

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОДНОЙ СМЕСИ В ПОЛОСТИ ГИЛЬЗЫ КЛАСТЕРНОГО РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОРГАНА РЕАКТОРА РБМК-1000

В.И. Белозеров, В.К. Милинчук

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

Р

В проекте технического устройства для постоянного отвода газовой среды из полости гильзы кластерного регулирующего органа (КРО) в трап бассейна выдержки реактора РБМК-1000 предусмотрена возможность установки датчика контроля с целью мониторинга состава газовой смеси в полости гильзы КРО. При перемещении в КРО поглощающих элементов происходит их трение со стенками продольных каналов, которые изготовлены из сплава алюминия марки САВ-1. При механическом воздействии оксидная пленка на поверхности канала частично или полностью удаляется, и сплав переходит в состояние без защитного оксидного слоя. Целью работы является получение экспериментальных данных о взаимодействии алюминиевых сплавов марок САВ-1 и АСД-4 с водной средой гильзы КРО при наличии в воде химических соединений, которые удаляют пассивирующий оксидный слой Al_2O_3 с поверхности металла. В качестве химических активаторов сплавов исследованы кремнийсодержащие соединения (жидкое натриевое стекло, жидкое калиевое стекло, кристаллогидраты метасиликата натрия) и известь. Реакции алюминиевых сплавов в водных растворах с жидким натриевым и калиевым стеклом протекают в эндотермическом режиме, а в водных растворах кристаллогидрата метасиликата натрия и извести – в экзотермическом. Выходы водорода для сплавов САВ-1 и АСД-4 при 60С составляют ~ 0.6 л на 1 г прореагировавшего металла. Образующийся при взаимодействии алюминиевого сплава САВ-1 с водой водород входит в состав газовой смеси в полости гильзы КРО. Поэтому образование водорода необходимо учитывать при проведении мониторинга газовой смеси гильзы КРО реактора РБМК-1000.

Ключевые слова: реактор РБМК-1000, кластерный регулирующий орган (КРО), система управления и защиты (СУЗ), тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ), поглощающий элемент (ПЭЛ), алюминий, алюминиевые сплавы САВ-1 и АСД-4, вода, водород, жидкое натриевое и калиевое стекло, кристаллогидраты метасиликата натрия, известь.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разрабатывается проект технического устройства для постоянного отвода газовой среды из полости гильзы кластерного регулирующего органа (КРО) в трап бассейна выдержки реактора РБМК-1000 (рис. 1). В техническом устройстве рассматривается возможность установки датчика контроля с целью

© В.И. Белозеров, В.К. Милинчук, 2018

мониторинга состава газовой смеси в полости гильзы КРО. При перемещении в КРО поглощающих элементов происходит их трение со стенками продольных каналов, которые изготовлены из сплава алюминия марки САВ-1. При механическом воздействии оксидная пленка на поверхности канала частично или полностью удаляется, и сплав переходит в активированное состояние – металл без защитного оксидного слоя. В результате происходит взаимодействие активированного алюминиевого сплава САВ-1 с водой и водяным паром, что может сопровождаться образованием водорода.

Цель работы – получение экспериментальных данных о взаимодействии алюминиевых сплавов марок САВ-1 и АСД-4 с водной средой гильзы КРО при наличии в воде таких химических соединений, которые могут прореагировать с оксидным слоем, удалить его с поверхности и перевести металл в активированное состояние по отношению к воде. В качестве химических активаторов сплавов исследованы такие кремнийсодержащие соединения, как жидкое натриевое стекло, жидкое калиевое стекло, кристаллогидраты метасиликата натрия и кальцийсодержащее соединение – известь.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

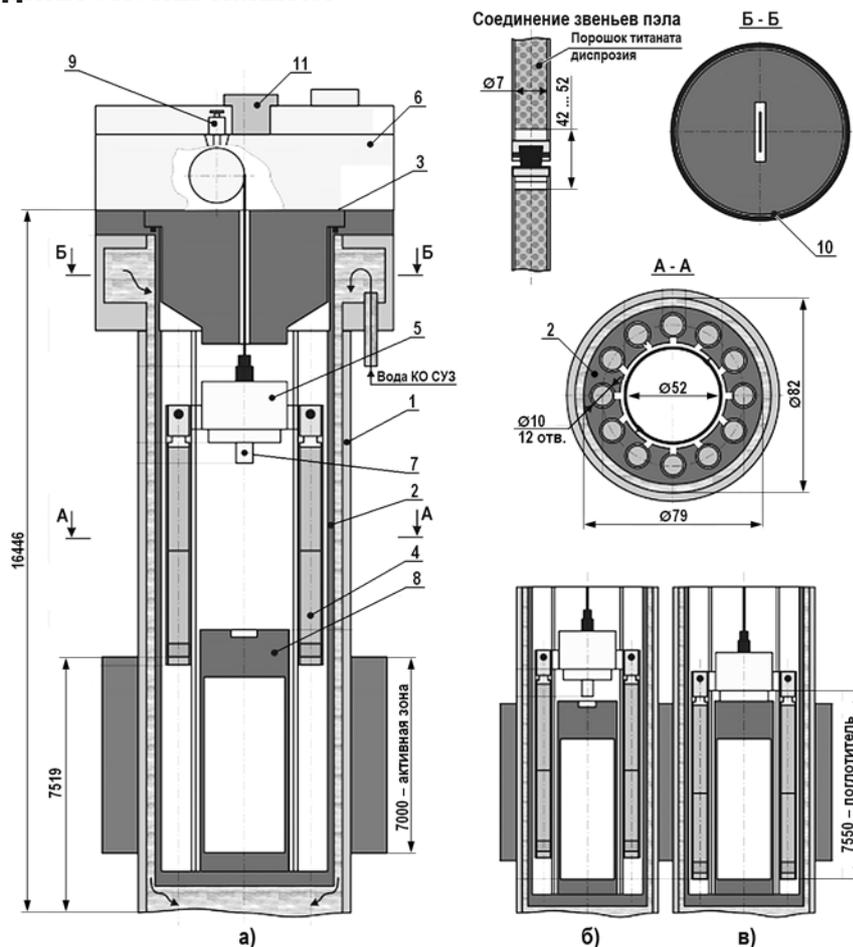


Рис. 1. Схема КРО СУЗ реактора РБМК-1000: 1 – канал СУЗ; 2 – гильза; 3 – пробка защитная; 4 – поглощающий элемент (пзл); 5 – подвеска; 6 – сервопривод (СП); 7 – аварийный демпфер; 8 – труба опорная; 9 – клапан; 10 – закладка; 11 – защита; а) – положение пзлов на ВК; б) – положение пзлов на НК; в) – положение пзлов при обрыве ленты СП

Гильзы КРО предназначены для размещения и перемещения поглощающих элементов (пэлов). Гильза выполняет функцию неподвижного вытеснителя «лишней» воды из канала СУЗ на участке активной зоны и одновременно является направляющей для перемещения рабочего органа. Гильза представляет собой полый цилиндр длиной 6.5 м и наружным диаметром 79 мм; внутри цилиндра имеется 12 продольных каналов диаметром 10 мм; гильзы расположены равномерно по периметру КРО (см. рис. 1). Гильза устанавливается стационарно в канал системы управления и защиты (СУЗ) и крепится посредством нажимного клапана на головке канала СУЗ. Охлаждение гильзы осуществляется водой контура охлаждения СУЗ, циркулирующей в кольцевом зазоре между каналом СУЗ и гильзой. В центральной части полости гильзы на участке активной зоны высотой ~ 7 м установлена труба опорная диаметром 50 мм и толщиной стенки 2 мм, изготовленная из алюминиевого сплава САВ-1 для ограничения выхода поглотителя из зоны при обрыве ленты сервопривода (СП), а также при отказе нижнего концевика в СП или обесточивании СП.

Гильза КРО представляет собой сборку из 12-ти пэлов, шарнирно закрепленных в верхней части на серьгах подвески. Пэл длиной 7600 мм состоит из двух шарнирно соединенных между собой звеньев. Каждое звено длиной 3800 мм представляет собой стальную оболочку (диаметром 82 мм и толщиной стенки 0.6 мм), изготовленную из нержавеющей стали марки 06Х18Н10Т, заполненную виброуплотненным порошковым поглотителем (титанатом диспрозия) и герметично заглушенную с торцов концевыми деталями. Каждый пэл размещается в соответствующем канале диаметром 10 мм гильзы КРО. Контроль герметичности гильзы осуществляется путем измерения давления во внутренней полости гильзы посредством манометра, подсоединенного к штуцеру клапана. Для определения состава газа в полости гильзы КРО организуется отбор пробы газа из полости гильзы. Для этого к клапану для измерения давления присоединяется байпасная линия для отвода газа из полости гильзы, состоящая из специально изготовленного штуцера, присоединенного к клапану гильзы. Через эту линию организуется постоянный отвод газовой смеси из полости гильзы в сливной трап. Расход воды через канал СУЗ с КРО составляет 3.6 – 5.2 м³/ч.

В реакторах РБМК гильза КРО выполнена из низколегированного алюминиевого деформируемого сплава САВ-1 тройной системы Al-Mg-Si следующего химического состава (мас. %): основной компонент Al – 97.8, Mg – 0.45 – 0.9, Si – 0.7 – 1.2; примеси (не более) Fe – 0.5, Zn – 0.03, Cu – 0.01, Ni – 0.03, Ti – 0.01, Cd ≤ 0.00001, B ≤ 0.00012 (ГОСТ 4784 – 74, ОСТ 1.90048 – 72). Алюминиевый сплав АСД-4 с содержанием алюминия 99.3%, примеси железа – 0.2%, кремния – 0.2 %, прочих примесей в сумме 0.3% имеет удельную поверхность ~ 0.4 м²/г и диаметр частиц 7 мкм (ТУ 48-5-226-87). В естественных условиях поверхности алюминия и алюминиевых сплавов покрыты тончайшей, очень плотной, прочной и гибкой оксидной пленкой Al₂O₃, предохраняющей металл от дальнейшего окисления [1 – 5].

В качестве химических активаторов алюминия и алюминиевых сплавов были исследованы жидкое натриевое стекло, жидкое калиевое стекло, кристаллогидрат метасиликата натрия состава Na₂SiO₃·5H₂O, негашеная и гашеная извести. Использовали жидкое натриевое стекло с силикатными модулями 2.56 и 3.2, водородным показателем pH = 10 – 12 (ГОСТ 13078-81). При добавлении к жидкому стеклу воды щелочность среды повышается до 14. Калиевое жидкое стекло представляет собой вязкий коллоидный раствор с плотностью от 1.3 до 1.4 г/см³ и силикатным модулем от 2.5 до 4.0 (ГОСТ 18958-73). Жидкое калиевое стекло и его водные растворы имеют щелочную реакцию с pH до 14. Использовали кристаллогидрат метасиликата натрия с пятью молекулами воды Na₂SiO₃·5H₂O (T_{пл} = 78.2°C). Химическим активатором алюминиевых сплавов мо-

жет быть известь, которая является продуктом обжига известняка, природного мела, гипсового камня и других кальцийсодержащих минералов при температурах от 1100 до 1200°C (ГОСТ 9179-77). При обжиге по реакции $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ ($\Delta H = -179$ кДж/моль) происходит декарбонизация карбоната кальция с удалением углекислого газа и образованием оксида кальция (негашеной извести). Температура плавления негашеной извести 2627°C, температура кипения 2850°C, плотность от 3.2 до 3.37 г/см³. Процесс гашения (гидратации) извести водой протекает по обратимой реакции $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca(OH)}_2$ с образованием гидроксида кальция Ca(OH)_2 (гашеная известь) и выделением большого количества тепла ($\Delta H = -65,1$ кДж/моль).

Исследования получения водорода в эндотермическом и экзотермическом режимах проводили на лабораторной установке, в состав которой входят электронагревательная плитка, термостат, стеклянная реакционная колба, в которую помещают компоненты реакционной смеси, термометр, газоотводная трубка для водорода, сосуд с водой, через который пропускается водород, и стеклянный цилиндр для сбора водорода [6 – 10]. Процесс получения водорода включает в себя процедуры, описанные в [11 – 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования физико-химических процессов получения водорода были проведены на гидрореакционных гетерогенных композициях на основе алюминиевых сплавов марок САВ-1 и АСД-4. В естественных условиях алюминий и алюминиевые сплавы покрыты тонкой прочной защитной пленкой оксида алюминия Al_2O_3 толщиной от 1 до 100 нм, которая поддерживает алюминий в пассивном состоянии по отношению к воде и водяному пару. Принято считать, что известные химические примеси при штатном водно-химическом режиме (ВХР) теплоносителя реакторов ВВЭР и РБМК практически не влияют на оксидный слой алюминия. Однако в качестве примесей в теплоноситель неконтролируемым образом могут попасть и другие нештатные для ВХР реакторов ВВЭР и РБМК химические примеси. В качестве таких примесей были исследованы жидкое натриевое и калиевое стекло и известь, которые используются при производстве строительных материалов реакторов и проведении ремонтных работ на АЭС. Например, жидкое натриевое стекло входит в состав бетона, применяемого при строительстве реакторных блоков АЭС [14, 15]. В водной среде эти соединения и продукты их химических превращений могут взаимодействовать с поверхностной оксидной пленкой Al_2O_3 , разрушить её и перевести алюминий в активированное состояние, реакция которого с водой приводит к разложению воды на водород. Поэтому учет возможности протекания таких процессов генерации водорода с участием реакторных металлов может помочь в предотвращении и снижении последствий инцидентов, связанных с реакциями водорода с кислородом в условиях как штатной эксплуатации ядерных реакторов, так и при проектных и запроектных авариях на АЭС [16 – 18].

Ниже приведены результаты исследований генерации водорода в гидрореакционных гетерогенных композициях, содержащих порошки алюминиевых сплавов марок САВ-1, АСД-4 и такие химические активаторы, как жидкое натриевое и калиевое стекло, соль кристаллогидрат метасиликата натрия состава $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и известь.

На рисунке 2 приведена кривая накопления водорода в композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава САВ-1, 1 г жидкого натриевого стекла и 10 г дистиллированной воды. При комнатной температуре процесс генерации водорода протекает с низкой скоростью. При нагревании до 60°C скорость генерации водорода значительно увеличивается, и предельный выход водорода достигает ~ 90 мл. С заметно большей скоростью и с большим выходом образуется водород в композиции, содержащей в качестве химического активатора кристаллогидрат метасиликата натрия состава $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (рис. 3).

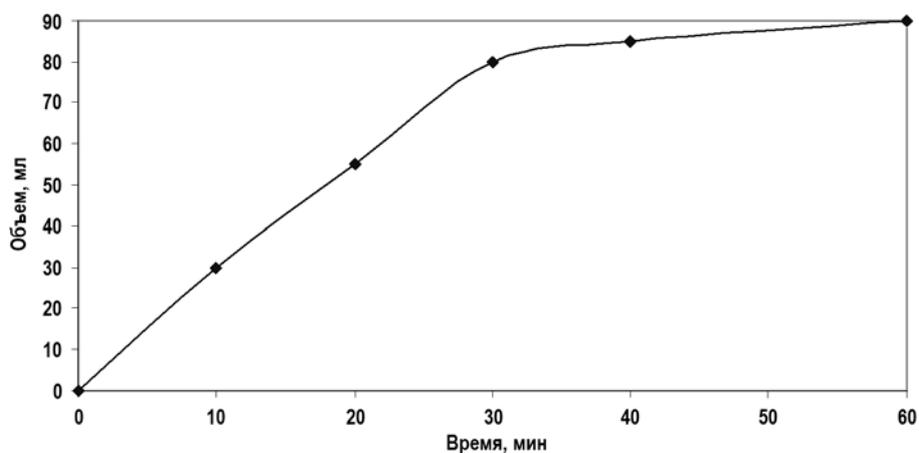


Рис. 2. Кривая накопления водорода в композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава САВ-1, 1 г жидкого натриевого стекла и 10 г дистиллированной воды, при 60°C

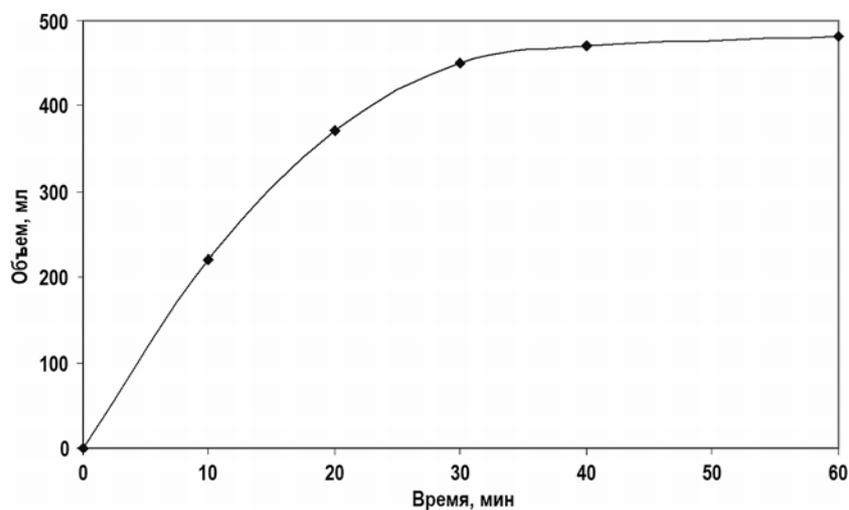


Рис. 3. Кривая накопления водорода в композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава САВ-1, 2 г кристаллогидрата метасиликата натрия состава $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и 10 г дистиллированной воды, при 60°C

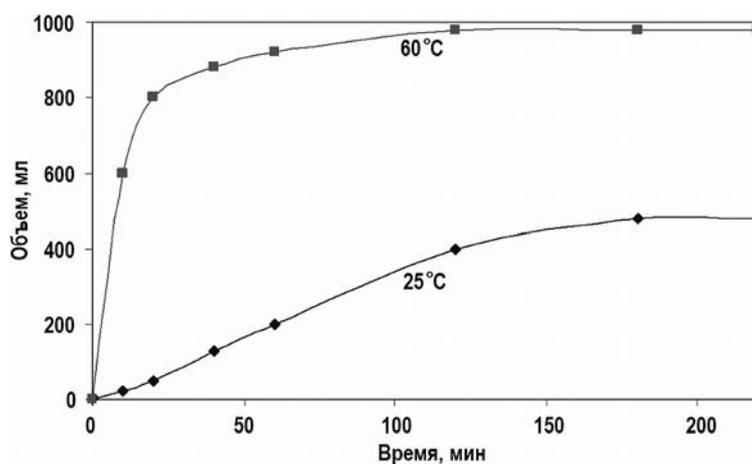


Рис. 4. Кривые накопления водорода в композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава АСД-4, 2 г кристаллогидрата метасиликата натрия и 10 г дистиллированной воды

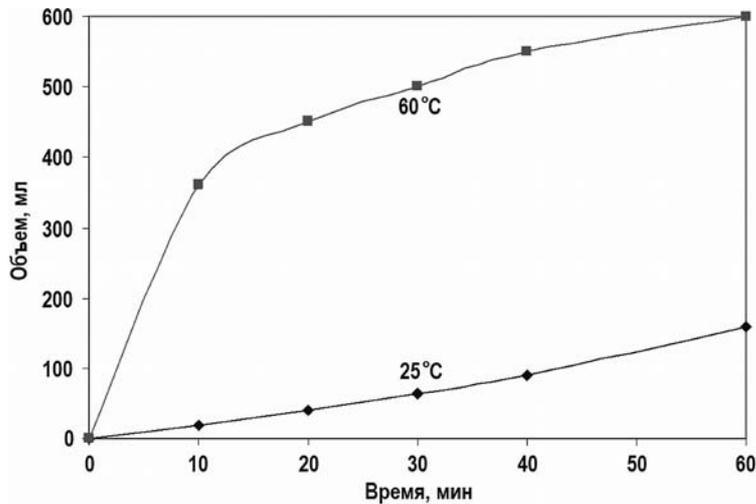


Рис. 5. Кривые накопления водорода в композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава САВ-1, 1 г жидкого калиевого стекла и 10 г дистиллированной воды

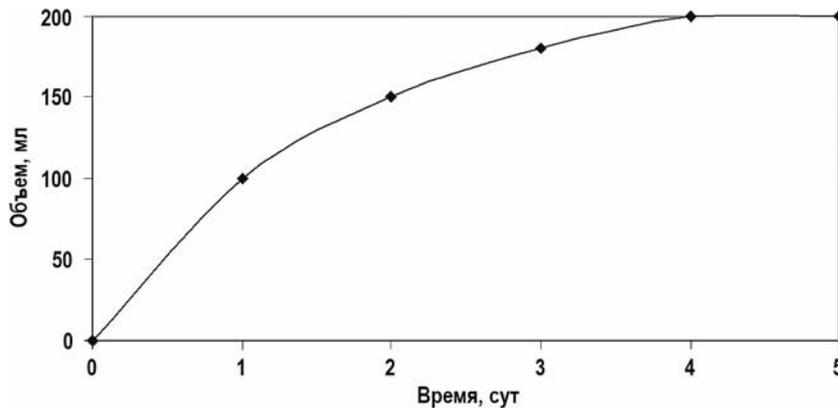


Рис. 6. Кривая накопления водорода в композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава САВ-1, 2 г негашеной извести и 10 г дистиллированной воды, в течение пяти суток при комнатной температуре (25°C)

На примере алюминиевого сплава марки АСД-4 было исследовано образование водорода в гетерогенных композициях, содержащих алюминиевые сплавы другого состава. Как видно на рис. 4, выход водорода в композиции, содержащей 1 г порошка сплава АСД-4, 2 г кристаллогидрата метасиликата натрия и 10 г дистиллированной воды, зависит от температуры и при 60°C составляет ~1000 мл/г. Видно, что в этой композиции выход водорода примерно в два раза больше, чем в композиции со сплавом САВ-1, и близок к выходу водорода в композициях с алюминиевой пудрой [7, 8].

На рисунке 5 приведены кривые накопления водорода в композициях с использованием в качестве активатора жидкого калиевого стекла. Как видно, в композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава САВ-1, 1 г жидкого калиевого стекла и 10 г дистиллированной воды, при 60°C с большей скоростью и примерно в два раза большим предельным выходом протекает процесс накопления водорода, чем в композиции с жидким натриевым стеклом (см. рис. 2).

На примере изучения кинетики накопления водорода в композиции, содержащей 1 г порошка алюминиевого сплава САВ-1, 2 г негашеной извести и 10 г дистиллированной воды, установлено, что эффективным активатором сплава САВ-1 в процессе генерации водорода может быть негашеная известь, содержащая в качестве химического активатора оксид кальция СаО. В этой композиции при комнатной темпера-

туре процесс образования водорода протекает в течение продолжительного времени (порядка пяти суток) (рис. 6).

Таблица 1

Выходы водорода (мл/1 г сплава) в композициях с алюминиевыми сплавами САВ-1, АСД-4 и химическими активаторами при 25 и 60 °С

Алюминиевый сплав марки	Химический активатор	Выход, температура 25°С	Выход, температура 60°С
САВ-1	Жидкое натриевое стекло	–	90
САВ-1	Метасиликат натрия	–	500
САВ-1	Жидкое калиевое стекло	150	600
САВ-1	Негашеная известь	200	–
АСД-4	Метасиликат натрия	150	600

В таблице 1 представлены выходы водорода по данным, приведенным на рис. 2 – 6. Из экспериментальных данных о кинетике накопления и выходах водорода следует, что, во-первых, в композициях, содержащих порошки алюминиевых сплавов САВ-1 и АСД-4, эффективно протекает процесс генерации водорода примерно с такими же скоростями накопления и предельными выходами водорода при комнатной температуре и 60 °С, как и в ранее изученных композициях с алюминиевой пудрой [7 – 9]; во-вторых, химическими активаторами алюминиевых сплавов являются кремний- и кальцийсодержащие реагенты, как для композиций с алюминиевой пудрой [7 – 9]; в-третьих, химические составы алюминиевых сплавов и химических активаторов оказывают заметное влияние на скорость накопления и предельный выход водорода; в-четвертых, основной вклад алюминия в химическом составе сплавов (~98%) позволяет предложенный ранее механизм процесса генерации водорода в композициях с алюминиевой пудрой распространить на композиции с алюминиевыми сплавами.

Оксид алюминия имеет амфотерный характер и не растворим в воде. В водных композициях с жидким натриевым стеклом и кристаллогидратом метасиликата натрия в результате гидролиза метасиликата натрия: $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} = \text{NaHSiO}_3 + \text{NaOH} + 5\text{H}_2\text{O}$ образуется гидроксид натрия NaOH, который реагирует с оксидом алюминия с образованием гидроксоалюмината $\text{Na}_3[\text{Al}(\text{OH})_6]$: $\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{NaOH} + 3\text{H}_2\text{O} = 2\text{Na}_3[\text{Al}(\text{OH})_6]$. После удаления слоя оксида с поверхности образуется активированный алюминий, который реагирует с водой, вытесняя водород с образованием гидроксида алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$ и водорода: $2\text{Al} + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2$. Гидроксид алюминия, имеющий слоистую кристаллическую решетку и практически нерастворимый в воде, под действием щелочей образует комплексные соединения (алюминаты), в которых алюминий входит в состав аниона: $\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{NaOH} = \text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$.

Так как для атома алюминия в этих соединениях характерно координационное число 6, а не 4, то действительная формула тетрагидроксо соединений следующая: $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})_2]$. Будучи амфотерным, алюминий легко взаимодействует с растворами щелочей, превращаясь в комплексное соединение (тетрагидроксоалюминат натрия) с образованием водорода: $2\text{Al} + 6\text{NaOH} + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{Na}_3[\text{Al}(\text{OH})_4] + 3\text{H}_2$. Алюминий обладает большим сродством к кислороду и очень легко окисляется с образованием оксида Al_2O_3 : $4\text{Al} + 3\text{O}_2 = 2\text{Al}_2\text{O}_3$, который вновь вступает во взаимодействие с гидроксидом натрия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алюминиевые сплавы марок САВ-1 и АСД-4, как и порошки алюминия и алюминиевая пудра, в водной среде с кремний- и кальцийсодержащими соединениями эффективно участвуют в химическом разложении воды на водород. Образующийся при

взаимодействии алюминиевого сплава САВ-1 с водой водород входит в состав газовой смеси в полости гильзы КРО. Поэтому образование водорода при взаимодействии сплава с химическими активаторами необходимо учитывать при проведении мониторинга газовой смеси гильзы КРО реактора РБМК-1000.

За активную поддержку работы и обсуждение материала статьи авторы выражают благодарность начальнику отдела ядерной безопасности и надежности Смоленской АЭС Скворцову Дмитрию Николаевичу.

Литература

1. Герасимов В.В. Коррозия реакторных материалов. – М.: Атомиздат, 1980. – 255 с.
2. Калинин Б.А., Платонов П.А., Тузов Ю.В., Чернов И.И., Штромбах Я.И. Т. VI. Конструкционные материалы ядерной техники. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 736 с.
3. Альтман М.Б., Андреев Г.Н., Арбузов Ю.П. Применение алюминиевых сплавов. Справочник. – М.: Металлургия, 1985. – 344 с.
4. Баландин Ю.Ф., Горынин И.В., Звездин Ю.И. Конструкционные материалы АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1984 – 280 с.
5. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы в авиаракетной и ядерной технике. // Вестник РАН. 2004. – Т. 74. – № 12. – С. 1076-1081.
6. Шилина А.С., Милинчук В.К. Физико-химические процессы получения водорода и адсорбента, соответствующие принципам «зелёной» химии. // Альтернативная энергетика и экология. – 2009. – № 10. – С. 10-14.
7. Милинчук В.К., Шилина А.С., Ананьева О.А. Исследование экологически безопасных, энергосберегающих способов получения водорода химическим разложением воды. // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 4. – С. 49-54.
8. 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. – 2013. – № 2. – С. 39-46.
9. Милинчук В.К., Клишпонт Э.Р., Белозеров В.И. Химическое разложение воды на водород в гетерогенных алюминийсодержащих композициях. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 4. – С. 32-38.
10. Милинчук В.К., Клишпонт Э.Р., Белозеров В.И. Превращения оксидных покрытий алюминия при имитации факторов ядерных энергетических установок. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 2. – С. 49-59.
11. Милинчук В.К., Роцектаев Б.М. Автономный генератор водорода. Патент 2 2510 876 РФ. МПК С01В 3/08. Бюл. 2011. № 12.
12. Клишпонт Э.Р., Роцектаев Б.М., Милинчук В.К. Кинетика накопления водорода при химическом разложении воды в гетерогенных композициях. // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 9. – С. 116-120.
13. Милинчук В.К., Клишпонт Э.Р., Белозеров В.И. Автономный генератор водорода на основе химического разложения воды алюминием. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 2. – С. 49-59.
14. Ран Ф., Адамантнадес А., Кентон Дж., Браун Ч. Справочник по ядерной энерготехнологии. / Пер. с англ. под ред. В.А. Легасова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 752 с.
15. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции. Учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. – М.: ИздАТ, 1994. – 296 с.
16. НП-040-02. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомной станции». – М.: Гостехнадзор, 2003. – 5 с.
17. Mitigation of hydrogen hazards in severe accidents in nuclear power plants. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2011.
18. Роцектаев Б.М. Водно-химический режим АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и РБМК-1000. Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 132 с.

Поступила в редакцию 17.09.2017 г.

Авторы

Белозеров Владимир Иванович, доцент, канд. техн. наук

E-mail: v.i.belozеров@iate.obninsk.ru

Милинчук Виктор Константинович, профессор, д-р. хим. наук

E-mail: milinchuk@iate.obninsk.ru

UDC 621.039.526 +620.9+544(075)

A STUDY OF THE GAS-WATER MIXTURE IN THE ROD CONTROL CLUSTER ASSEMBLY SLEEVE CAVITY OF THE RBMK-1000 REACTOR

Belozеров V.I., Milinchuk V.K.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «MEPhI»,
1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249020 Russia.

ABSTRACT

The design of the technical device for removing the gas-water medium from the rod control cluster assembly (RCCA) sleeve cavity to the storage pool ladder of the RBMK-1000 reactor makes it possible to install a sensor for monitoring the composition of the gas-water mixture. When the absorbing elements move in the RCCA, they rub against the walls of the longitudinal channels made of the aluminum alloy SAV-1. Under mechanical action, the oxide film is partially or completely removed from the channel surface, and the alloy passes into a state without a protective oxide layer. The purpose of the study is to obtain experimental data on the interaction of aluminum alloys SAV-1 and ASD-4 with the aqueous medium of the RCCA sleeve when chemical compounds are present in water that remove the passivating oxide layer (Al_2O_3) from the metal surface. As chemical activators for the alloys, silicon-containing compounds (sodium water glass, potassium water glass, crystalline sodium metasilicate hydrates) and lime are considered. Reactions of the aluminum alloys in aqueous solutions with sodium and potassium water glass are endothermic, whereas in aqueous solutions of crystalline sodium metasilicate hydrate and lime they are exothermic. The hydrogen yields for the alloys SAV-1 and ASD-4 at 60°C are ~ 0.6 l per 1 g of the reacted metal. The hydrogen formed during the interaction of the aluminum alloy SAV-1 with water is part of the gas-water mixture in the RCCA sleeve cavity. Therefore, the hydrogen formation should be taken into account when monitoring the gas-water mixture in the RCCA sleeve of the RBMK-1000 reactor.

Key words: RBMK-1000 reactor, rod control cluster assembly (RCCA), control and protection system (CPS), fuel element, absorber element, aluminum, aluminum alloys SAV-1 and ASD-4, water, hydrogen, sodium and potassium water glass, crystalline sodium metasilicate hydrates, lime.

REFERENCES

1. Gerasimov V.V. *Corrosion of reactor materials*. Moscow. Atomizdat Publ., 1980, 255 p. (in Russian).
2. Kalin B.A., Platonov P.A., Tuzov V.Yu., Chernov I.I., Shtrombakh Ya.I. *Structural materials of nuclear technology*. Volume VI. Moscow. National Research Nuclear University MEPhI Publ., 2012, 736 p. (in Russian).
3. Al'tman M.B., Andreev G.N., Arбузов Yu.P. *Application of aluminum alloys*. Handbook. Moscow. Metallurgiya Publ., 1985, 344 p. (in Russian).

4. Balandin Yu.F., Gorynin I.V., Zvezdin Yu.I. *Structural materials of nuclear power plants*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1984, 280 p. (in Russian).
5. Fridlyander I.N. Aluminum alloys in aerospace and nuclear engineering. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2004, v. 74, no. 12, pp. 1076-1081 (in Russian).
6. 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 ehnergetika i ehkologiya*, 2009, no. 10, pp. 10-14 (in Russian).
7. Milinchuk V.K., Shilina A.S., Anan'eva O.A. Research environmentally safe, energy-saving methods for producing hydrogen by chemical decomposition of water. *Al'ternativnaya ehnergetika i ehkologiya*. 2012, no. 4, pp. 49-54 (in Russian).
8. Milinchuk V.K., Belozarov 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. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2013, no. 2, pp. 39-46 (in Russian).
9. Milinchuk V.K., Klinshpont E.H.R., Belozarov V.I. Chemical decomposition of water into hydrogen in heterogeneous aluminum-containing compositions. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 4, pp. 32-38 (in Russian).
10. Milinchuk V.K., Klinshpont E.R., Belozarov V.I. Aluminum oxide coatings transformations in the simulation of the reactor factors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2015, no. 2, pp. 49-59 (in Russian).
11. Milinchuk V.K., Roshchektaev B.M. Autonomous hydrogen generator. Patent 2 2 510 876 RF. MPK S01V3/08. Bull. 2011, no. 12 (in Russian).
12. Klinshpont E.R., Roshchektaev B.M., Milinchuk V.K. The kinetics of accumulation of hydrogen by the chemical decomposition of water in heterogeneous compositions. *Al'ternativnaya ehnergetika i ehkologiya*. 2012, no. 9, pp. 116-120 (in Russian).
13. Milinchuk V.K., Klinshpont E.H.R., Belozarov V.I. Autonomous hydrogen generator based on chemical decomposition of water with aluminum. *Izvestiya vuzov. Yadernaya ehnergetika*. 2015, no. 2, pp. 49-59 (in Russian).
14. Ran F., Adamantnades A., Kenton Dzh., Braun Ch. *Handbook of nuclear energy technologies*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1989, 752 p. (in Russian).
15. Margulova T.H. *Nuclear power plants*. Textbook for high schools. Moscow. Izdat Publ., 1994, 296 p. (in Russian).
16. NR-040-02. Rules for hydrogen explosion protection at a nuclear plant. Moscow. Gostekhnadzor Publ., 2003, 5 p. (in Russian).
17. Mitigation of hydrogen hazards in severe accidents in nuclear power plants. International atomic energy agency. Vienna, 2011.
18. Roshchektaev B.M. *Water chemistry at NPP with VVER-1000 and RBMK-1000*. Textbook. Moscow. NIYaU MIFI Publ., 2010, 132 p. (in Russian).

Authors

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

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

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

E-mail: milinchuk@iate.obninsk.ru