

УДК 614.8

*Ю.П. Ключка, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., докторант, НУГЗУ,
В.И. Кривоцова, д-р. техн. наук, профессор, профессор, НУГЗУ,
В.Г. Борисенко, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент, НУГЗУ*

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА БАЛЛОНА С ВОДОРОДОМ ДО МОМЕНТА ЕГО РАЗРУШЕНИЯ

Получена регрессионная модель длительности нагрева баллона с водородом до момента его разрушения. Установлено, что вариации объема баллона с водородом практически не влияют на время разрушения баллона, в то время как температура продуктов горения и характер ее изменения оказывают значительное влияние на значение t_r .

Ключевые слова. сжатый водород, баллон, эксперимент, факторы.

Постановка проблемы. На сегодняшний день сжатый водород (до 70 МПа [1]) рассматривается как один из перспективных экологически чистых энергоносителей для транспорта будущего.

Однако такие характеристики, как высокое давление, большая плотность водорода, а также малая толщина стенок баллона повышают их пожаровзрывоопасность. В связи с этим знание законов изменения характеристик баллона и водорода в нем, в результате воздействия внешних факторов является важным фактором безопасного хранения водорода на автомобильном транспорте.

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

В частности, в работах [2-3] показано, что значение температуры в автомобиле и скорость развития пожара зависят от многих параметров, таких как: место возникновения; тип автомобиля; наличие дополнительных ЛВЖ; открытые или закрытые окна и т.д. В работе [4] предложен алгоритм определения критических значений давления водорода, температуры стенок баллона в зависимости от температурных параметров окружающей среды и времени их воздействия. Однако на сегодняшний день нет зависимостей, определяющих время до разрушения баллона в зависимости от параметров внешней среды, характеристик баллона и водорода в нем.

Постановка задачи и ее решение. Целью данной работы является определение длительности нагрева баллона с водородом до момента его разрушения в зависимости от температуры окружающей среды, характеристик баллона и водорода в нем.

Исходя из [4], выражение функции отклика можно представить в виде

$$\tau_r = M(T_{pg}, V_6, \rho_{H_2}, \tau_n), \quad (1)$$

где: T_{pg} – температура продуктов горения; ρ_{H_2} – плотность водорода; V_6 – объем баллона; τ_n – время достижения $T_{pg(max)}$.

Пусть модель (1) имеет вид [5–6]

$$\begin{aligned} t_r = & m_0 + m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + m_3 \cdot x_3 + m_4 \cdot x_4 + m_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ & + m_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + m_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + m_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + m_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + \\ & + m_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + m_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + m_{124} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + \\ & + m_{134} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + m_{234} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + m_{1234} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4. \end{aligned} \quad (2)$$

где: $m_0, m_i, m_{ij}, m_{ijc}, m_{ijcs}$ – коэффициенты регрессии, которые будут получены в результате численного эксперимента; $x_i, i = \overline{1,4}$ – переменные, связанные с физическими переменными $T_{pg}, \tau_n, \rho_{H_2}, V_6$ следующим образом

$$x_1 = \frac{T_{pg} - T_{pg(0)}}{\Delta T_{pg}}; \quad x_2 = \frac{\tau_n - \tau_{n(0)}}{\Delta \tau_n}; \quad x_3 = \frac{\rho_{H_2} - \rho_{H_2(0)}}{\Delta \rho_{H_2}}; \quad x_4 = \frac{V_6 - V_{6(0)}}{\Delta V_6}, \quad (3)$$

где $T_{pg(0)}, \tau_{n(0)}, \rho_{H_2(0)}, V_{6(0)}$ – значения факторов на нулевом уровне, представленные в табл. 1; $\Delta T_{pg}, \Delta \tau_n, \Delta \rho_{H_2}, \Delta V_6$ – интервалы варьирования факторов, указанные в той же таблице.

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}, K	x_1	1023	250	1273	773
Время достижения $T_{pg(max)}$	$\tau_n, \text{мин}$	x_2	3,5	2,5	6	1
Плотность водорода	$\rho, \text{кг/м}^3$	x_3	40	10	50	30
Объем баллона	$V_6, \text{м}^3$	x_4	0,1	0,05	0,15	0,05

План-матрица эксперимента представлена в табл. 2. Приведенный план позволяет проводить независимую оценку коэффициентов уравнения регрессии.

Таблица 2 – Расширенная матрица планирования полного факторного эксперимента типа 2^4 и результаты опытов

№ п/п	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_1 x_4$	$x_2 x_3$	$x_2 x_4$	$x_3 x_4$	$x_1 x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_4$	$x_1 x_3 x_4$	$x_2 x_3 x_4$	$x_1 x_2 x_3 x_4$	t, мин.
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1,09
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0,64
3	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	5,32
4	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	2,73
5	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	0,80
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	0,50
7	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	3,4
8	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1,9
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1,6
10	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0,95
11	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	5,75
12	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	3,15
13	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1,21
14	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0,80
15	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	3,95
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2,2

Число вычислительных процедур для такого плана должно составлять

$$N = 2^m = 16, \text{ при } m = 4. \tag{4}$$

По результатам эксперимента в ядре плана получена оценка

$$m_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N t_u = 2,25. \tag{5}$$

Так как при проведении любого числа опытов в каждом эксперименте среднеквадратическое отклонение будет равно нулю, то значения выходов в каждой попытке n-го варианта будут одинаковы. По

этой же причине будет невозможно оценить значимость коэффициентов регрессии, так как выборочная дисперсия будет равна нулю. Однако в реальных условиях дисперсия не будет равна нулю по целому ряду причин, таким как изменение температуры и давления, старение и износ материалов и т.д. Согласно [5], чтобы оценить ошибку опыта, исходный план был дополнен n_0 параллельными вычислительными процедурами в центре плана (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты опытов в центре плана

Номер опыта								
Время τ_i	1	2	3	4	5	6	7	8
t_{Γ}, c	2,29	2,27	2,19	2,21	2,25	2,18	2,22	2,24
Номер опыта								
Время τ_i	9	10	11	12	13	14	15	
t_{Γ}, c	2,31	2,21	2,26	2,19	2,21	2,17	2,21	

Среднее значение наблюдений в центре плана определим из выражения

$$\bar{t}_{ц.п.} = \frac{1}{n_0} \cdot \sum_{j=1}^{n_0} t_{ц.п.,j} = 2,227, \text{ при } n_0 = 15, \quad (6)$$

где $t_{ц.п.,j}$ – результаты повторных опытов в центре плана (табл. 3).

Оценка дисперсии ошибок наблюдений определяется по результатам шести параллельных опытов в центре плана с помощью следующего выражения [5]

$$s_y^2 = \frac{1}{\varphi_{ц.п.}} \cdot \sum_{j=1}^{15} (t_{ц.п.,j} - \bar{t}_{ц.п.})^2 = 0,0017. \quad (7)$$

Данная оценка имеет $\varphi_{ц.п.} = n_0 - 1 = 14$ степеней свободы.

Коэффициенты регрессии определялись по формулам

$$m_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N x_{i_u} \cdot t_u; \quad i = \overline{1,4} \quad (8)$$

$$m_{ij} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N x_{i_u} \cdot x_{j_u} \cdot t_u; \quad i = \overline{1,3}; \quad j = \overline{i+1,4}. \quad (9)$$

$$m_{ijc} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N x_{i_u} \cdot x_{j_u} \cdot x_{c_u} \cdot t_u; \quad i = \overline{1,3}; \quad j = \overline{i+1,4}; \quad c = \overline{j+1,4}. \quad (10)$$

В результате расчетов получены следующие значения коэффициентов регрессии

$$\begin{aligned} m_1 &= -0,64; \quad m_2 = 1,3; \quad m_3 = -0,404; \quad m_4 = 0,202; \\ m_{12} &= -0,414; \quad m_{13} = 0,145; \quad m_{14} = -0,036; \\ m_{23} &= -0,283; \quad m_{24} = 0,011; \quad m_{34} = -0,007; \\ m_{123} &= 0,0969; \quad m_{124} = 0,003; \quad m_{134} = -0,009; \\ m_{234} &= 0,007; \quad m_{1234} = -0,0204. \end{aligned} \quad (11)$$

Оценка статистической значимости коэффициентов регрессии выполнялась с помощью критерия Стьюдента. Соответствующий коэффициент признается статистически значимым в случае выполнения неравенства

$$|m_i| \geq m_{кр} = t_{(0.05; 14)} \cdot s_y = 0,088, \quad (12)$$

где s_y определяется выражением (7); $t_{(0.05; 14)}$ – 5%-ная точка распределения Стьюдента с пятью степенями свободы при $t_{(0.05; 14)}=2.1448$.

На рис.1 приведена графическая интерпретация выражений (11)-(12).

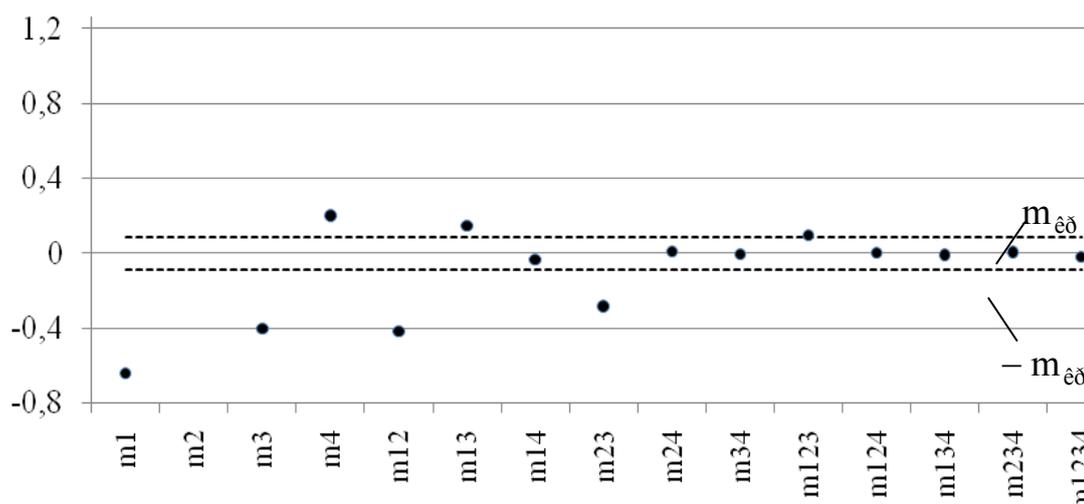


Рис. 1. – Оценка статистической значимости коэффициентов регрессии

Из рисунка следует, что не значимыми являются следующие коэффициенты регрессии $m_{14}, m_{24}, m_{34}, m_{124}, m_{134}, m_{234}, m_{1234}$. Следовательно, модель (2) целесообразно представить в виде

$$t_r = 2,24 - 0,64 \cdot x_1 + 1,301 \cdot x_2 - 0,404 \cdot x_3 + 0,202 \cdot x_4 - 0,414 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,145 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,283 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,097 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (13)$$

В соответствии с выражением (13) на рис. 2-3 представлены зависимости времени нагрева баллона от начала воздействия повышенной температуры до момента его разрушения для диапазона параметров, приведенных в табл. 1.

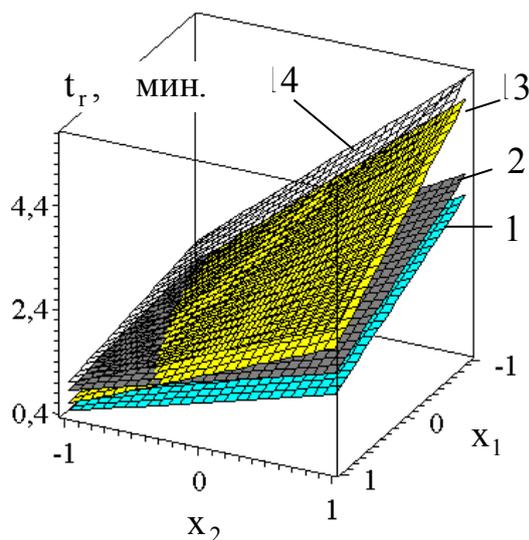


Рис. 2. – Зависимость времени от начала воздействия повышенной температуры до момента разрушения баллона от температуры продуктов внешней стенки баллона (x_1) и характера ее изменения (x_2): 1 – $x_3=1$, $x_4=-1$; 2 – $x_3=1$, $x_4=1$; 3 – $x_3=-1$, $x_4=-1$; 4 – $x_3=-1$, $x_4=1$

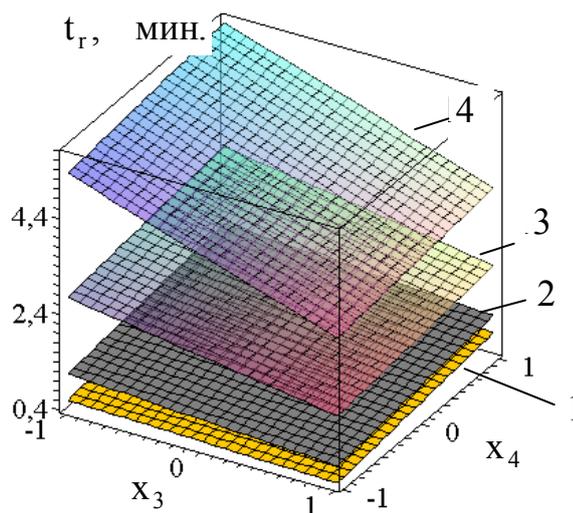


Рис. 3. – Зависимость времени от начала воздействия повышенной температуры до момента разрушения баллона от объема баллона (x_4) и плотности водорода (x_3): 1 – $x_1=1$, $x_2=-1$; 2 – $x_1=-1$, $x_2=-1$; 3 – $x_1=1$, $x_2=1$; 4 – $x_1=-1$, $x_2=1$

Анализ рис. 2 и 3 свидетельствует, что вариации объема баллона практически не влияют на время его разрушения, в то время как температура окружающей среды и характер ее изменения оказывают значительное влияние на t_r .

Адекватность модели (13) проверялась с помощью критерия Фишера. Так как в каждой точке плана было проведено по одному эксперименту, то ошибку опытов, согласно [5], можно оценить по результатам повторных экспериментов в центре плана. В соответствии с критерием Фишера должно выполняться неравенство

$$F_{\text{Ад}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{ц.п.}}^2} < F_{\text{кр}}, \quad (14)$$

где $F_{кр}$ – критическое значение критерия Фишера [6].

Дисперсия адекватности $s_{ад}$ определяется согласно выражению

$$s_{ад}^2 = \frac{1}{\varphi_{ад}} \cdot \sum_{u=1}^N (t_u - t_{r_u})^2 = 0.0031, \quad (15)$$

где t_{r_u} – время, рассчитанное по формуле (13); t_u – время, полученное в результате вычислительного эксперимента; $\varphi_{ад}$ – число степеней свободы дисперсии адекватности равное [5]

$$\varphi_{ад} = N - k - 1 = 4. \quad (16)$$

Модель (13) является адекватной в соответствии с критерием Фишера.

Таким образом, с целью повышения безопасности использования баллонной СХП водорода, необходимо иметь максимальную длительность ее нагрева, что можно наблюдать при снижении плотности водорода в баллоне и уменьшении скорости повышения температуры.

Выводы. В результате проведенной работы получена регрессионная модель длительности нагрева баллона с водородом до момента его разрушения, учитывающая изменение температуры окружающей среды и характера ее изменения, объема баллона и плотности водорода в нем. Установлено, что вариации объема баллона с водородом практически не влияют на время разрушения баллона, в то время как температура окружающей среды и характер ее изменения оказывают значительное влияние на время t_r .

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 параметров

окружающей среды / В.Г. Борисенко, В.И. Кривцова, Ю.П. Ключка // Проблемы пожарной безопасности. – 2010. – № 27. – С. 83–96.

5. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье – К.: Техника, 1975, – 168 с.

6. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский – М.: Наука, 1976, – 254 с.

nuczu.edu.ua

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

Імітаційна модель часу нагріву балона з воднем до моменту його руйнування.

На основі теорії планування експерименту, отримана модель тривалості нагрівання балона з воднем до моменту його руйнування. Встановлено, що варіації обсягу балона з воднем практично не впливають на час руйнування балона, в той час як температура продуктів горіння і характер її зміни роблять значний вплив на значення t_r .

Ключові слова. стиснутий водень, балон, експеримент, фактори.

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

Time simulation model of heating the container with hydrogen until its destruction.

Based on the theory of experiment planning, the duration model obtained by heating the container with hydrogen prior to its destruction. Found that variations in the volume of the container with hydrogen has almost no impact on the destruction of the cylinder, while the temperature of combustion products and its character changes make a significant impact on the value of t_r .

Keywords: compressed hydrogen cylinder, experiment, factors.