

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 гидроксида 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-

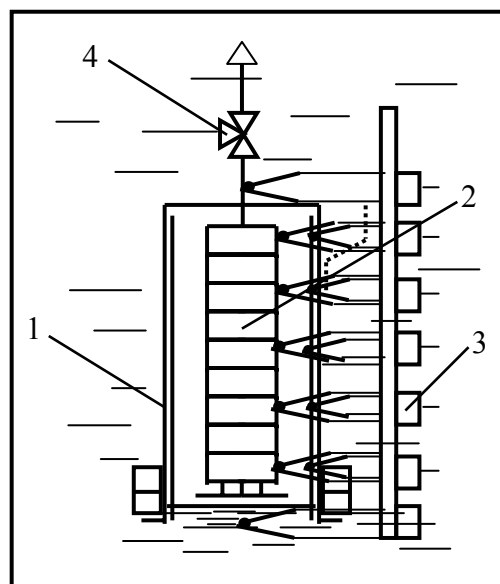


Рис. 2. Схема термометрирования модели генератора:

- 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;

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

$$\bar{\alpha}_{H_2} = \frac{\alpha_{H_2}}{\alpha_0} \text{ – безразмерный коэффициент теплоотдачи от поверхности столбца ГРВ к генерируемому водороду;}$$

α_{H_2}, α_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.

α_{H_2}, α_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 $\bar{T}_{s_{cp}}$ и генерируемого ею водорода. При этом разность температур $(\bar{T}_{s_{cp}} - \bar{T}_{H_2})$ 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 $\bar{\alpha}_{\text{H}_2}$ 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 $\bar{T}_s(\bar{p})$, $\bar{T}_{\text{H}_2}(\bar{p})$ и $\bar{\alpha}_{\text{H}_2}(\bar{p})$ 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.