

ГЕНЕРАЦИЯ ВОДОРОДА ГИДРОГЕТЕРОГЕННЫМИ КОМПОЗИЦИЯМИ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

С.Р. Асхадуллин, В.К. Милинчук

Обнинский институт ядерной энергетики ИАТЭ НИЯУ «МИФИ»

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



Процесс образования водорода и связанный с ним риск горения и взрыва представляет собой сложную проблему водородной и радиационной безопасности ядерных реакторов. Гидроксиды лития, калия и натрия применяются в реакторах ВВЭР в качестве корректирующих добавок для поддержания водородного показателя водного теплоносителя с борной кислотой на контролируемом уровне $\text{pH} = 5,8 - 10,3$. При исследовании процесса взаимодействия водных растворов вышеперечисленных гидроксидов с алюминием химически наиболее активным является гидроксид лития; данная реакция протекает с образованием водорода с высокой скоростью при комнатной температуре (в экзотермическом режиме). Процессы генерации водорода в гидрогетерогенных композициях с гидроксидами калия и натрия протекают с приемлемой скоростью при нагревании до $\sim 60^\circ\text{C}$. Кинетика генерации водорода сложным образом зависит от содержания борной кислоты, а именно, при низкой концентрации $0,01 - 0,05 \text{ г/л}$ выход водорода на уровне $\sim 1000 \text{ мл}$, а при концентрации $0,6 \text{ г/л}$ образование водорода не происходит. Согласно нормам качества теплоносителя, в горячем состоянии энергоблока ВВЭР-1000 или в состоянии реактора на минимально контролируемом уровне мощности суммарная концентрация щелочных металлов составляет около 1 мг/дм^3 , т.е. на два – три порядка меньше, чем в исследуемых композициях. Обнаружение влияния гидроксидов щелочных металлов на образование водорода с участием конструкционных материалов на примере алюминия (модельного металла) позволяет предполагать, что присутствующие в теплоносителе в небольшом количестве гидроксиды этих металлов также могут принимать участие в гидрогетерогенном процессе образования небольших количеств водорода. Возможность генерации водорода по этому пути необходимо принимать во внимание при длительных сроках эксплуатации ядерных реакторов, авариях и инцидентах на АЭС.

Ключевые слова: вода, водород, алюминий, модельный металл, оксид алюминия, борная кислота, гидроксид лития, гидроксид калия, гидроксид натрия, гидрогетерогенная композиция, водородная и радиационная безопасность ядерных реакторов.

ВВЕДЕНИЕ

Водно-химический режим (ВХР) первого контура АЭС с реакторами ВВЭР является коррекционным. При работе энергоблока на мощности для водного теплоносителя применяется слабощелочной восстановительный координированный калий-аммиачно-гидразиновый ВХР с борным регулированием [1 – 5]. Борная кислота в условиях работы реактора имеет ряд положительных качеств: она химически устойчива в радиационных и термических полях первого контура, хорошо растворима в воде, не образует шлама и накипи. Но борная кислота понижает величину водородного показателя pH теплоносителя, что усиливает коррозию конструкционных материалов оборудования контура. Для компенсации кислотных свойств борной кислоты и поддержания оптимальных параметров ВХР в теплоноситель вводятся корректирующие добавки в виде щелочных металлов (лития, калия, натрия), аммиака и гидразин-гидрата $N_2H_4 \cdot 2H_2O$.

Согласно нормам качества теплоносителя, суммарная концентрация ионов щелочных металлов в «горячем» состоянии энергоблока ВВЭР составляет $\sim 3,0$ мг/дм³ и устанавливается путем введения в теплоноситель первого контура гидроксидов щелочных металлов в количестве, зависящем от концентрации борной кислоты и обеспечивающем поддержание водородного показателя на контрольном уровне $pH = 5,8 - 10,3$ [6 – 10]. В этой проблеме не изучено влияние щелочных металлов на образование водорода при взаимодействии водного теплоносителя с конструкционными материалами реактора. Поэтому целью работы является выяснение влияния гидроксидов лития, калия и натрия на процесс образования водорода при взаимодействии теплоносителя с конструкционными материалами реактора. В качестве модельного металла (моделирующего конструкционные материалы реактора) в исследовательских целях взят алюминий в виде пудры для использования в гидрогетерогенных композициях. Алюминий взят в виде пудры для увеличения площади соприкосновения реагентов (алюминий – водный раствор с корректирующей добавкой) и выхода водорода, чтобы было возможно оценить различие в генерации водорода с использованием водных растворов с разными корректирующими добавками гидроксидов щелочных металлов. Водные растворы с корректирующими добавками гидроксидов щелочных металлов моделируют ВХР первого контура реакторов типа ВВЭР [11 – 20].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рисунке 1 приведена схема лабораторной установки кафедры общей и специальной химии ИАТЭ НИЯУ МИФИ для исследования образования водорода химическим разложением воды в гидрогетерогенных композициях. Установка позволяет исследовать генерацию водорода композициями от комнатной температуры до 100°C. Контроль протекающей реакции образования водорода осуществляется путем измерения количества выделившегося водорода в цилиндре 7. В качестве объекта исследования была взята реакционная смесь, состоящая из алюминиевой пудры с удельной поверхностью 1,6 м²/г в виде чешуек размером 25 – 50 мкм, толщиной 0,25 – 0,50 мкм (марка ПАП-2, ГОСТ 5494-95) и гидроксида лития (марка МРТУ 6-09-4597-57, ГОСТ 8595-83), гидроксида калия (марка ЧДА, ГОСТ 24363-80) и гидроксида натрия (марка ЧДА, ГОСТ 4328-77). В качестве добавки использовали также борную кислоту (марка Б, ГОСТ 18704-78).

Процесс получения водорода включает в себя ряд процедур. Взвешиваются навески алюминиевой пудры 8, гидроксидов щелочных металлов и борной кислоты на аналитических весах марки OHAUS Adventurer (погрешность $\pm 0,0002$ г). Дистиллированная вода отмеривается мерными цилиндрами объемом 10 и 50 мл (ГОСТ 1770-

74, погрешность $\pm 0,2$ мл). Навески алюминиевой пудры, гидроксидов металлов, борной кислоты и дистиллированной воды, взятые в определенной пропорции, загружаются в реакционную стеклянную колбу 3 объемом $100 \pm 0,2$ мл (ГОСТ 1770-74) и тщательно перемешиваются. Колбу помещают в водяную баню 2, снабженную термометром 4, и нагревают до необходимой температуры на электроплитке 1, что позволяет вести процесс генерации водорода в управляемом режиме с приемлемой скоростью. Реакционная колба 3 снабжена трубкой 5 для отвода образующегося водорода через воду 6 в измерительный цилиндр 7 объемом 1000 ± 10 мл (метод Лавуазье). Для измерения водородных показателей гидрогетерогенных композиций использовали рН-метр марки рН-150 МА.

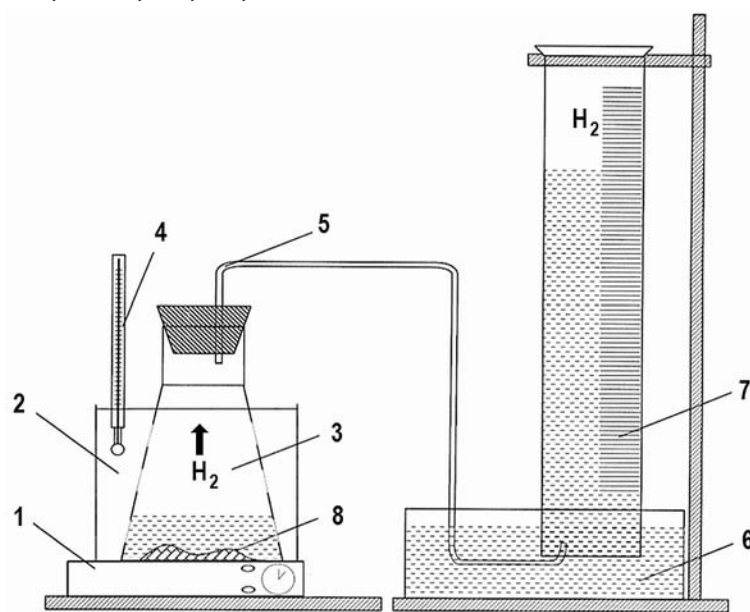


Рис. 1. Схема лабораторной установки для получения водорода химическим разложением воды в гидрогетерогенных композициях (описание элементов приводится в тексте)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние гидроксида лития. На рисунке 2 приведены кривые накопления водорода в гидрогетерогенных композициях (1 г пудры Al, 10 г дистиллята H_2O) в зависимости от содержания гидроксида лития LiOH.

В композиции без примеси гидроксида лития образование водорода не происходит. При введении в композицию даже небольшого количества примеси гидроксида лития около $1 \cdot 10^{-4}$ г уже при комнатной температуре наблюдается интенсивное образование водорода. Протекание реакции при комнатной температуре свидетельствует об экзотермическом характере протекания этой реакции в таких гидрогетерогенных композициях. Кинетика накопления водорода зависит от содержания гидроксида лития в этих композициях. При содержании LiOH ~ 1 г генерация водорода протекает в неуправляемом экзотермическом режиме с высокой скоростью, бурно, что не позволяет провести тщательное измерение кинетики накопления водорода. При содержаниях гидроксида лития от 0,0007 до 0,3 г процесс накопления водорода при комнатной температуре, протекающий в спокойном режиме, завершается за 25 – 120 мин с предельным выходом водорода $\sim 800 - 1100$ мл на 1 г прореагировавшего алюминия. При содержаниях гидроксида лития на порядок меньших ($\sim 0,0001$ г) наблюдается образование водорода, протекающее с низкой скоростью.

стью таким образом, что процесс генерации водорода протекает в течение очень длительного времени (десятки часов).

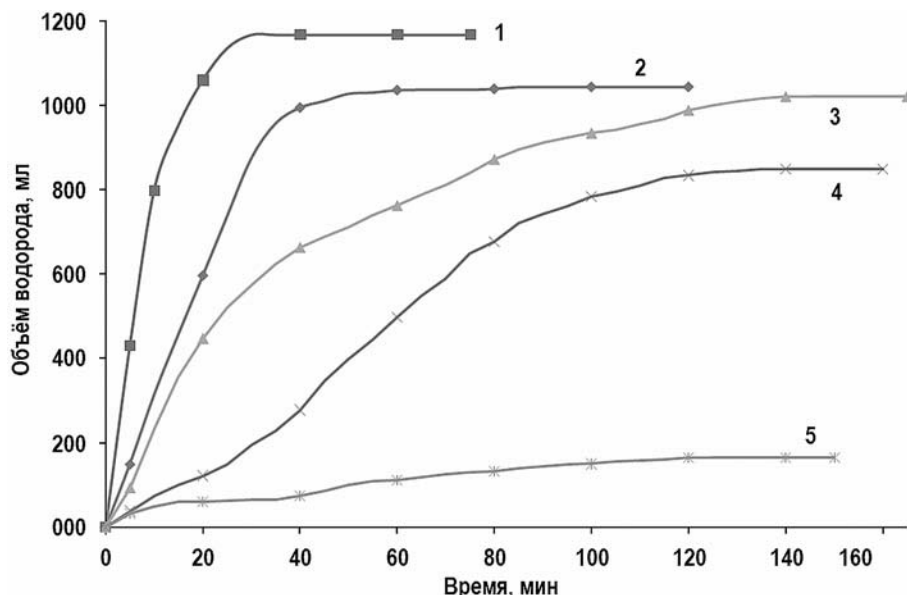


Рис. 2. Кривые накопления водорода при комнатной температуре в гидрогетерогенных композициях (1 г Al, 10 г H_2O) в зависимости от содержания в них гидроксида лития: 1 – 0,28 г; 2 – 0,05 г; 3 – 0,01 г; 4 – 0,003 г; 5 – 0,0007 г

Влияние гидроксида калия. При отсутствии в композиции гидроксида калия образование водорода не наблюдается. При введении в композицию примеси КОН наблюдается образование водорода, накопление которого протекает с приемлемой скоростью при температурах $\sim 60^\circ C$ и выше (рис. 3).

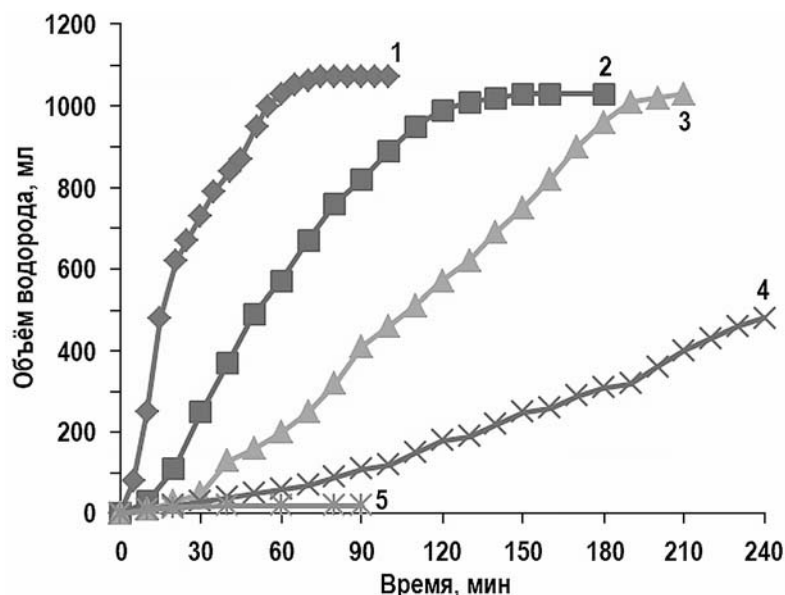


Рис. 3. Кривые накопления водорода при $60^\circ C$ в гидрогетерогенных композициях (1 г Al, 10 г H_2O) в зависимости от содержания в них гидроксида калия: 1 – 0,06 г; 2 – 0,03 г; 3 – 0,01 г; 4 – 0,003 г; 5 – 0,001 г

Кинетика накопления водорода зависит от количества примеси щелочи. При высоком содержании гидроксида калия (0,1 – 1,0 г) процесс накопления протекает

бурно, с высокой скоростью. Максимальный предельный выход водорода ~ 1000 – 1200 мл/на 1 г прореагировавшего алюминия достигается при концентрации гидроксида калия 0,01 – 0,06 г за время 75 – 210 мин. Образование водорода происходит и в композициях, содержащих небольшие количества гидроксида калия, вплоть до нормируемого показателя ~ 3 мг/дм³. Генерация водорода, как и в композициях с гидроксидом натрия, при комнатной температуре протекает с низкой скоростью в течение очень длительного времени (десятки часов).

Влияние гидроксида натрия. Скорость накопления водорода, предельный выход водорода, время достижения предельного выхода водорода в гидрогетерогенных композициях из 1 г алюминиевой пудры и 10 г дистиллированной воды в зависимости от содержания гидроксида натрия от 0,0008 до 0,1 г при комнатной температуре представлены в табл. 1. При большом содержании гидроксида натрия (от 0,2 до 1 г) образование водорода протекает очень бурно с большим выделением тепла, что свидетельствует об экзотермическом характере протекания процесса образования водорода. Протекание процесса в таком неуправляемом режиме не позволяет корректно определить кинетические параметры реакции. Поэтому кинетику процесса накопления водорода исследовали на композициях с содержанием гидроксида натрия меньше 0,1 г. При небольшом количестве гидроксида натрия (~ 0,0008 г и меньше) заметное количество водорода около 150 мл образуется только за время регистрации не менее 60 мин.

Таблица 1

Скорость накопления водорода, предельный выход водорода, время достижения предельного выхода водорода в гидрогетерогенных композициях в зависимости от содержания в них гидроксида натрия при комнатной температуре

Содержание гидроксида натрия, г	Скорость накопления водорода, мл/мин	Предельный выход водорода, мл	Время достижения предельного выхода водорода, мин
0,0008	13,2	150	60
0,005	11,2	1000	40
0,009	8,3	1000	40
0,05	1,9	1040	40
0,1	0,6	1050	40

Влияние борной кислоты. В таблице 2 представлены результаты исследования накопления водорода в гидрогетерогенных композициях (1 г пудры Al, 0,05 г NaOH, 10 г дистиллята H₂O) в зависимости от содержания в них борной кислоты при 60°C. При концентрациях борной кислоты от 0,03 до 0,1 г предельный выход водорода за фиксируемое время от 100 до 200 мин достигает максимальной величины ~ 1000 – 1270 мл.

Как видно на рис. 4, кривые накопления водорода в гидрогетерогенных композициях имеют сложную зависимость от концентрации борной кислоты (0,03 – 0,07 г) и времени экспонирования (примерно до 200 мин).

На всех кривых накопления можно выделить индукционный участок от 10 до 50 мин, в течение которого образование водорода не фиксируется. Величина этого участка зависит от содержания борной кислоты и времени экспонирования. Вероятно, на этом участке кислота полностью нейтрализуется щелочью NaOH. На втором участке кривой наблюдается быстрое накопление водорода, что обусловлено увеличением щелочности композиции и высокой скоростью образования водорода за счет химического разложения воды активированным алюминием. Бо-

лее сложный характер имеют кривые накопления в композициях с большим содержанием борной кислоты: при содержании кислоты ~ 0,5 г накапливается около 100 мл водорода, а при 0,7 г образования водорода вообще не происходит.

Таблица 2

Влияние содержания борной кислоты на водородный показатель гидрогетерогенных композиций, на скорость накопления водорода, выход водорода и время достижения предельного выхода водорода при 60 °С

Содержание борной кислоты, г	Водородный показатель композиции, pH	Скорость накопления водорода, мл/мин	Выход водорода, мл	Время достижения предельного выхода водорода, мин
0,03	13,8	13,2	1270	100
0,05	13,4	11,2	1020	100
0,07	11,0	8,3	1080	200
0,1	10,8	1,9	920	160
0,5	8,0	0,6	100	100
0,7	7,1	0,1	~ 25	100

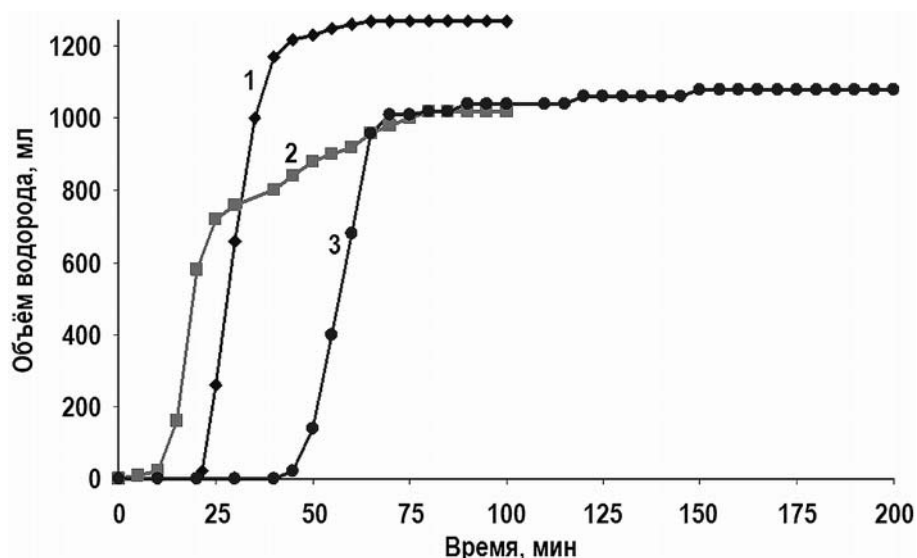
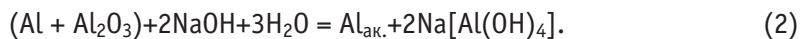


Рис.4. Кривые накопления водорода в гидрогетерогенных композициях (1 г Al, 0,05 г NaOH, 10 г H₂O) в зависимости от содержания в них борной кислоты: 1 – 0,03 г; 2 – 0,05 г; 3 – 0,07 г. Температура 60 °С

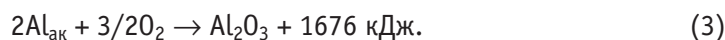
Процесс образования водорода в гидрогетерогенных композициях с участием гидроксидов щелочных металлов можно представить в виде двух стадий. Первая стадия – взаимодействие гидроксидов щелочных металлов с тонким поверхностным слоем оксида алюминия (5 – 10 мкм) Al₂O₃. Оксид алюминия Al₂O₃, будучи амфотерным соединением, может реагировать не только с кислотами, но и со щелочами; для примера возьмём гидроксид натрия:



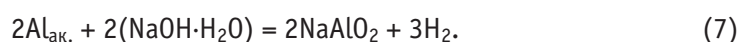
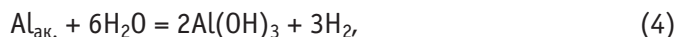
Это приводит к удалению поверхностного слоя оксида алюминия и образованию металлического алюминия, который на воздухе в течение короткого промежутка времени находится в активированном состоянии Al_{ак.} (без поверхностного пассивирующего слоя оксида алюминия):



Вторая стадия процесса – взаимодействие активированного алюминия $Al_{ак.}$ с кислородом воздуха и водой. Алюминий в виде порошка или стружек (с высокой удельной поверхностью) ярко горит на воздухе с образованием оксида алюминия, выделяя большое количество теплоты:



Активированный алюминий $Al_{ак.}$ также энергично реагирует с водой (в экзотермическом режиме) с образованием водорода по одной из следующих реакций:



Предельный выход водорода в гидрогетерогенных композициях с участием гидроксидов щелочных металлов определяется массой алюминия, количеством гидроксидов щелочных металлов и временем проведения процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных результатов следует, что природа гидроксидов щелочных металлов (Li, K, Na) существенно влияет на процесс образования водорода в гидрогетерогенных композициях с алюминием, поскольку эти металлы являются сильными химическими активаторами процесса образования водорода. В данном процессе химически наиболее активным активатором является гидроксид лития. В композициях с гидроксидом лития образование водорода протекает с высокой скоростью при комнатной температуре в экзотермическом режиме. В композициях с гидроксидом калия и натрия накопление водорода с приемлемой для регистрации скоростью протекает при нагревании до 60°C. В этих композициях скорость накопления и выход водорода зависят от содержания борной кислоты, например, при содержании борной кислоты ~ 0,03 г/л выход водорода составляет ~ 1000 мл на 1 г прореагировавшего алюминия, а при 0,6 г/л образование водорода не происходит из-за нейтрализации гидроксида калия борной кислотой. Таким образом, в этих композициях гидроксиды щелочных металлов являются эффективными активаторами процесса образования водорода, а борная кислота – ингибитором этого процесса.

Согласно нормам качества теплоносителя, в горячем состоянии энергоблока ВВЭР-1000 или в состоянии реактора на минимально контролируемом уровне мощности суммарная концентрация щелочных металлов составляет около 1 мг/дм³, т.е. на два – три порядка меньше, чем в исследуемых композициях [4]. Тем не менее, обнаружение влияния гидроксидов щелочных металлов на образование водорода с участием конструкционных материалов, рассмотренное на примере алюминия, моделирующего конструкционный материал реактора, позволяет предполагать, что присутствующие в теплоносителе в небольших количествах гидроксиды этих металлов могут принимать участие в гидрогетерогенном процессе образования небольших количеств водорода. Возможность генерации водорода по этому пути необходимо учитывать, особенно при непрерывных длительных периодах эксплуатации ядерных реакторов, а также в режимах инцидентов и аварий на АЭС [1 – 3].

Признательность

Авторы выражают благодарность и глубокую признательность С.П. Багдиновой, И.С. Корнеевой и В.С. Соловьевой за активное участие в данном исследовании.

Литература

1. ГОСТ 24693-81. Реакторы ядерные энергетические корпусные с водой под давлением. Общие требования к системе борного регулирования. – Введ. 1982-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 5 с.
2. Техническое обоснование. Изменения и дополнения, вносимые в стандарт по ведению водно-химического режима первого контура энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 (с учетом замечаний Ростехнадзора) по теме: Пересмотр стандарта СТП ЭО 0004 – 00 «Водно-химический режим первого контура энергоблоков атомных электростанций с реактором ВВЭР-1000. Нормы качества теплоносителя и средства их обеспечения» 2011/4.1.1.1.1/46111 (Y025/2011//4600002685/00) этап 29. – М.: Ростехнадзор, 2016. – 71 с.
3. Авдеев Е.Ф., Баклушин Р.П., Гольба В.С. и др. Аварии и инциденты на атомных электростанциях: Учеб. пособие под общ. ред. д.ф. - м.н., проф. С.П. Соловьева. – Обнинск, ИАТЭ, 1992. – 300 с.
4. Рощектаев Б.М. Водно-химический режим АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и РБМК-1000: Учеб. пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 132 с.
5. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. – М.: Атомиздат, 1970. – 295 с.
6. Клишпонт Э.Р., Рощектаев 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.
7. Милинчук В.К., Белозеров В.И., Ананьева О.А., Ларичева Т.Е., Куницына Т.Е. Химическое разложение воды на водород в гетерогенных алюминий содержащих композициях. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 4. – С. 32-40.
8. 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.
9. Школьников Е.И., Якушко С.А., Тарасова С.А. и др. Исследование работы алюмоводного микрогенератора водорода для компактных источников питания. // Электрохимическая энергетика. – 2008. – Т. 8. – № 2. – С. 86-91.
10. Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Василькова И.В., Чечев В.П. Свойства неорганических соединений. – Л.: Химия, 1983. – 392 с.
11. Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В. Водород для производства энергии: Проблемы и перспективы. // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. – 2006. – № 8. – С. 72-90.
12. Дмитриев А.Л., Прохоров Н.С. Перспективы применения водорода в качестве энергоносителя // Химическая промышленность. – 2003. – Т. 80. – № 10. – С. 27-29.
13. Легасов В.А. Методы получения водорода путем разложения воды. // Атомно-водородная энергетика и технология. – М.: Атомиздат, 1978. – Вып. 1. – С. 37-61.
14. Милинчук В.К., Шилина А.С., Ананьева О.А. и др. Исследование экологически безопасных, энергосберегающих способов получения водорода химическим разложением воды. // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. – 2012. – № 4. – С. 49-54.
15. Милинчук В.К., Белозеров В.И., Шилина В.И. и др. Исследование генерации водорода при взаимодействии алюминия с водными растворами. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 2. – С. 39-47.
16. Милинчук В.К., Рощектаев Б.М. Автономный генератор водорода. Патент на изобретение RU 2510876 C2, 10.04.2014. Заявка № 2012115818/05 от 19.04.2012.
17. Аминов Р.З., Байрамов А.Н. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными станциями. – М.: Наука, 2016. – С. 14-30.
18. Шейндлин А.Е, Жук А.З. Концепция алюмоводородной энергетики. // Российский химический журнал. – 2006. – Т. 1. – № 6. – С. 105-108.
19. Милинчук В.К., Клишпонт Э.Р., Белозеров В.И. и др. Превращения покрытий оксида алюминия при имитации факторов ЯЭУ. // Известия вузов. Ядерная энергетика.

– 2016. – № 2. – С. 45-54.

20. Салахова А.А., Суворов В.А., Фирсова А.И. и др. Влияние борной кислоты на генерацию водорода алюминийсодержащими гидрокомпозициями с химическими активаторами. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 3. – С. 171-179. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.3.15>.

Поступила в редакцию 20.10.2020 г.

Авторы

Асхадуллин Сергей Радомирович, аспирант

E-mail: s.askhadulin@mail.ru

Милинчук Виктор Константинович, профессор, доктор химических наук

E-mail: vkmlinchuk@mail.ru

UDC 629.9 +544(075)

GENERATION OF HYDROGEN BY HYDROHETEROGENIC COMPOSITIONS BASED ON ALUMINUM AND ALKALINE METALS

Askhadullin S.R., Milinchuk V.K.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «MEPhI»

1 Studgorodok, 249040 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

ABSTRACT

The process of hydrogen formation and the associated risk of combustion and explosion is a complex problem in the hydrogen and radiation safety of nuclear reactors. Lithium, potassium and sodium hydroxides are used in VVER reactors as corrective additives to maintain the pH of the aqueous coolant with boric acid at a controlled level of 5.8 – 10.3 by removing the passivating layer of aluminum oxide Al_2O_3 from the surface. In this process, the most reactive are lithium hydroxides, the reactions of which with the formation of hydrogen proceed at a high rate at room temperature (in an exothermic mode). The processes of hydrogen generation in hydroheterogeneous compositions with potassium and sodium hydroxides proceed at an acceptable rate when heated to ~ 60 °C. The kinetics of hydrogen generation depends in a complex way on the boric acid content, namely, at a low concentration of 0.01 – 0.05 g/l, the yield of hydrogen is at a level of ~ 1000 ml, and at a concentration of 0.6 g/l, no hydrogen is formed. According to the quality standards of the coolant in the hot state of a VVER-1000 power unit or in the reactor state at the minimum controlled power level, the total concentration of alkali metals is about 1 mg/dm³, i.e. two to three orders of magnitude less than in the compositions we have studied. The discovery of the influence of alkali metal hydroxides on the formation of hydrogen with the participation of structural materials using the example of aluminum suggests that the hydroxides of these metals present in a coolant in a small amount can also take part in the hydroheterogeneous process of the formation of small amounts of hydrogen. The possibility of generating hydrogen along this path must be taken into account in the long-term operation of nuclear reactors, accidents and incidents at nuclear power plants.

Key words: water, hydrogen, aluminum, aluminum oxide, boric acid, lithium hydroxide, potassium hydroxide, sodium hydroxide, hydroheterogeneous composition,

hydrogen and radiation safety of nuclear reactors.

Acknowledgments

We express our gratitude and deep appreciation to S.P. Bagdinova, I.S. Korneeva and V.S. Solovieva who participated in this study.

REFERENCES

1. GOST 24693-81. *Nuclear Power Vessel Reactors with Pressurized Water*. General Requirements for Boron Control System. Intr. 1982-07-01. Moscow. Publishing House of Standards, 1981, 5 p. (in Russian).
2. Technical Justification. Changes and Additions to the Standard on Water-Chemical Regime of the Primary Circuit of Power Units of NPPs with VVER-1000 (with consideration of remarks of the Federal Technical Supervision Service) on the subject: Revision of the Standard STP EO 0004 – 00 «*Water-Chemical Regime of the Primary Circuit of Power Units of Nuclear Power Plants with VVER-1000 Reactor. Quality Standards of Coolant and Means to ensure them*». 2011/4.1.1.1.1/46111 (Y025/2011//4600002685/00) Stage 29. Moscow. Rostekhnadzor Publ., 2016, 71 p. (in Russian).
3. Avdeev E.F., Baklushin R.P., Golba V.S. et al. *Accidents and Incidents at Nuclear Power Plants: Study Guide*. Edited by Professor S.P. Solovyov. Obninsk. IATE Publ., 1992. 300 p. (in Russian).
4. Roshektaev B.M. *Water-Chemical Regime of NPPs with VVER-1000 and RBMK-1000 Reactors: Study Guide*. M.: NIYaU MIFI Publ., 2010, 132 p. (in Russian).
5. Subbotin V.I., Ivanovsky M.N., Arnoldov M.N. *Physicochemical Foundations of the Use of Liquid Metal Coolants*. Moscow. Atomizdat Publ., 1970, 295 p. (in Russian).
6. Klinshpont E.R., Roshektaev B.M., Milinchuk V.K. Kinetics of Hydrogen Accumulation during Chemical Decomposition of Water in Heterogeneous Compositions. *Al'ternativnaya Energetika i Ecologiya. – ISJAEF*. 2012, no. 9, pp. 116-120 (in Russian).
7. Milinchuk V.K., Belozerov V.I., Ananyeva O.A., Laricheva T.E., Kunitsina T.E. Chemical Decomposition of Water to Hydrogen in Heterogeneous Aluminum Containing Compositions. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 4, pp. 32-40 (in Russian).
8. Milinchuk V.K., Klinshpont E.R., Belozerov V.I. Autonomous Hydrogen Generator based on the Chemical Decomposition of Water by Aluminum. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2015, no. 2, pp. 49-59 (in Russian).
9. Shkolnikov E.I., Yakushko S.A., Tarasova S.A. et al. Investigation of the Operation of an Aluminum-Water Hydrogen Microgenerator for Compact Power Sources. *Elektrokhimicheskaya Energetika*. 2008, v. 8, no. 2, pp. 86-91 (in Russian).
10. Efimov A.I., Belorukova L.P., Vasilkova I.V., Chechev V.P. *Properties of Inorganic Compounds*. Leningrad. Khimiya Publ., 1983, 392 p. (in Russian).
11. Tarasov B.P., Lototsky M.V. Hydrogen for Energy Production: Problems and Prospects. *Al'ternativnaya Energetika i Ecologiya. – ISJAEF*. 2006, no. 8, pp. 72-90 (in Russian).
12. Dmitriev A.L., Prokhorov N.S. Prospects of Using Hydrogen as an Energy Carrier. *Khimicheskaya Promyshlennost'*. 2003, v. 80, no. 10, pp. 27-29 (in Russian).
13. Legasov V.A. Methods of Obtaining Hydrogen by Decomposition of Water. *Atomno-Vodorodnaya Energetika i Tekhnologii*. Moscow. Atomizdat Publ., 1978, iss. 1, pp. 37-61 (in Russian).
14. Milinchuk V.K., Shilina A.S., Ananyeva O.A., et al. Study of Environmentally Safe and Energy-Saving Ways of Obtaining Hydrogen by Chemical Decomposition of Water. *Al'ternativnaya Energetika i Ecologiya. – ISJAEF*. 2012, no. 4, pp. 49-54 (in Russian).
15. Milinchuk V.K., Belozerov V.I., Shilina V.I. et al. A Study of Hydrogen Generation in Interaction of Aluminum with Aqueous Solutions. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh*

Zawedeniy. Yadernaya Energetika. 2013, no. 2, pp. 39-47 (in Russian).

16. Milinchuk V.K., Roschektaev B.M. Autonomous Hydrogen Generator. Patent for the Invention RU 2510876 C2, 10.04.2014. Application No. 2012115818/05 of 19.04.2012 (in Russian).

17. Aminov R.Z., Bayramov A.N. *Combining Hydrogen Energy Cycles with Nuclear Power Plants*. Moscow. Nauka Publ., 2016, pp. 14-30 (in Russian).

18. Sheindlin A.E., Zhuk A.Z. The concept of alumina-hydrogen energy. *Rossiysky Khimichesky Zhurnal*. 2006, v. L, no. 6, pp. 105-108 (in Russian).

19. Milinchuk V.K., Klinshpont E.R., Belozerov V.I. et al. Transformation of the Aluminum Oxide Coatings at the Simulation of the Nuclear Power Engineering Factors. *Izvestia vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016, no. 2, pp. 45-54 (in Russian).

20. Salakhova A.A., Suvorov V.A., Firsova A.I. et al. Influence of Boric Acid on the Generation of Hydrogen by Aluminum-Containing Compositions with Chemical Activators. *Izvestia vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 3, pp. 171-179. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.3.15> (in Russian).

Authors

Askhadullin Sergey Radomirovich, PhD Student

E-mail: s.askhadulin@mail.ru.

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

E-mail: vkmilinchuk@mail.ru.