

УДК 614.8

Ю.П. КЛЮЧКА

*Национальный университет гражданской защиты Украины, Украина***АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ  
В БАЛЛОНЕ С ВОДОРОДОМ**

*Получена аналитическая зависимость коэффициента теплоотдачи в баллоне с водородом от геометрических параметров баллона, плотности водорода, температуры водорода и стенки баллона. Показано, что наибольшее влияние на значение коэффициента теплоотдачи оказывает разница температур стенки баллона и водорода, а также плотность водорода, в то время как величина радиуса баллона не оказывает существенного влияния. Определено, что значение коэффициента теплоотдачи, полученное с учетом его зависимости от характеристик водорода, баллона и температуры окружающей среды и полученное при усредненных параметрах, может иметь разницу до 500%.*

**Ключевые слова.** сжатый водород, баллон, коэффициент теплоотдачи.

**Введение**

В силу своих свойств водород является одним из энергоемких топлив, широко используемых в двигателях и энергоустановках летательных аппаратов [1, 2]. Использование водорода влечет за собой наличие системы хранения и подачи, одним из видов которой является хранение водорода в баллонах высокого давления (до 70 МПа [3]). В конечном итоге эффективность использования водорода будет определяться не только его свойствами, но и характеристиками системы хранения. Такие характеристики данных систем, как высокое давление водорода, а также малая толщина стенок баллона (в силу минимизации массогабаритных характеристик), повышают их пожаровзрывоопасность.

Одной из опасных ситуаций является повышение давления в баллоне с последующим его разрушением. Поэтому учет изменений характеристик водорода и материала баллона в результате внешнего воздействия, например, изменения температуры внешней среды, является важным условием для обеспечения безопасного использования водорода в двигательных и энергетических установках летательных аппаратов [1, 2].

**Анализ последних исследований и публикаций.** В результате внешнего температурного воздействия, обусловленного, в частности, возникновением пожара или нерасчетным режимом эксплуатации системы, происходит изменение температуры водорода в баллоне, вследствие нагрева его стенок [3].

В работе [4], посвященной разработке транспортных средств, в том числе и на водороде, упоминается о возможности разрушения баллона в резуль-

тате повышения температуры и давления водорода, однако какие либо количественные характеристики не приводятся.

Кроме того, отсутствуют данные о способах определения времени достижения критических параметров, которые зависят от характеристик водорода и баллона, а также от коэффициента теплоотдачи, который определяет передачу тепла от баллона к водороду.

В работе [5] рассматривается процесс изменения температуры водорода в сосуде и приводится усредненное значение коэффициента теплоотдачи для диапазона давлений водорода (0–35) МПа. Однако не исследуется изменение данного параметра в зависимости от параметров сосуда, а также от перепада температур на границе «внутренняя поверхность баллона–водород», которое имеет место в случае резкого повышения температуры окружающей среды.

**Целью данной работы** является аналитическое определение коэффициента теплоотдачи от стенки баллона к водороду в зависимости от характеристик водорода, баллона и температуры окружающей среды.

**Результаты исследований**

Коэффициент теплоотдачи можно определить исходя из следующего выражения [6]

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $Nu$  – критерий подобия тепловых процессов, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счёт конвекции и интенсив-

ностью теплообмена за счёт теплопроводности;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $L$  – характерный размер.

Усредненное значение  $\overline{Nu}$ , для случая свободной конвекции в горизонтальном цилиндре, определялось в соответствии со следующим выражением [7]

$$\overline{Nu} = \left[ 0,6 + \left( 0,387 \frac{Gr \cdot Pr}{\left[ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{16/9}} \right)^{1/6} \right]^2, \quad (2)$$

где  $Pr$  – критерий подобия тепловых процессов в жидкостях и газах, учитывающий влияние физических свойств теплоносителя на теплоотдачу ( $Pr=0,72$  для двухатомных газов [7]);  $Gr$  – критерий подобия теплообмена при свободном движении в поле гравитации.

Значение  $Gr$  определялось в соответствии со следующим выражением [6]

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_{H_2})L^3}{\nu^2}, \quad (3)$$

где:  $g$  – ускорение свободного падения;  $L$  – определяющий линейный размер поверхности теплообмена;  $T_s$  – температура поверхности теплообмена;  $T_{H_2}$  – температура водорода;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $\beta$  – температурный коэффициент объёмного расширения (для газов  $\beta = (T_{H_2})^{-1}$ ,  $K^{-1}$ ).

Коэффициент кинематической вязкости определяется в соответствии с [8]

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (4)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости.

В работе [9] показано, что коэффициент динамической вязкости водорода зависит от температуры и инвариантен к значению давления. В результате аппроксимации экспериментальных данных, приведенных в работе [9], получена зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры

$$\eta = (0,0147 \cdot T_{H_2} + 5,8616) \cdot 10^{-6}. \quad (5)$$

На рис. 1 в соответствии с выражениями (4) и (5) приведена полученная зависимость коэффициента кинематической вязкости от температуры и плотности водорода.

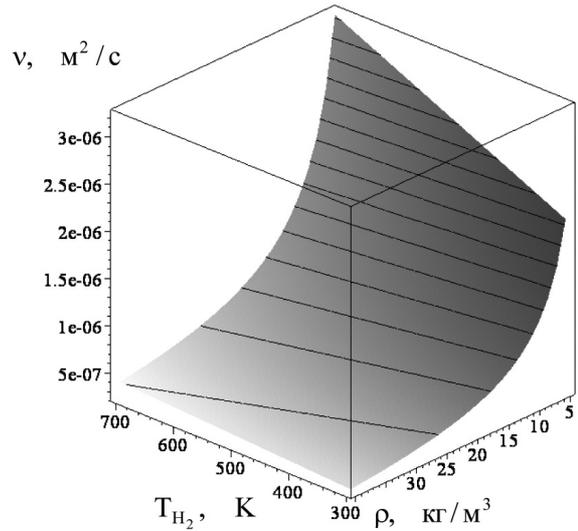


Рис. 1. Зависимость коэффициента кинематической вязкости от температуры и плотности водорода

На рис. 2 приведены полученные зависимости числа Нуссельта от радиуса баллона и плотности водорода при различных значениях  $T_s$  и  $T_{H_2}$ .

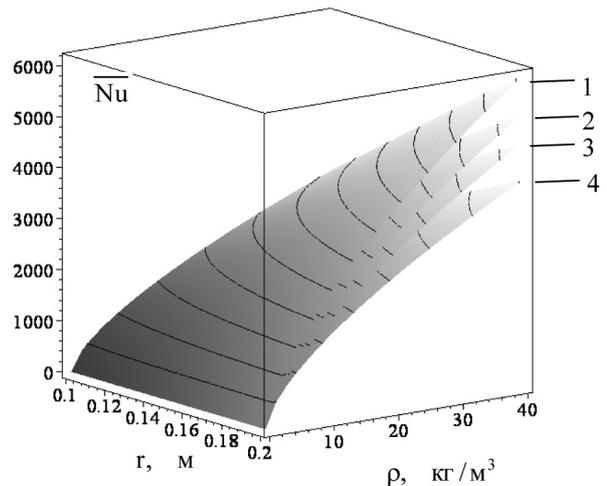


Рис. 2. Зависимость числа Нуссельта от радиуса баллона и плотности водорода: 1, 3 –  $T_s = 900$  К; 2, 4 –  $T_s = 700$  К; 1, 2 –  $T_{H_2} = 300$  К; 3, 4 –  $T_{H_2} = 400$  К

Из рис. 2 следует, что небольшие значения числа Нуссельта (до 10) характерны при малых давлениях водорода в баллоне (до 1 МПа). Поэтому, при расчете количества переданного тепла в баллоне с водородом, когда плотность водорода может достигать  $1 \text{ кг/м}^3$  и более, коэффициент теплоотдачи можно рассчитывать исходя из того, что тепло передается только за счет конвекции.

Исходя из данных, приведенных в работе [9], основное влияние на значение теплопроводности водорода оказывает его температура, а изменение давления при низких температурах приводит к изменению  $\lambda$  не более чем на 3%, при высоких температурах – на 1,0%. Учитывая, что данные отклонения находятся в пределах погрешности определения  $\lambda$  [9], то при описании зависимости  $\lambda$  от температуры и давления, влиянием давления можно пренебречь.

Таким образом, пренебрегая влиянием давления на  $\lambda$  и аппроксимировав экспериментальные данные, приведенные в работе [9], была получена следующая зависимость  $\lambda_{H_2}(T)$ :

$$\lambda_{H_2}(T) = 97,96 \cdot (3,68 \cdot 10^{-3} \cdot T_{H_2} + 1). \quad (6)$$

Подставив (2) – (6) в (1), получаем зависимость коэффициента теплоотдачи, как функцию температуры водорода и стенки баллона, а также плотности водорода

$$\alpha = 2,91 \cdot 10^5 \cdot (3,68 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{H_2} + 1) \times \left[ \frac{0,011}{r^{0,5}} + \frac{\rho \left( \frac{T_s}{T_{H_2}} - 1 \right)^{0,5}}{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_{H_2} + 1} \right]^{1/3} \quad (7)$$

где  $r$  – радиус баллона (определяющий линейный размер).

На рис. 3, в соответствии с (7) приведены зависимости коэффициента теплоотдачи от внутренней стенки баллона к водороду в зависимости от разницы температур между стенкой и водородом и внутреннего радиуса баллона.

Из рисунка следует, что радиус баллона практически не оказывает влияния на коэффициент теплоотдачи. В то же время увеличение температуры водорода и его плотности приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи. Также из рисунка следует, что приведенное в [5] усредненное значение коэффициента теплоотдачи существенно меньше значений полученных с помощью выражения (7), что необходимо учитывать при расчетах количества тепла переданного водороду, а соответственно и значения его давления.

### Выводы

В результате проведенной работы получена аналитическая зависимость коэффициента теплоотдачи в баллоне с водородом от радиуса баллона, плотности водорода, температуры водорода и стенки баллона.

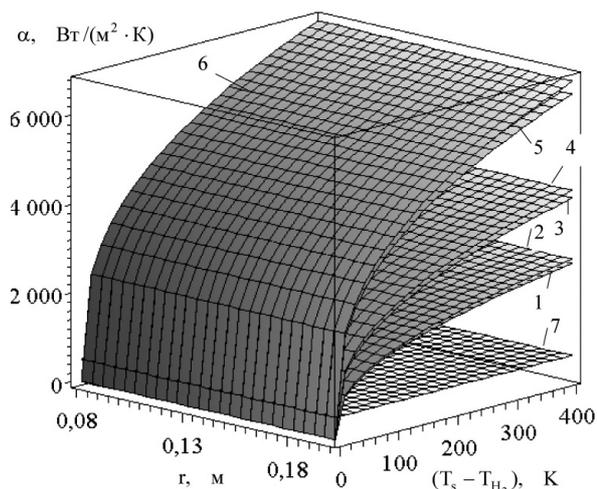


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от разницы температур между стенкой и водородом и внутреннего радиуса баллона ( $V_6=0,15 \text{ м}^3$ ):  
1, 3, 5 –  $T_{H_2}=300 \text{ К}$ ; 2, 4, 6 –  $T_{H_2}=600 \text{ К}$ ;  
1, 2 –  $m_{H_2}=2 \text{ кг}$ ; 3, 4 –  $m_{H_2}=4 \text{ кг}$ ; 5, 6 –  $m_{H_2}=6 \text{ кг}$ ;  
7 – усредненное значение коэффициента теплоотдачи [5]

Показано, что наибольшее влияние на значение коэффициента теплоотдачи оказывает разность температур ( $T_s - T_{H_2}$ ) и плотность водорода, в то время как величина радиуса баллона не оказывает существенного влияния. Определено, что значение коэффициента теплоотдачи, полученное с учетом его зависимости от характеристик водорода, баллона и температуры окружающей среды и полученное при усредненных параметрах [5], может иметь разницу до 500%

### Литература

1. Гришин С.Д. Теоретические основы создания двигательных установок для управления космическими аппаратами / С.Д. Гришин, В.В. Кокорин, Н.П. Харламов. – М.: Машиностроение, 1985. – 191 с.
2. Мелькумов Т.М. Ракетные двигатели / Т.М. Мелькумов, Н.И. Мелик-Пашаев, П.Г. Чистяков. – М.: Машиностроение, 1976. – 400 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. Коноплев В.Н. Научные основы проектирования автотранспортных средств, работающих на газомоторных топливах : автореф. дис. на соиск. науч. степени докт. техн. наук: спец. 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины» / В.Н. Коноплев. – Москва, 2008. – 45 с.

5. Masanori M. Characteristics of heat transfer and temperature rise of hydrogen during rapid hydrogen filling at high pressure [Электронный ресурс] / M. Masanori, M. Yuichi, W. Peter, M. Shinichi // Режим доступа: <http://www3.interscience.wiley.com/journal/113512425/abstract>.

6. Рябова І.Б. Термодинаміка і теплопередача / І.Б. Рябова, І.В. Сайчук, А.Я. Шаршанов. – Х.: АПБУ, 2002. – 352 с.

7. Free convection from horizontal cylinders

[Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://users.wpi.edu/~chslt/courses/es3003/lect25\\_6.pdf](http://users.wpi.edu/~chslt/courses/es3003/lect25_6.pdf).

8. Безразмерные переменные и уравнения подобия [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://fast-const.ru/articles.php?article\\_id=87](http://fast-const.ru/articles.php?article_id=87).

9. 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.

Поступила в редакцию 3.06.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. физико-математических дисциплин В.И. Кривцова, Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков.

### АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ В БАЛОНІ З ВОДНЕМ

*Ю.П. Ключка*

Отримано аналітичну залежність коефіцієнта тепловіддачі в балоні з воднем від геометричних параметрів балона, густини водню, температури водню і стінки балона. Показано, що найбільший вплив на значення коефіцієнта тепловіддачі надає різниця температур стінки балона та водню, а також значення густини водню, в той час як величина радіусу балона істотно не впливає. Визначено, що значення коефіцієнта тепловіддачі, отримане з урахуванням його залежності від характеристик водню, балона та температури навколишнього середовища і отримане при усереднених параметрах, може мати різницю до 500%.

**Ключові слова.** стиснутий водень, балон, коефіцієнт тепловіддачі.

### ANALYTICAL DETERMINATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN CYLINDERS HYDROGEN

*Yu.P. Klyuchka*

The analytical dependence of the coefficient of heat transfer in a cylinder with hydrogen from the geometrical parameters of the cylinder, the density of hydrogen, the temperature of the hydrogen and the cylinder wall. It is shown that the greatest influence on the value of the coefficient of heat transfer has a temperature difference and the density of hydrogen, while the value of the radius of the cylinder has no significant effect. It was determined that the value of heat transfer coefficient obtained by taking into account its dependence on the characteristics of the hydrogen cylinder and the ambient temperature and obtained by averaging the parameters can be the difference to 500%.

**Key words.** the compressed hydrogen, gas cylinder, heat transfer coefficient.

**Ключка Юрий Павлович** – канд. техн. наук, с.н.с., докторант кафедры физико-математических дисциплин, Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков, Украина, e-mail: [arbu@rambler.ru](mailto:arbu@rambler.ru).