

*В.И. Кривцова, д.т.н, профессор, НУГЗУ,
Ю.П. Ключка, к.т.н., ст. научн. сотр., НУГЗУ*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ДО ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ВОДОРОДА ИЗ СИСТЕМЫ ЕГО ХРАНЕНИЯ

Проведено сравнение систем хранения водорода (СХВ) трех типов (в газообразном виде, в жидком виде, в форме гидридов интерметаллидов) по массовому расходу и по количеству истекшего водорода. Получены оценки времени достижения среднеобъемных концентраций водорода в помещении при истечении из СХВ и построена номограмма для его определения.

Ключевые слова: водород, баллон, истечение, массовый расход, концентрация, время.

Постановка проблемы. В настоящее время водород рассматривается как один из перспективных экологически чистых энергоносителей для транспорта будущего [1-5]. Необходимым условием для этой реализации является создание малогабаритных аккумуляторов водорода с высокой емкостью и минимальным уровнем пожаровзрывоопасности. При этом параметры систем хранения водорода, максимальное давление определяются исходя из характеристик автомобиля, таких как масса автомобиля, расход водорода, наличие рекуперационной установки и т.д.

Учитывая повышенное давление в СХВ, вибрацию в процессе эксплуатации, постоянное изменение температурных режимов работы, системы хранения водорода представляют опасность в связи с возможным разрушением баллона или истечением водорода через щели и свищи.

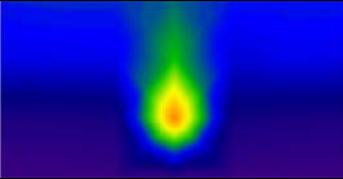
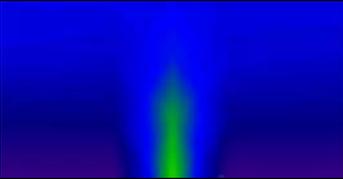
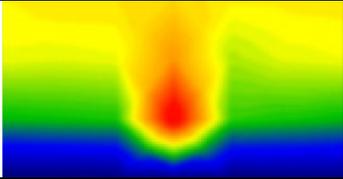
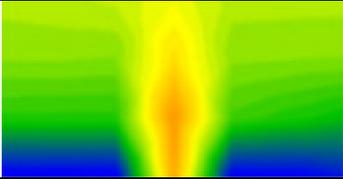
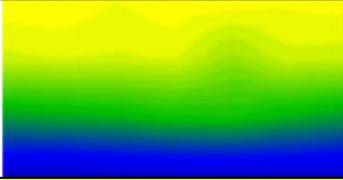
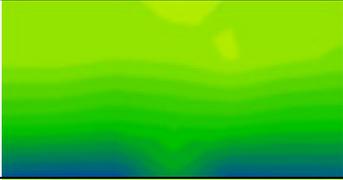
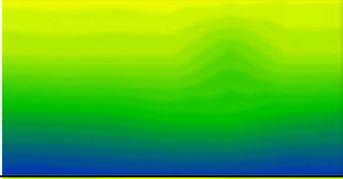
Анализ последних достижений и публикаций. Анализ показывает, что при использовании СХВ на автотранспортных средствах опасность представляет собой горючая среда, образование которой возможно в результате возникновения трещин, свищей, сквозных отверстий, обрыва трубопровода в данных системах.

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].

В работах [7–9] получены выражения массового расхода водорода при его истечении для СХВ трех типов (в газообразном виде, в жидком виде, в форме гидридов интерметаллидов).

В работе [6] представлены результаты экспериментальных исследований по определению полей концентраций в помещении при вертикальном истечении водорода вверх и вниз. В табл. 1. представлены результаты этих исследований [6].

Таблица 1 – Распределение концентрации водорода в зависимости от времени и направления истечения

Время, мин.	Истечение вверх	Истечение вниз								
5										
15										
20										
30										
40										
Соответствие цвета концентрации водорода										
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="background-color: #4b0082; color: white;">0 %</td> <td style="background-color: #000080; color: white;">2 %</td> <td style="background-color: #000080; color: white;">4 %</td> <td style="background-color: #0000ff; color: white;">6 %</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #0000ff; color: white;">8 %</td> <td style="background-color: #00ff00; color: white;">10 %</td> <td style="background-color: #90ee90; color: white;">12 %</td> <td style="background-color: #ffff00; color: white;">14 %</td> </tr> </table>			0 %	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %	12 %	14 %
0 %	2 %	4 %	6 %							
8 %	10 %	12 %	14 %							

Из таблицы следует, что независимо от направления истечения водорода по истечению (20÷30) минут концентрация водорода в помещении практически выравнивается. Таким образом, при определе-

нии времени до возникновения пожаровзрывоопасных концентраций, можно считать, что распределение водорода в помещении не зависит от направления истечения и можно принять равномерное распределение.

Следует отметить, что на сегодняшний день, отсутствуют данные о количественных оценках времени до возникновения пожаровзрывоопасных концентраций водорода в помещении при его истечении из СХВ в случае возникновения щелей или свищей.

Постановка задачи и ее решение. Целью данной работы является определение времени до возникновения пожаро- или взрывоопасной концентрации водорода в помещении, при его истечении из СХВ.

Зависимость массы водорода от объема помещения, например, гаража и концентрации можно записать в виде

$$m_{H_2} = 0,09 \cdot V_{\text{п}} \cdot \varphi_{H_2}, \quad (1)$$

φ_{H_2} – концентрация водорода, $V_{\text{п}}$ – объем помещения.

Количество водорода, выделившегося из СХВ за время t

$$m_{H_2} = \int_0^t Q_s(P, S) dt, \quad (2)$$

где $Q_s(P, S)$ – массовый расход водорода в зависимости от типа СХВ, давления в ней и площади отверстия, через которое он истекает.

Тогда, из (1) и (2), можно определить время достижения φ_{H_2}

$$\int_0^t Q_s(P, S) dt = 0,09 \cdot V_{\text{п}} \cdot \varphi_{H_2}. \quad (3)$$

Полученные в работах [7–9] выражения массового расхода водорода для СХВ трех типов (в газообразном виде, в жидком виде, в форме гидридов интерметаллидов) позволили построить зависимости относительного расхода водорода от степени заполнения системы (рис. 1).

Анализ рисунка показывает, что наибольший массовый расход присущ СХВ в газообразном виде, а наименьший – гидридной системы хранения водорода.

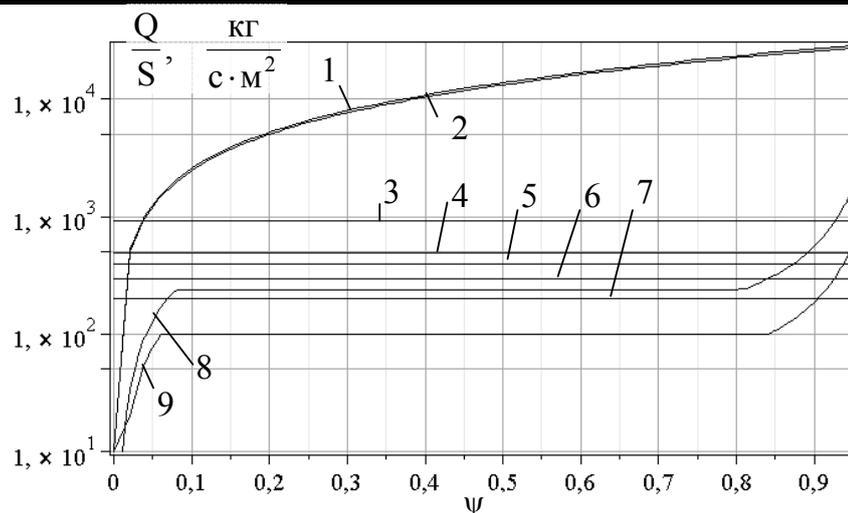


Рис. 1 – Зависимость относительного расхода водорода от степени заполнения системы: 1 – СХВ в газообразном виде $T=323$ К; 2 – СХВ в газообразном виде $T=298$ К; 3-7 – СХВ в жидком виде; 3 – $T=22$ К; 4 – $T=23$ К; 5 – $T=24$ К; 6 – $T=25$ К; 7 – $T=27$ К; 8 – СХВ в форме гидридов $T=323$ К; 9 – СХВ в форме гидридов $T=298$ К

На рис. 2 представлены зависимости выделившейся массы водорода из СХВ при его истечении через отверстие в соответствии с математическими моделями, полученными в работах [7–9].

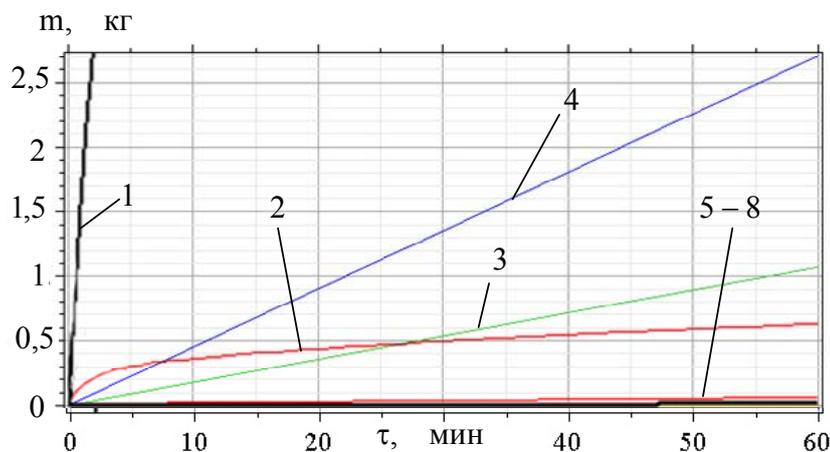


Рис. 2 – Зависимость выделившейся массы водорода при истечении через отверстие площадью 1 мм^2 (1-4) и 100 мкм^2 (5-8) от времени: 1, 5 – СХВ в газообразном виде; 2, 6 – СХВ водорода в форме гидридов; 3, 4, 7, 8 – СХВ в жидком виде; 3 – $T=22$ К; 4 – $T=26$ К

Из рисунка следует, что наибольшая масса водорода истекает из газообразной системы хранения, а наименьшая из жидкостной (на интервале времени от 0 до $7 \div 25$ минут) или гидридной (на интервале времени от $7 \div 25$ минут и более).

В соответствии с (1), (2), (3) и моделями, полученными в работах [7–9] на рис. 3 приведена номограмма для определения времени достижения среднеобъемных пожаровзрывоопасных концентраций водорода в помещении.

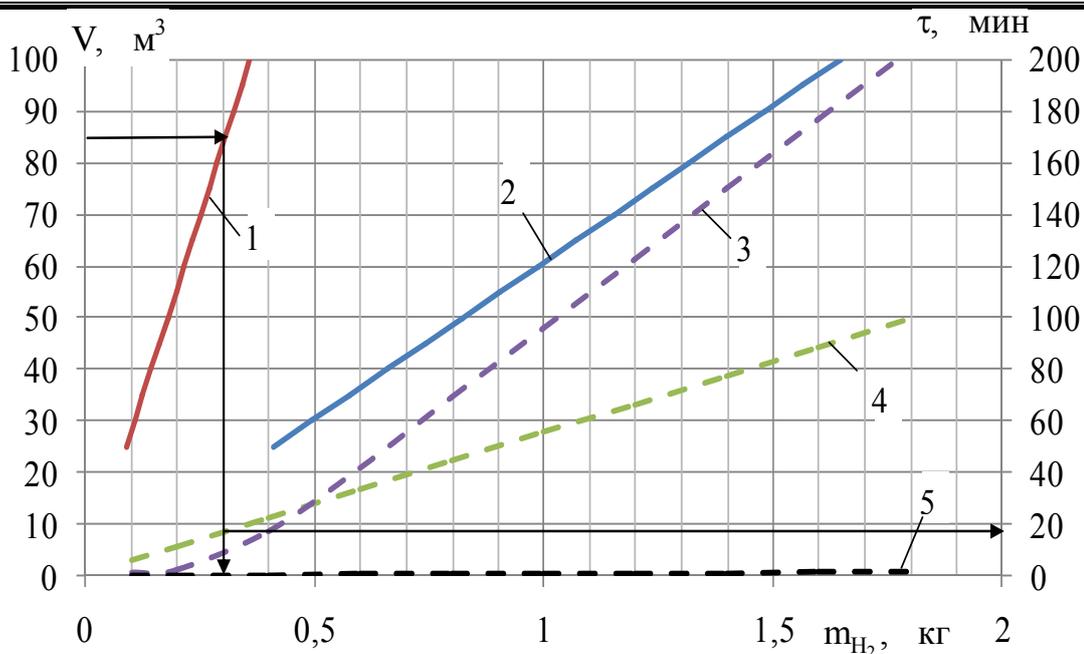


Рис. 3 – Номограмма для определения времени достижения среднеобъемных концентраций водорода в помещении при его аварийном истечении: 1 – концентрация водорода 4%; 2 – 18,3%; 3 – гидридная СХВ; 4 – СХВ в жидком виде; 5 – СХВ в сжатом виде

Анализ рисунка показывает, что, например, в гараже объемом 85 м^3 пожароопасная концентрация (1) достигается для СХВ в жидком виде через 18 минут, в то время как для СХВ в газообразном виде этот показатель составляет менее 1 минуты.

Выводы. В результате проведенной работы получены оценки времени достижения среднеобъемных концентраций водорода в помещении при истечении из СХВ и построена номограмма для его определения.

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. Гамбург Д.Ю. 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.

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. Эксперименты по напуску и распространению водорода в замкнутом цилиндрическом объёме [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://h2forum2008.ru/docs/pdf/abstracts/5_3_09.pdf.

7. Ключка Ю.П. Определение характеристик истечения газообразного водорода из баллона / Ю.П. Ключка, В.И. Кривцова, В.Г. Борисенко // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУГЗУ, 2011. – № 29. – С. 84–91.

8. Ключка Ю.П. Определение характеристик истечения водорода из криогенной системы хранения / Ю.П. Ключка, В.И. Кривцова // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Харьков: НУГЗУ, 2012. – № 15. – С. 78–83.

9. Ключка Ю.П. Определение характеристик истечения водорода из системы хранения в форме гидридов интерметаллидов / Ю.П. Ключка // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. – Харків, ХУПС, 2012. – Вип. 3(101). – С. 161–163.

nuczu.edu.ua

V.I. Krivtsova, Yu.P. Kluchka

Визначення часу до виникнення пожежовибухонебезпечні концентрації при витіканні водню із системи його зберігання

Проведено порівняння систем зберігання водню трьох типів (у газоподібному вигляді, в рідкому вигляді, у формі гідридів інтерметалідів) по масовій витраті і за кількістю водню, що витік. Отримано оцінки часу досягнення середньо об'ємних концентрацій водню в приміщенні при витіканні з СХВ і побудована номограма для його визначення.

Ключові слова: водень, балон, закінчення, масова витрата, концентрація, час.

V.I. Krivtsova, Yu.P. Kluchka

Determination of time before a fire and explosion hazard concentration at end of hydrogen storage system

A comparison of hydrogen storage systems of three types (as a gas, liquid, in the form of hydrides of intermetallic compounds) for the mass flow rate and the number of expired hydrogen. We obtain estimates of the time to reach volume average concentration of hydrogen in the room at the end of the HSS and a nomogram for determining it.

Keywords: hydrogen, oxygen cylinder, discharge, mass flow, concentration, time.