

# АДСОРБЦИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ЙОДА ИЗ ГАЗОАЭРОЗОЛЬНЫХ СРЕД И ВОДНЫХ РАСТВОРОВ НОВЫМ ТИПОМ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СОРБЕНТА

**В.А. Шилин\***, **А.Б. Гордиенко\*\***, **А.С. Шилина\*\***, **В.К. Милинчук\*\***

*\*Автономная некоммерческая организация, Научно-исследовательский центр «Радиофизические тестовые технологии», г. Москва*

*\*\* Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*



Представлены результаты исследований сорбции алюмосиликатными сорбентами паров молекулярного йода из газоаэрозольных сред в статическом и динамическом режимах. Сорбционная емкость по парам молекулярного йода составляет  $234 \pm 1.0$  мг/г. Коэффициент извлечения йода из газоаэрозольных сред при сорбции в динамическом режиме  $99.5 \pm 0.2\%$ . Сорбционная емкость алюмосиликатного сорбента по растворенному в воде йоду составляет  $254 \pm 12$  мг/г. Алюмосиликатный сорбент, модифицированный  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ , обладает высокой льдообразующей активностью.

**Ключевые слова:** йод, адсорбция, алюмосиликатный адсорбент, сорбционная емкость, коэффициент извлечения йода, льдообразующая активность аэрозоля.

**Key words:** iodine, adsorption, aluminosilicate adsorbent, sorption capacity, factor of extraction of iodine, ice-nucleation activity of aerosol.

## ВВЕДЕНИЕ

В составе аэрозолей и газовых примесей, выбрасываемых реакторами АЭС, идентифицируют, наряду с прочими радионуклидами, изотопы радиоактивного йода в виде молекулярного йода и его органических соединений, главным образом, йодистый метил. Как источник излучения наиболее важным нуклидом является изотоп йода  $^{131}\text{I}$ , имеющий период полураспада 8.05 сут и энергию  $\gamma$ -кванта 0.7–0.8 МэВ. Помимо аэрозольной формы  $^{131}\text{I}$  может существовать и в газовой форме также в виде молекулярного йода и его органических производных [1–3]. Соотношение обеих форм в выбросах АЭС зависит от многих факторов и различно для реакторов ВВЭР и РБМК.

В связи с масштабным развитием атомной энергетики остро встает проблема разработки высокоэффективных и надежных систем улавливания радиоактивного йода. В настоящее время наиболее распространенным способом уменьшения активности газообразных отходов АЭС является способ, основанный на динамической сорбции газообразных продуктов деления на активированном угле. В час-

тности, очистка вентиляционного воздуха от йода и его соединений на предприятиях атомной промышленности производится с помощью фильтров, заполненных слоем активированного угля, который пропитывают специальными веществами, например,  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{PbI}_2$ ,  $\text{KI}$ ,  $\text{CuI}$ , триэтиленидиамином. Существующие в настоящее время системы спецгазоочистки и вентиляции на всех АЭС на территории бывшего СССР нуждаются в реконструкции, необходимость которой вызвана снижением коэффициентов очистки вследствие износа фильтрационных компонентов и ужесточением норм допустимого выхода радионуклидов в атмосферу [4]. Большое значение в данной проблеме имеет ее экономическая сторона, так как удовлетворяющие современным требованиям фильтры на основе импрегнированных серебром активированных углей являются дорогостоящими.

В статье рассматриваются результаты экспериментов по сорбции молекулярного йода из газоаэрозольных сред и водных растворов алюмосиликатными сорбентами, являющимися синтетическими цеолитами, разрабатываемыми на кафедре общей и специальной химии ИАТЭ по оригинальным способам, защищенным патентами РФ [5, 6]. Синтез сорбентов осуществляется в одну технологическую стадию с использованием недорогих реагентов, производимых отечественной промышленностью. Сорбенты обладают высокой удельной поверхностью порядка  $1000 \text{ м}^2/\text{г}$  и высокой сорбционной активностью по отношению к ряду катионов металлов [7–8].

Кроме того, в статье приводятся результаты по получению на основе йодсодержащих алюмосиликатов специальных реагентов, так называемых льдообразующих агентов, используемых для активных воздействий на переохлажденные облака с целью предотвращения градов и регулирования выпадения осадков. Активные воздействия проводятся с целью коррекции климата, необходимость которой вызвана увеличивающейся в настоящее время климатической нестабильностью. Основным действующим началом льдообразующих агентов является йодистое серебро. Поскольку за последние десять лет стоимость серебра возросла практически в десять раз [9], остро встал вопрос снижения его содержания в рецептурах, используемых для создания реагентов для активного воздействия, посредством использования неактивных носителей, составляющих основу частиц аэрозоля, применяемого в процессах воздействия с поверхностью нанесенным слоем активного вещества. В свете этого, использование алюмосиликатов как носителей реагентов активного воздействия могло бы стать еще одной сферой практического приложения синтезированных алюмосиликатных сорбентов [10].

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Во всех проводимых экспериментах использовали стабильный изотоп йода  $^{127}\text{I}$ . По физико-химическим свойствам изотопы йода (как стабильные, так и радиоактивные) практически не отличаются друг от друга. Поэтому результаты исследования обычного стабильного изотопа  $^{127}\text{I}$  могут быть перенесены на радиоактивный изотоп  $^{131}\text{I}$ .

## Сорбция паров йода из газоаэрозольных сред в статическом режиме

Эксперимент основан на способности йода к сублимации. Давление паров йода над его кристаллами при  $25^\circ\text{C}$  в замкнутом объеме составляет  $41.2 \text{ Па}$  [11]. Для определения максимальной сорбционной емкости сорбента в статических условиях в плотно закрывающийся эксикатор помещали чашку Петри с кристаллами йода. Рядом в эксикаторе располагали стеклянные бюксы (доведенные до посто-

янной массы), в которые помещали обезвоженные образцы сорбентов с фиксированной массой. В эксикаторе быстро устанавливается равновесие между возогнанным йодом и кристаллическим. Давление паров йода остается постоянным на всем протяжении эксперимента, так как берется избыточное количество кристаллического йода. О сорбции йода судили по изменению массы сорбента. Сорбцию проводили до тех пор, пока не переставала изменяться масса сорбента. В аналогичном эксикаторе проводили холостой опыт без йода для того, чтобы учесть сорбцию паров воды.

### **Сорбция паров йода из газоаэрозольных сред в динамическом режиме**

Газоаэрозольную смесь, содержащую пары йода, готовили в специальной камере пробоподготовки КПП-1 объемом 13 м<sup>3</sup>, оснащенной системами активной вентиляции и перемешивания, устройством для аспирации (отбора нужного количества аэрозоля). Внутри камеры помещали 1–2 г кристаллического йода и включали систему перемешивания. Через сутки получали однородную газоаэрозольную смесь по всему объему камеры. С помощью аспиратора через поглотительный патрон пропускали 1–2 м<sup>3</sup> газовой фазы с постоянной скоростью 2 л/мин. Поглотительный патрон представляет собой стеклянную трубку с сорбентом, закрытую с обеих сторон пробками из стекловаты, фиксирующими поглотитель. Из поглотительного патрона пробу газовой фазы направляли в барботажное устройство, где находился фиксированный объем раствора йодида калия. Неадсорбированный молекулярный йод легко растворяется в йодиде калия, образуя соединение KI<sub>3</sub>. Далее отбирали аликвоту раствора из барботажного устройства и титровали ее тиосульфатом натрия в присутствии крахмала в качестве индикатора [12]. Остаточное содержание йода в аэрозоле определяли, используя закон эквивалентов по реакции  $2 S_2O_3^{2-} + I_2 = 2 I^- + S_4O_6^{2-}$ .

Содержание йода в исходном аэрозоле уточняли этим же способом, пропуская аэрозоль в барботажное устройство сразу из аспиратора. По разности содержания йода в газоаэрозольной смеси до сорбции и после сорбции в поглотительном патроне судили о сорбционной способности сорбента.

### **Сорбция молекулярного йода из водных растворов**

Растворимость йода в воде при температуре 25°C составляет 340 мг/л. Для изучения сорбционной активности сорбента по отношению к молекулярному йоду, растворенному в воде, готовили серию стандартных растворов йода с концентрациями 50–340 мг/л. Уточняли концентрацию полученных растворов, титруя их раствором тиосульфата натрия с концентрацией 0.01 М в присутствии крахмала. Далее по 100 мл раствора каждой концентрации помещали в конические колбы на 250 мл, приводили в контакт с сорбентом (1 г) и после установления сорбционного равновесия титрованием в тех же условиях определяли остаточное содержание йода в растворах. Из полученных результатов рассчитывали массу адсорбированного йода и степень извлечения его из раствора.

Для определения максимальной сорбционной емкости алюмосиликатного сорбента по отношению к молекулярному йоду использовали растворы йодида калия, растворимость йода в которых очень велика. Сорбцию вели из растворов с разной концентрацией йода. По полученным в результате титрования данным рассчитывали адсорбцию йода в расчете на 1 г сорбента и получали изотерму адсорбции Лэнгмюра как зависимость адсорбции от равновесной концентрации йода в растворе после установления сорбционного равновесия. Линейная анаморфоза

изотермы в координатах  $1/a - 1/c_{\text{равн}}$  ( $a$  – адсорбция в мг/г;  $c_{\text{равн}}$  – равновесная концентрация) позволяла графическим путем определить максимальную адсорбцию йода [13].

### Синтез льдообразующих агентов на основе алюмосиликатного сорбента

Исследуемый алюмосиликат обладает высокой сорбционной активностью к катионам переходных металлов. Это свойство позволяет получать серии импрегнированных сорбентов с различными специфическими свойствами. В данном случае импрегнирование проводили катионами серебра и меди для получения реагента активного воздействия на пересыщенные облака. В практике активных воздействий на облака хорошо зарекомендовал себя реагент  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ . Путем импрегнирования катионов серебра и меди, взятых в мольном соотношении 3:1, на поверхности алюмосиликатного сорбента и дальнейшей обработкой модифицированного сорбента раствором KI получали алюмосиликат, по развитой поверхности которого в виде мономолекулярного слоя равномерно распределено вещество  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### Сорбция паров йода из газовой среды алюмосиликатным сорбентом в статическом режиме

Сорбцию йода из паров, проводимую в герметично закрытом эксикаторе, осуществляли на сорбентах двух типов: базовом сорбенте, имеющем состав  $(\text{Na}_2\text{O})_1(\text{Al}_2\text{O}_3)_{2.6}(\text{SiO}_2)_1(\text{H}_2\text{O})_{11}$ , и модифицированном алюмосиликатном сорбенте, в состав которого введены катионы серебра. Оба сорбента имеют развитую удельную поверхность от 900 до 1000 м<sup>2</sup>/г. Сорбцию вели до полного насыщения сорбентов адсорбированным молекулярным йодом.

На рисунке 1 приведена зависимость насыщаемости сорбентов йодом от времени, полученная при температуре 25°C и давлении паров йода 41.2 Па. Насыщаемость выражена в миллиграммах адсорбированного йода в расчете на 1 г сорбента. Ее можно рассматривать как относительный привес массы сорбента за счет адсорбции йода. Как видно из рисунка, полная насыщаемость обоих сорбентов

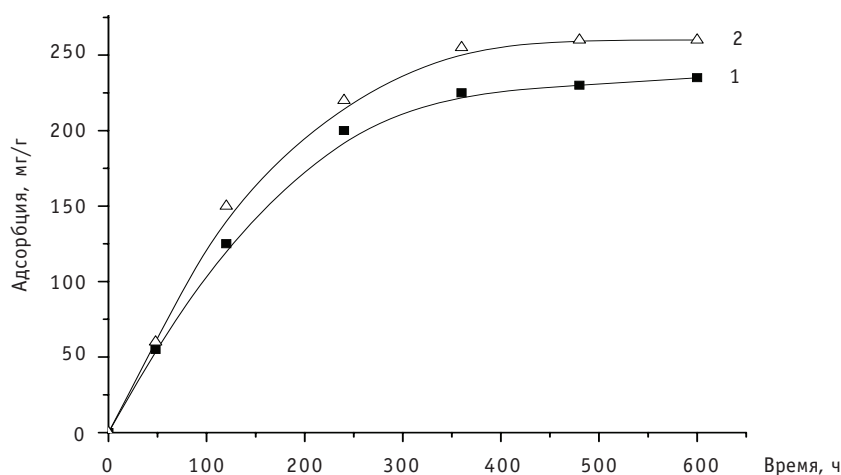


Рис. 1. Удельная сорбция йода из газовой фазы: 1 – на базовом алюмосиликатном сорбенте; 2 – на сорбенте с введенными катионами серебра

достигается за 400 часов (16–17 суток) и составляет 230 мг/г для базового сорбента и 260 мг/г для модифицированного сорбента.

В таблице 1 приведены данные по сорбции йода для двух типов сорбентов. Для каждого сорбента проводили три параллельных эксперимента.

Таблица 1

**Сорбция йода из газовой фазы при температуре 25°C и давлении паров йода 40.2 Па на алюмосиликатных сорбентах**

Сорбент	Исходная масса сорбента, г	Масса сорбента, г				$\Delta m_{\max}$	$\Delta m_{\max}$ на 1 г сорбента
		через 10сут	через 15 сут	через 20 сут	через 25 сут		
Базовый ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) <sub>1</sub> ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) <sub>2,6</sub> ( $\text{SiO}_2$ ) <sub>1</sub> ( $\text{H}_2\text{O}$ ) <sub>11</sub>	1.5559	1.8659	1.9059	1.9185	1.9190	0.3631	0.2334
	1.5586	1.8704	1.9147	1.9233	1.9243	0.3657	0.2346
	1.5651	1.8807	1.9238	1.9236	1.9335	0.3684	0.2354
Модифицированный катионами серебра	1.5333	1.8733	1.9133	1.9078	1.9333	0.4000	0.2600
	1.5406	1.8931	1.9142	1.9392	1.9408	0.4002	0.2598
	1.5465	1.8013	1.9327	1.9491	1.9511	0.4047	0.2616

Из полученных результатов видно, что максимально возможные сорбции молекулярного йода на обоих типах сорбентов практически не отличаются друг от друга и составляют для базового сорбента  $234 \pm 1.0$  мг/г, для сорбента, имеющего в своем составе серебро,  $260 \pm 2.0$  мг/г. Эти величины значительно превышают аналогичные показатели для сорбционных углеродистых материалов, используемых в системах вентиляции и спецгазоочистки на предприятиях атомной промышленности. Так для активированных углеродистых волокнистых материалов эта величина не превышает 25 мг/г, для активированных углей марки СКТ-3, используемых в фильтрах АЭС, она составляет примерно 12 мг/г [4]. С учетом того, что концентрация паров йода в вентиляционном воздухе на АЭС в стабильном рабочем режиме на входе в фильтры очень мала, использование алюмосиликатных сорбентов в фильтрах могло бы быть перспективным и значительно увеличить срок эксплуатации фильтров.

**Сорбция паров йода из газовой среды алюмосиликатным сорбентом в динамическом режиме**

При изучении сорбции паров йода в динамическом режиме были проведены одновременно три параллельных эксперимента. В каждом случае в камеру пробоподготовки помещали по 1 г металлического йода. Через сутки из камеры отбирали пробу газовой фазы объемом 1 м<sup>3</sup> и пропускали через барботажный сосуд, содержащий 5 л 0.1 М раствора йодида калия. По окончании отбора пробы аликвоту раствора йодида калия титровали 0.01 н раствором тиосульфата натрия. Общее содержание йода в газовой пробе, взятой из камеры пробоподготовки, рассчитывали по формуле

$$m(I_2) = C_S V_S V_B V_{ГП} / V_A,$$

где  $m(I_2)$  – масса йода, перешедшего в газообразное состояние в КПП;  $C_S$  – эквивалентная концентрация тиосульфата натрия ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ );  $V_S$  – объем  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , пошедший на титрование аликвоты раствора йодида калия из барботажного сосуда;  $V_B$  – объем йодида калия в барботажном сосуде;  $V_{ГП}$  – объем газовой пробы;  $V_A$  – объем

аликвоты йодида калия из барботажного сосуда, взятый для титрования тиосульфатом натрия.

Аналогичные операции проводили, отбирая пробу из вновь подготовленной газовой фазы КПП и пропуская ее через патрон с 10 г сорбента.

Для расчета коэффициента извлечения использовали формулу

$$K = m^*(I_2) / m(I_2) \cdot 100\%,$$

где  $m^*(I_2)$  – масса поглощенного сорбентом йода. В таблице 2 приведены результаты проведенных экспериментов по сорбции йода из газовой фазы в динамическом режиме. Коэффициент извлечения йода в этих условиях составляет  $99.5 \pm 0.2\%$ .

Таблица 2

**Сорбция йода из газовой фазы в динамическом режиме на алюмосиликатном сорбенте. Температура 25°C, давление паров йода 40.2 Па, скорость прокачки газовой фазы через сорбент 2 л/мин**

Номер пробы	$m(I_2)$ – масса йода до сорбции	$m^*(I_2)$ – масса поглощенного сорбентом йода	$K$ – коэффициент извлечения, %
1	0.0720	0.0718	99.7
2	0.0695	0.0692	99.5
3	0.0754	0.0753	99.9

**Сорбция йода из жидкой фазы алюмосиликатным сорбентом**

Для изучения сорбции йода из водных растворов была приготовлена серия стандартных растворов йода в 0.1 М растворе йодида калия с концентрациями 20–100 г/л. На основании полученных данных была построена изотерма адсорбции Ленгмюра (рис. 2) и определена максимальная сорбционная емкость сорбента по йоду. Сорбцию изучали на алюмосиликате двух типов, имеющих следующие составы:  $(Na_2O)_1(Al_2O_3)_{2.6}(SiO_2)_1(H_2O)_{11}$  и  $(Na_2O)_1(Al_2O_3)_{2.6}(SiO_2)_1$ . Последний, безводный, алюмосиликат был получен прокаливанием в течение двух часов при температуре 600°C исходного (первого) сорбента. На рисунке 2 представлены полученные изотермы адсорбции молекулярного йода из водных растворов для алюмосиликатных сорбентов и для сравнения приведены изотермы адсорбции йода для сорбентов природного происхождения – трепела и клиноптилолита.

Как видно, максимальной сорбционной емкостью (254 мг/г) обладает обезводженный термически модифицированный сорбент состава  $(Na_2O)_1(Al_2O_3)_{2.6}(SiO_2)_1$ . Базовый сорбент, в состав которого входит вода, имеет сорбционную емкость  $192 \pm 10$  мг/г. Близкую к нему емкость (180 мг/г) имеет природный цеолит клиноптилолит. Трепел, представляющий собой особую тонкодисперсную субстанцию на основе оксида кремния, практически не обладает сорбционной активностью по отношению к молекулярному йоду, растворенному в воде ( $a = 12.5$  мг/г). Следует отметить, что активированные угли в водных средах обладают очень высокой сорбционной емкостью к молекулярному йоду, которая составляет от 800 до 1100 мг/г. Тем не менее, вполне пригодным для сорбции молекулярного йода может быть и термически модифицированный алюмосиликат, поскольку максимальная растворимость йода в воде при 25°C составляет 340 мг/л.

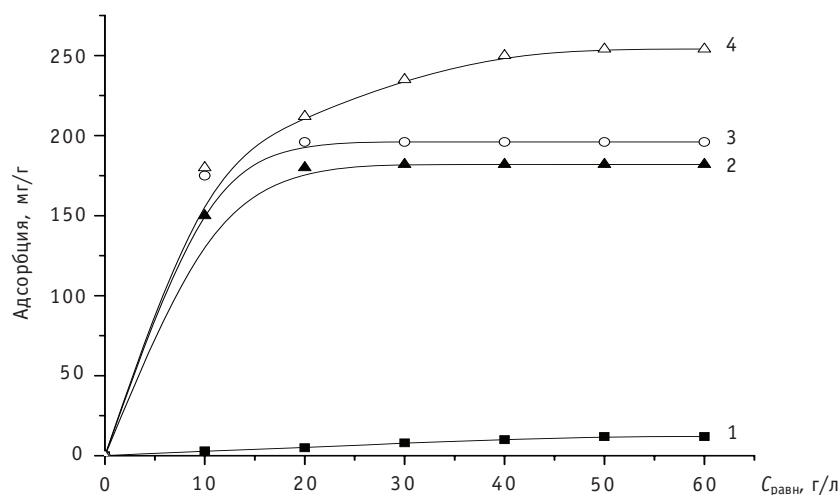


Рис. 2. Изотермы адсорбции йода из водных растворов на различных сорбентах: 1 – трепел; 2 – клиноптилолит; 3 – базовый алюмосиликатный сорбент; 4 – обезвоженный базовый алюмосиликатный сорбент

### Льдообразующая активность аэрозоля на основе модифицированного алюмосиликатного сорбента

Сорбционная емкость алюмосиликатного сорбента по меди составляет  $160 \pm 10$  мг/г, а по серебру  $360 \pm 16$  мг/г. Сорбент не обладает селективностью по отношению к катионам переходных металлов. На основании этих данных были приготовлены три раствора, содержащих нитрат серебра  $\text{AgNO}_3$  и нитрат меди  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  в соотношении 3:1, из которых велась одновременная сорбция на поверхности алюмосиликата катионов меди двухвалентной и катионов серебра. Растворы содержали в 100 мл 15, 30, 45 мг серебра и 5, 10, 15 мг меди соответственно. После установления сорбционного равновесия сорбент отфильтровывали, промывали и помещали в 0.1 М раствор йодида калия. Вследствие малой растворимости йодидов серебра и меди на поверхности сорбента происходило образование соответствующих йодидов. При этом медь двухвалентная превращалась в медь одновалентную в соответствии с окислительно-восстановительной реакцией  $\text{Cu}^{2+} + \text{I}^- = \text{Cu}^+ + 0.5 \text{I}_2$ . После этого сорбент отфильтровывали, промывали и сушили на воздухе. Полученную субстанцию исследовали на проявление льдообразующей активности. Для этого готовили в камере пробподготовки аэрозоль, содержащий частицы алюмосиликата с адсорбированными на нем йодидами  $\text{AgI}$  и  $\text{CuI}$  в соотношении 3:1. Далее фиксированный объем аэрозоля поступал в климатическую камеру, где была создана переохлажденная облачная среда. Льдообразующая активность представляет собой количество льдообразующих частиц, полученных с 1 г вещества при данной температуре ( $-10^\circ\text{C}$ ) и определяется подсчетом количества снежинок, выпавших на единицу площади дна климатической камеры. Подсчет количества снежинок осуществляли с помощью цифрового оптического микроскопа Motich-3. Полученные экспериментальные данные представлены в табл. 3.

Как видно из таблицы, аэрозоль, приготовленный на основе алюмосиликатного сорбента, по поверхности которого тонким слоем распределены йодиды серебра и меди (I) в количествах 98 и 45 мг ( $\text{Ag} - 45$  мг и  $\text{Cu} - 15$  мг) в расчете на 1 г сорбента, обладает льдообразующей активностью, близкой к активности аэрозольобразующего реагента  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ . Это позволяет предполагать, что на поверхности алюмосиликата действительно имеется тонкий слой соединения  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ . На долю

Таблица 3

**Льдообразующая активность аэрозоля на основе алюмосиликатного сорбента, модифицированного монослоем реагента  $Ag_3CuI_4$** 

Тип аэрозоля	Льдообразующая активность
$Ag_3CuI_4$	$5 \cdot 10^{13}$
Сорбент + $3AgI + CuI$ (Ag – 15 мг и Cu – 5 мг)	$7 \cdot 10^{10}$
Сорбент + $3AgI + CuI$ (Ag – 30 мг и Cu – 10 мг)	$2 \cdot 10^{12}$
Сорбент + $3AgI + CuI$ (Ag – 45 мг и Cu – 15 мг)	$8 \cdot 10^{12}$

серебра в алюмосиликате с распределенным на поверхности твердым раствором состава  $Ag_3CuI_4$  приходится 3.5% общей массы, в то время как в чистом реагенте этот показатель составляет 36%. Таким образом, использование модифицированного йодидами серебра и меди алюмосиликатного сорбента в качестве льдообразующего аэрозоля приводит к существенной экономии дорогостоящих серебро-содержащих реагентов.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Из полученных результатов следует, что синтезированные новые типы термостойких алюмосиликатных адсорбентов обладают высокой сорбционной способностью по отношению не только к катионам тяжелых металлов и радионуклидов, находящихся в водных средах, но и к молекулярному йоду, находящемуся как в газовой фазе, так и в водных растворах. Максимальной сорбционной емкостью (254 мг/г) по отношению к молекулярному йоду, растворенному в воде, обладает термически модифицированный алюмосиликат. Статическая сорбционная емкость алюмосиликатов по отношению к йоду, находящемуся в газовой фазе, составляет 234 мг/г для базового сорбента и 260 мг/г – для сорбента, модифицированного катионами серебра. Эти величины на порядок больше соответствующих показателей у активированных углей марки СКТ-3 и углеродистых материалов, используемых в фильтрах АЭС [4]. Коэффициент извлечения йода из газовых сред в динамическом режиме достаточно высок – при непрерывной фильтрации газоаэрозольных смесей составляет 99.5%. Это говорит о том, что использование алюмосиликатных сорбентов в фильтрах для вентиляции воздуха на предприятиях атомной промышленности могло бы быть перспективным и значительно увеличить срок эксплуатации фильтров.

Обнаруженная высокая льдообразующая активность аэрозоля на основе алюмосиликатного сорбента, модифицированного монослоем реагента  $Ag_3CuI_4$ , позволяет рассматривать высокопористые алюмосиликатные сорбенты в качестве перспективного носителя для создания реагентов активного воздействия с пониженным содержанием дорогостоящих соединений серебра.

**Литература**

1. Четкин Ю.В., Якишин Е.К., Ещеркин В.М. Очистка радиоактивных газообразных отходов АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
2. Справочник по ядерной электротехнологии/Пер. с англ. Ф. Ран, А. Адамантиадес, Дж. Кентон, Ч. Браун; под ред. В.А. Легасова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 752 с.
3. Синев Н.М. Экономика ядерной энергетики. Основы технологии и экономики производства ядерного топлива. Экономика АЭС: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.



4. Колобродов В.Г., Хажмурадов М.А., Григорова Т.К., Сергеев В.П. Исследование возможности использования активированных углеродных волокнистых материалов «Днепр» в системах вентиляции и спецгазоочистки АЭС//Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. №4. – 2006. – С. 104–110.
5. Милинчук В.К., Шилина А.С. Патент РФ 2402486. 27.10.2010//Бюл. № 30.
6. Милинчук В.К., Шилина А.С. Патент РФ 2438974. 10.01.2012//Бюл. № 1.
7. Шилина А.С., Милинчук В.К. Сорбционные свойства нового типа алюмосиликатного сорбента //Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – №3. – С. 24-30.
8. Шилина А.С., Милинчук В.К. Сорбционная очистка природных и промышленных вод от катионов тяжелых металлов и радионуклидов новым типом высокотемпературного алюмосиликатного адсорбента//Сорбционные и хроматографические процессы. – 2010. – Т.10. – Вып. 2. – С. 237-245.
9. Тимофеев Н.Е., Мадякин Ф.П., Арутюнян А.С., Салин В.Н. Льдообразующие составы с ультрамалым содержанием йодида серебра/Труды Всес. семин. «Активные воздействия на градовые процессы и перспективы усовершенствования льдообразующих реагентов для практических активных воздействий» (Нальчик, 16-21 окт., 1989 г.). – М., 1991. – С. 220-224.
10. Сидоров А.И., Хван С.Б., Арутюнян А.С. и др. Разработка и испытания пироставов с ультрамалым содержанием йодистого серебра/Труды Всес. конф. «Активные воздействия на гидрометеорологические процессы» (Киев, 17-21 ноября, 1987 г.). – Л., 1990. – С. 467-471.
11. Барон Н.М., Квят Э.И., Подгорная Е.А. Краткий справочник физико-химических величин. – Л.: Химия, 1965. – 160 с.
12. Фадеева В.И., Шеховцова Т.Н., Иванов В.М. и др./ Под ред. Золотова Ю.А. Основы аналитической химии. Практическое руководство: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2001. – 463 с.
13. Гельфман М.И., Ковалевич О.В., Юстратов В.П. Коллоидная химия. – СПб.: Лань, 2003. – 336 с.

Поступила в редакцию 12.05.2012

*energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 13 pages, 1 table, 2 illustrations. – References, 22 titles.*

The present paper concentrates on the problem of errors committed by NPP MCR operators during implementation of operating procedures. It is proposed to categorize such errors into four classes as follows: selection of inappropriate procedure, incorrect execution of procedure, navigation errors, and communication errors. These categories of errors have been described and analyzed in detail in the paper. Each type of errors is illustrated by the real examples. The causes of the errors have been also investigated. It was revealed that a weaknesses of procedures is the main contributor to the committed errors. The following two aspects of two-column symptom-oriented procedures that impact on the operator activity were revealed: complicated logic which underlie the transition from the left column of procedure to the right one; and absence of tools for visual emphasis of procedure elements.

#### **УДК 661.879:541.183**

*Adsorption of Molecular Iodine from Gas-aerosol Environments and Water Solutions with a New Type of an Aluminum-Silicate Sorbent | V.A. Shilin, A.B. Gorgienko, A.S. Shilina, V.K. Milinchuk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 9 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 13 titles.*

In the article presents the results of studies of sorption of iodine vapor from the gaze-aerosol media on aluminosilicate sorbents in static and dynamic modes. The sorption capacity of vapor of molecular iodine is  $234 \pm 1.0$  mg/g. Factor extraction of iodine from the aerosol media during sorption under dynamic conditions is  $99.5 \pm 0.2\%$ . The sorption capacity of silica-alumina sorbent for iodine, dissolved in water is  $254 \pm 12$  mg/g. Aluminosilicate sorbent, modified  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ , has a high ice-forming activity.

#### **УДК 621.039.53**

*Experimental Investigations of Vertical Turbomachine Catcher Bearings | S.E. Belov, M.N. Borovkov, N.G. Kodochigov, E.G. Novinskiy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 8 pages, 9 illustrations. – References, 6 titles.*

It is a challenging engineering task to develop the GT-MHR reactor plant turbomachine catcher bearings aimed at retaining in geometric axis a flexible vertical rotor having large mass and diametrical dimensions in case of electromagnetic bearings power supply failure. The novelty and relevance of the task is determined by specific feature of turbomachine configuration, high safety requirements for bearing assemblies and absence of experience in developing such bearings worldwide. Verification of analytical procedures requires performance of comprehensive experiments in a stepwise fashion starting from small-scale models to full-scale catcher bearings specimens. For this purpose, it has been planned to perform a set of R&D activities within the GT-MHR Project.

This paper deals with the program of R&D activities aimed at development of catcher bearings for the GT-MHR turbomachine as well as some results of performed activities. The experience which is being gained as a result of this investigation program implementation can also be used in other mechanical engineering industries associated with development of vertical and dynamic machines.

#### **УДК 621.039.564**

*On Electrode Polarization of Electrochemical Oxygen Sensor in Liquid Metal Coolants | Yu.A. Musikhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 3 tables, 7 illustrations. – References, 28 titles.*

The paper considers the main provisions of thermodynamic oxygen activity control in liquid metal coolants by the EMF method by means of a two-electrode electrochemical oxygen sensor with a solid oxygenated electrolyte which is in contact with the coolant and at the same time is a working electrode of the sensor. The sensor EMF is proportional to the oxygen activity logarithm. It has been noted that absorption of metallic impurities and oxides on the electrolyte causes polarization of the working electrode, thus reducing the EMF value and deteriorating the oxygen control accuracy. The polarization process was shown to be multifactorial and localized within the limits of double electric layer that results from the difference in the work functions of the contacting phases. The double layer characteristics are presented. The analytical dependence values were calculated for the electron work function from the solid electrolytes and metal oxides.