

ХИМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ВОДЫ НА ВОДОРОД В ГЕТЕРОГЕННЫХ АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИЯХ

В.К. Милинчук, В.И. Белозеров, О.А. Ананьева, Т.Е. Ларичева, Т.Е. Куницына

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ.
249040 Калужская область, г. Обнинск, Студгородок, 1.*



Исследованы кинетические закономерности и механизм химического разложения воды на водород в гидрореакционных гетерогенных системах, содержащих алюминий, алюминиевые сплавы и химические соединения (жидкое натриевое стекло или негашеная известь), придающие водному раствору щелочной характер. В основе эндотермического процесса разложения воды на водород в гетерогенных композициях с алюминием и жидким натриевым стеклом лежит гидролиз силикатной соли, реакция гидроксида натрия с поверхностной тонкой пленкой оксида алюминия Al_2O_3 и реакция восстановления водорода из воды активированным алюминием. В композиции алюминий-негашеная известь экзотермический процесс генерации водорода включает в себя удаление защитного оксидного слоя в реакции оксида кальция с оксидом алюминия, образование гидроалюминатов кальция и взаимодействие активированного алюминия с водой. Скорость образования и выход водорода зависят от соотношения констант скорости реакций гашения извести и скорости удаления с поверхности алюминия оксидной пленки. Гетерогенная композиция генерирует водород при условии, чтобы скорость удаления оксидной пленки была больше скорости гашения извести, что достигается оптимальным соотношением количества алюминия, негашеной извести и воды. Предельный выход водорода в композициях, содержащих оптимальное количество металла, жидкого натриевого стекла или негашеной извести, составляет 1.2 л водорода на 1 г алюминия.

Ключевые слова: вода, водород, алюминий, алюминиевые сплавы, оксид алюминия, оксид кальция, жидкое натриевое стекло, негашеная известь.

ВВЕДЕНИЕ

Надежным способом защиты алюминия и его сплавов от коррозии является химическое и электрохимическое оксидирование. Используемые в ядерных энергетических установках конструкционные материалы на основе алюминия и его сплавов покрыты тонкой оксидной пленкой, которая состоит, в основном, из слоя кристаллической γ -модификации оксида алюминия Al_2O_3 в виде плотного барьерного слоя толщиной 1 – 3 нм непосредственно на поверхности металла и внешнего пористого слоя толщиной от 100 до 200 нм [1]. Оксид алюминия устойчив к действию ряда

органических реактивов и некоторых минеральных солей, обладает высокой термической, радиационной стойкостью и в ядерном реакторе при высоких температурах в мощных полях ионизирующих излучений предохраняет чистый металл от прямого контакта с водой и водяным паром. Однако оксид алюминия хорошо растворяется в щелочных растворах, и удаление защитных оксидных покрытий в водных щелочных растворах переводит алюминий в состояние чистого металла, активно взаимодействующего с водой с большим выделением тепла, образованием водорода и твердого продукта [2 – 4].

В неконтролируемых и инцидентных ситуациях в водную среду АЭС могут попадать химические примеси, которые могут разрушить и удалить защитный оксидный слой, перевести металл в активное состояние по отношению к воде, привести к коррозии металла и неуправляемому процессу образования водорода. Поэтому с целью повышения водородной безопасности на АЭС необходимо исследовать химические процессы разложения воды на водород в различных композициях, содержащих реакторные металлы и водные растворы с химическими соединениями, придающих водному раствору щелочной характер.

В статье приведены результаты исследований химического процесса образования водорода в гидрореакционных гетерогенных композициях на основе алюминия и его сплавов, которые входят в состав материалов теплоизоляции и элементов конструкции реактора (для ВВЭР и РБМК) [5]. В качестве возможных неконтролируемых примесей исследованы жидкое натриевое стекло и негашеная известь, которые в нормальных условиях являются химически стабильными соединениями и широко применяются при производстве различных материалов и проведении ремонтных работ, например, жидкое натриевое стекло в качестве добавки вводится в состав бетона, применяемого при строительстве реакторных блоков АЭС [6].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследований были взяты образцы технического алюминия в виде алюминиевой пудры с размерами чешуек 25 – 50 мкм толщиной 0.25 – 0.50 мкм с удельной поверхностью 1.6 м²/г (марка ПАП-2, ГОСТ 13078-81); образцы алюминиевого сплава марки САВ-1; тройная система Al-Mg-Si следующего состава, масс. %: основные компоненты – Mg 0.45–0.90, Si 0.7–1.2, примеси (не более) – Fe 0.2, Zn 0.03, Cu 0.012, Mn 0.012, Ni 0.03, Ti 0.012, Cd 0.0001, В 0.00012, прочие примеси – каждой менее 0.03 в сумме менее 0.07 (ГОСТ 4784-74); образцы алюминиевого сплава АСД-4 (99.3% Al, 0.2% Fe, 0.2 % Si, прочие примеси – в сумме 0.3%). Из сплава САВ-1 изготавливаются каналы кластерного регулирующего органа СУЗ РБМК, конструкционные материалы активной зоны и защитные оболочки твэлов в исследовательских водоохлаждаемых реакторах типа МР, ИРТ, ВВР-Ц, ВВР-М, МИР. Алюминий используется в качестве матрицы сердечника дисперсионных твэлов, в которых содержится двуокись урана и плутония или соединения урана и плутония с алюминием [7].

В качестве химических примесей были исследованы жидкое натриевое стекло и негашеная известь. Использовались образцы жидкого натриевого стекла с силикатными модулями 2.5 и 3.2 и водородным показателем *pH* от 11 до 12 (ГОСТ 13078-81). Для приготовления гидрореакционных гетерогенных композиций использовали негашеную известь с высоким содержанием оксида кальция (содержание CaO 97.5%, марка ЧДА, ГОСТ 867 7-76) и техническую негашеную известь с более низким содержанием оксида кальция (содержание CaO 72%, ГОСТ 9179-77).

Процесс получения водорода включает в себя следующие процедуры [4]. Навески металла, химической добавки и дистиллированной воды, взятые в определенной

пропорции, загружаются в стеклянную колбу объемом 500 мл. Реакционная колба помещается в термостат, снабженный термометром, нагревается до необходимой температуры, при которой процесс идет в управляемом режиме и с удовлетворительной скоростью, и в дальнейшем поддерживается эта температура до окончания процесса образования водорода. Реакционная колба снабжена стеклянной трубкой для отвода через воду в измерительный сосуд образующегося водорода. Установка позволяет исследовать генерацию водорода в температурном диапазоне от комнатной температуры до 90 °С. Мониторинг реакции проводится путем измерения количества выделившегося водорода, поступающего в измерительный сосуд установки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 приведены кривые, описывающие зависимость скорости образования и выхода водорода от состава композиций, состоящих из порошка алюминия, жидкого натриевого стекла и дистиллированной воды в соотношениях 1:1.2:0 (кривая 1), 1:1.2:0.35 (кривая 2), 1:1.2:1.4 (кривая 3) и 1:1.2:2.1 (кривая 4). Как видно, скорость накопления и выход водорода растут нелинейно с увеличением степени разбавления жидкого стекла водой. При разбавлении на ~30 и ~60 % выход водорода увеличивается в ~2.5 и ~4.3 раза соответственно, а при дальнейшем увеличении степени разбавления рост выхода водорода замедляется и достигает предельной величины при степени разбавления ~90 % (кривая 4). Максимальный выход водорода в расчете на 1 г алюминия составляет 0.3, 0.7, 1.0 и 1.2 л/г для композиций 1 – 4 соответственно.

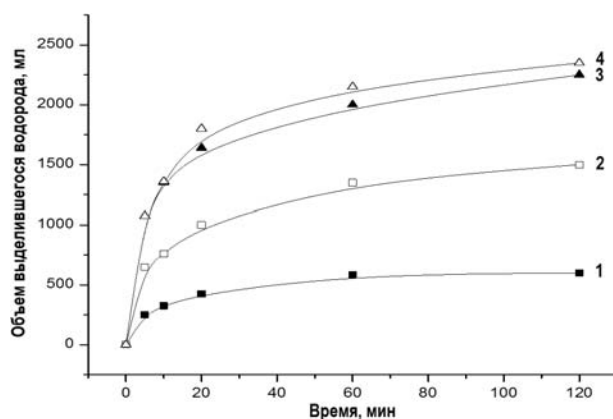


Рис. 1. Накопление водорода в зависимости от соотношения в композиции порошка алюминия, жидкого натриевого стекла и дистиллированной воды: 1 – соотношение (1 : 1.2 : 0); 2 – (1 : 1.2 : 0.35); 3 – (1:1.2:1.4); 4 – (1:1.2 : 2.1). Масса алюминия 2 г, температура 60 °С

В композиции, содержащей водный раствор жидкого стекла (кривая 4), максимальный выход водорода примерно в 4.5 раза больше, чем в композиции, содержащей только жидкое стекло (кривая 1). Это свидетельствует о значительном влиянии добавляемой к жидкому стеклу воды на стадии разложения воды на водород алюминием.

На рисунке 2 представлены кривые, характеризующие зависимость скорости образования и выхода водорода от температуры в интервале от комнатной до 80 °С для композиции, содержащей порошок алюминия и жидкое натриевоое стекло в соотношении 1:1.2. Образование водорода, хотя и с низкой скоростью, начинается при комнатной температуре. При нагревании до 50 °С скорость накопления и выход водорода значительно возрастают, а при 80 °С скорость увеличивается примерно в

десять раз (кривая 5). Температурная зависимость образования водорода свидетельствует об эндотермическом характере процесса, обусловленного высокой вязкостью жидкого стекла.

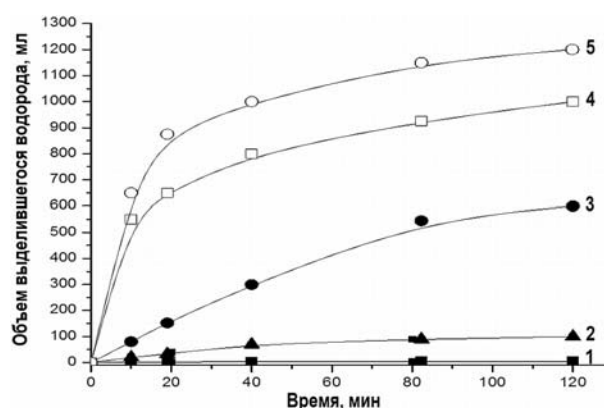


Рис. 2. Накопление водорода в композиции, содержащей порошок алюминия, жидкое натриевое стекло и дистиллированную воду в соотношении 1: 2: 4 в зависимости от температуры: 1 – комнатная температура; 2 – 40 °C; 3 – 50 °C, 4 – 60 °C, 5 – 80 °C. Масса алюминия 1 г.

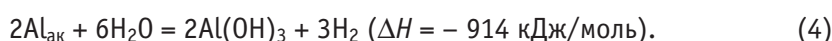
В основе химического процесса разложения воды на водород в гетерогенных щелочных растворах на основе алюминия и жидкого натриевого стекла лежат следующие химические реакции. На первой стадии протекает реакция гидролиза силикатной соли с образованием гидроксида натрия NaOH:



который взаимодействует с пленкой оксида алюминия



и удаляет ее с поверхности с образованием чистого алюминия $\text{Al}_{\text{акт}}$. Активированный алюминий $\text{Al}_{\text{акт}}$ восстанавливает водород из воды по одной из следующих экзотермических реакций:



Исследования накопления водорода в композициях, содержащих в качестве химического активатора алюминия негашеную известь с высоким содержанием оксида кальция или техническую негашеную известь с более низким содержанием оксида кальция, показали, что в разложении воды на водород принимает участие только негашеная известь (оксид кальция CaO). В композициях, содержащих гашеную известь с гидроксидом кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образование водорода не происходит. В качестве иллюстрации на рис. 3 приведены кривые накопления водорода в композициях, содержащих 1 г алюминиевой пудры, 10 мл дистиллированной воды, в зависимости от количества негашеной извести. Видно, что выход водорода достигает теоретически предельной величины ~1200 мл/г Al в течение ~20 мин при наличии в композиции ~2 г негашеной извести. На кинетику накопления водорода существенно влияет количество воды в композиции (рис. 4). Как видно, выход водорода растет с увеличением количества воды и достигает предельной величины 1200 мл/г при наличии в композиции ~20 мл воды, т.е. при превышении количества воды по отношению к количеству алюминия в 20 раз.

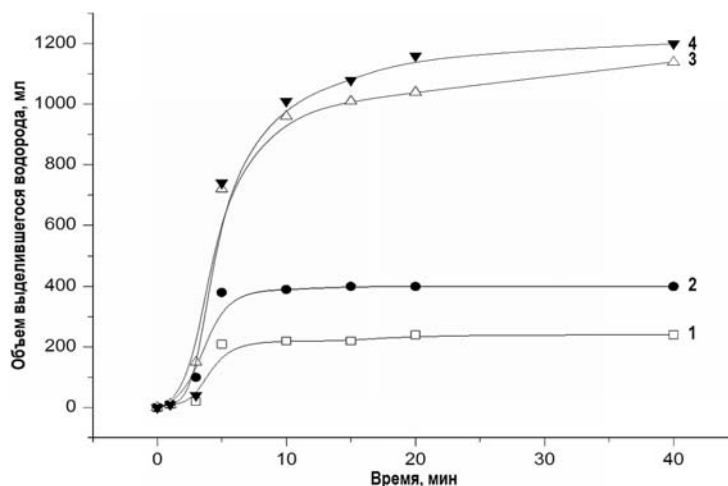


Рис. 3. Накопление водорода в композициях, содержащих 1 г алюминиевой пудры и 10 мл дистиллированной воды, в зависимости от количества технической негашеной извести: 1 – 0.5 г; 2 – 1 г; 3 – 1.5 г; 4 – 2 г. Температура комнатная

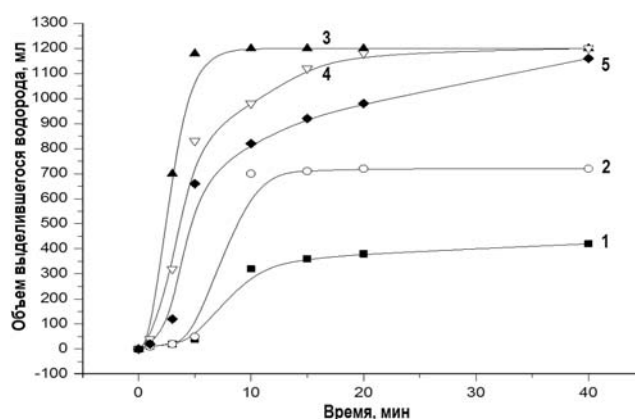


Рис. 4. Накопление водорода в композициях, содержащих 1 г алюминиевой пудры и 2 г негашеной извести с высоким содержанием CaO, в зависимости от количества дистиллированной воды: 1 – 5 мл; 2 – 8 мл; 3 – 10 мл; 4 – 15 мл; 5 – 20 мл. Температура комнатная

Таким образом, в гидрореакционных гетерогенных композициях, содержащих алюминиевую пудру, негашеную известь и дистиллированную воду, протекают химические реакции, результатом которых является образование водорода. В системе алюминий-негашеная известь-вода протекают конкурирующие реакции гашения оксида кальция



с образованием гидроксида кальция Ca(OH)_2 (гашеная известь) и выделением большого количества тепла ($\Delta H = -65.1$ кДж/моль) и оксида кальция с оксидом алюминия



с удалением с поверхности алюминия защитной оксидной пленки, образованием гидроалюминатов кальция разного химического состава ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 19\text{H}_2\text{O} \cdot 4\text{CaO}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O} \cdot 3\text{CaO}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O} \cdot \text{CaO}$) и чистого алюминия $\text{Al}_{\text{акт}}$ [7]. Активированный алюминий (без оксидной пленки) реагирует с водой с образованием гидроксида алюминия и водорода по реакции (4).

Скорость образования и выход водорода зависят от соотношения констант скоростей конкурирующих реакций гашения извести (5) и взаимодействия оксида кальция с оксидом алюминия (6). Генерация водорода происходит с заметной скоростью, если скорость удаления оксидной пленки Al_2O_3 превысит скорость гашения извести. Это достигается подбором соотношения количества алюминия, негашеной извести и воды – оптимальный состав композиции должен содержать количество воды, достаточное для участия в реакции гашения (5), в реакциях с оксидом алюминия (6) и активированным алюминием (7).

Водородный показатель водного раствора на основе негашеной извести и дистиллированной воды $pH \approx 13 - 14$, т.е. процесс образования водорода в таких композициях протекает в щелочной среде. Установлено, что гетерогенные композиции с негашеной известью эффективно разлагают на водород как дистиллированную, так и минерализованную воду. Предельный выход водорода в композициях, содержащих оптимальные количества алюминия, негашеной извести и воды, составляет на 1 М алюминия 1.5 М водорода (на 1 г алюминия 1.2 л водорода), что отвечает теоретически предельному значению. Выходы и скорости накопления водорода зависят от соотношения компонентов смеси. В зависимости от состава композиции и скорости подачи воды в реакционный сосуд процесс генерации водорода протекает в течение различных промежутков времени – от минут до многих часов.

Исследования гетерогенных композиций, содержащих алюминиевые сплавы, показали, что алюминиевые сплавы, как и алюминиевая пудра, в присутствии жидкого натриевого стекла и негашеной извести также эффективно разлагают воду на водород. В качестве примера в табл. 1 – 3 приведены некоторые результаты исследований выхода водорода в гидрореакционных гетерогенных композициях, содержащих алюминиевые сплавы марок САВ-1 и АСД-4. Видно, что в композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава САВ-1, 1 г жидкого натриевого стекла и 10 мл дистиллированной воды, при 60 °С за 60 мин выделяется ~110 мл/г водорода (табл. 1), т.е. примерно в пять раз меньше, чем в композиции с алюминиевой пудрой (рис. 1). Негашеная известь является эффективным активатором алюминиевого сплава марки САВ-1. В композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава САВ-1, 2 г технической негашеной извести и 10 мл дистиллированной воды, при комнатной температуре процесс генерации водорода протекает непрерывно в течение длительного времени с невысокой скоростью, и за пять суток выход водорода достигает 210 мл/г (табл. 2). С большей скоростью и большим выходом при 60 °С происходит образование водорода в композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава марки АСД-4, 2 г негашеной извести и 10 мл дистиллированной воды, – через 200 мин выход водорода составляет 1000 мл/г (табл. 3).

Таблица 1

Накопление водорода в композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава САВ-1, 1 г жидкого натриевого стекла и 10 мл дистиллированной воды. Температура 60 °С

Время, мин	10	20	30	60
Объем водорода, мл	30	55	80	110

Установленные различия в эффективности химического разложения воды на водород алюминиевой пудрой и порошками алюминиевых сплавов продолжают исследоваться.

Таблица 2

Накопление водорода в композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава САВ-1, 2 г негашеной извести и 10 мл дистиллированной воды. Температура комнатная

Время, час	24	48	72	120
Объем водорода, мл	100	150	180	210

Таблица 3

Накопление водорода в композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава АСД-4, 2 г негашеной извести и 10 мл дистиллированной воды. Температура 60°С

Время, мин	5	10	50	200
Объем водорода, мл	200	600	850	1000

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований закономерностей химического разложения воды на водород в гидрореакционных гетерогенных композициях свидетельствуют о протекании эффективного процесса образования водорода в водных щелочных системах, содержащих реакторные металлические конструкционные материалы и химические примеси, реакции которых с пассивирующими оксидными покрытиями металлов в штатном водно-химическом режиме АЭС не рассматриваются [8]. Адекватный учет этого источника водорода в водных системах в неконтролируемых и инцидентных ситуациях будет способствовать повышению водородной безопасности на АЭС [5, 9].

Литература

1. Физическое материаловедение. Т. 8. Конструкционные материалы ядерной техники / Б.А. Калинин, П.А. Платонов, Ю.В. Тузов, И.И. Чернов, Я.И. Штромбах. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 736 с.
2. Шилина А.С., Милинчук В.К. Физико-химические процессы получения водорода и адсорбента, соответствующие принципам «зеленой» химии. // Альтернативная энергетика и экология – ISJAE. 2009. № 10. С. 10 – 14.
3. 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. // Альтернативная энергетика и экология – ISJAE. 2012. № 4. С. 49 – 54.
4. Милинчук В.К., Белозеров В.И., Шилина А.С., Ананьева О.А., Куницына Т.Е., Гордиенко А.Б. Исследование генерации водорода при взаимодействии алюминия с водными растворами. // Известия вузов. Ядерная энергетика. № 2, 2013. С. 39 – 46.
5. Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомной станции. НП-040-02.
6. Справочник по ядерной энерготехнологии: Пер. с англ. / Ф. Ран, А. Адамантиадес, Дж. Кентон, Ч. Браун; под ред. В.А. Легасова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 752 с.
7. Химическая энциклопедия. Редкол.: Кнуньянц И.Л. и др. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – Т. 2. – 611 с.
8. Рошкеттаев Б.М. Водно-химический режим АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и РБМК-1000. Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 132 с.
9. Mitigation of hydrogen hazards in severe accidents in nuclear plants. International atomic energy agency. Vienna, 2011.

Поступила в редакцию 17.11.2014 г.

Авторы

Милинчук Виктор Константинович, профессор, доктор хим. наук

E-mail: milinchuk@iate.obninsk.ru

Белозеров Владимир Иванович, доцент, кандидат техн. наук

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

Ананьева Ольга Александровна, доцент, кандидат хим. наук

E-mail: o57362@gmail.com;

Ларичева Татьяна Евгеньевна, доцент, кандидат хим. наук

E-mail: tlaricheva@yandex.ru;

Куницына Татьяна Евгеньевна, заведующая лабораторией

E-mail: tat2112kun@mail.ru

UDC 620.9+544(075)

CHEMICAL DECOMPOSITION OF WATER INTO HYDROGEN IN HETEROGENEOUS ALUMINIUM-CONTAINING COMPOSITIONS

Milinchuk V.K., Belozyorov V. I., Anan'eva O.A., Laricheva T.E., Kunitsyna T.E.

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

ABSTRACT

The aim of this work was to investigate the kinetic regularities and mechanism of chemical decomposition of water into hydrogen in heterogeneous hydro-reactive systems containing aluminum, aluminum alloys, and such chemical compounds as liquid sodium glass or quicklime giving water solution alkaline properties. The installation for studying the process of hydrogen generation in the temperature range from room temperature to 90 °C includes a thermostat and a reaction flask equipped with a tube to drain through the water in the measuring vessel formed of hydrogen. Endothermic decomposition of water into hydrogen in heterogeneous compositions containing aluminum and liquid sodium glass is based on hydrolysis of silicate salt, the reaction of sodium hydroxide with a thin surface film of aluminum oxide Al_2O_3 , and the reaction of the recovery of hydrogen from water activated alumina. In the aluminum – quicklime composition, exothermic hydrogen generation involves removal of the protective oxide layer in the reaction of calcium oxide with aluminum oxide, the formation of hydroalumination calcium and activated aluminum interaction with water. The rate of formation and yield of hydrogen depend on the ratio of rate constants of the competing reactions of lime slaking and removal from the surface of the aluminum oxide film. Heterogeneous composition generates hydrogen, provided that the removal rate of the oxide film was greater than the speed of slaked lime, which is achieved by selecting the optimal ratio of aluminum, quicklime and water which should be enough to participate in the process of calcium oxide slaking in reactions with aluminum oxide and activated aluminum. The maximum hydrogen yield in the compositions containing the optimal ratio of metal, liquid sodium glass or quicklime is 1.2 liters of hydrogen per 1 g of aluminum.

Key words: water, hydrogen, aluminum, aluminum alloy, aluminum oxide, calcium oxide, liquid sodium glass, burnt lime.

REFERENCES

1. Kalin B.A., Platonov P.A., Tuzov Yu.V., Chernov I.I., Shtrombah Ya.I.. Fizicheskoe materialovedenie. T.8. Konstruktsionnyye materialy i yader-noy tekhniki [Physical materials.

- V. 8. Structural materials of nuclear engineering]. Moscow. NRNU MEPhI Publ. 2012. 736 p
2. Shilina A.S., Milinchuk V.K. Fiziko-himicheskie protsessy poluche-niya vodoroda i adsorbenta, sootvetstvuyushchie printsipam «zelyonoj» chimii [Physico-chemical processes for producing hydrogen and adsorbent corresponding to the principles of green chemistry]. *Alternativnaya energetika i ekologiya*. 2009, no. 10, pp. 10 – 14.
3. Milinchuk V.K., Shilina A.S., Ananeva O.A., Kunitsyna T.E., Pasevich O.F., Laricheva T.E. Issledovanie ekologicheski bezopasnyih, energosberegayuschih sposobov polucheniya vodoroda himicheskim razlozheniem vodyi [The study of environmentally friendly, energy-efficient ways of producing hydrogen by chemical decomposition of water]. *Alternativnaya energetika i ekologiya*. 2012, no. 4, pp. 49 – 54.
4. Milinchuk V.K., Belozorov V.I., Shilina A.S., Ananeva O.A., Kunitsyna T.E., Gordienko A.B. Issledovanie generatsii vodoroda pri vzaimodeystvii alyuminiya s vodnymi rastvorami [Study of the generation of hydrogen by the interaction of aluminum with aqueous solutions]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2013, no. 2, pp. 39 - 46.
5. Pravila obespecheniya vodorodnoy vzryivozaschityi na atomnoy stantsii [The rules provide hydrogen explosion at the nuclear power plant]. NP-040-02 (in Russian).
6. Ran F., Ada-mantiades A., Kenton Dzh., Braun Ch.; Pod red. Legasova . V.A.. Spravochnik po yadernoy energotekhnologii [Handbook of nuclear energy technology]. Per. s angl. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1989. 752 p. (in Russian).
7. Himicheskaya encyclopedia. Redkol.: Knunianz I. L. i drugie. M.: Sovetskaya encyclopedia, 1990. T. 2. – 611 s. [Chemical encyclopedia. The editorial board.: Knunianz I. L. and others. Moscow. Sovetskaya encyclopedia Publ., 1990, v. 2, 611 p.] (in Russian).
8. Roschektaev B.M. Vodno-Himicheskii rezhim AES s reaktorami VVER-1000 i RBMK-1000 [Water chemistry of nuclear power plants with reactors VVER-1000 and RBMK-1000]. Moscow. NRNU MEPhI Publ. 2010. 132 p. (in Russian).
9. Mitigation of hydrogen hazards in severe accidents in nuclear plants. International atomic energy agency. Vienna. 2011.

Authors

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

E-mail: vkmilinchuk@mail.ru;

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

E-mail: v.i.belosorov@iate.odninsk.ru

Anan'eva Olga Aleksandrovna, Associate Professor, Cand. Sci. (Chemistry)

E-mail: o57362@gmail.com

Laricheva Tat'yana Evgen'evna, Associate Professor, Cand. Sci. (Chemistry)

E-mail: tlaricheva@yandex.ru;

Kunitsyna Tat'yana Evgen'evna, Head of Laboratory

E-mail: tat2112kun@mail.ru