

## ВЛИЯНИЕ БОРНОЙ КИСЛОТЫ НА ГЕНЕРАЦИЮ ВОДОРОДА АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИМИ ГИДРОКОМПОЗИЦИЯМИ С ХИМИЧЕСКИМИ АКТИВАТОРАМИ

**А.А. Салахова, В.А. Суворов, А.И. Фирсова, В.И. Белозеров, В.К. Милинчук**

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ*

*249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*

**Р**

Рассмотрены результаты исследований кинетики генерации водорода гидрокомпозициями с алюминием, химическими активаторами (кристаллогидрат метасиликата натрия, оксид и гидроксид кальция) и борной кислотой. Алюминий защищен от прямого контакта с водой и паром поверхностным слоем оксида алюминия  $Al_2O_3$ , обладающим высокой коррозионной стойкостью по отношению к воздействию воды и пара при высоких температурах и в мощных радиационных полях. После удаления или при нарушении сплошности оксидного слоя алюминий эффективно разлагает воду на водород. Установлено, что закономерности процесса образования водорода в алюминийсодержащих гидрокомпозициях зависят от концентрации борной кислоты. Наличие борной кислоты необходимо учитывать при рассмотрении химических процессов образования водорода, протекающих с участием реакторных материалов, корректирующих добавок и активирующих примесей в водном теплоносителе реакторов типа ВВЭР.

Согласно проведенным исследованиям, кинетика генерации водорода алюминийсодержащими композициями зависит от концентрации кристаллогидрата метасиликата натрия, а именно, при уменьшении концентрации активатора увеличивается индукционный участок на кривых накопления водорода, что свидетельствует о снижении скорости удаления оксидного слоя. Результаты экспериментальных данных показали, что кальцийсодержащие химические активаторы при взаимодействии с борной кислотой не влияют на предельный выход генерации водорода, но снижают скорость накопления водорода. Полученные результаты свидетельствуют о сложном характере взаимодействия реакторных материалов с водным теплоносителем в присутствии корректирующих добавок и примесных молекул, что необходимо принимать во внимание при рассмотрении водно-химического режима реакторов типа ВВЭР. Если в водной среде находятся химические вещества, например, кремний- или кальцийсодержащие соединения, придающие водной среде щелочной характер, то в такой системе протекают физико-химические процессы с образованием водорода, которые можно разбить на три стадии: активация алюминия, окисление алюминия кислородом, взаимодействие алюминия и воды с образованием водорода.

**Ключевые слова:** водород, алюминий, вода, борная кислота, водный теплоноситель, оксидный слой, кристаллогидрат метасиликат натрия, оксид и гидроксид кальция.

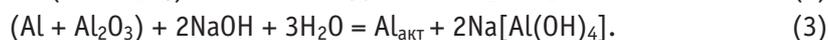
## ВВЕДЕНИЕ

Исследование образования водорода при взаимодействии водного теплоносителя с реакторными материалами является важной стадией при разработке научно-технических мероприятий по обеспечению водородной взрывозащиты АЭС [1, 2]. В этой проблеме недостаточно исследованы закономерности процесса образования водорода при взаимодействии реакторных материалов с корректирующими добавками и примесными молекулами водного теплоносителя. Прежде всего это относится к выяснению влияния принципиально важной для водно-химического режима реакторов ВВЭР борной кислоты, которая используется при мягком регулировании реактивности реактора [3 – 5].

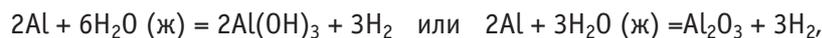
Установлено, что в водном теплоносителе в присутствии химических соединений, придающих водной среде щелочной характер, алюминий эффективно разлагает воду на водород [6 – 16]. Процесс разложения воды на водород протекает с высокой скоростью при температурах до 100°C. Например, в композиции состава 1 г алюминия, 1 г кристаллогидрата метасиликата натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  и 10 мл дистиллированной воды при 60°C образуется водород с предельным выходом 1200 мл на 1 г прореагировавшего алюминия. Это обусловлено тем, что если в водной среде находятся химические вещества, например, кремний- или кальцийсодержащие соединения, придающие водной среде щелочной характер, то в такой системе протекают физико-химические процессы с образованием водорода, которые можно разбить на три стадии [8 – 13]. Так в композиции, содержащей в качестве химического активатора соли метасиликата натрия, на первой стадии в результате гидролиза метасиликата натрия образуются химически активные соединения:



Продукт гидролиза – гидроксид натрия  $\text{NaOH}$  взаимодействует с оксидным покрытием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по реакциям



В результате с поверхности алюминия удаляется оксидная пленка и образуется алюминий в активированном состоянии (без оксидного покрытия). Образующийся активированный алюминий эффективно разлагает воду на водород, например, по реакциям



о чем свидетельствуют высокие стандартные термодинамические потенциалы взаимодействия алюминия с водой

$$\Delta H^\circ = - 272.8 \text{ Дж/моль}, \quad \Delta G^\circ = - 287.8 \text{ кДж/моль}. \quad (4)$$

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Накопление водорода исследовали на гетерогенных гидрореакционных композициях следующих составов: алюминиевая пудра – 1.0 г (ГОСТ 5494-95, марка ПАП-2, поверхность 1.6 м<sup>2</sup>/г); химические активаторы – кристаллогидрат метасиликата натрия состава  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , оксид кальция  $\text{CaO}$ , диоксид кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – в количестве от 0.2 до 1.0 г; борная кислота – в количестве 0.16 – 0.48 г; дистиллированная вода – 10 г.

Процесс получения водорода включает в себя следующие процедуры: алюминиевую пудру, химические активаторы и воду, взятые в определенных пропорциях, загружают в стеклянную колбу объемом 250 мл и перемешивают. Реакционную колбу помещают в термостат, снабженный термометром, нагретый до необходимой температуры, при которой процесс идет в управляемом режиме и с удовлетворительной скоростью, и в дальнейшем поддерживают эту температуру до окончания процесса

выделения водорода. Стеклянная реакционная колба снабжена стеклянной трубкой для отвода через воду в измерительный сосуд образующегося водорода.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

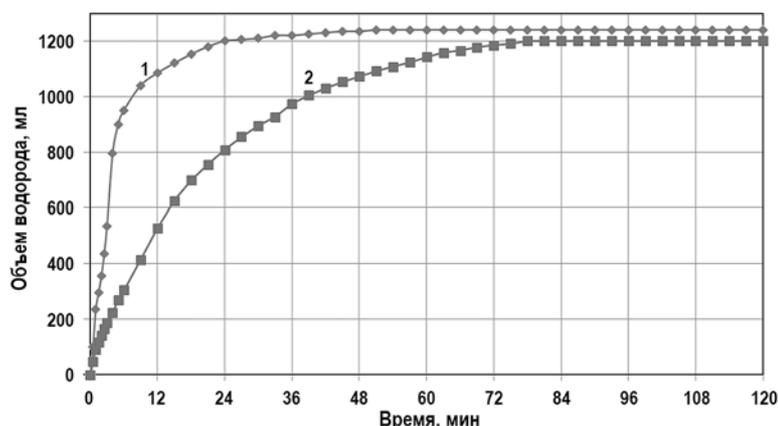
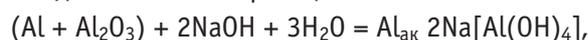


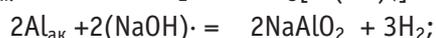
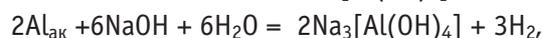
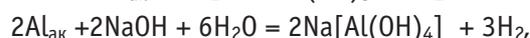
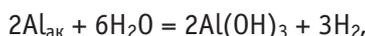
Рис. 1. Кривые накопления водорода при  $t = 60^\circ\text{C}$  в композициях, содержащих 1 г алюминия, 1 г кристаллогидрата метасиликата натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  и 10 мл дистиллированной воды (кривая 1); 1 г алюминия, 1 г кристаллогидрата метасиликата натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  и 10 мл (0.16 г) борной кислоты (кривая 2),

Все исследованные композиции имеют щелочной характер, и, как видно на рис. 1, кривые накопления водорода имеют близкие по форме кинетические кривые накопления водорода, характеризующиеся близкими начальными скоростями образования водорода и одинаковыми предельными величинами количества водорода. В композициях без химического активатора образование водорода не происходит. Таким образом, непременным условием генерации водорода гидрокомпозициями является щелочной характер водной среды композиции, что согласуется с представлениями о механизме образования водорода с участием химических активаторов, предложенном в [5 – 7]:

– растворение оксида алюминия по реакциям



– взаимодействие активированного алюминия с водой с образованием водорода по одной из следующих реакций:



– взаимодействие  $\text{Al}(\text{OH})_3$  с избытком  $\text{NaOH}$ :  $\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{NaOH} = \text{Na}_3[\text{Al}(\text{OH})_6]$ .

В композициях с борной кислотой заметно изменяется процесс накопления водорода.

На рисунке 2 приведены кривые накопления водорода при температуре  $60^\circ\text{C}$  в композициях, содержащих 1 г алюминия, 1 г кристаллогидрата метасиликата натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 10 г дистиллированной воды (кривая 1,  $\text{pH} = 13.26$ ) и водный раствор с содержанием борной кислоты 0.16 г (кривая 2,  $\text{pH} = 13.02$ ), 0.24 г (кривая 3,  $\text{pH} = 13.02$ ), 0.32 г (кривая 4,  $\text{pH} = 13.02$ ) и 0.48 г (кривая 5,  $\text{pH} = 13.02$ ). Видно, что предельные концентрации водорода зависят от количества борной кислоты в композиции. При низкой концентрации борной кислоты предельные концентрации водорода такие же, как и в композиции с дистиллированной водой – около 1.2 л / 1 г Al. При концентрации бор-

ной кислоты около 0.2 г предельная концентрация водорода снижается примерно на 30%. При увеличении концентрации борной кислоты до 0.3 г и выше предельные концентрации водорода снижается в пять и более раз. При концентрации борной кислоты более 1.0 г генерация водорода в композиции полностью прекращается.

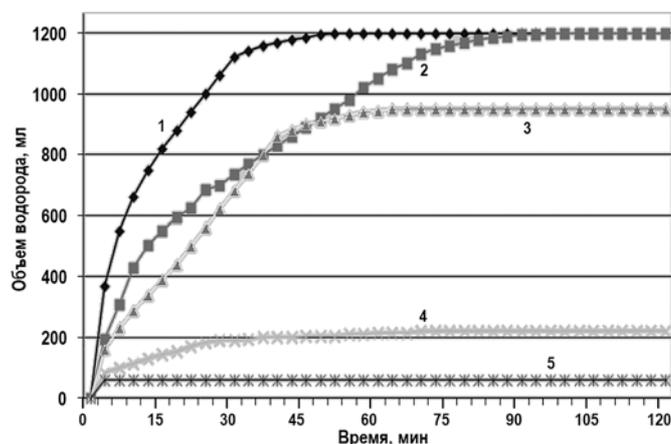


Рис. 2. Кривые накопления водорода при  $t = 60^\circ\text{C}$  в композициях, содержащих 1 г алюминия, 1 г кристаллогидрата метасиликата натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 10 мл дистиллированной воды (кривая 1); 1 г алюминия, 1 г кристаллогидрата метасиликата натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  и водный раствор с содержанием борной кислоты 0.16 г (кривая 2); 0.24 г (кривая 3); 0.32 г (кривая 4) и 0.48 г (кривая 5)

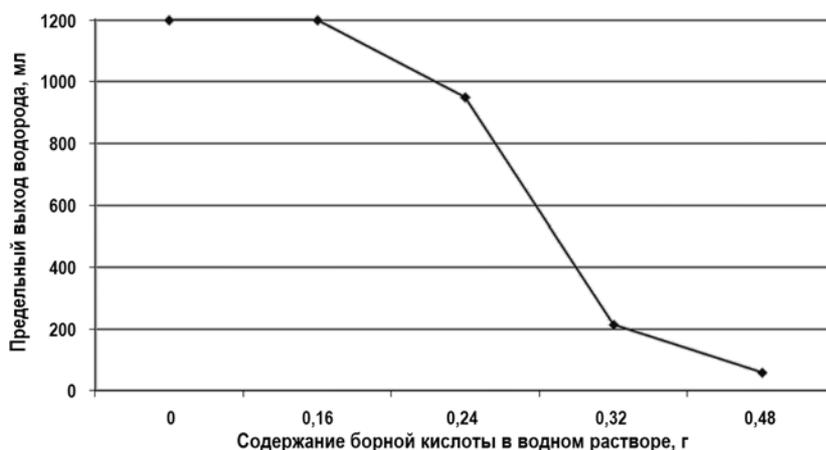


Рис. 3. Зависимость предельного выхода водорода от содержания борной кислоты (г) в алюминийсодержащих композициях с кристаллогидратом метасиликата натрия

На рисунке 3 видно, что предельный выход водорода нелинейно зависит от концентрации борной кислоты в композиции. При увеличении концентрации борной кислоты от 0.24 до 0.32 г скачкообразно многократно снижается предельный выход водорода. Этот результат свидетельствует о том, что борная кислота в гетерогенных композициях активно участвует в процессах, которые приводят к подавлению процесса образования водорода с участием алюминия и воды.

Известно, что кислотные свойства борной кислоты обусловлены не отщеплением протона  $\text{H}^+$ , а присоединением гидроксильного аниона:  $\text{B}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}[\text{B}(\text{OH})_4]$ . Образующийся при гидролизе метасиликата натрия гидроксид натрия  $\text{NaOH}$  реагирует с борной кислотой  $4\text{H}_3\text{BO}_3 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 7\text{H}_2\text{O}$  с образованием тетрабората натрия. Избытком щелочи тетраборат переводится в метаборат  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 2\text{NaOH} \rightarrow 4\text{NaBO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ . Мета- и тетрабораты также, но в меньшей степени, могут гидролизываться. Надо отметить, что борная кислота может непосредственно взаимодействовать

вать с алюминием с образованием водорода, например,  $\text{Al} + \text{H}_3\text{BO}_3 \rightarrow \text{AlBO}_3 + 1.5 \text{H}_2$ .

Можно предположить следующий схему механизма влияния борной кислоты на образование водорода в композициях, содержащих алюминий и активаторы алюминия. Во-первых, борная кислота уменьшает скорость взаимодействия алюминия с активатором путем снижения скорости гидролиза кристаллогидрата метасиликата натрия. Во-вторых, борная кислота вступает в реакции с продуктами гидролиза активатора, уменьшает концентрацию продуктов гидролиза, снижает скорость и эффективность их взаимодействия с поверхностным слоем оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и тем самым уменьшает скорость образования и предельную концентрацию водорода. Кроме того, борная кислота может эффективно нейтрализоваться гидроксидом натрия  $\text{NaOH}$  с образованием плохо растворимых в воде полиборатов:

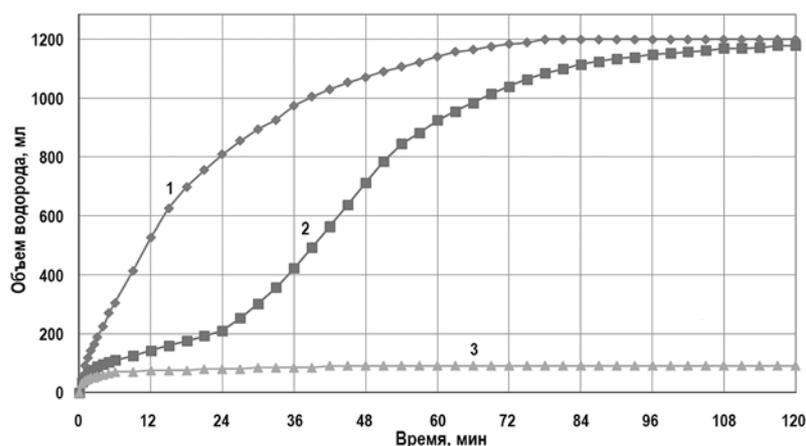
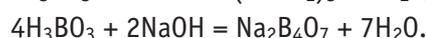
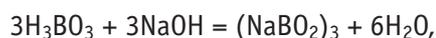


Рис. 4. Кривые накопления водорода при  $t = 60^\circ\text{C}$  в композициях, содержащих 1 г алюминия, 10 мл (0.16 г) борной кислоты и разное количество кристаллогидрата метасиликата натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ : кривая 1 – 1 г; кривая 2 – 0.5 г; кривая 3 – 0,2 г

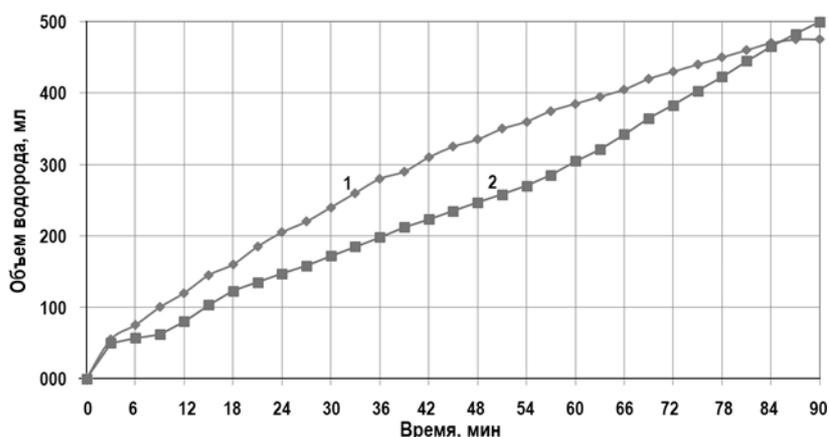


Рис. 5. Кривые накопления водорода при  $t = 60^\circ\text{C}$  в композициях, содержащих 1 г алюминия, 1 г  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  10 мл (0.16 г) борной кислоты (кривая 1); 1 г алюминия, 1 г  $\text{CaO}$  и 10 мл (0.16 г) борной кислоты (кривая 2)

На рисунке 4 приведены кривые накопления водорода в композициях, содержащих 1 г алюминия, 1 г кристаллогидрата метасиликата натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 5 мл дистиллированной воды и 10 мл (0.16 г) борной кислоты (кривая 1); 1 г алюминия, 0.5 г кристаллогидрата метасиликата натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 5 мл дистиллированной воды и 10 мл

(0.16 г) борной кислоты; 1 г алюминия, 0.2 г кристаллогидрата метасиликата натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 5 мл дистиллированной воды и 10 мл (0.16 г) борной кислоты. В композициях с борной кислотой заметно изменяется процесс накопления водорода. Видно, что при большой концентрации активатора наличие в композициях борной кислоты существенно не влияет на характер кривых накопления водорода. При снижении концентрации активатора в два раза изменяется форма кривых накопления, а именно, на кривых отчетливо просматриваются индукционные участки. При снижении концентрации активатора в композиции до 0.2 г образование водорода прекращается.

На рисунке 5 приведены кривые накопления водорода в композициях, содержащих 1 г алюминиевой пудры и 10 мл борной кислоты, в зависимости от вида активатора – оксида и гидроксида кальция. Видно, что выход водорода достигает ~ 480 мл на 1 г алюминия в течение ~ 1.5 ч. Таким образом, в гидрогетерогенных композициях, содержащих алюминиевую пудру, оксид или гидроксид кальция и борную кислоту, протекают химические реакции, результатом которых также является образование водорода. На форму кривых накопления влияет природа химических активаторов, а именно, скорость накопления водорода в композициях с гидроксидом кальция выше, чем с оксидом кальция. Это позволяет сделать вывод о том, что кальцийсодержащие химические активаторы в композициях с борной кислотой не влияют на предельный выход водорода, но заметно снижают скорость накопления водорода.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Условием генерации водорода гидрокомпозициями с борной кислотой и химическими активаторами является щелочной характер водной среды, что подтверждает ранее выдвинутые представления о механизме образования водорода путем химического разложения воды с участием химических активаторов. Скорость и предельная концентрация водорода, генерируемая композициями с химическими активаторами, нелинейно зависят от количества борной кислоты, что свидетельствует о взаимодействии борной кислоты как с алюминием, так и с химическими активаторами. Кинетика генерации водорода алюминийсодержащими композициями зависит от концентрации кристаллогидрата метасиликата натрия, а именно, при уменьшении концентрации активатора увеличивается индукционный участок на кривых накопления водорода, что свидетельствует о снижении скорости удаления оксидного слоя. Установлено, что кальцийсодержащие химические активаторы при взаимодействии с борной кислотой не влияют на предельный выход генерации водорода, но снижают скорость накопления водорода. Полученные результаты свидетельствуют о сложном характере взаимодействия реакторных материалов с водным теплоносителем в присутствии корректирующих добавок и примесных молекул, что необходимо принимать во внимание при рассмотрении водно-химического режима реакторов типа ВВЭР.

### **Литература**

1. НП-040-02. Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомной станции. Электронный ресурс: [http://snipov.net/c\\_4686\\_snip\\_109274.html](http://snipov.net/c_4686_snip_109274.html) (дата доступа 15.01.2018).
2. Mitigation of hydrogen hazards in severe accident in nuclear power plants. International Atomic Energy Agency. – Vienna: IAEA, 2011. – 155 p. Электронный ресурс: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE\\_1661\\_Web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1661_Web.pdf) (дата доступа 15.01.2018).
3. ГОСТ 24 693-81. Реакторы ядерные энергетические корпусные с водой под давлением. Общие требования к системе борного регулирования. Электронный ресурс: [http://gostrf.com/norma\\_data/27/27074/index.htm](http://gostrf.com/norma_data/27/27074/index.htm) (дата доступа 15.01.2018).
4. Рошкетав Б.М. Водно-химический режим АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и РБМК-1000.

Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 132 с.

5. *Милинчук В.К., Клинов Д.А.* Водородная энергетика. Учебное пособие. – Обнинск: ИАТЭ, 2008. – 68 с.

6. *Милинчук В.К., Мерков С.М.* Патент № 2 371 382 РФ. МПК С01В 3/08. Гидрореакционная композиция для получения водорода. / Бюлл. 2009. № 30.

7. *Милинчук В.К., Шилина А.С.* Патент № 2 417 157 РФ. МПК С01В 3/08. Гидрореакционная гетерогенная композиция для получения водорода. / Бюлл. 2011. № 12.

8. *Шилина А.С., Милинчук В.К.* Физико-химические процессы получения водорода и адсорбента, соответствующие принципам «зеленой» химии. // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. – 2009. – № 10. – С. 10-14.

9. *Ананьева О.А., Куницына Т.Е., Шилина А.С., Милинчук В.К.* Получение водорода химическим разложением минерализованной воды. // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. – 2012. – № 5-6. – С. 140-144.

10. *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 – ISJAEЕ. – 2012. – № 4. – С. 49-54.

11. *Клишпонт Э.Р., Роцектаев 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.

12. *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 высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2014. – № 4. – С. 32-38.

13. *Милинчук В.К., Клишпонт Э.Р., Белозеров В.И.* Автономный генератор водорода на основе химического разложения воды алюминием. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2015. – № 2. – С. 49-59.

14. *Милинчук В.К., Клишпонт Э.Р., Белозеров В.И., Хаврошина И.С., Садиков Э.И.* Превращения покрытий оксида алюминия при имитации факторов ядерных энергетических установок. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 2. – С. 45-54.

15. *Милинчук В.К., Клишпонт Э.Р., Белозеров В.И.* Генерация водорода гидрогетерогенными композициями с  $\gamma$ -облученным алюминием. // Химия высоких энергий. – 2017. – № 2. – С. 19-22.

16. *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 высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2013. – № 2. – С. 39-46.

Поступила в редакцию 17.01.2018 г.

#### Авторы

Салахова Айгуль Айратовна, бакалавр  
E-mail: AASalahova@yandex.ru

Суворов Василий Александрович, аспирант  
E-mail: suworow.ne@gmail.com

Фирсова Алена Игоревна, бакалавр  
E-mail: alena.f\_095@mail.ru

Белозеров Владимир Иванович, доцент, кандидат техн. наук  
E-mail: v.i.belozerov@iate.obninsk.ru

Милинчук Виктор Константинович, профессор, доктор хим. наук  
E-mail: milinchuk@iate.obninsk.ru

**EFFECTS OF BORIC ACID ON THE GENERATION OF HYDROGEN BY ALUMINUM-CONTAINING HYDROCOMPOUNDS WITH CHEMICAL ACTIVATING AGENTS**

Salakhova A.A., Suvorov V.A., Firsova A.I., Belozerov V.I., Milinchuk V.K.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering NRNU MEPhI

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga region 249040

## ABSTRACT

Results of investigation of kinetics of hydrogen generation by chemical hydrocompounds containing aluminum, chemical activating agents (hydrated sodium metasilicate, nitric oxide and calcium hydroxide) and boric acid are presented. Aluminum is protected from direct contact with water and steam by the surface layer of aluminum oxide  $Al_2O_3$  possessing high corrosion resistance against exposure to water and steam at high temperatures in high-intensity radiation fields. After removal of the oxide layer or violation of its integrity aluminum efficiently decomposes water with release of hydrogen. It was established that regularities of formation of hydrogen in aluminum-containing hydrocompounds depend on the concentration of boric acid. Presence of boric acid must be accounted for in the examination of chemical processes of hydrogen generation with involvement of reactor materials, corrective additives and activating impurities in the water coolant of VVER reactors.

According to the implemented studies, kinetics of hydrogen generation by aluminum-containing compositions depends on the concentration of hydrated sodium metasilicate, namely, the induction phase on the curves of hydrogen accumulation increases with decreasing concentration of the activating agent, which is the indication of the decrease in the rate of destruction of the oxide layer. Experimental results showed that calcium-containing chemical activating agents do not affect the limiting hydrogen yield in the interaction with boric acid, but reduce the rate of accumulation of hydrogen. The obtained results evidence complex nature of interactions of reactor materials with water coolant in the presence of corrective additives and impurity molecules that must be accounted for in the examination of water chemistry of VVER-type reactors. If chemical substances, for example, silicon- or calcium-containing compounds imparting alkaline properties to water environment are present in the aqueous medium, then physical and chemical processes of hydrogen formation take place in such a system, which can be divided into the following three stages: aluminum activation; aluminum oxidation by oxygen and interaction of aluminum with water with generation of hydrogen.

**Key words:** hydrogen, aluminum, boric acid, the oxide layer, hydrated sodium metasilicate, oxide and calcium hydroxide.

## REFERENCES

1. NP-040-02. Rules for Hydrogen Explosion Protection at a Nuclear Power Plant. Available at: [http://snipov.net/c\\_4686\\_snip\\_109274.html](http://snipov.net/c_4686_snip_109274.html) (accessed Jan. 15, 2018) (in Russian).
2. Mitigation of hydrogen hazards in severe accident in nuclear power plants. International atomic agency. Vienna, 2011. Available at: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE\\_1661\\_Web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1661_Web.pdf) (accessed Jan. 15, 2018) (in Russian).
3. GOST 24 693-81. The reactors of the nuclear power body of water under pressure. General requirements to the system of boric regulation. Available at: [http://gostrf.com/norma\\_data/27/27074/index.htm](http://gostrf.com/norma_data/27/27074/index.htm) (accessed Jan. 15, 2018) (in Russian).

4. Roshchektaev B.M. *The Water-Chemical Mode of NPP with VVER-1000 and RBMK-1000*. Moscow. NRNU MEPhI Publ., 2010, 132 p. (in Russian).
5. Milinchuk V.K., Klinov D.A. *Hydrogen Energy*. Obninsk. IATE Publ., 2008, 68 p. (in Russian).
6. Milinchuk V.K., Merkov S.M. Patent No. 2 371 382 RF. MPK S01V 3/08. *Hidroregjioni Composition to Produce Hydrogen*. Bull. 2009, no. 30 (in Russian).
7. Milinchuk V.K., Shilina A.S. Patent No. 2 417 157 RF. MPK S01V 3/08. *Hidroregjioni Heterogeneous Composition to Produce Hydrogen*. Bull. 2011, no. 12 (in Russian).
8. Shilina A.S., Milinchuk V.K. Physico-Chemical Processes of Obtaining Hydrogen and the Adsorbent in Accordance with the Principles of «Green» Chemistry. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. ISJAE. 2009, no. 10, pp. 10-14 (in Russian).
9. Anan'eva O.A., Kunicyna T.E., Shilina A.S., Milinchuk V.K. Hydrogen Production by Chemical Decomposition of the Saline Water. *Al'ternativnaya energetika i ehkologiya*. ISJAE. 2012, no. 5-6, pp. 140-144 (in Russian).
10. Milinchuk V.K., Shilina A.S., Anan'eva O.A., Kunicyna T.E., Pasevich O.F., Laricheva T.E. The Study of Environmentally Friendly, Energy Efficient Methods for Producing Hydrogen by Chemical Decomposition of Water. *Al'ternativnaya energetika i ehkologiya*. ISJAE. 2012, no. 4, pp. 49-54 (in Russian).
11. Klinshpont E.R., Roshchektaev B.M., Milinchuk V.K. Kinetics of Hydrogen Accumulation During Chemical Decomposition of Water in Heterogeneous Compositions. *Al'ternativnaya energetika i ehkologiya*. ISJAE. 2012, no. 9, pp. 116-120 (in Russian).
12. Milinchuk V.K., Belozero V.I., Anan'eva O.A., Laricheva T.E., Kunicyna T.E. Chemical Decomposition of Water into Hydrogen in Heterogeneous Aluminum-Containing Compositions. *Izvestiya Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 4, pp. 32-38 (in Russian).
13. Milinchuk V.K., Klinshpont E.R., Belozero V.I. Autonomous Hydrogen Generator Based on Chemical Decomposition of Water with Aluminum. *Izvestiya Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2015, no. 2, pp. 49-59 (in Russian).
14. Milinchuk V.K., Klinshpont E.R., V.I. Belozero, Havroshina I.S., Sadikov E.I. The Conversion Coating of Aluminum Oxide when Simulating Factors of Nuclear Power Plants. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016, no. 2, pp. 45-54 (in Russian).
15. Milinchuk V.K., Klinshpont E.R., V.I. Belozero. The Generation of Hydrogen Hidrometeorologii Compositions with  $\gamma$ -irradiated Aluminium. *Khimiya vysokih ehnergij*. 2017, no. 2, pp. 19-22 (in Russian).
16. Milinchuk V.K., Belozero V.I., Shilina A.S., Anan'eva O.A., Kunicyna T.E., Gordienko A.B. Study of the Generation of Hydrogen by Reaction of Aluminum with Aqueous Solutions. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2013, no. 2, pp. 39-46 (in Russian).

#### Authors

Salakhova Aigul Airatovna, Bachelor

E-mail: AASalahova@yandex.ru

Suvorov Vasily Alexandrovich, PhD Student

E-mail: suworow.ne@gmail.com

Firsova Alena Igorevna, Bachelor

E-mail: alena.f\_095@mail.ru

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

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

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

E-mail: milinchuk@iate.obninsk.ru