

АВТОНОМНЫЙ ГЕНЕРАТОР ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ХИМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ВОДЫ АЛЮМИНИЕМ

В.К. Милинчук, Э.Р. Клишпонт, В.И. Белозеров

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ.

249040, г. Обнинск, Калужская область, Студгородок, 1

Р

Разработан автономный генератор водорода (АГВ) на основе химического разложения воды в гетерогенных композициях, содержащих высокодисперсный порошок алюминия и кристаллогидраты метасиликата натрия. Исследованы кинетические закономерности генерации водорода в зависимости от констант скорости активации и окисления алюминия, концентрации алюминия и кислорода. В кинетике накопления водорода величина индукционного периода определяется концентрацией кислорода. Обсуждаются конструкция, подбор водорода и производительность АГВ. Доступность и низкая стоимость химических реагентов отечественного производства позволяют рассматривать АГВ в качестве перспективного источника водорода для различных потребителей, в том числе и для ядерно-энергетических установок (ЯЭУ).

Ключевые слова: водород, вода, алюминий, оксид алюминия, автономный генератор водорода.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям генерации водорода при взаимодействии порошков металлов и сплавов, особенно, алюминия с водой. Решающую роль в процессе играют свойства оксидов металлов, образующих поверхностную пленку. Высокая химическая стойкость алюминия по отношению к воде и водяному пару обусловлена наличием поверхностных пленок оксида алюминия Al_2O_3 . Чтобы активировать алюминий к взаимодействию с водой, необходимо удалить с поверхности оксидную пленку. Для активации алюминия применяются различные способы, например, обработка гидроксидом натрия, высокими температурой и давлением, галлий-индиевыми сплавами, которые, однако, являются экологически опасными, сложными и дорогостоящими [1 – 5]. На основании исследований кинетики и механизма реакций в гидрореакционных гетерогенных композициях, содержащих алюминий и кремний или кальцийсодержащие соединения в качестве активаторов [6 – 8], разработаны способы получения водорода, защищенные патентами РФ [9, 10].

Для практического применения желательно производить водород непосредственно на месте потребления, что существенно снижает затраты на хранение, транспортировку и создает удобства пользователю [2, 11]. Это достигается использованием автономных генераторов водорода. В данной статье приведено описание автономного генератора водорода (АГВ), защищенного патентом РФ [12], рассмотрены ки-

нетические закономерности генерации водорода с учетом состава гетерогенных композиций и окружающей среды, а также некоторые вопросы управления процессом генерации водорода АГВ.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Генератор водорода состоит из двух металлических камер в форме цилиндров, которые сочленяются между собой резьбовым соединением с резиновым уплотнением (рис.1).

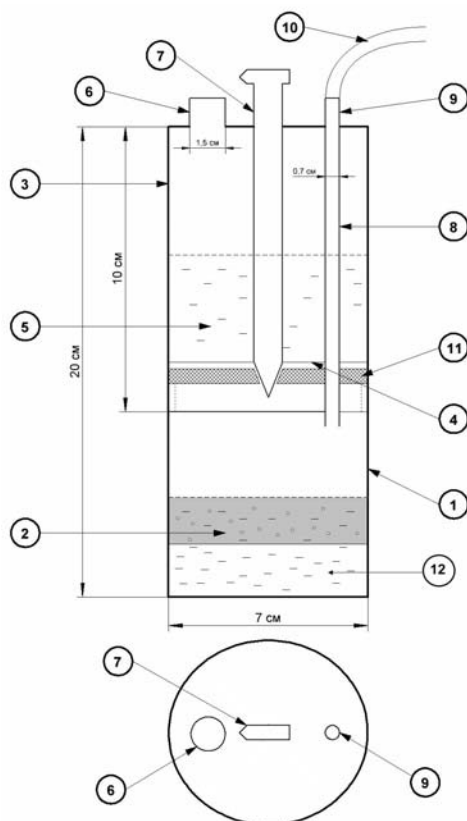


Рис. 1. Схема макета автономного генератора водорода: 1 – нижняя реакционная камера; 2, 12 – гидрореакционная гетерогенная композиция; 3 – верхняя камера; 4 – металлическое дно верхней камеры; 5 – водный раствор активатора; 6 – окно для заливки раствора; 7 – регулятор подачи водного раствора активатора в реакционную камеру; 8 – трубка для выпуска водорода из нижней камеры; 9 – обечайка; 10 – гибкая трубка для вывода водорода; 11 – уплотнительное кольцо

В нижнюю реакционную камеру 1 помещается гетерогенная композиция 2; в верхнюю камеру 3 с металлическим дном 4 заливается водный раствор кристаллогидрата метасиликата натрия $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, который является активатором алюминия; водный раствор активатора из верхней камеры в нижнюю подается с помощью резьбового регулятора подачи раствора 7, который представляет собой стержень с конусным окончанием, позволяющий поставлять нужный объем водного раствора с заданной скоростью (см. рис. 1). В верхнюю камеру водный раствор активатора заливается через окно 6, расположенное на крышке камеры. Скорость подачи водного раствора из верхней камеры в нижнюю регулируется указателем номеров сегмента 12, индикация которых нанесена на поверхность крышки верхней камеры. Выпуск генерируемого композицией водорода из нижней камеры производится че-

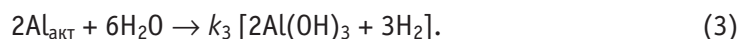
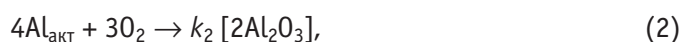
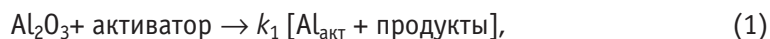
рез металлическую трубку 8, которая через обечайку 9 присоединяется к гибкой резиновой трубке 10, соединенной с приемником водорода.

Работа АГВ протекает по следующей схеме. В нижнюю реакционную камеру 1 помещается гетерогенная композиция, содержащая алюминий в виде микродисперсного порошка и воду 12. Может быть использована вода различного химического состава – дистиллированная, минерализованная, сточная. Верхняя камера 3 через заливочное окно 6 заполняется водным раствором кристаллогидрата метасиликата натрия $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 5. Запуск генератора и производство водорода осуществляются путем подачи определенного объема водного раствора активатора в камеру 1 с помощью резьбового регулятора подачи раствора 7 с определенной скоростью (мл/мин). Путем изменения химического состава гетерогенной композиции, концентрации активатора в водном растворе, скорости подачи раствора в реакционную камеру 1 регулируется скорость генерации водорода, температура, продолжительность генерации (мин, ч) и производительность генератора водорода (л/ч). Работа генератора характеризуется быстрым запуском в рабочий режим (в течение нескольких минут) и легкостью управления скоростью генерации водорода. АГВ работает без внешнего источника энергии в автономном режиме, экологически безопасен, портативен, надежен и прост в эксплуатации.

Исследования кинетических закономерностей накопления водорода с использованием АГВ проведены на композициях, содержащих алюминиевую пудру (ГОСТ 5494-95, марка ПАП-2) с размерами частиц 25 – 50 мкм, толщиной 0.25 – 0.50 мкм, поверхностью 1.6 м²/г и дистиллированную воду. Водный раствор кристаллогидрата метасиликата натрия $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ подается в реакционную камеру 1 с определенной скоростью с помощью резьбового регулятора. Реакции протекают при температуре не выше 80°C в камере объемом 500 мл. АГВ позволяет получать теоретически предельный выход чистого водорода (0.12 кг на 1 кг алюминия) со скоростью от 0.01 до 1.5 л/мин, производительностью от 0.01 до 0.1 м³/ч и длительностью генерации водорода от 0.1 до 6 ч. Методом газовой хроматографии определен состав выделяющегося газа: содержание водорода 98%, диоксида углерода ~ 0.03 %, оксида углерода ~ $5 \cdot 10^{-5}$ %, т.е. АГВ генерирует чистый водород без примесей парникового газа CO_2 и оксида углерода CO , отравляющих платиновые и палладиевые катализаторы низкотемпературных топливных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химические процессы в гидрореакционных гетерогенных композициях, содержащих алюминиевую пудру и в качестве активатора кристаллогидрат метасиликата натрия, протекают в присутствии кислорода, который находится в газовой фазе реакционного сосуда или растворен в воде. Поэтому необходимо учитывать протекание реакции окисления алюминия кислородом. С учетом этой реакции процессы в композиции можно описать следующей упрощенной схемой:



Активатор разрушает и удаляет поверхностную оксидную пленку и переводит алюминий в активированное состояние $\text{Al}_{\text{акт}}$ с константой скорости k_1 (1). В присутствии кислорода воздуха активированная поверхность алюминия окисляется с константой скорости k_2 с образованием оксида Al_2O_3 (2). Одновременно вода, имеющаяся в композиции, с константой скорости k_3 взаимодействует с активированной

поверхностью алюминия с образованием водорода и гидроксида алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$ (3). Толщина слоя оксида алюминия много меньше толщины частиц алюминия. Такое начальное состояние гетерогенной композиции позволяет определить характер кинетических закономерностей накопления водорода в зависимости от соотношения констант скоростей активации и окисления поверхности алюминия.

Процесс накопления водорода можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$d[S]/dt = -k_1 \cdot [S] + k_2 \cdot [A] \cdot [\text{O}_2], \quad (4)$$

$$d[A]/dt = k_1 \cdot [S] - k_2 \cdot [A] \cdot [\text{O}_2], \quad (5)$$

$$d[\text{O}_2]/dt = -k_2 \cdot [A] \cdot [\text{O}_2], \quad (6)$$

$$d[\text{H}_2]/dt = k_3 \cdot [A], \quad (7)$$

где $[S]$ – площадь исходной поверхности алюминия; $[A]$ – площадь активированной поверхности алюминия; $[\text{O}_2]$ – концентрация кислорода; $[\text{H}_2]$ – концентрация водорода.

Так как получить аналитическое решение этой системы уравнений не представляется возможным, то она решалась численно с использованием пакета Mathcad-14. При решении системы уравнений варьировались отношения констант скоростей реакций k_1 и k_2 , начальная концентрация кислорода, количество и поверхность частиц алюминия. Из анализа полученных расчетных кинетических кривых, характеризующих изменения поверхности, покрытой оксидом алюминия, и активированной поверхности алюминия, следует, что процесс накопления водорода существенно зависит от соотношения в системе концентраций оксида алюминия и кислорода ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{O}_2$).

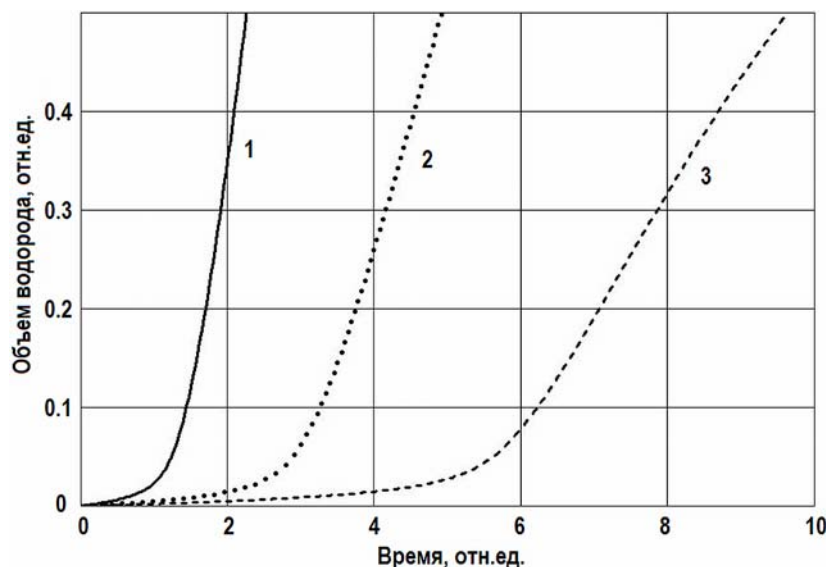


Рис. 2. Кинетические кривые накопления водорода в композициях, содержащих кислород, в зависимости от массы алюминия: 1, 2 и 3 соответствуют массам алюминия 5, 2 и 1 (отн. ед.)

Рассмотрим кинетические закономерности процесса накопления водорода при постоянном соотношении констант скорости активации и окисления, постоянном количестве кислорода и изменении количества алюминия. На рисунке 2 приведены расчетные кинетические кривые накопления водорода в зависимости от времени для композиций, содержащих одинаковое количество кислорода, но разное количество

частиц алюминия одинакового размера. На начальном участке кинетических кривых видно наличие временного интервала, в течение которого накопление водорода в композиции не происходит. Этот временной участок следует определить как индукционный период в процессе накопления водорода. Отметим, что с увеличением количества алюминия в композиции величина индукционного периода сокращается, а скорость накопления водорода увеличивается.

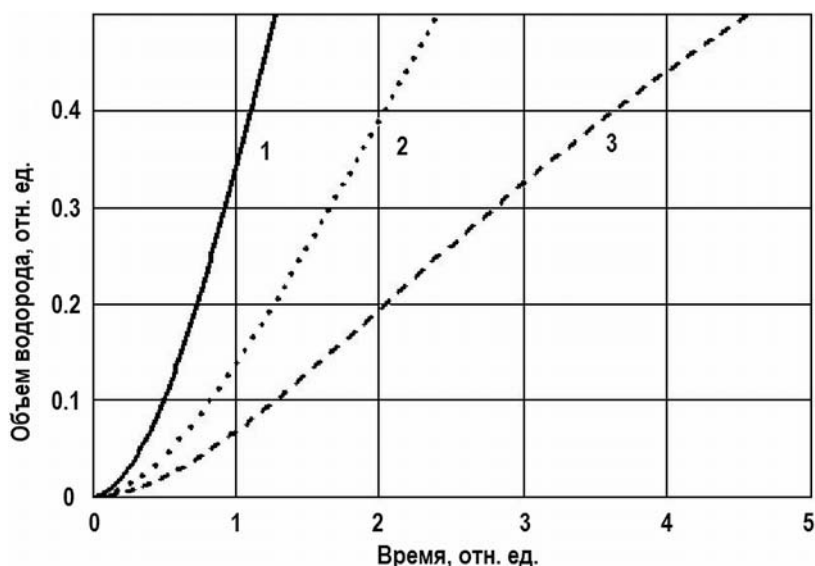


Рис. 3. Кинетические кривые накопления водорода в зависимости от массы алюминия в отсутствие кислорода: 1, 2 и 3 соответствуют массам алюминия 5, 2 и 1 (отн. ед.)

На рисунке 3 сопоставлены расчетные кинетические кривые накопления водорода, полученные при отсутствии в композициях кислорода и различном количестве алюминия. Видно, что на кинетических кривых индукционный период практически исчезает, а скорость накопления водорода на линейном участке увеличивается пропорционально массе алюминия. Сравнение кривых накопления водорода на рис. 2, 3 показывает, что на кинетику накопления водорода существенное влияние оказывает присутствие в композициях кислорода, что проявляется в существовании промежутка времени, в течение которого водород не образуется. В результате окисления поверхности и образования оксида алюминия исчезает активированный алюминий.

Длительность индукционного периода возрастает пропорционально количеству кислорода, что видно при сравнении кинетических кривых в зависимости от количества кислорода и одинаковой массе алюминия (рис. 4). Характер кинетических закономерностей выделения водорода в присутствии кислорода существенно зависит от соотношения скоростей реакций окисления и активации поверхности алюминия — с увеличением соотношения растет индукционный период (см. рис. 4). При выборе соотношения констант скорости активации и окисления следует принимать во внимание, что константа скорости присоединения кислорода к алюминию существенно выше константы скорости активации алюминия ($k_2 \gg k_1$).

Выше было проведено рассмотрение начальной стадии активации алюминия в предположении сравнительно небольшого количества кислорода в композиции. В условиях содержания в композиции большой концентрации кислорода в ходе процесса происходит образование большого количества оксида алюминия,

соизмеримого с массой частиц алюминия. В этом случае в результате многократного повторяющегося цикла реакций активации алюминия (удаления Al_2O_3) и повторного образования оксида алюминия при взаимодействии с кислородом происходит постепенное уменьшение размера и массы частиц металла, что приводит к его исчезновению в композиции и прекращению образования водорода. В результате при окончании линейного участка накопления водорода происходит уменьшению скорости накопления, а общий объем выделившегося водорода остается без изменения. На кинетических кривых накопления водорода это проявляется в наличии после линейного стабильного участка, на котором увеличение концентрации водорода не происходит.

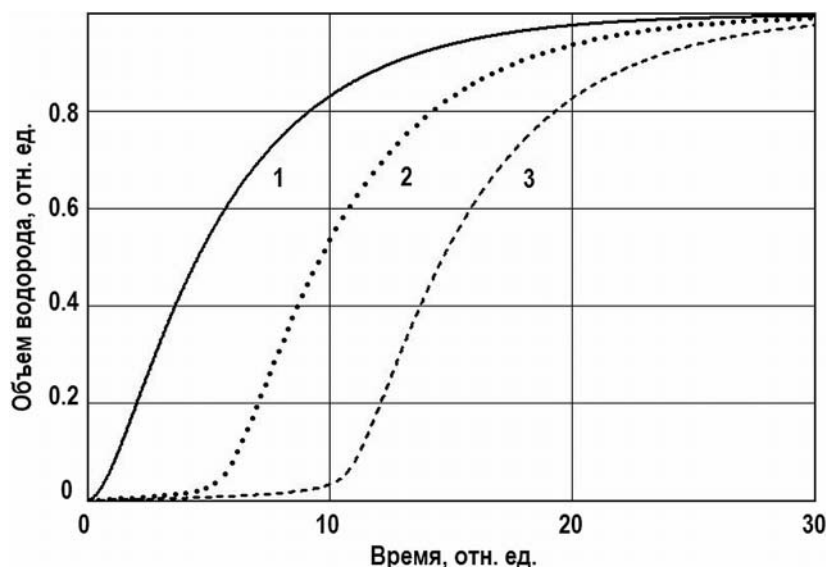


Рис. 4. Кинетические кривые накопления водорода в зависимости от количества кислорода: 1, 2 и 3 соответствуют количеству кислорода 0.1, 5 и 10 (отн. ед.)

Расчетные кинетические закономерности накопления водорода в гетерогенных композициях были сопоставлены с экспериментальными результатами, полученными при исследовании процесса генерации водорода АГВ. Основными параметрами, определяющими функционирование генератора водорода, являются масса алюминия, концентрация активатора в водном растворе, скорость подачи водного раствора активатора в реакционный объем, количество воды и температура.

При анализе экспериментальных данных следует принимать во внимание, что объем камеры, в которой протекает реакция, составляет 500 мл, и в ней содержится примерно $3 \cdot 10^{21}$ молекул кислорода. Согласно оценке, для окисления поверхности 1 г алюминиевой пудры с размерами частиц от 25 до 50 мкм и поверхностью $1.6 \text{ м}^2/\text{г}$ потребуется $1.4 \cdot 10^{18}$ молекул кислорода, т.е. в реакторе содержится достаточное количество кислорода для создания примерно 35-ти слоев оксида алюминия. Это значит, что наряду с реакцией, приводящей к активации алюминия, в композиции эффективно протекает реакция окисления активированной поверхности алюминия. Поскольку при активации алюминия водород не выделяется, то цепная реакция активация - окисление приводит к уменьшению выхода водорода по сравнению с расчетным значением.

Рассмотрим зависимость объема выделившегося водорода от массы алюминия при заданной концентрации раствора активатора, приготовленного на дистиллированной воде, и постоянной скорости подачи раствора в реактор АГВ.

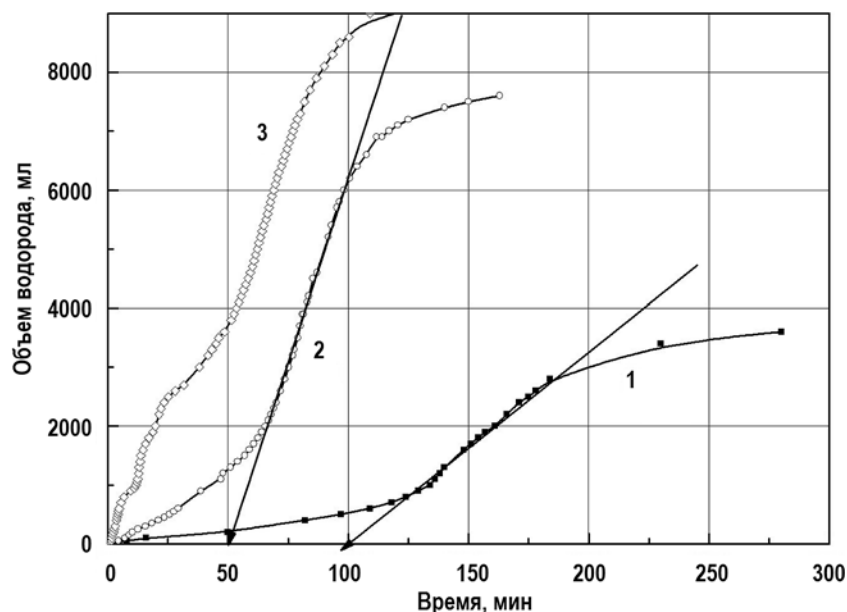


Рис. 5. Кинетические кривые накопления водорода в зависимости от массы алюминия: 1, 2 и 3 соответствуют 3, 6 и 7.5 г. Скорость подачи 20%-го водного раствора кристаллогидрата метасиликата натрия 2 мл/мин

На рисунке 5 видно, что индукционный период накопления водорода увеличивается с уменьшением массы алюминия в соответствии с предложенной теоретической моделью. При постоянной массе алюминия влияние изменения концентрации кислорода на кинетику накопления водорода проявляется в увеличении скорости окисления поверхности, изменении соотношения скоростей окисления и активации и удлинении индукционного периода.

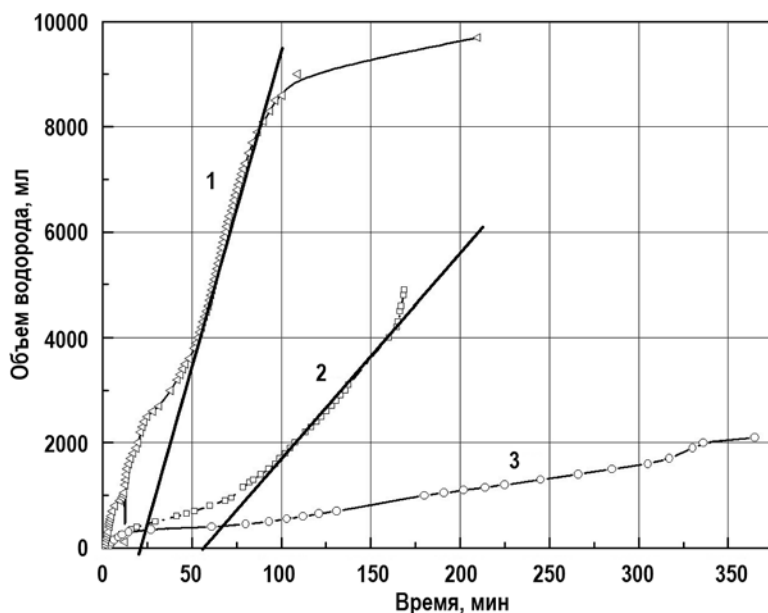


Рис. 6. Кинетические кривые накопления водорода в зависимости от концентрации кристаллогидрата метасиликата натрия в водном растворе: 1, 2 и 3 соответствуют 20, 10 и 5%. Скорость подачи 20%-го водного раствора кристаллогидрата метасиликата натрия 2 мл/мин

На АГВ была исследована зависимость объема выделившегося водорода от концентрации активатора в водном растворе при заданной массе алюминия и постоянной скорости подачи водного раствора активатора в реактор (рис. 6). На кинетических кривых можно выделить индукционный период, участок линейного и финального накопления водорода. Кривая 1 соответствует 20%-ой концентрации активатора в растворе при скорости подачи раствора 2 мл/мин и массе алюминия 7.5 г. На кривой 2, соответствующей 10%-ой концентрации кристаллогидрата метасиликата натрия в растворе, более отчетливо, чем на кривой 1, виден индукционный период. Кривая 3 (раствор с 5% кристаллогидрата метасиликата натрия) характеризует кинетику накопления водорода только на стадии индукционного периода. Очевидно, что путем варьирования концентрации активатора в растворе можно изменять скорость реакции инициирования и управлять кинетикой процесса генерации водорода.

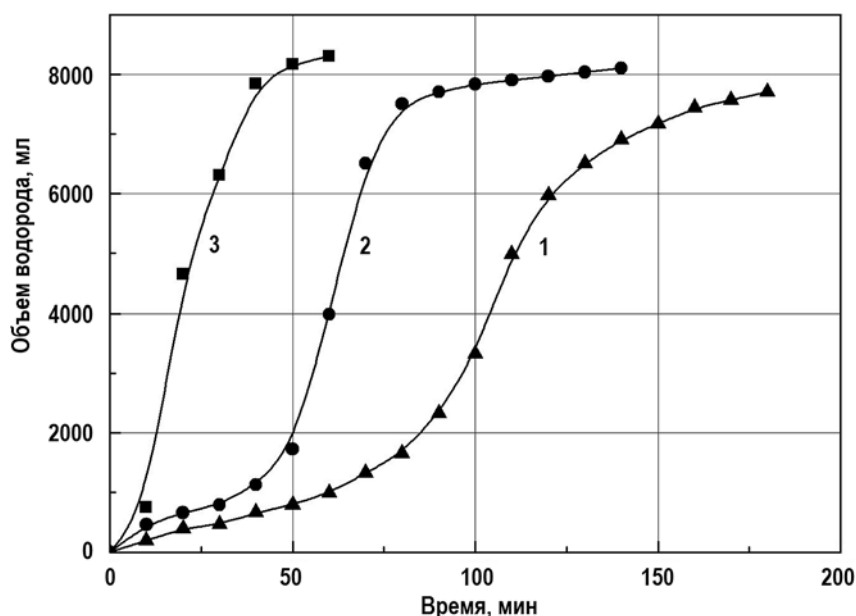


Рис.7. Кинетические кривые накопления водорода в зависимости от скорости подачи 20%-го водного раствора кристаллогидрата метасиликата натрия: 1, 2 и 3 соответствуют скорости подачи 2, 3 и 4 мл/мин. Масса алюминия 6 г

На рисунке 7 представлена зависимость объема выделившегося водорода от скорости подачи водного раствора активатора. Как видно, скорость выделения водорода пропорциональна скорости подачи раствора. Общий объем водорода соответствует теоретическому значению. При скорости подачи раствора 2 мл/мин (кривая 1) и 3 мл/мин (кривая 2) зависимости выхода водорода от времени имеют S-образный характер. Изменением скорости подачи раствора активатора можно влиять на величину индукционного периода и на время достижения предельного выхода водорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный автономный генератор водорода на основе химического разложения воды в гетерогенных композициях, содержащих высокодисперсный порошок алюминия и кристаллогидраты метасиликата натрия, позволяет получить теоретически предельный выход чистого водорода. Все используемые АГВ химические ингредиенты отечественного производства доступны, химически безопасны и могут

храниться при нормальных условиях в течение длительного времени. Предварительные оценки показывают, что технико-экономические параметры технологии получения водорода с использованием алюминия, водных растворов химического активатора и АГВ не уступают другим технологиям получения водорода.

Получение водородного топлива с помощью АГВ имеет ряд технических, экономических, экологических и социальных преимуществ по сравнению с другими способами получения водорода при рассмотрении уровня интеграционных затрат на реализацию всей водородной технологической цепочки: производство, хранение, транспортирование, распределение и конечное потребление. В качестве доступного и быстро запускаемого в эксплуатацию АГВ может применяться на ЯЭУ для независимого от поставщика производства водорода.

Широкая доступность и невысокая стоимость химических реагентов позволяет рассматривать АГВ в качестве компактных источников водорода, которые могут использоваться для питания телекоммуникационных систем, а также индивидуальными потребителями, находящимися вне систем централизованного энергоснабжения, особенно, в удаленных и труднодоступных местностях.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного контракта № 14.740.11.0095.

Литература

1. Шейндлин А.Е., Жук А.З. Концепция алюмоводородной энергетики. // Российский химический журнал. 2006. Т. 1, № 6. С. 105 – 108.
2. Школьников Е.И., Якушко С.А., Тарасова С.А., Пармузина А.В., Илюхин А.С., Шейндлин А.Е. Исследование работы алюмоводородного микрогенератора водорода для компактных источников питания. // Электрохимическая энергетика. 2008. Т. 8, № 2. С. 86 – 91.
3. Баймаков А.Ю., Петрович С. Ю., Липин В.А., Шахмин А.Л., Еремин Е.А. Генерация водорода при взаимодействии порошков металлов и сплавов системы алюминий - магний с водой, с кислотным и щелочным раствором. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2(171) 2013. С. 151 – 157.
4. Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В. Водородная энергетика: прошлое, настоящее, виды на будущее. // Российский химический журнал. 2006. Т. 1, № 6. С. 5 – 18.
5. Назаров Р.С., Куц С.Д., Кравченко О.В., Фокина Э.Э., Тарасов Б.П. Водородгенерирующие материалы для источников водорода гидролизного типа. //Альтернативная энергетика и экология. – ISJAEЕ/ 2010. № 6. С. 26 – 33.
6. Милинчук В.К., Шилина А.С., Ананьева О.А., Куницына Т.Е., Пасевич О.Ф., Ларичева Т.Е. Исследование экологически безопасных, энергосберегающих способов получения водорода химическим разложением воды. //Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». ISJAEЕ. 2012. № 4. С. 49 – 54.
7. Милинчук В.К., Белозеров В.И., Ананьева О.А., Ларичева Т.Е., Куницына Т.Е. Химическое разложение воды на водород в гетерогенных алюминийсодержащих композициях. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2014. № 4. С.32 – 38.
8. Клишпонт Э.Р., Рошкетав Б.М., Милинчук В.К. Кинетика накопления водорода при химическом разложении воды в гетерогенных композициях. //Альтернативная энергетика и экология. – ISJAEЕ. 2012. № 9. – С. 116 – 120.
9. Патент № 2 371 382 РФ. МПК С01В 3/08. Гидрореакционная композиция для получения водорода. / В.К. Милинчук, С.М. Мерков // Бюл. 2009. № 30.
10. Патент № 2 417 157 РФ. МПК С01В 3/08. Гидрореакционная гетерогенная композиция для получения водорода. / В.К. Милинчук, А.С. Шилина // Бюл. 2011. № 12.
11. Милинчук В.К., Клинов Д.А. Водородная энергетика. Учебное пособие. – Обнинск: ИАТЭ, 2008. – 68 с.
12. Патент № 2 510 876 РФ. МПК С01В 3/08. Автономный генератор водорода. / В.К. Милинчук, Б.М. Рошкетав//Бюл. 2014. № 10.

Поступила в редакцию 14.04.2015 г.

Авторы

Милинчук Виктор Константинович, профессор, доктор хим. наук

E-mail: milinchuk@iate.obninsk.ru

Клиншпонт Эдуард Рейнгольдович, доцент, кандидат хим. наук

E-mail: kedward314@gmail.com

Белозеров Владимир Иванович, доцент, кандидат техн. наук

E-mail: v.i.belosero@iate.obninsk.ru

UDC 629.9+544(075)

**STAND-ALONE HYDROGEN GENERATOR
BASED ON THE CHEMICAL DECOMPOSITION OF WATER
BY ALUMINUM**

Milinchuk V. K., Klinshpont E.R., Belosero V.I.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University «MEPhI». 1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

Developing of stand-alone hydrogen generator (AGV) based on the chemical decomposition of water in heterogeneous compositions containing finely dispersed powder aluminum and crystalline sodium metasilicate. The kinetics of accumulation of hydrogen depends on the presence in the reaction medium of oxygen, which is manifested in the presence of an induction period. The nature of the kinetic regularities of hydrogen in the presence of oxygen significantly depends on the ratio of reaction rates, oxidation and activation of the aluminium surface. The design of the AGV and the optimal composition of heterogeneous compositions allow to obtain the theoretically maximum hydrogen yield (0.12 kg per 1 kg of aluminum) at a rate of from 0.01 to 1.5 l/min, at a flow rate of 0.01 to 0.1 m³/h and a duration of generation from 0.1 to 12 hours. AGV in an environmentally safe and energy-saving mode allows to get pure hydrogen fuel hydrogen content 98%, carbon dioxide ~ 0.03 % of carbon monoxide ~ 5·10⁻⁵ %. All chemical ingredients to produce hydrogen by AGV are chemically safe and stored under normal conditions for a long time. The wide availability of chemicals allows to consider designed AGV as lane-looking source of hydrogen for different consumers. Production of hydrogen using AGV has a number of technical, economic, environmental and social advantages compared with other methods of producing hydrogen when considering the level of integration costs for the implementation of all hydrogen technological chain: production, storage, transportation, distribution and final consumption.

Keywords: hydrogen, water, aluminum, aluminum oxide, stand-alone hydrogen generator.

REFERENCES

1. Shejndlin A.E., Zhuk A.Z.. Konceptiya alyumovodorodnoj energetiki. *Rossijskij himicheskij zhurnal*. 2006, v. L, no. 6, pp. 105 – 108 (in Russian).
2. Shkolnikov E. I., Yakushko C. A., Tarasov S. A., Parmuzin A. V., Ilyukhin S. A., Sheindlin A. E. Issledovanie raboty alyumovodnogo mikrogeneratorsa vodoroda dlya kompaktnyh istochnikov pitaniya. *Elektrohimicheskaya energetika*. 2008, v. 8, no. 2, pp. 86 – 91 (in Russian).
3. Bajmakov A.Yu., Petrovich S. Yu., Lipin V.A., Shahmin A.L., Eremin E.A.. Generaciya vodoroda pri vzaimodejstvii poroshkov metallov i splavov sistemy alyuminij - magnijs vodoj, s kislotnym i shhelochnym rastvorom. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-*

Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. 2(171) 2013, pp. 151 – 157 (in Russian).

4. Tarasov B.P., Lotockij M.V. Vodorodnaya energetika: proshloe, nastoyashee, vidy na budushee. *Rossiyskiy himicheskij zhurnal*. 2006, v. L, no. 6, pp. 5 – 18 (in Russian).

5. Nazarov R.S., Kuc S.D., Kravchenko O.V., Fokina E.E., Tarasov B.P. Vodorodgeneriruyuschie materialy dlya istochnikov vodoroda gidroliznogo tipa. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. ISJAE. 2010, no. 6, pp. 26 – 33 (in Russian).

6. Milinchuk V.K., Shilina A.S., Anan'eva O.A., Kunicyna T.E., Pasevich O.F., Laricheva T.E. Issledovanie ekologicheskimi bezopasnykh, energosberegayuschiykh sposobov polucheniya vodoroda himicheskimi razlozheniem vody. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. ISJAE. 2012, no. 4, pp. 49 – 54 (in Russian).

7. Milinchuk V.K., Belozorov V.I., Anan'eva O.A., Laricheva T.E., Kunicyna T.E. Himicheskoe razlozhenie vody na vodorod v geterogennykh alyuminijsoderzhaschiykh kompozitsiyakh. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2014, no. 4, pp. 32 – 38 (in Russian).

8. Klinshpont E.R., Roshektaev B.M., Milinchuk V.K. Kinetika nakopleniya vodoroda pri himicheskoi razlozhenii vody v geterogennykh kompozitsiyakh. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. ISJAE. 2012, no. 9, pp. 116 – 120 (in Russian).

9. Patent no. 2 371 382 RF. MPK S01V 3/08. Hidroreaktsionnaya kompozitsiya dlya polucheniya vodoroda. / Milinchuk V.K., Merkov S.M. Bul. 2009, no. 30 (in Russian).

10. Patent no. 2 417 157 RF. MPK S01V 3/08. Hidroreaktsionnaya geterogennaya kompozitsiya dlya polucheniya vodoroda. / Milinchuk V.K., Shilina A.S. Bul. 2011, no. 12 (in Russian).

11. Milinchuk V.K., Klinov D.A. Vodorodnaya energetika. Uchebnoe posobie. Obninsk. IATE Publ., 2008. 68 p. (in Russian).

12. Patent no. 2 510 876 RF. MPK S01V 3/08. Avtonomnyy generator vodoroda. / Milinchuk V.K., Roshektaev B.M. Bul. 2014, no. 10 (in Russian).

Authors

Milinchuk Victor Konstsntinovich, Professor, Dr. Sci. (Chemistry)

E-mail: milinchuk@iate.obninsk.ru

Klinshpont Edward Reingol'dovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Chemistry)

E-mail: kedward314@gmail.com

Belozorov Vladimir Ivanovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: v.i.beloserov@iate.obninsk.ru