с водородом изготовленного из базальтоволокна и стекловолокна до момента его разрушения в зависимости от температуры продуктов горения, характеристик баллона и водорода в нем.

В табл. 1 представлены уровни варьирования факторов вычислительного эксперимента в соответствии с алгоритмом [4]. При этом теплопроводность стекловолокна принималась 0,75 Вт/(м·К), а базальтоволокна – 0,45 Вт/(м·К).

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов

Факторы		Кодовое обозначение	Нулевой уровень $x_i = 0$	Интервал варьирования	Уровень $x_i = 1$	Уровень $x_i = -1$
Температура продуктов горения	T_{pg} , К	x_1	1023	250	1273	773
Время достижения $T_{pg(\max)}$	τ_n , мин	x_2	3,5	2,5	6	1
Плотность водорода	ρ , кг/м ³	x_3	40	10	50	30
Объем баллона	V_{δ} , м ³	x_4	0,1	0,05	0,15	0,05

В табл. 2 приведен матрица планирования и результаты откликов времени до момента разрушения баллона из базальтового волокна, стекловолокна и стали.

На рис. 1 представлены зависимости времени до разрушения для баллона, изготовленного из стекловолокна, базальтового волокна и стали при изменении значений факторов (табл. 1).

Таблица 2 – Матрица планирования вычислительного эксперимента

№	Кодовое обозначение				Время отклика, мин.		
	x_1	x_2	x_3	x_4	Базаль- товолокно	Стекло- волокно	Сталь [5]
1	-1	-1	-1	-1	23	4,2	1,09
2	1	-1	-1	-1	4,08	0,87	0,64
3	-1	1	-1	-1	25,5	7,18	5,32
4	1	1	-1	-1	6,6	3,84	2,73
5	-1	-1	1	-1	5,28	1,92	0,8
6	1	-1	1	-1	2,68	0,7	0,5
7	-1	1	1	-1	7,94	4,84	3,4
8	1	1	1	-1	5,1	2,92	1,9
9	-1	-1	-1	1	30,1	5,3	1,6
10	1	-1	-1	1	4,86	0,92	0,95
11	-1	1	-1	1	32,8	8,04	5,75
12	1	1	-1	1	7,36	4,02	3,15
13	-1	-1	1	1	6,68	2,24	1,21
14	1	-1	1	1	3,1	0,72	0,8
15	-1	1	1	1	9,3	5,24	3,95
16	1	1	1	1	5,58	3,08	2,2

Из рисунка следует, что баллон из базальтового волокна более устойчив к разрушению и по сравнению с баллонами из стекловолокна и стали. При этом разница во времени может составлять до 25 и 27 минут соответственно.

В результате расчетов были получены следующие регрессионные модели для определения времени от начала воздействия повышенной температуры до момента разрушения баллона:

– баллон из стекловолокна

$$t_{sw} = 3,48 - 1,35 \cdot x_1 + 1,37 \cdot x_2 - 0,77 \cdot x_3 + 0,174 \cdot x_4 + 0,496 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,123 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,124 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (2)$$

– баллон из базальтового волокна

$$t_{bw} = 11,24 - 6,32 \cdot x_1 + 1,27 \cdot x_2 - 5,54 \cdot x_3 + 1,22 \cdot x_4 + 4,73 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,92 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,77 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0,68 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (3)$$

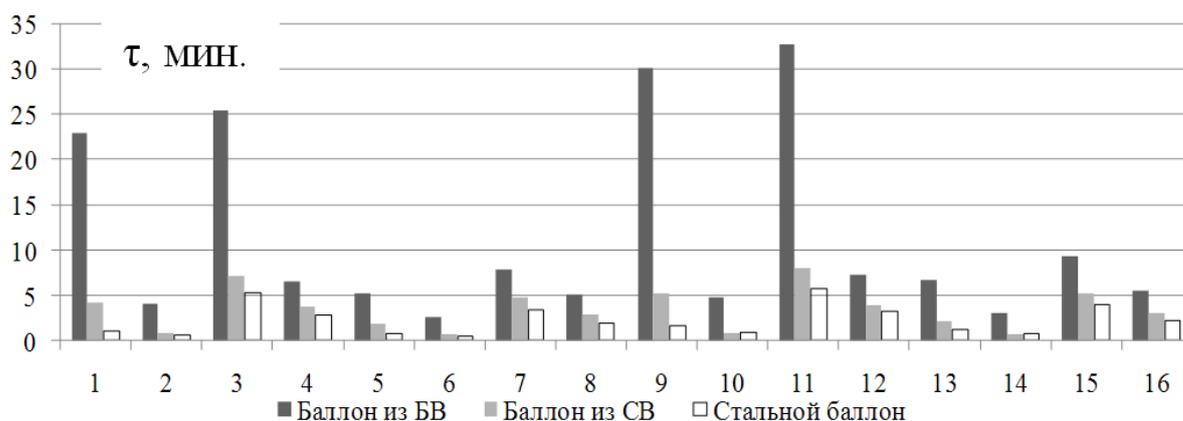


Рис. 1 – Диаграмма зависимости времени от начала воздействия повышенной температуры до момента разрушения баллона (в соответствии с табл. 2)

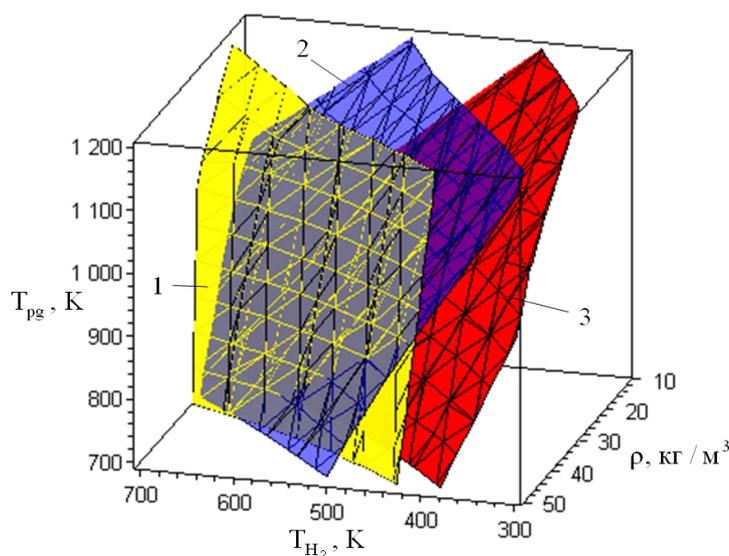


Рис. 2 – Границы областей, обуславливающих возможное разрушение баллона для баллона из: 1 – базальтоволокна; 2 – стали [5]; 3 – стекловолокна

Определение времени нагрева баллонов из композиционных материалов с водородом до момента их разрушения

Оценка статистической значимости коэффициентов регрессии выполнялась с помощью критерия Стьюдента. Адекватность моделей (2)-(3) проверялась с помощью критерия Фишера [6-7].

На рис. 2 приведены границы областей возможного разрушения баллона из базальтоволокна, стекловолокна и стали.

Из рисунка следует, что у баллонов, изготовленных из стекловолокна, наибольший диапазон параметров (слева от соответствующей плоскости), при которых возможно разрушение баллона, в то время как у баллона, изготовленного из базальтового волокна, наиболее узкий диапазон параметров. Не смотря на то, что у стального баллона более широкий диапазон параметров разрушения баллона по сравнению с базальтовым, есть область, в которой он оказывается безопаснее, нежели базальтовый. Это связано с различным поведением материалов во время нагревания, а соответственно и изменением их характеристик.

Выводы. В результате проведенной работы получены регрессионные модели длительности нагрева баллона с водородом изготовленного из стекловолокна и базальтоволокна до момента его разрушения. Определены границы областей для баллонов трех типов, обуславливающих возможное разрушение баллона. Показано, что у баллонов из стекловолокна наибольший диапазон параметров, при которых возможно разрушение баллона, в то время как у баллона из базальтового волокна наиболее узкий диапазон параметров, т.е. баллон из базальтового волокна является наименее опасным выбором с точки зрения возможного разрушения в случае воздействия на него повышенных температур, а из стекловолокна – наиболее опасным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключка Ю.П. Особенности использования водорода на автомобильном транспорте / В.И. Кривцова, Ю.П. Ключка // Проблемы пожарной безопасности. – 2009. – № 26. – С. 49–61.
2. Пожарная_безопасность_автомобиля [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.jcwiki.ru/> Пожарная_безопасность_автомобиля.
3. Клаус Д.П. Роль естественно-научной криминалистики / Клаус Дитер Поль. — Москва, 1985. — 311 с.
4. Борисенко В.Г. Определение времени разрушения баллона с водородом, обусловленного изменением температурных пара-

- метров окружающей среды / В.Г. Борисенко, В.И. Кривцова, Ю.П. Ключка // Проблемы пожарной безопасности. – 2010. – № 27. – С. 83–96.
5. Ключка Ю.П. Имитационная модель времени нагрева баллона с водородом до момента его разрушения / Ю.П. Ключка, В.И. Кривцова, В.Г. Борисенко // Проблемы пожарной безопасности. – 2010. – № 28. – С. 83–92.
 6. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье – К.: Техника, 1975, – 168 с.
 7. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский – М.: Наука, 1976, – 254 с.

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

Визначення часу нагріву балонів з композиційних матеріалів з воднем до моменту їх руйнування

Отримано регресійні моделі тривалості нагрівання балона з воднем (зі скловолокна і базальтоволокна) до моменту його руйнування. Визначено межі областей для балонів трьох типів, які обумовлюють можливе руйнування балона. Встановлено, що балон з базальтового волокна є кращим вибором з точки зору можливого руйнування у випадку впливу на нього підвищених температур, а зі скловолокна - гіршим.

Ключові слова: стиснутий водень, балон, чисельний експеримент, фактори

Kluchka Yu.P., Krivtsova V.I., Borisenko W.G.

Determination of time of heating cylinders with hydrogen from composite until their destruction

Obtained regression models, the duration of the heating cylinder with hydrogen (made of fiberglass and basalt fiber) until its destruction. The boundaries of the areas for the three types of cylinders, causing the possible collapse of the container. It is established that a container made of basalt fiber is the best choice in terms of potential damage in case of exposure to elevated temperatures, and fiberglass - the worst.

Key words: compressed hydrogen gas cylinder, numerical experiment, factors