

*Кривцова В.И., д-р техн. наук, проф., НУГЗУ,  
Ключка Ю.П., канд. техн. наук, докторант, НУГЗУ*

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ БАЛЛОНОВ С ВОДОРОДОМ

Получены плотности вероятности и функции распределения времени до разрушения баллонов с водородом трех типов: из стали, базальтоволокна и стекловолокна. Показано, что в диапазоне от 0 до 25 минут, вероятность разрушения баллона из базальтоволокна меньше, нежели баллонов изготовленных из стали и стекловолокна.

**Ключевые слова.** Сжатый водород, баллон, функция распределения, плотность вероятности, время

**Постановка проблемы.** На сегодняшний день сжатый водород (до 70 МПа [1]) рассматривается как один из перспективных экологически чистых энергоносителей для транспорта будущего. В качестве материала баллона может использоваться сталь, стекловолокно, базальтоволокно. Одной из проблем этих систем является их пожаровзрывоопасность, обусловленная свойствами водорода и самой системы хранения.

Поэтому определение безопасного типа баллона, используемого под воздействием внешних факторов, в частности повышенных температур, является актуальным вопросом применения водорода на автомобильном транспорте.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Повышение температуры в автомобиле может быть обусловлено возникновением чрезвычайной ситуации, а именно пожаром. В работах [2-3] показано, что динамика повышения температуры в автомобиле, при пожаре, зависит от скорости его развития, места возникновения, типа автомобиля, наличия дополнительных ЛВЖ, открытые или закрытые окна и т.д.

В работе [4] были получены оценки времени до разрушения баллона с водородом под воздействием внешней температуры, а также построены регрессионные модели зависимости времени до разрушения от температуры окружающей среды и характера ее изменения, плотности водорода, объема баллона. Однако данные модели не позволяют оценить вероятностные характеристики сис-

тем хранения водорода, в частности, вероятность ее разрушения под воздействием повышенных температур.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью данной работы является получение плотности вероятности разрушения баллона с водородом под воздействием повышенной температуры окружающей среды при различных параметрах баллона и водорода в нем.

Для этого разобьем интервал изменения параметров (табл. 1 [4]) на 10 частей [5, 6].

**Таблица 1 – Значение параметров**

Параметры		Максимальное значение	Минимальное значение
Температура окружающей среды	$T_{os}, \text{ К}$	1273	773
Время достижения $T_{os(max)}$	$\tau_n, \text{ мин}$	6	1
Плотность водорода	$\rho, \text{ кг/м}^3$	50	30
Объем баллона	$V_b, \text{ м}^3$	0,15	0,05

В таком случае получим  $10^4$  возможных вариантов состояния системы, в которых и будет рассчитываться время до разрушения в соответствии с работой [4]. Учитывая, что выборка состоит из 10000 значений, определим количество диапазонов, на которые будет разбит интервал  $(\tau_{i(min)}; \tau_{i(max)})$ , исходя из следующего выражения [6]

$$n = 3,3 \cdot \lg(N) + 1 \approx 15. \quad (1)$$

На рис. 1 приведен алгоритм определения значений времени до разрушения для построения гистограммы частот.

В табл. 2 приведены значения границ интервалов, полученные частоты и другие расчетные значения для стального баллона.

Анализ столбца 5 табл. 2 позволил предположить, что исследуемая величина распределена в соответствии с гамма распределением. Тогда плотность вероятности времени до разрушения можно представить в следующем виде [6]

$$f(\tau) = \frac{\tau^{k-1} \cdot e^{-\frac{\tau}{\theta}}}{\theta^k \cdot \Gamma(k)}, \quad \tau \geq 0, \quad k > 0, \quad \theta \geq 0, \quad (2)$$

где  $\Gamma(k)$  - гамма-функция Эйлера, определяемая в соответствии с

$$\Gamma(k) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n! n^z}{k(k+1) \dots (k+n)} = \frac{1}{k} \prod_{n=1}^{\infty} \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^k}{1 + \frac{k}{n}}. \quad (3)$$

**Таблица 2 – Расчетные значения**

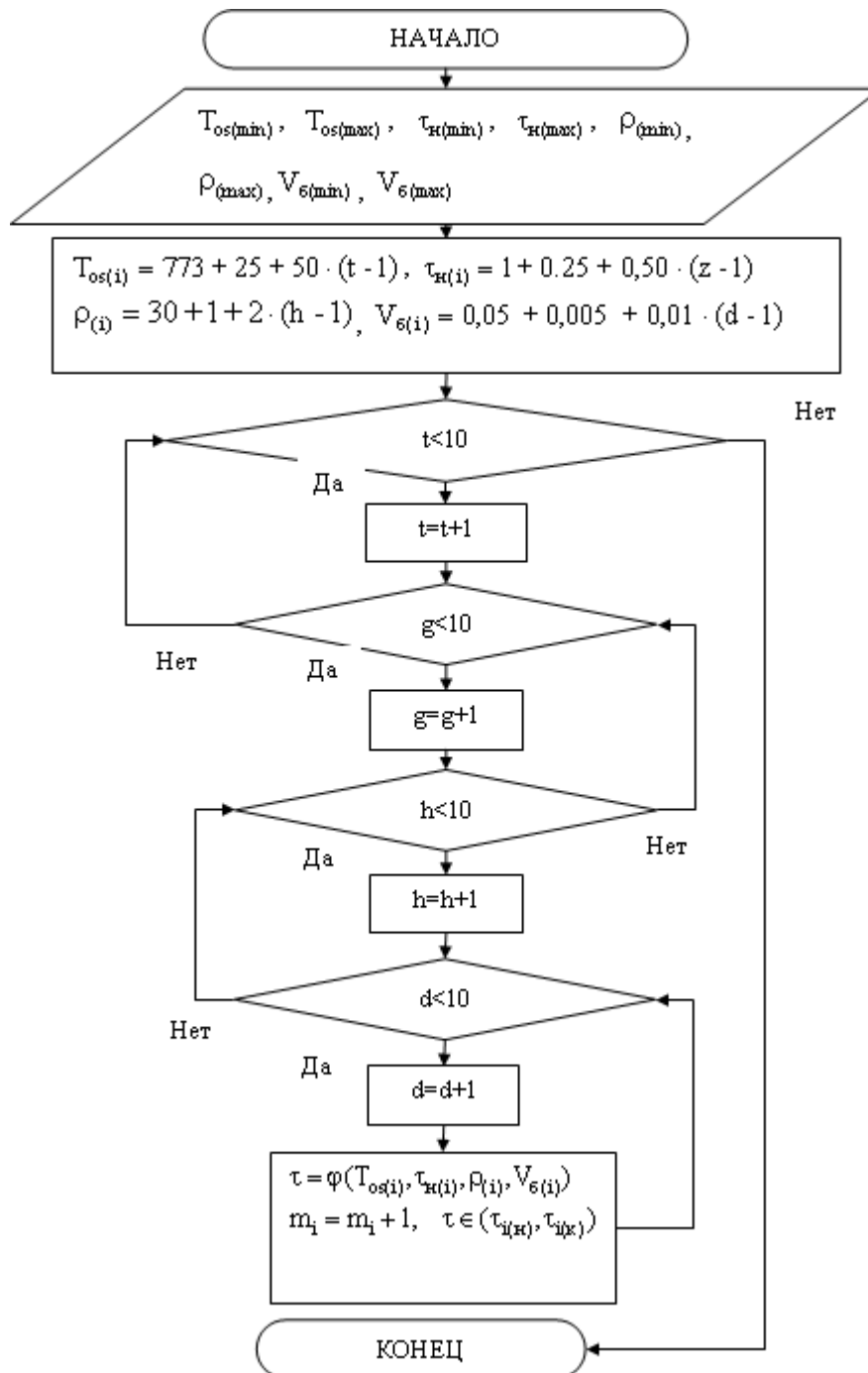
	Границы интервалов		Средины интервалов, $\tau_i$	Частоты, $m_i$	Отн. частоты, $P_i^{emp}$	$\tau_i \cdot p_i$	$m_i (\tau_i - \bar{\tau})^2$	$P_i^{th}$	$\chi_i^2$
	$\tau_{i(n)}$	$\tau_{i(k)}$							
1	0,5	0,84	0,67	184	0,0184	0,01232	445,3	0,0186	0,013
2	0,84	1,18	1,01	692	0,0692	0,06989	1022,8	0,0661	1,437
3	1,18	1,52	1,35	1298	0,1298	0,17523	995,5	0,1244	2,360
4	1,52	1,86	1,69	1597	0,1597	0,26989	458,4	0,1620	0,333
5	1,86	2,2	2,03	1594	0,1594	0,32358	61,1	0,1665	3,066
6	2,2	2,54	2,37	1427	0,1427	0,33819	29,7	0,1452	0,428
7	2,54	2,88	2,71	1093	0,1093	0,29620	256,3	0,1121	0,722
8	2,88	3,22	3,05	825	0,0825	0,25162	560,5	0,0790	1,590
9	3,22	3,56	3,39	542	0,0542	0,18373	734,7	0,0517	1,238
10	3,56	3,9	3,73	338	0,0338	0,12607	764,8	0,0319	1,167
11	3,9	4,24	4,07	201	0,0201	0,08180	683,7	0,0187	1,016
12	4,24	4,58	4,41	116	0,0116	0,05115	553,4	0,0106	1,036
13	4,58	4,92	4,75	52	0,0052	0,0247	331,3	0,0057	0,519
14	4,92	5,26	5,09	28	0,0028	0,01425	229,7	0,0030	0,183
15	5,26	5,6	5,43	13	0,0013	0,00705	133,5	0,0016	0,440

Коэффициент масштаба  $\theta$ , определялся в соответствии с выражением

$$\theta = \frac{\sigma^2}{\mu}, \quad (4)$$

$k$  – коэффициент, определяемый в соответствии с

$$k = \frac{\mu}{\theta}. \quad (5)$$



**Рис. 1 – Алгоритм определения значений времени до разрушения для построения гистограммы частот**

При этом  $\mu$  – математическое ожидание и  $\sigma$  – дисперсия случайной величины определялись в соответствии с выражениями

$$\mu = \sum_{i=1}^n \tau_i p_i, \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n m_i (\tau_i - \mu)^2. \quad (7)$$

Исходя из значений табл. 2,  $\mu = 2,22$ ,  $\sigma^2 = 0,726$ ,  $k=6,8229$  и  $\theta=0,3262$ , тогда выражение (2) можно представить в виде

$$f_{st}(\tau) = 4,0281 \cdot \tau^{5,8229} \cdot e^{-3,065\tau}. \quad (8)$$

Оценим согласованность выбранного теоретического распределения с опытными данными в соответствии с критерием Пирсона (критерий  $\chi^2$ )

$$\chi_p^2 = N \sum_i^n \frac{(P_i^{th} - P_i^{emp})^2}{P_i^{th}}, \quad (9)$$

где  $P_i^{th}$  – предполагаемая вероятность попадания в  $i$ -й интервал

$$P_i^{th} = \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} f(\tau) d\tau. \quad (10)$$

По таблице критических точек  $\chi^2$ -распределения, исходя из того, что число степеней свободы  $r = 15 - 4 - 1 = 10$ , определим  $\chi_{кр}^2$  ( $\chi_{кр}^2 = 18,3$ ).

Из таблицы следует, что критерий Пирсона  $\chi_p^2 = 15,54$ . Поскольку  $\chi_p^2 < \chi_{кр}^2$ , то принятая гипотеза о гамма распределении не противоречит имеющимся выборочным данным на уровне значимости 0,05.

На рис. 2 приведены зависимости частот, полученных эмпирическим и теоретическим путем, и значения  $\chi_i^2$  для стального баллона.

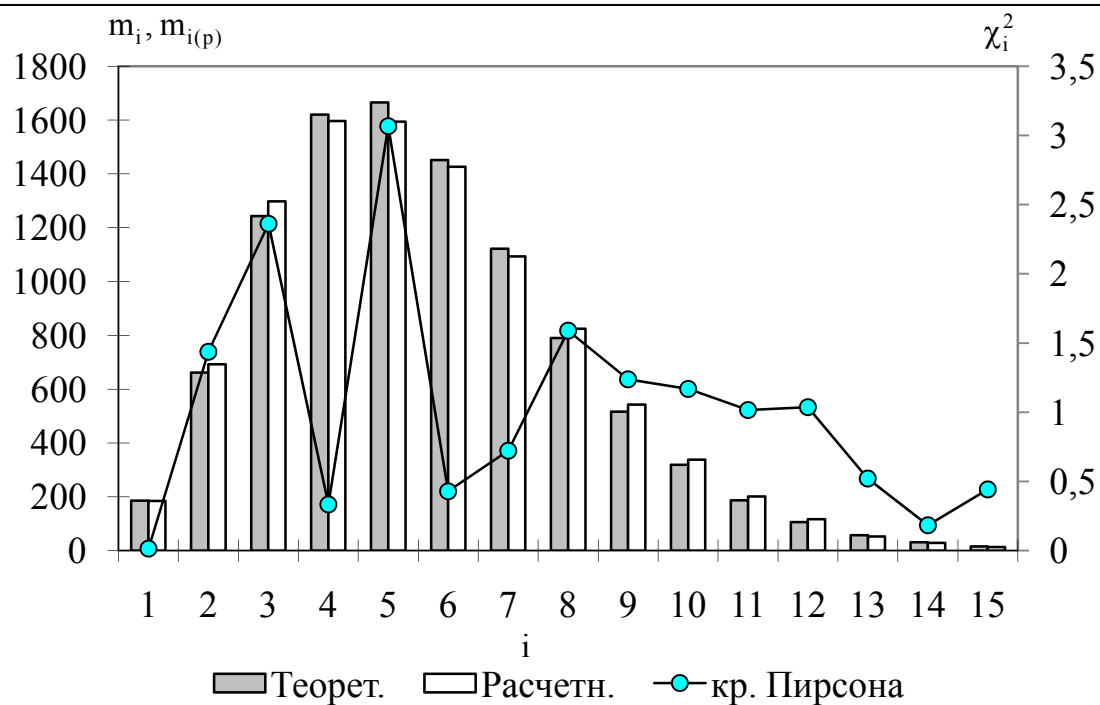


Рис. 2 – Зависимость частот, полученных эмпирическим и теоретическим путем, а также значения  $\chi_i^2$  для стального баллона

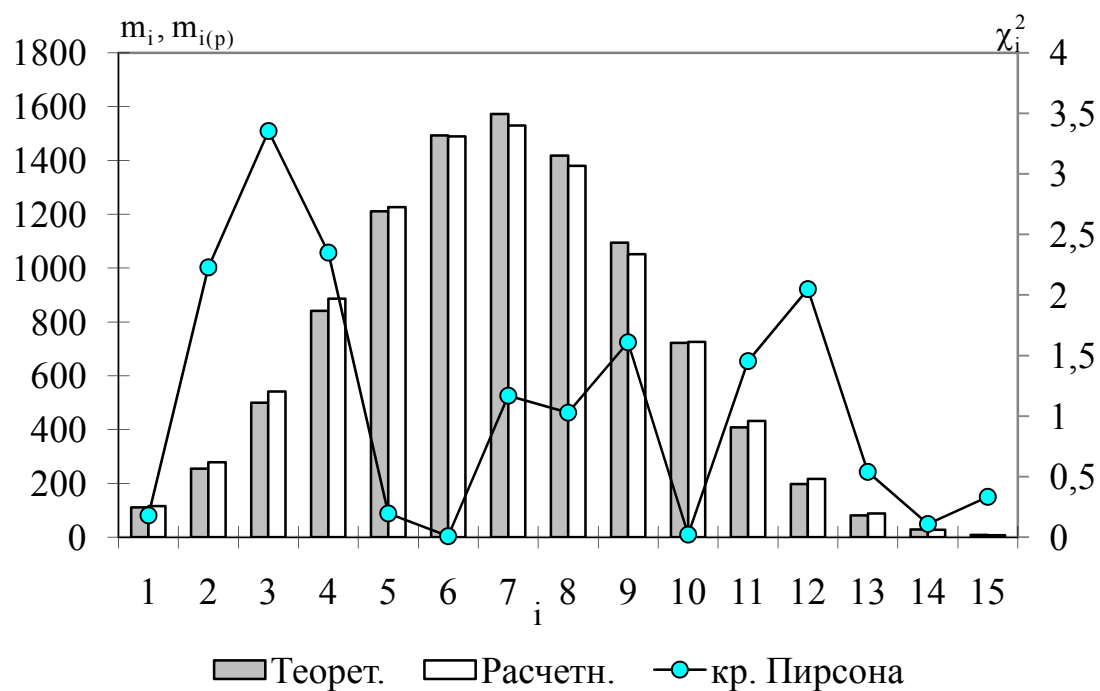


Рис. 3 – Зависимость частот, полученных эмпирическим и теоретическим путем, а также значения  $\chi_i^2$  для баллона из стекловолокна

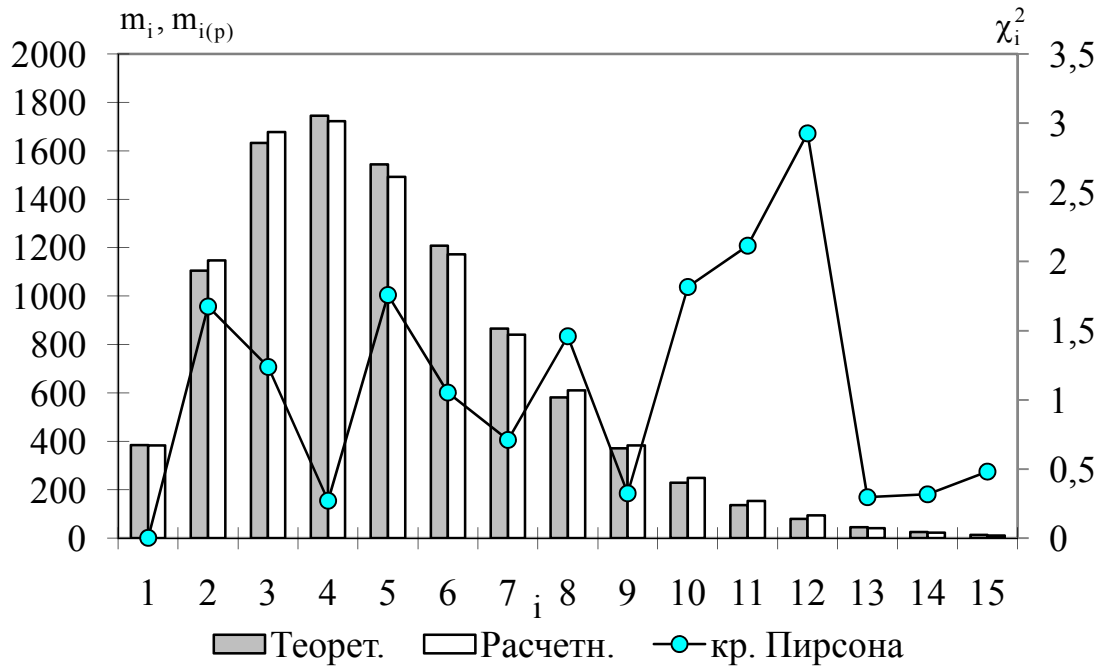


Рис. 4 – Зависимость частот, полученных эмпирическим и теоретическим путем, а также значения  $\chi_i^2$  для баллона из базальтоволокна

Аналогичным образом были получены характеристики для баллона из стекловолокна  $\mu = 3,49$ ,  $\sigma^2 = 1,417$ ,  $\chi_p^2 = 16,63$  (рис. 3). Принятая гипотеза о нормальном распределении на уровне значимости 0,05 подтвердилась.

Также были получены характеристики для баллона из базальтоволокна  $\mu = 10,82$ ,  $\sigma^2 = 26,85$ ,  $\chi_p^2 = 16,44$  (рис. 4). Принятая гипотеза о гамма распределении на уровне значимости 0,05 подтвердилась.

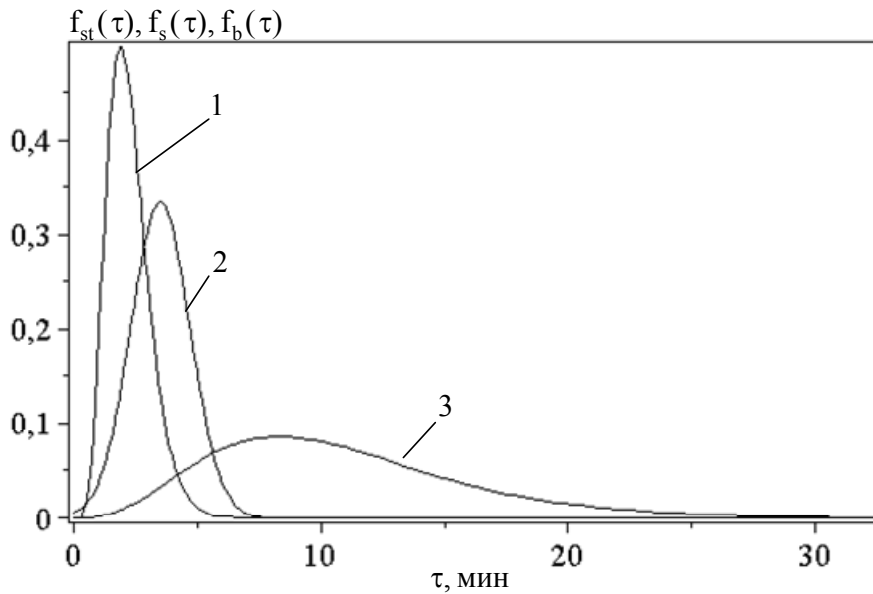
Плотности вероятностей времени до разрушения для баллона из стекловолокна и базальтоволокна можно представить в следующем виде

$$f_s(\tau) = 0,3352 \cdot e^{-0,353(\tau-3,499)^2} \quad (11)$$

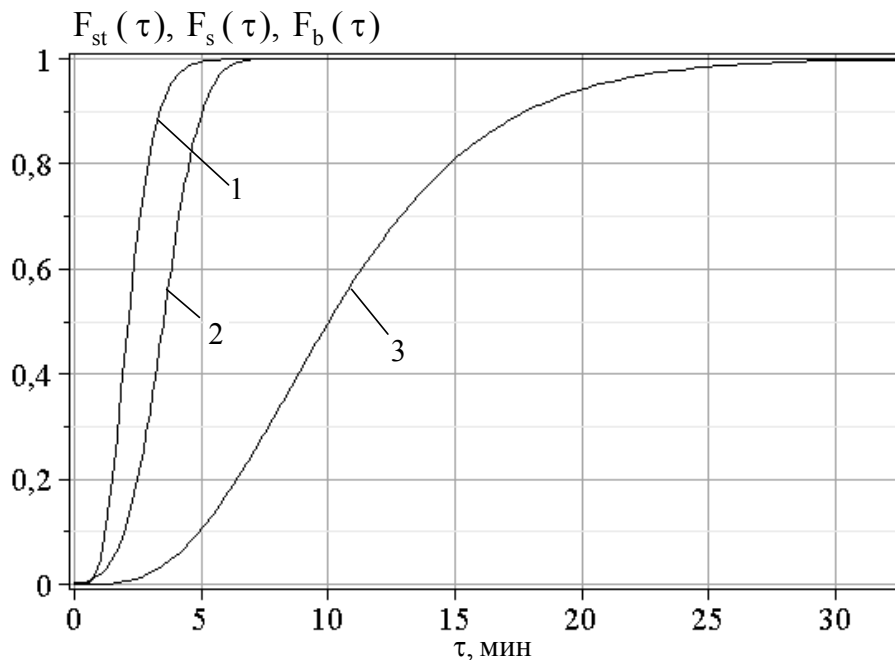
$$f_b(\tau) = 0,01227 \cdot \tau^{3,2274} \cdot e^{-0,5782\tau} \quad (12)$$

На рис. 5 и 6, в соответствии с (8), (11) и (12), представлены плотности вероятности и функции распределения времени до раз-

рушения баллонов с водородом трех типов для диапазона параметров приведенных в табл 1.



**Рис. 5 – Плотность вероятности времени до разрушения баллона с водородом: 1 – стальной баллон; 2 – баллон из стекловолокна; 3 – баллон из базальтоволокна**



**Рис. 6 – Функция распределения времени до разрушения баллона с водородом: 1 – стальной баллон; 2 – баллон из стекловолокна; 3 – баллон из базальтоволокна**



Из рис. 6 следует, что наиболее безопасным является баллон из базальтоволокна, а наиболее опасным – из стали. По истечению пяти минут, вероятность разрушения баллона из базальтоволокна составляет 0,1, а из стали и стекловолокна, соответственно, 0,98 и 0,9.

**Выводы.** В результате проведенной работы, получены плотности вероятности и функции распределения времени до разрушения баллонов с водородом трех типов: из стали, базальтоволокна и стекловолокна. Показано, что в диапазоне от 0 до 25 минут, вероятность разрушения баллона из базальтоволокна меньше, нежели баллонов изготовленных из стали и стекловолокна.

## 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 Польш. — Москва, 1985. — 311 с.
4. Борисенко В.Г. Определение времени разрушения баллона с водородом, обусловленного изменением температурных параметров окружающей среды / В.Г. Борисенко, В.И. Кривцова, Ю.П. Ключка // Проблемы пожарной безопасности. – 2010. – № 27. – С. 83–96.
5. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций/ А.А.Свешников – М.: Наука, 1968. – 464 с.
6. Александр Алексеевич Боровков Теория вероятностей/ А.А. Боровков – М.: Наука, 1986. – 432 с.  
nuczu.edu.ua

Ключка Ю.П., Кривцова В.І.

### **Оцінка ймовірності руйнування балонів з воднем**

Отримано щільності ймовірності та функції розподілу часу до руйнування балонів з воднем трьох типів: зі сталі, базальтоволокна і скловолокна. Показано, що в діапазоні від 0 до 25 хвилин, ймовірність руйнування балона з базальтоволокна менше, ніж балонів виготовлених із сталі і скловолокна.

**Ключові слова:** Стиснутий водень, балон, функція розподілу, щільність ймовірності, час

Kluchka Yu.P., Krivtsova V.I.

**Evaluation of the possibility of damage of cylinders with hydrogen**

Obtained the probability density and distribution function of time before the destruction of tanks with hydrogen in three types: steel, basalt fiber and fiberglass. It is shown that the range of 0 to 25 minutes, the probability of failure of the balloon basalt fiber is less than cylinders made from steel and fiberglass.

**Key words:** Compressed hydrogen tank, the distribution function, probability density, the time

**УДК 331.101**

*Левтеров А.А., канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НУГЗУ,  
Стрелец В.М., канд. техн. наук, нач. лаб., НУГЗУ,  
Федцов А.А., преп., НУГЗУ*

**ОЦЕНКА УРОВНЯ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ ЛИЧНОГО СОСТАВА  
К РАБОТЕ СО СПЕЦИАЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ**

(представлено д-ром хим. наук Калугиным В.Д.)

Получены оценки уровня подготовленности спасателей к выполнению типовых операций, требующих использования специального оборудования, с помощью уравнений в кодированных переменных. Коэффициенты регрессии в кодированных переменных при этом характеризуют вес рассматриваемого фактора.

**Ключевые слова:** подготовка, типовые операции, кодированные переменные

**Постановка проблемы.** В оперативно-спасательных подразделениях служит личный состав разного возраста и, соответственно, разного уровня подготовленности. В то же время программа служебной подготовки [1] имеет типовой характер. Учесть особенности, присущие конкретному пожарному подразделению (срок службы большинства спасателей, используемое ими оборудование и др.), позволяет ее вариативная часть, которая позволяет на 10% отступить от приведенных рекомендаций. Однако для соответствующей корректировки необходимо иметь количественные показатели, которые бы позволили утверждать о том, что занятия в соответствии с измененной программой дадут эффект.

**Анализ последних исследований и публикаций** показал, что в настоящее время основным методом для оценки эффек-

Левтеров А.А., Стрелец В.М., Федцов А.А.