

**УДК 614.8**

*Ю.П. Ключка, к.т.н., ст. научн. сотр., докторант, НУГЗУ,  
В.И. Кривцова, д.т.н, профессор, профессор, НУГЗУ,  
В.Г. Борисенко, к.ф.-м.н., доцент, доцент, НУГЗУ*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТЕЧЕНИЯ  
ГАЗООБРАЗНОГО ВОДОРОДА ИЗ БАЛЛОНА**

С использованием вириального уравнения, определена зависимость массового расхода водорода через отверстие от площади сечения, массы хранимого водорода, давления. Получена зависимость остаточной массы водорода в баллоне во времени при его истечении через отверстие, которая позволяет оценить возможность образования пожаровзрывоопасной ситуации.

**Ключевые слова.** Газообразный водород, баллон, истечение, массовый расход.

**Постановка проблемы.** В настоящее время водород рассматривается как один из перспективных экологически чистых энергоносителей для транспорта будущего [1, 2]. Хранение водорода в сжатом виде (до 70 МПа) является одним из основных способов его хранения на автотранспорте [1, 3]. При этом параметры баллонов, их количество, максимальное давление определяются исходя из характеристик автомобиля, таких как масса автомобиля, расход водорода, наличие рекуперационной установки и т.д.

Учитывая высокое давление в баллонах, вибрацию в процессе эксплуатации, постоянное изменение температурных режимов работы, данные системы хранения водорода являются пожаровзрывоопасными объектами в связи с возможным разрушением баллона или истечением водорода через щели и свищи.

**Анализ последних достижений и публикаций.** На рис. 1 приведены фото разрушенных баллонов различных типов.

Из рисунков следует, что в случае разрушения баллона, образовавшееся отверстие настолько велико, что истечение водорода из баллона можно считать мгновенным, а соответственно и образование горючей среды.

Кроме того, опасность представляет собой горючая среда, образование которой возможно в результате возникновения трещин, свищей, сквозных отверстий, обрыва трубопровода.

В работе [4] проведена оценка скорости уменьшения давления газа в сосудах при возникновении в них различного рода трещин и свищей. В данной работе, в качестве базового уравнения состояния газа, использовалось уравнение состояния идеального газа и уравнение Ван-дер-

Ваальса, применение которых применительно к водороду в баллонах с высоким давлением, приводит к существенным погрешностям (до 50%) [3].



Рис. 1 – Фото разрушенных баллонов

Однако, на сегодняшний день, отсутствуют данные о количественных оценках времени истечения водорода из баллона в случае возникновения щелей или свищей, а также зависимость этого параметра от температуры.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью данной работы является определение массового расхода водорода при истечении его из баллона, а также динамики изменения массы водорода в баллоне, что является важным фактором с точки зрения пожаровзрывоопасности этих систем.

В соответствии с [5], массовый расход сжатого газа из резервуара описывается следующими выражениями:

– докритическое истечение

$$Q = S \cdot \mu \left[ P \cdot \rho \cdot k \left( \frac{2k}{k-1} \right) \left( \frac{P_a}{P} \right)^{\frac{2}{k}} \left[ 1 - \left( \frac{P_a}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right]^{0,5}, \quad \text{при} \quad \frac{P_a}{P} \geq \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}; \quad (1)$$

– сверхкритическое истечение

$$Q = S \cdot \mu \left( P \cdot \rho \cdot k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right)^{0,5}, \quad \text{при} \quad \frac{P_a}{P} < \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

где  $Q$  - массовый расход,  $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $P$  - давление газа в резервуаре,  $P_a$ ;

Определение характеристик истечения газообразного водорода из баллона

$P_a$  – атмосферное давление, Па;  $\gamma$  - показатель адиабаты газа;  $S$  - площадь отверстия, м<sup>2</sup>;  $\mu$  - коэффициент истечения (0,6-0,8);  $\rho$  - плотность газа в резервуаре, кг • м<sup>-3</sup>.

Поскольку неравенство  $\frac{P_a}{P} < \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$  для водорода выполняется

практически во всем диапазоне давлений водорода в баллоне (0,2÷70 МПа), то при расчетах параметров истечения можно использовать только выражение (2).

Полученную на основе табличных данных [6] зависимость коэффициента адиабаты от давления можно представить в виде

$$k = 9,54 \cdot 10^{-9} P + 1,3854. \quad (3)$$

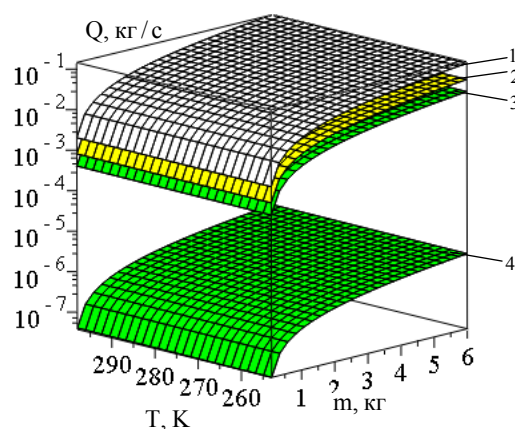
Тогда, с учетом (3), выражение (2) примет следующий вид

$$Q = S \cdot \mu \left( P \cdot \rho \cdot (9,54 \cdot 10^{-9} P + 1,3854) \left( \frac{2}{9,54 \cdot 10^{-9} P + 2,3854} \right)^{\frac{9,54 \cdot 10^{-9} P + 2,3854}{9,54 \cdot 10^{-9} P + 0,3854}} \right)^{0,5} \quad (4)$$

Зависимость давления водорода от температуры, плотности представим в виде Вириального уравнения [6]

$$P = \frac{mRT}{MV} \left( 1 + \frac{mB_2(T)}{MV} + \frac{m^2B_3(T)}{M^2V^2} \right). \quad (5)$$

В соответствии с (4) и (5) на рис. 2 приведена зависимость массового расхода водорода через отверстие от площади отверстия и температуры водорода (при  $V=0,15$  м<sup>3</sup>).

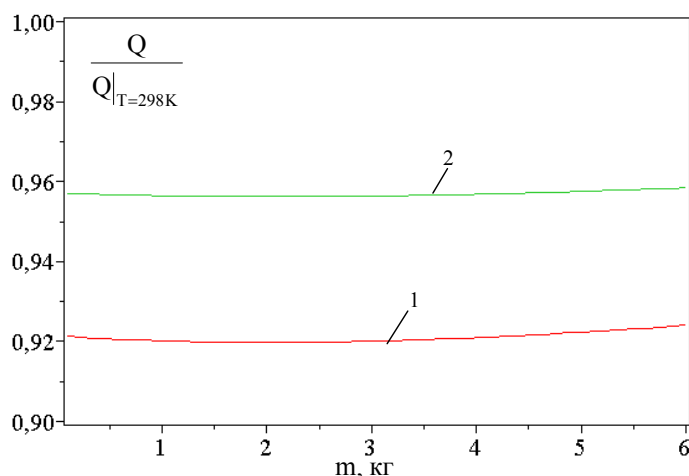


**Рис. 2 – Массовый расход водорода через отверстие (трещины, свищи) площадью: 1 – 5 мм<sup>2</sup>; 2 – 2 мм<sup>2</sup>; 3 – 1 мм<sup>2</sup>; 4 – 100 мкм<sup>2</sup>**

Из рисунка следует, что наибольшее влияние на массовый рас-

ход через отверстие оказывает его площадь.

На рис. 3 приведены зависимости относительного расхода водорода при температурах 273 и 253 К, в сравнении с расходом при T=298 К.



**Рис. 3 – Зависимость относительного расхода водорода от его массы в баллоне при изменении температуры по отношению к 298К: 1 – 253 К; 2 – 273 К**

Из рисунка следует, что уменьшение температуры до 273 К приводит к уменьшению расхода на 4%, а уменьшение до 253 К – на 8%. Поэтому при расчетах целесообразно использовать значения полученные при 298 К.

Приняв T=298 К выражение (5), можно представить в следующем виде

$$P = 1,238 \cdot 10^6 \cdot \frac{m}{V} \left( 1 + \frac{7,167 \cdot 10^{-3} \cdot m}{V} + \frac{9,09 \cdot 10^{-5} \cdot m^2}{V^2} \right) \quad (6)$$

Подставив (6) в (4) получим зависимость массового расхода от массы хранимого водорода в сосуде

$$Q = 609,5 \cdot S \cdot \frac{m}{V} \left[ \left( 1 + \frac{7,167 \cdot 10^{-3} \cdot m}{V} + \frac{9,09 \cdot 10^{-5} \cdot m^2}{V^2} \right) \right]^{0,5} \quad (7)$$

Выражение (7) получено без учета зависимости (3), так как анализ показал, что ее учет практически не влияет на конечный результат (отклонение около 1%), и ею можно пренебречь.

Так как изменение массы водорода в баллоне равно расходу со знаком минус, то можно записать

$$\frac{dm}{dt} = -Q, \quad (8)$$

где  $\frac{dm}{dt}$  – скорость изменения массы газа со временем, а  $Q$  – массовый расход через отверстие.

После разделения переменных в (8), с учетом (7), получим

$$\frac{dm}{dt} = -609,5 \cdot S \cdot \frac{m}{V} \left[ \left( 1 + \frac{7,167 \cdot 10^{-3} \cdot m}{V} + \frac{9,09 \cdot 10^{-5} \cdot m^2}{V^2} \right) \right]^{0,5}, \quad (9)$$

$$\frac{dm}{-609,5 \cdot S \cdot \frac{m}{V} \left[ \left( 1 + \frac{7,167 \cdot 10^{-3} \cdot m}{V} + \frac{9,09 \cdot 10^{-5} \cdot m^2}{V^2} \right) \right]^{0,5}} = dt. \quad (10)$$

Проинтегрируем (10)

$$\int \frac{dm}{-609,5 \cdot S \cdot \frac{m}{V} \left[ \left( 1 + \frac{7,167 \cdot 10^{-3} \cdot m}{V} + \frac{9,09 \cdot 10^{-5} \cdot m^2}{V^2} \right) \right]^{0,5}} = \int dt + A, \quad (11)$$

$$\frac{-1,64 \cdot 10^{-3} V}{S} \operatorname{arctgh} \left( \frac{1,58 \cdot 10^{-4} \left( 2 \cdot 10^7 + \frac{71670 \cdot m}{V} \right)}{\sqrt{10^7 + \frac{71670 \cdot m}{V} + \frac{909 \cdot m^2}{V^2}}} \right) = t + A, \quad (12)$$

где  $A$  – константа.

Для определения  $A$  воспользуемся начальным условием  $m = m_0, t = 0$ . Тогда

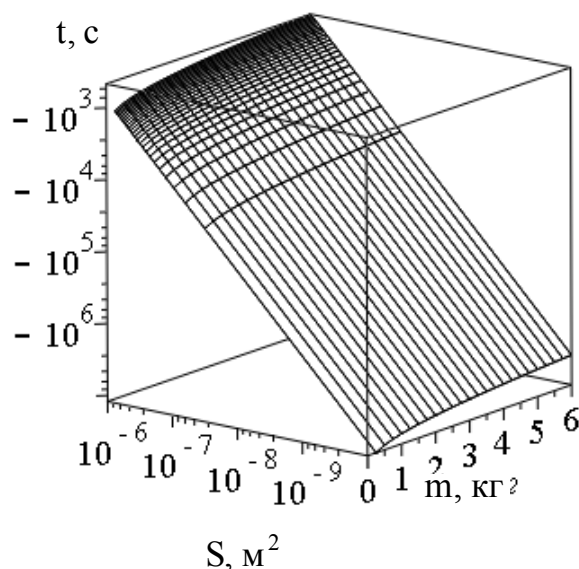
$$A = \frac{-1,64 \cdot 10^{-3} V}{S} \operatorname{arctgh} \left( \frac{1,58 \cdot 10^{-4} \left( 2 \cdot 10^7 + \frac{71670 \cdot m_0}{V} \right)}{\sqrt{10^7 + \frac{71670 \cdot m_0}{V} + \frac{909 \cdot m_0^2}{V^2}}} \right). \quad (13)$$

На рисунке 4 приведена зависимость константы  $A$  от массы водорода в баллоне и площади истечения через отверстие (при  $V=0,15 \text{ м}^3$ ).

Тогда, выражение для определения массы водорода в баллоне, по истечению времени  $t$ , можно представить в виде

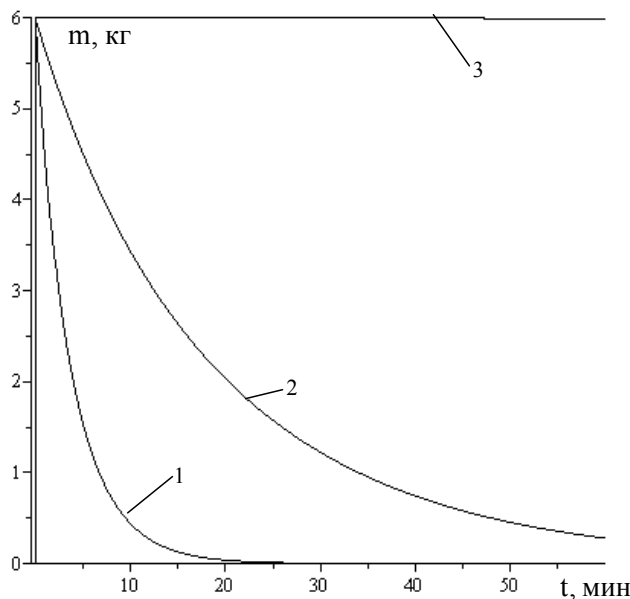
$$m = -68,38V \left[ 4,08 - \frac{\tanh \zeta \cdot \left( 2,47 \tanh \zeta + \sqrt{1 - \tanh^2 \zeta} \right)}{7,05 \tanh^2 \zeta - 1} \right], \quad (14)$$

где  $\zeta = 609,7 \frac{S(t+A)}{V}$ .



**Рис. 4 – Зависимость константы А от массы водорода в баллоне и площади истечения через отверстие**

На рис. 5 и 6 представлены зависимости остаточной массы водорода в баллоне при истечении через отверстие (трещины, свищи), как функции времени (при  $V=0,15 \text{ м}^3$ ).



**Рис. 5 – Зависимость остаточной массы водорода в баллоне при истечении через отверстие (трещины, свищи) площадью: 1 –  $1 \text{ мм}^2$ ; 2 –  $0,2 \text{ мм}^2$ ; 3 –  $100 \text{ мкм}^2$**

Из рисунков следует, что при малых значениях площади истечения, изменение массы водорода в баллоне может быть таким, что пользователь (владелец автомобиля) исходя из показания приборов в автомобиле в течении суток, может не замечать истечения водорода,

ввиду малых расходов.

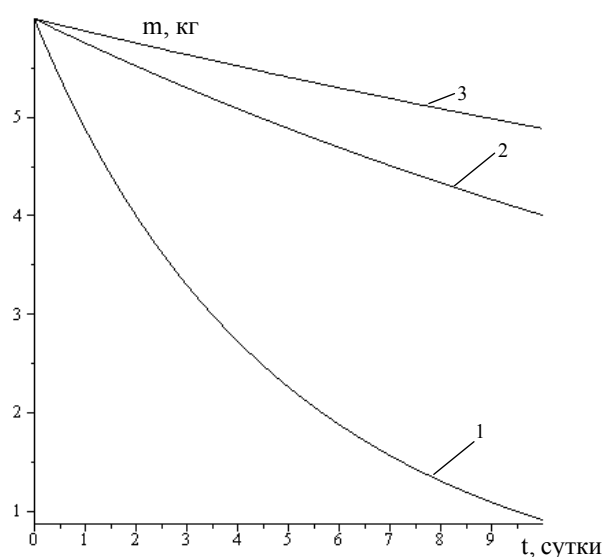


Рис. 6 – Зависимость остаточной массы водорода в баллоне при истечении через отверстие (трещины, свищи) площадью: 1 – 500 мкм<sup>2</sup>; 2 – 100 мкм<sup>2</sup>; 3 – 50 мкм<sup>2</sup>

Учитывая широкие концентрационные пределы распространения пламени для водорода, а особенно низкое значение НКПРП, это может привести к пожаровзрывоопасной ситуации, например, в гараже или другом ограниченном объеме.

**Выводы.** В результате проведенной работы, с использованием вириального уравнения, определена зависимость массового расхода водорода через отверстие от площади сечения, массы хранимого водорода (давления). Получена зависимость остаточной массы водорода в баллоне во времени при его истечении через отверстие. Полученные результаты в дальнейшем планируется использовать при оценке возможности образования горючей среды в замкнутом пространстве.

## 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. Высокие технологии, водородная энергетика, платиновые металлы. Сборник документов и материалов традиционного "круглого стола", посвященного Дню космонавтики. МИРЭА, АСМИ, 2005. — 288 с.

3. 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.

4. Билей Д.В. Исследование изменения давления газа в сосудах при его истечении из трещин в стенках / Д.В. Билей, М.В. Максимов, О.А. Назаренко, Р.В. Протопопов // Труды Одесского политехнического университета. – 1998. – № 6. – С. 87–91.

5. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий / [И.А. Болодьян, Ю.Н. Шебеко, В.Л. Карпов, В.И. Макеев и др.]. – М.: Федеральное государственное учреждение «Всероссийский ордена "Знак почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны», 2006. — 97 с.

6. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортировка, применение: Справочное издание / Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовнин и др.: под ред. Д.Ю. Гамбурга, И.Ф. Дубовнина, - М.:Химия, 1989. – 672 с.

nuczu.edu.ua

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

#### **Characterization expiration hydrogen gas from a cylinder**

Using the virial equation, is defined dependence of mass flow of hydrogen through the opening of cross-sectional area, the mass of stored hydrogen pressure. The dependence of the residual mass of hydrogen in the tank in time for its expiration through the hole, which allows to estimate possibility of fire and explosion hazards situation.

**Key words:** Hydrogen gas, container, discharge, mass flow rate.

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

#### **Визначення характеристик закінчення газоподібного водню з балона**

З використанням вірiального рiвняння, визначена залежнiсть масової витрати водню через отвір від площi перерiзу, маси зберiгається водню, тиску. Отримано залежнiсть залишкової маси водню в балонi в часi при його витiканнi через отвір, що дозволяє оцiнити можливiсть утворення пожежевибухонебезпечної ситуацiї.

**Ключові слова:** Газоподібний водень, балон, витікання, масова витрата.