

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕНЕРАТОРАХ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ГИДРОРЕАГИРУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

*О.В. Кравченко, канд. техн. наук,*

*Институт проблем машиностроения НАН Украины,*

*В.Б. Пода,*

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», г. Харьков, Украина*

Использование для получения водорода высокоэнергетичных гидрореагирующих веществ (ГРВ) на основе Li, Na, NaH, Al, которые обладают большой скоростью реакции с водой, жидкими кислотами и щелочами, сталкивается с проблемой высокого уровня тепловыделения в процессе реакции этих веществ с жидким реагентом. Это в свою очередь требует изучения теплового состояния генераторов, в которых проводится данная реакция, и энтальпии генерируемого водорода.

Рядом авторов [1, 2] и др. изучался процесс тепловыделения различных гидрореагирующих веществ. Однако эти исследования проводились с малыми образцами твердых реагентов (размерами не более 25÷60 мм), обладающих достаточно низкими скоростями газообразования и низким уровнем тепловыделения, в условиях больших объемов жидкого реагента. Вопросы влияния давления на параметры теплофизических процессов и их изменения в процессе реакции ГРВ при этом не рассматривались.

Задачей исследования являлось экспериментальное изучение температур и коэффициентов теплоотдачи от реакционной поверхности ГРВ к генерируемому водороду в генераторах открытого типа с нижней подачей воды [3], разрабатываемых для систем хранения и подачи водорода в энергоустановки и системы плавучести подводных транспортных средств.

Характерной особенностью работы генераторов с нижней подачей жидкого реагента и с зарядом ГРВ, выполненным в виде вертикальных столбцов, является высокая степень газосодержания жидкого реагента у поверхности столбца (рис. 1), которая увеличивается с увеличением высоты столбца и с уменьшением

зазора между поверхностью столбца и ограничивающими его стенками генератора.



Рис. 1. Общий вид газожидкостной эмульсии у поверхности столбца ГРВ

В режимах частичного затопления столбца ГРВ газожидкостная эмульсия в нижних частях столбца имеет вид барботажного слоя, с увеличением высоты постепенно переходящего в слой ячеистой, а затем подвижной пены и брызг. Кроме того, экзотермический характер реакции на поверхности ГРВ, тем более высокоэнергетичных, приводит к тому, что в пузырьках генерируемого водорода содержится достаточно большое количество паров жидкого реагента, которые, наряду с каплями жидкости, в общем случае будут вызывать дополнительную генерацию, а значит и тепловыделение на поверхности верхних слоев столбцов, не находящихся в контакте с жидкостью.

Таким образом, тепловые параметры процесса генерации водорода в рассматриваемых генераторах в полной мере будут зависеть от характеристик газожидкостного слоя у поверхности столбцов ГРВ. В связи с этим основными параметрами, влияющими на тепловыделение столбцов ГРВ, были выбраны: высо-

та столбца; величина свободного пространства или зазора между поверхностью столбца и стенкой генератора; уровень затопления столбцов ГРВ водой, оцениваемый по величине площади проходного сечения устройства, регулирующего расход водорода; давление и время работы.

В качестве физической модели генераторов водорода открытого типа был выбран одностолбцовый генератор, представляющий собой цилиндр с теплоизолированной внутренней стенкой и открытым нижним дном, в верхней части которого располагалось устройство регулирования расхода водорода и уровня затопления столбца ГРВ водой.

Столбец ГРВ (высотой 518÷543 мм) набирался на центральном стержне-держателе из отдельных цилиндрических элементов наружным диаметром 46 мм с центральным отверстием 11 мм, которые изготавливались прессованием из порошков алюминия и гидрида натрия.

С целью изучения влияния на теплофизические параметры зазора между поверхностью столбца ГРВ и внутренней стенкой генератора, эксперименты проводились на моделях генераторов различных диаметров в диапазоне 80÷50 мм, а величина указанного зазора оценивалась с помощью коэффициента загрузки сечения генератора  $k_s$ , представляющего собой отношение площади поперечного сечения столбца к площади поперечного сечения генератора по внутреннему его диаметру.

Методика экспериментов предусматривала измерение температур поверхности столбца ГРВ вдоль его высоты, температур газожидкостной эмульсии на уровнях термометрирования поверхности столбца и температуры генерируемого водорода на выходе из модели генератора (рис. 2).

Экспериментальные исследования проводились на стендовых установках, представляющих собой резервуары высокого давления, заполняемые водой, в объеме которых размещались исследуемые модели генераторов.

В связи с многопараметричностью задачи, при проведении экспериментов и обработке их результа-

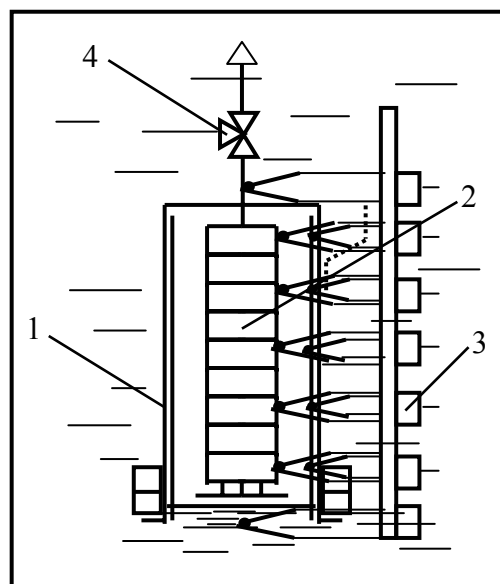


Рис. 2. Схема термометрирования модели генератора:

- 1 модель генератора;
- 2 столбец ГРВ;
- 3 термопарная стойка;
- 4 регулирующее устройство.

тов были использованы методы оптимального математического планирования, которые позволили построить регрессионные модели для температур поверхности заряда и генерируемого водорода и коэффициента теплоотдачи от поверхности ГРВ к водороду в виде полиномов второй степени, а именно:

$$\begin{aligned} \bar{T}_S = & 0,232 - 1,227k_s + 0,045\bar{p} + 0,795\bar{\tau} + \\ & + 2,177\bar{H} + 2,126\bar{s} + 0,992k_s^2 - 4 \cdot 10^{-4} \bar{p}^2 - \\ & - 1,3\bar{\tau}^2 - 2,075\bar{H}^2 - 2,107\bar{s}^2 - 0,024k_s\bar{p} + \\ & + 0,378k_s\bar{\tau} + 0,198k_s\bar{H} + 0,758k_s\bar{s} - \\ & - 0,036\bar{p}\bar{\tau} - 0,033\bar{p}\bar{H} + 0,040\bar{p}\bar{s} + 0,474\bar{\tau}\bar{H} - \\ & - 0,144\bar{\tau}\bar{s} + 0,216\bar{H}\bar{s}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \bar{T}_{H_2} = & 0,893 + 0,609k_s + 4,258 \cdot 10^{-3} \bar{p} + \\ & + 0,221\bar{\tau} + 1,108\bar{s} + 0,268k_s^2 - \\ & - 9,167 \cdot 10^{-6} \bar{p}^2 - 0,268\bar{\tau}^2 - 0,676\bar{s}^2 - \\ & - 0,127\bar{\tau}\bar{s}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{H_2} = & 0,168 + 0,724k_s + \\ & + 0,653 \cdot 10^{-3} \bar{p} - 0,150\bar{\tau} - 0,235\bar{s} + \\ & + 0,077k_s^2 - 1,602 \cdot 10^{-6} \bar{p}^2 - 0,217\bar{\tau}^2 + \\ & + 1,173\bar{s}^2 - 0,179k_s\bar{\tau} + 0,203k_s\bar{s} + \\ & + 0,131 \cdot 10^{-3} \bar{p}\bar{s} - 0,153\bar{\tau}\bar{s}. \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\bar{T}_s = \frac{T_s}{T_{s0}}$  – безразмерная температура поверхности столбца ГРВ;

$T_s, T_{s0}$  – температуры соответственно поверхности столбца и поверхности небольших образцов ГРВ, реагируемых в неограниченном объеме воды, имеющей температуру 293 К;

$\bar{p}$  – отношение величины давления в генераторе к нормальному атмосферному давлению;

$$\bar{H} = \frac{H}{H_{30}} \text{ – безразмерная высота столбца;}$$

$H, H_{30}$  – соответственно высота столбца, на уровне которой определяется температура  $T_s$  его поверхности, и начальная высота столбца;

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_p \Sigma} \text{ – безразмерное время;}$$

$\tau, \tau_p \Sigma$  – соответственно текущее время работы генератора и полное время работы генератора на данном режиме;

$$\bar{s} = \frac{s}{s_{\max}} \text{ – безразмерная величина площади расходного сечения регулирующего устройства;}$$

$s, s_{\max}$  – площади расходного сечения регулирующего устройства соответственно на данном режиме частичного затопления столбца ГРВ и на режиме полного его затопления;

$\alpha_{H_2}, \alpha_0$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно от поверхности столбца ГРВ к водороду и от поверхности небольших образцов ГРВ в воду при их реакции в неограниченном объеме воды, имеющей температуру 293 К.

Анализ результатов экспериментов и полученных эмпирических зависимостей (1 – 3) позволил установить следующее.

Температура поверхности столбца  $\bar{T}_s$  увеличивается с ростом высоты столбца и имеет максимум на уровне подвижной пены с последующим уменьшением. Это свидетельствует о том, что на участке роста температуры теплопроводность газожидкостного слоя у поверхности столбца вследствие увеличения его газосодержания снижается, причем более интенсивно, чем падение скорости газовыделения и связанное с ним тепловыделение с поверхности. В дальнейшем интенсивность снижения скорости газовыделения становится столь значительной, что это приводит к падению температуры поверхности верхних слоев столбца, не контактирующих с водой.

Подобный характер изменения  $\bar{T}_s$  на фиксированных уровнях с наличием максимума кривых наблюдается также в процессе работы генератора и с изменением площади проходного сечения  $\bar{s}$  регулирующего устройства, что вызвано перемещением вдоль столбца газожидкостного слоя с увеличением  $\bar{\tau}$  и  $\bar{s}$ .

Кривые изменения  $\bar{T}_{H_2}(\bar{s})$  также имеют максимумы в районе  $\bar{s} = 0,55 \div 0,62$ , в то время как коэффициент теплоотдачи от поверхности столбца к водороду с увеличением  $\bar{s}$  растет по зависимости, близкой к параболической. Это вызвано прежде всего тем, что с увеличением  $\bar{s}$  растет уровень затопления столбца заряда и, соответственно, расход водорода, высота пены и тепловыделение с поверхности столбца. При значениях же  $\bar{s} > 0,6 \div 0,62$  величина поверхности столбца, работающая в барботажном слое начинает превышать величину поверхности, работающей в пенном слое, что приводит к более интенсивному съему тепла от поверхности столбца в увеличивающийся объем воды в генераторе, снижению средней по всей высоте температуры поверхности столбца  $\bar{T}_{scp}$  и генерируемого ею водорода. При этом разность температур  $(\bar{T}_{scp} - \bar{T}_{H_2})$  с увеличением  $\bar{s}$  уменьшается, вызывая интенсивный рост  $\bar{\alpha}_{H_2}$ .

В процессе работы генератора температура генерируемого водорода изменяется незначительно в сто-

рону увеличения, в то время как  $\bar{\alpha}_{H_2}$  с течением времени падает вследствие увеличивающейся доли тепла, отдаваемой в воду, масса которой в генераторе, по мере его работы, возрастает.

Изменение коэффициента загрузки сечения генератора  $k_s$  в сторону его увеличения или уменьшения зазора между поверхностью столбца ГРВ и стенками генератора приводит к росту температуры поверхности столбца на всех его уровнях, к увеличению теплоотдачи к генерируемому водороду и, как следствие, к увеличению его температуры. Основной причиной этого следует считать то, что с увеличением  $k_s$  растет высота газожидкостного слоя, а значит, содержание жидкого реагента на одном и том же уровне столбца, что вызывает увеличение скорости газовыделения и тепловыделения на этом уровне. Относительное газосодержание при этом на каждом из уровней также возрастает.

Увеличение давления в системе вызывает рост температуры поверхности всех уровней столбца, что связано, по всей вероятности, с повышением плотности водяного пара, а значит, и влажности генерируемого водорода, а также с ростом диаметра отрывного пузырька водорода [4]. Как следствие этого, увеличивается газовыделение с поверхности столбца при ухудшающейся теплопроводности газожидкостного слоя. При этом теплоотдача к генерируемому водороду от поверхности столбца по той же причине также возрастает, приводя к заметному повышению температуры водорода.

Характер однопараметрических кривых  $\bar{T}_s(\bar{p})$ ,  $\bar{T}_{H_2}(\bar{p})$  и  $\bar{\alpha}_{H_2}(\bar{p})$  близок к логарифмической зависимости.

Проведенные исследования процессов теплообмена в одностолбцовых моделях генераторов водорода с гидрореагирующими веществами, заряд из которых выполнен в виде вертикального цилиндрического столбца и с нижней подачей воды позволили выявить зависимости изменения основных параметров этого

процесса от конструктивных параметров генераторов, давления и в процессе работы генераторов.

Результаты исследований могут быть распространены на многостолбцовые генераторы с целью расчета их теплового состояния и определения энтальпии генерируемого водорода, в том числе на генераторы, работающие на других жидких реагентах и использующих принцип работы аппарата Киппа.

### Литература

1. Новиков С.П., Озеров Е.С. Теплообмен при химическом взаимодействии твердого тела с жидкостью // Теплофизика высоких температур.- 1983.- Т. 21, № 2.- С. 326-329.
2. Трошенькин В.Б., Ткач Г.А., Трошенькин Б.А. Получение водорода из воды с использованием сплава ферросиликоалюминия.- Харьков, 1996.- 28 с. (Препр. № 396 / НАН Украины. Ин-т проблем машиностроения).
3. Пода В.Б., Кривцова В.И., Кузьмин Д.В. Глубоководные генераторы водорода на гидрореагирующих веществах // Пробл. Машиностроения.- 1998.- Т. 2, № 3 – 4.- С. 146-149.
4. Гумницкий Я.М. Химическое кипение в условиях свободной конвекции // Инж.-физ. журнал.- 1985.- Т. 48, № 5.- С. 788-792.

*Поступила в редакцию 02.06.03*

**Рецензенты** д-р техн. наук, зав. каф., проф. А.В. Амброжевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков; канд. техн. наук, профессор В.М. Кошельник, НТУ «ХПИ», г. Харьков.