

УДК 614.8

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТЕЧЕНИЯ ВОДОРОДА ИЗ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ

В результате проведенной работы определена зависимость массового расхода водорода через отверстие от его площади и температуры водорода. Получена зависимость остаточной массы водорода в баллоне во времени при его истечении через отверстие.

Ключевые слова: водород, баллон, истечение, массовый расход

Постановка проблемы. В настоящее время водород рассматривается как один из перспективных экологически чистых энергоносителей для транспорта будущего [1, 2]. Одним из способов его хранения на автотранспорте, является хранение в жидком (криогенном) виде при температурах около 20 К [1–4].

Одной из проблем применения данных систем хранения водорода (СХВ) является их пожаровзрывоопасность [3]. Учитывая давление в СХВ, вибрацию в процессе эксплуатации, постоянное изменение температурных режимов работы, данные системы хранения водорода представляют опасность в связи с возможным разрушением бака или его разгерметизации.

Анализ последних исследований и публикаций. Одним из опасных факторов использования данной СХВ является горючая среда, образование которой возможно в результате разгерметизации бака или трубопровода и его соединений.

В работе [4] проведена оценка скорости уменьшения давления газа в сосудах при их разгерметизации. В данной работе, в качестве базового уравнения состояния газа, использовалось уравнение состояния идеального газа и уравнение Ван-дер-Ваальса, использование которых применительно к СХВ в жидком виде невозможно, ввиду наличия жидкой и газообразной фаз [3].

В работе [5] получены оценки скорости истечения водорода из СХВ в газообразном виде (давление до 70 МПа).

Однако, на сегодняшний день, отсутствуют данные о количественных значениях массового расхода, времени истечения водорода из СХВ в жидком виде при ее разгерметизации.

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

Несмотря на то, что в данной системе хранения водород находится в двух фазах, рассмотрим только истечение газообразного водорода, как наиболее вероятного события при незначительных размерах площади отверстия истечения. Тогда, соответствии с [6], 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, Па; P_a - атмосферное давление, Па; γ - показатель адиабаты газа; S - площадь отверстия, м^2 ; μ - коэффициент истечения (0,6-0,8); ρ - плотность газа в резервуаре, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Зависимость давления газообразного водорода от температуры можно представить в виде [4]

$$P_{\text{H}_2}(T_{\text{H}_2}) = 0,0059 \cdot T_{\text{H}_2}^2 - 0,2235 \cdot T_{\text{H}_2} + 2,1909 \quad (3)$$

где T_{H_2} – температура водорода.

Плотность газообразного водорода, как функцию температуры запишем в виде [7]

$$\rho_{\text{H}_2}(T_{\text{H}_2}) = 10^{(0,29610^{-4} \cdot T_{\text{H}_2}^4 - 0,0023624 \cdot T_{\text{H}_2}^3 + 0,064 \cdot T_{\text{H}_2}^2 - 0,5474 \cdot T_{\text{H}_2} - 0,38097)}. \quad (4)$$

В соответствии с (1) – (4) на рис. 1 показаны зависимости относительного расхода водорода от температуры.

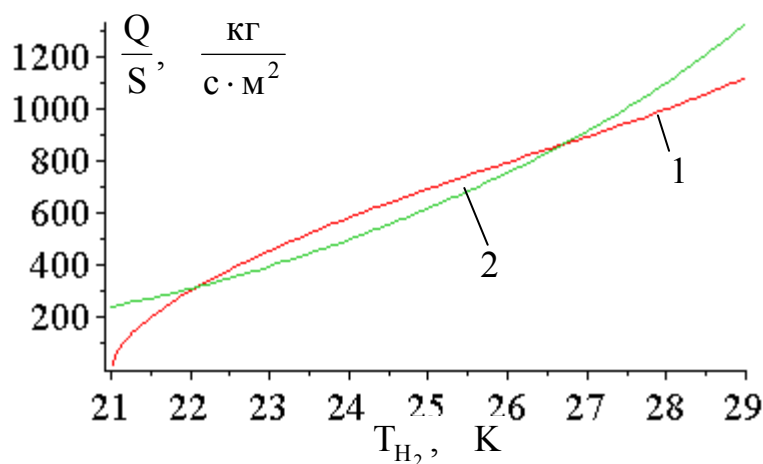


Рис. 1 – Зависимость относительного расхода водорода от температуры: 1 – докритическое истечение; 2 – сверхкритическое истечение

Из рисунка следует, что с увеличением температуры растет относительный расход водорода. В соответствии с (1) и (2) температура, при которой происходит изменение закона истечения водорода, составляет 22,1 К. На рис. 2 приведены зависимости изменения относительного расхода водорода $\frac{\partial(Q/S)}{\partial T_{H_2}}$.

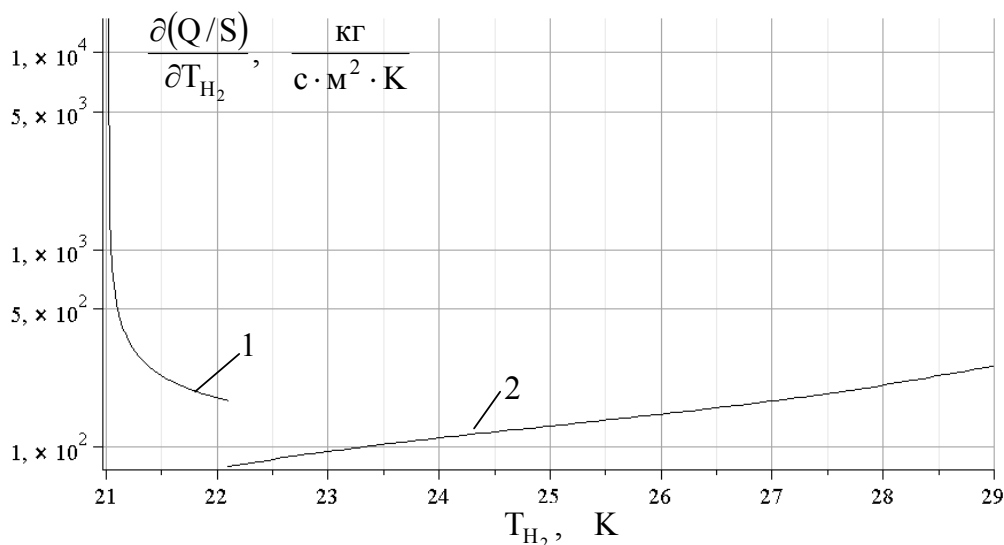


Рис. 2 – Зависимость изменения относительного расхода водорода: 1 – до критическое истечение; 2 – сверхкритическое истечение

Из рис. 2 следует, что с увеличением температуры ее влияние на величину $\frac{\partial(Q/S)}{\partial T_{H_2}}$ резко уменьшается, а начиная с $T=22,1$ К – увеличивается.

Дополнив (1)-(4)выражением

$$\frac{dm}{dt} = -Q, \quad (5)$$

получим систему уравнений для определения параметров истечения водорода из СХВ

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{H_2}(T_{H_2}) = 0,0059 \cdot T_{H_2}^2 - 0,2235 \cdot T_{H_2} + 2,1909; \\ \rho_{H_2}(T_{H_2}) = 10^{\left(\begin{array}{l} 0,296 \cdot 10^{-4} \cdot T_{H_2}^4 - 0,0023624 \cdot T_{H_2}^3 + \\ + 0,064 \cdot T_{H_2}^2 - 0,5474 \cdot T_{H_2} - 0,38097 \end{array} \right)}; \\ Q_{ДКИ} = S\mu \left[P_{H_2} \rho_{H_2} \left(\frac{2k}{k-1} \right) \cdot \left(\frac{P_a}{P_{H_2}} \right)^{2/k} \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_{H_2}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \right]^{0,5}; \\ Q_{ПИКИ} = S\mu \left[P_{H_2} \rho_{H_2} k \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]^{0,5}; \\ \frac{dm}{dt} = -Q. \end{array} \right. \quad (6)$$

На рис. 3 приведена графическая интерпретация системы уравнений (6).

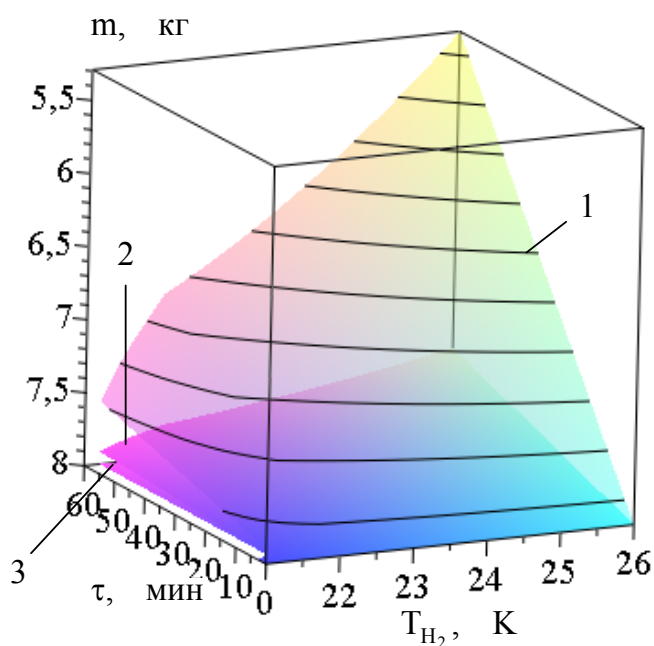


Рис. 3 – Зависимость остаточной массы водорода в баллоне при истечении через отверстие площадью: 1 – 1 мм²; 2 – 0,2 мм²; 3 – 100 мкм²

Из рисунка следует, что увеличение площади отверстия и температуры приводит к существенному увеличению количества выделившегося водорода. Так, например, увеличение температуры с 21,1 К до 26 К приводит к интенсификации процесса истечения водорода в 5 раз.

Выводы. В результате проведенной работы определена зависимость массового расхода водорода через отверстие от его площади и температуры водорода. 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. Кузык Б.Н. Россия: стратегия перехода к водородной энергетике / Б.Н. Кузык, Ю.В. Яковец; Авт. предисл. С.М. Миронов – М.: Институт экономических стратегий, 2007. – 400 с.
2. Высокие технологии, водородная энергетика, платиновые металлы. Сборник документов и материалов традиционного

Ключка Ю.П., Кривцова В.И.

- "круглого стола", посвященного Дню космонавтики. МИРЭА, АСМИ, 2005. – 288 с.
3. Ключка Ю.П. Особенности использования водорода на автомобильном транспорте / В.И. Кривцова, Ю.П. Ключка // Проблемы пожарной безопасности. – 2009. – № 26. – С. 49–61.
 4. 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.
 5. Ключка Ю.П. Определение характеристик истечения газообразного водорода из баллона / Ю.П. Ключка, В.И. Кривцова, В.Г. Борисенко// Проблемы пожарной безопасности. – 2011. – № 29. – С. 84–89.
 6. 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.
 7. Ключка Ю.П. Определение характеристик водорода в баке автомобиля при температурах 20 – 32 К / Ю.П. Ключка // Автомобильный транспорт: збірник наукових праць. - Харків : ХНАДУ. - 2011. - Вип. 28. - С. 32–36.
nuczu.edu.ua

Ключка Ю.П., Кривцова В.И.

Визначення характеристик витікання водню з криогенної системи зберігання

В результаті проведеної роботи визначено залежність масової витрати водню через отвір від його площі і температури водню. Отримано залежність залишкової маси водню в балоні в часі при його витіканні через отвір.

Ключові слова: водень, балон, масова витрата

Kluchka Yu. P., Krivtsova V.I.

Determination of the expiration of the cryogenic hydrogen storage system

As a result of the work determined the dependence of the mass flow of hydrogen through the hole of the size and temperature of hydrogen. The dependence of the residual mass of hydrogen in the tank at the time when the end through the hole.

Key words: the hydrogen tank, the discharge mass flow rate