

РЕДАКЦИОННАЯ СТАТЬЯ

УДК 359.6

ОЧИСТКА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ОТ РАДИОНУКЛИДОВ СОРБЕНТОМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

*¹И. Г. Мосягин, ²А. В. Куликов, ³Е. Я. Бузов, ²В. И. Касаткин, ³В. П. Пониматкин*¹Главное командование Военно-Морского Флота, Санкт-Петербург, Россия²Научно-исследовательский институт кораблестроения и вооружения
Военно-Морского Флота, Военный научно-учебный центр Военно-Морского Флота
«Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова», Санкт-Петербург, Россия³ЗАО Медико-биологический научно-исследовательский центр «Дискретная
нейродинамика», Санкт-Петербург, Россия

NEW-GENERATION SORBENT FOR DRINKING WATER PURIFICATION FROM RADIONUCLIDES

*I. G. Mosiagin, ²A. V. Kulikov, ³Ye. Ya. Buzov, ²V. I. Kasatkin, ³V. P. Ponimatkin*¹Navy General Headquarters, St. Petersburg, Russia²Research Institute of Ship Building and Armament, N. G. Kuznetsov Navy Academy,
St. Petersburg, Russia³ZAO Biomedical Research Center «Diskretnaya Neyrodinamika», St. Petersburg, Russia

© Коллектив авторов, 2015 г.

Обсуждаются результаты исследований сорбционных свойств фильтрующих материалов, производство которых основано на использовании технологий, удовлетворяющих требованиям мировой новизны. По данным специально спланированных экспериментов показано, что хорошие перспективы в этом направлении связаны с плазменно-стимулированными углеродными материалами и композитными составами на их основе.

Ключевые слова: питьевая вода, артезианская скважина, природные и техногенные радионуклиды, фильтрующий материал, сорбционная активность, сорбционная емкость.

The results of studies of the sorption properties of filtering materials manufactured using technologies satisfying the requirements of world-over novelty are reviewed. Experiments suggest good prospects for plasma-activated carbon materials and composite compounds based on them.

Key words: drinking water, artesian well, natural and anthropogenic radionuclides, filtering materials, sorption activity, sorption capacity.

Одним из важнейших показателей качества питьевой воды является содержание в ней природных радионуклидов (ПРН). Их наличие определяет дозы облучения населения за счет потребления питьевой воды [1–3]. И хотя среднемировое значение этой дозы невелико — всего около 12 мкЗв/год, что составляет менее 1% суммарных доз облучения населения за счет всех природных источников [4–6], в разных регионах земли, в том числе и в РФ, диапазон варьирования содержания природных радио-

нуклидов в воде достигает 3–4 порядков [7]. Проблема радиационной безопасности наиболее остро стоит в тех регионах, где питьевое водоснабжение населения осуществляется природной водой подземных горизонтов, для которой обычно характерно повышенное содержание отдельных ПРН [8]. Причем, кроме ²²²Rn, для большей части подземных природных вод в нашей стране наиболее характерным является повышенное содержание природного изотопа радия ²²⁶Ra [1], реже ²²⁸Ra, ²²⁴Ra,

а в единичных случаях — ^{210}Pb , ^{210}Po [9]. В 36 субъектах РФ обнаружены превышения радиоактивности воды по суммарным показателям, а превышения уровней вмешательства (УВ) по отдельным природным радионуклидам — в 24 субъектах.

Для обеспечения радиационной безопасности питьевого водоснабжения населения в НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10 [10] введены ограничения на содержание природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде. Чаще всего эти ограничения сводятся к мероприятиям по снижению радиоактивности воды, однако в некоторых случаях требуется введение запрета на использование воды для питьевых целей с переходом на альтернативные источники питьевой воды. С учетом современных представлений о риске возникновения неблагоприятных последствий облучения людей, в НРБ-99/2009 требования к показателям радиационной безопасности питьевой воды установлены в следующей форме: если УВ по содержанию радионуклидов в питьевой воде не превышены, то дальнейшее снижение содержания радионуклидов в ней не является обязательным [11, 12]. Такой формулировкой признается, что идеальной в радиационном отношении является питьевая вода, в которой радионуклиды полностью отсутствуют.

Присутствие техногенных радионуклидов в источниках питьевой воды в значимых концентрациях наблюдается в редких случаях на территориях, загрязненных в результате крупных радиационных аварий. За счет глобальных выпадений ^{137}Cs и ^{90}Sr могут присутствовать в следовых концентрациях в поверхностных источниках водоснабжения. Однако авария на японской АЭС «Фукусима-1» убедительно показала, что в таких ситуациях возможно загрязнение питьевой воды техногенными радионуклидами в значимых концентрациях. Чаще всего это может реализоваться для поверхностных источников питьевой воды, доля которых в питьевом водоснабжении населения нашей страны составляет чуть менее 50%, а в Центральном и Южном федеральных округах превышает 50%.

Надежное обеспечение населения качественной питьевой водой является одной из приоритетных проблем современности как в нашей стране, так и за рубежом. На территории РФ действует долгосрочная федеральная целевая программа (ФЦП) «Чистая вода на 2011-2017

годы», утвержденная постановлением правительства РФ № 1092 от 22.12.2010 г. На финансирование целевых показателей ФЦП направляются огромные финансовые ресурсы из бюджетов всех уровней. При этом приоритетность научных исследований, практических разработок и капитальных вложений в рамках ФЦП обозначена на всех уровнях ее реализации. В большинстве субъектов РФ приняты и реализуются региональные целевые программы обеспечения населения качественной питьевой водой.

Таким образом, в современных условиях особую актуальность приобретают вопросы разработки современных фильтрующих материалов и технологий очистки питьевой воды от различных микропримесей, в том числе и от радионуклидов. В условиях интенсификации использования воды подземных горизонтов в питьевом водоснабжении населения при одновременном увеличении загрязнения воды поверхностных источников, проблемы снабжения населения качественной питьевой водой со временем будут только обостряться. Учитывая, что общее количество источников питьевого водоснабжения населения в нашей стране превышает 110 тыс., в перспективе потребуются меры по нормализации показателей радиационной безопасности больших объемов воды для питьевого водоснабжения населения.

Именно поэтому создание эффективных сорбирующих материалов широкого спектра действия с использованием отечественного и доступного сырья представляется одним из наиболее перспективных путей решения стратегически важной задачи, связанной с очисткой воды. В настоящей работе исследованы сорбционные свойства принципиально новых сорбционных материалов комплексного типа, созданных с помощью новой технологии плазменно-стимулированного разложения углеводородов (например, ацетилен) под действием низкотемпературной плазмы, когда в зону осаждения поступает поток возбужденного и ионизированного низкотемпературной плазмой углеродосодержащего газа. При этом в качестве низкотемпературной плазмы используется плазма вакуумно-дугового разряда, горящего в парах графитового катода [13].

Для генерации плазмы углерода между анодом и катодом (графит) формируется вакуумно-дуговой разряд, горящий в парах эродированного катода. В этом случае привязка разряда к поверхности катода осуществляется в форме ка-

тодных пятен. Катодные пятна характеризуются необычно высокой плотностью тока (до 1012 А/м^2) с поверхностной плотностью мощности свыше 109 Вт/м^2 . Катодные пятна являются источником плазменных потоков с высокой скоростью распространения (порядка 104 м/с). Плазменный поток с графитового катода содержит в основном однозарядные ионы углерода.

Используя технологию плазменной стимуляции, основы которой были сформулированы проф. В. Г. Кузнецовым [13], разработана технология получения принципиально новых фильтрующих составов на основе плазменно-стимулированных углеродных материалов ПСУМ®. Суть плазменной стимуляции процесса осаждения сорбционного материала из газовой фазы состоит в том, что плазма создает на поверхности подложки условия, эквивалентные очень высокой температуре, и ускоряет процессы химического взаимодействия компонентов газовой смеси на поверхности подложки. Этим устраняются основные недостатки традиционного газозофазного метода — снижаются температура осаждения, энергоемкость процесса и расход газа, повышается скорость осаждения. Элементарные стадии процесса — образование зародышей на поверхности подложки и их рост, в процессе которого атомы углерода из газовой фазы взаимодействуют с углеродом зародышей, образуя плотную массу. В процессе плазменной стимуляции удается получать соединения из не взаимодействующих в нормальных условиях газовых компонентов.

Структура сорбента зависит от природы углеводорода. Процессы образования сорбента из метана и ацетилена имеют существенные различия. Для метана энергия активации образования зародышей составляет $317,2 \text{ кДж/моль}$ и значительно больше энергии активации роста кристаллитов ($226,8 \text{ кДж/моль}$), в результате чего средние размеры кристаллитов с повышением температуры быстро уменьшаются. Для ацетилена эти энергии ($143,4$ и $132,6 \text{ кДж/моль}$) различаются незначительно, что соответствует малой зависимости средних размеров кристаллитов от температуры.

КАРБОВЕР как композиция представляет собой вермикулит с нанесенным на его поверхность материалом ПСУМ®, также полученным методом плазменно-стимулированного разложения ацетилена под действием плазмы вакуумно-дугового разряда. Анализ структуры вермикулита до и после нанесения покрытия

показал, что оно наносится равномерно, причем поверхность композиции становится более развитой. Элементный анализ покрытия подтверждает, что оно состоит из углерода, соответствующего составу ПСУМ®. Никаких новых элементов по сравнению с исходным образцом, кроме углерода, не обнаружено.

Для исследования сорбционных свойств фильтрующих материалов была предложена (И. П. Стамат) модель фильтрующей установки, в которой в качестве корпуса для загрузки фильтрующего состава используется вертикальная стеклянная колонка объемом около $0,2 \text{ дм}^3$ [10]. В качестве «модельной» жидкости использовалась дистиллированная или природная вода из артезианских скважин с различным содержанием природных радионуклидов. «Модельная» жидкость подается в колонку снизу вверх, а скорость ее фильтрации регулируется краниками и изменением по высоте взаимного положения емкости с модельной жидкостью и фильтрующей установки.

Важнейшими характеристиками фильтрующих материалов, используемых в системах водоподготовки, являются сорбционная активность их, емкость и прочность сорбционных связей. Величина сорбционной активности определяет эффективность осаждения радионуклидов при фильтрации воды, а ее емкость — максимальную активность, которая может быть осаждена в единице массы или объема фильтрующего материала. Прочность сорбционных связей важна в плане технологии очистки воды: если она высока, то фильтрующий материал может использоваться однократно. При слабых связях осевших радионуклидов материал можно промыть чистой водой, и он может использоваться для осаждения радионуклидов повторно.

Сорбционная активность фильтрующих материалов определялась как отношение удельной активности радионуклида в исходной «модельной» жидкости до ее фильтрации и в отфильтрованной среде после фильтрации заданного объема жидкости. Сорбционная емкость материалов определялась как максимальная активность радионуклида, которая может быть адсорбирована зернами фильтрующего материала. Определение сорбционной емкости фильтрующей загрузки по отношению к выбранному ПРН проводилось при дополнительном условии, чтобы эффективная удельная активность ПРН в фильтрующем материале

не превышала 1500 Бк/кг. Содержательный его смысл заключается в том, чтобы в процессе очистки воды не происходило образование производственных отходов с повышенным содержанием ПРН, обращение с которыми требует определенной регламентации по обеспечению радиационной безопасности населения.

Оценка прочности сорбционных связей проводилась по результатам выноса радионуклидов при обратной фильтрации дистиллированной воды через насыщенный фильтрующий материал.

Поскольку сорбционные свойства фильтрующих материалов определяются рядом дополнительных условий (температура процесса фильтрации и перепад давления жидкости на входе и выходе из колонки, линейная скорость фильтрации и высота столба фильтрующего материала, которые в конечном итоге определяют время контакта жидкости с его зернами), все исследования были проведены при комнатной температуре и постоянном расходе «модельной» жидкости.

При этом в качестве основного условия фильтрации воды через композицию было принято, чтобы линейная скорость фильтрации воды не превышала 5 м/ч. Это условие для фильтрационной колонки с внутренним диаметром $D=48 \text{ мм}=0,048 \text{ м}$ будет выполняться, если линейная скорость $v(\text{м/ч})$ фильтрации воды соответствует условию:

$$v \leq \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \cong 552,6 \cdot V, \quad (1)$$

в котором V — объемный расход «модельной» жидкости через фильтрующий материал в $\text{м}^3/\text{час}$.

Если для принять ограничение на уровне не более 5 м/ч, то из формулы (1) получим допустимое значение объемного расхода воды при фильтрации:

$$V \leq \frac{5}{552,6} \cong 0,009 \text{ м}^3 = 9 \text{ л/час}, \quad (2)$$

Для гарантированного обеспечения этого условия объемный расход воды через фильтрующий материал в течение всего периода фильтрации нами поддерживался на уровне около 1,5–2,5 л/ч (линейная скорость воды через фильтрующий материал не превышала 1–2 м/ч).

Контроль соблюдения баланса активности гамма-излучающих радионуклидов в экспериментальных исследованиях производился по соотношению:

$$V \cdot UA_{\text{до}} - V \cdot UA_{\text{после}} + M_C^0 \cdot A_C \approx M_C^V \cdot A_C^V, \quad \text{Бк} \quad (3)$$

где V — объем жидкости, пропущенной через фильтрующий материал, л;

$UA_{\text{до}}$ и $V \cdot UA_{\text{после}}$ — удельная активность радионуклида в модельной жидкости до и после фильтрации, Бк/кг;

M_C^0 и M_C^V — масса фильтрующей загрузки в колонке до и после окончания фильтрации V л воды, кг;

A_C и A_C^V — удельная активность радионуклида в материале фильтрующей загрузки до и после фильтрации V л воды, Бк/кг, определяемые методом гамма-спектрометрии.

Знак приближительного равенства в уравнении (3) поставлен в силу следующих причин. Во-первых, отработанный фильтрующий материал нами не высушивался до исходного состояния, так что его масса отличалась от исходной массы фильтрующей загрузки. Вследствие этого активность радионуклидов оказывается распределенной между сорбентом и водой в поровом пространстве фильтрующей загрузки. Во-вторых, объем воды, прошедшей через фильтр, определялся по объему отфильтрованной воды, накопленной в сборной емкости, так что объем воды на входе в экспериментальную установку был несколько больше объема отфильтрованной воды. Эта разница в объеме воды не превышала 50–70 мл, так что нарушение условий баланса по соотношению (3) может составлять не более 3–5%.

Для контроля баланса активности в экспериментальных исследованиях о загрузке фильтрующего материала в экспериментальную установку определялась удельная активность ПРН и ^{137}Cs в материале, а также его масса (табл. 1).

Для более корректного определения сорбционных характеристик фильтрующих материалов в экспериментальных исследованиях модельная жидкость (дистиллированная или природная вода) обогащалась отдельными природными радионуклидами. Это связано с тем, что удельная активность ПРН в природных источниках питьевой воды редко бывает значительно выше их УВ (0,5 Бк/кг для ^{226}Ra , 0,11 Бк/кг для ^{210}Po , 0,2 Бк/кг — для ^{210}Pb). Вследствие этого, использование воды без обогащения радионуклидами потребует фильтрации через материал многих десятков и сотен литров модельной жидкости и, соответственно, больших временных затрат. Кроме того, при низком содержании радионуклидов заметно возрастает погрешность определения их удель-

Таблица 1

Содержание ПРН и ^{137}Cs в фильтрующих материалах и их компонентах

Фильтрующая загрузка	Масса загрузки, г	Удельная активность радионуклидов, Бк/кг			
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{137}Cs
ПСУМ®	39,1±0,4	<5	<5	<40	<2*
КАРБОВЕР	36,3±0,4	19±5	<5	140±40	<2*
Вспученный вермикулит	34,6±0,5	16±7	14±7	140±40	—

* Нижний предел обнаружения ^{137}Cs в соответствии с методикой выполнения измерений. На практике такая величина означает, что Cs в материале отсутствует.

ной активности, что в конечном итоге сказывается на качестве определения сорбционных свойств материалов.

Для обогащения «модельной» жидкости ^{226}Ra использовался образцовый раствор радия, а природные радионуклиды ^{210}Po и ^{210}Pb получали по специальной технологии из воздуха с высоким содержанием ^{222}Rn .

Отметим, что при моделировании процессов фильтрации жидкостей через твердые и сыпучие материалы важно исключить так называемый пристеночный эффект, при котором значительная часть потока жидкости проходит вблизи стенки фильтрующей колонки, минуя основной объем адсорбента. Как показали результаты исследований с использованием окрашенной жидкости, которая пропусклась через экспериментальную установку, этот эффект в наших исследованиях был незначительным.

Оценка сорбционных характеристик новых фильтрующих материалов проведена для основных гигиенически значимых природных радионуклидов, которые наиболее распространены в подземных природных водах Северо-Западного региона страны, — ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po и ^{238}U . В отдельных исследованиях оценивались также сорбционные свойства фильтрующих материалов по отношению к техногенным радионуклидам ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{131}I (здесь рассматриваются процессы сорбции фильтрующими материалами только отдельных природных радионуклидов).

Наиболее подробно изучены процессы сорбции фильтрующими материалами природного радионуклида ^{226}Ra . Показано, что при фильтрации через ПСУМ® дистиллированной воды с растворенным в ней радионуклидом ^{226}Ra происходит практически полное осаждение радионуклида на поверхности зерен материала: при удельной активности радионуклида в воде до фильтрации $34,5\pm 5,2$ Бк/кг, удельная активность ^{226}Ra в отфильтрованной воде составила $0,120\pm 0,034$ Бк/кг.

Анализ полученных данных показал, что сорбционная активность ПСУМ® при фильтрации через него природного радионуклида ^{226}Ra в дистиллированной воде составляет около 290 с доверительным значением показателя в интервале 195–380. Оценка нижней границы сорбционной емкости данного сорбента составила не менее 1800 Бк/кг. Эта величина получена нами именно как нижняя граница оценки показателя по результатам однократной фильтрации 5 л дистиллированной воды с растворенным радионуклидом ^{226}Ra .

Однако исследования сорбционных свойств фильтрующего материала ПСУМ® показали, что применение его в чистом виде технологически малоперспективно в силу исключительно тонкой дисперсности материала, вследствие чего фильтрация воды через него идет крайне медленно. По этой причине все дальнейшие исследования проводились с использованием композитного фильтрующего материала КАРБОВЕР на основе вспученного вермикулита и состава ПСУМ®. Размеры зерен материала КАРБОВЕР составляют около 1–3 мм, так что фильтрация жидкости через него происходит достаточно эффективно.

Исследования сорбционных свойств вспученного вермикулита в чистом виде показали, что его сорбционная активность составляет около 3,0 с доверительным значением показателя в интервале 2,0–4,6. Это несколько выше, чем для обычных фильтрующих материалов природного происхождения. Вероятно, это связано с высокой удельной площадью поверхности зерен вспученного вермикулита, которые образуются при специальной обработке природного вермикулита. В пользу этого свидетельствует исключительно низкая плотность вспученного вермикулита, которая составляет около $0,130$ г/см³, в то время как плотность природного вермикулита равна $2,4$ – $2,7$ г/см³.

Учитывая это, можно было ожидать, что сорбционные свойства композитного материала КАР-

БОВЕР будут заметно отличаться в лучшую сторону по сравнению с характеристиками вспученного вермикулита в чистом виде. Для оценки численных значений сорбционных свойств материала КАРБОВЕР проведена серия исследований по следующей схеме: «модельная» жидкость с постоянным содержанием радионуклидов пропусклась через фильтрующую установку, и уже после пропускания определенного ее объема через фильтрующий материал отбирались пробы объемом 0,2 л для определения удельной активности радионуклидов. При этом суммарный объем отфильтрованной жидкости до отбора данной пробы определяется как сумма объемов воды, прошедшей через фильтр до ее отбора, включая и объем отобранной пробы (табл. 2).

Легко видеть, что по мере увеличения объема дистиллированной воды, пропущенной через материал, его сорбционная активность по отношению к ^{226}Ra постепенно снижается. Однако снижение сорбционной активности материала происходит достаточно медленно: если при фильтрации первого литра воды в его объеме осаждается около 16,5 Бк ^{226}Ra , то после фильтрации 9,3 л — 12,4 Бк, т. е. примерно на 25% меньше. Анализ полученных данных позволил оценить сорбционную активность материала КАРБОВЕР по отношению к ^{226}Ra при фильтрации дистиллированной воды, которая составила около 4,4 с доверительным значением показателя в интервале 3,0–6,7. Сорбционная активность материала КАРБОВЕР оказалась примерно в 1,5 раза выше, чем для вспученного вермикулита. Анализ полученных данных позволил также оценить сорбционную емкость материала КАРБОВЕР, которая составила около 3500 Бк/кг.

При обратной промывке дистиллированной водой материала КАРБОВЕР после его насыщения ^{226}Ra установлено, что вынос ^{226}Ra с промывной водой из объема фильтрующего материала

практически не наблюдается (табл. 3). Суммарная активность ^{226}Ra , которая перешла в промывные воды при пропускании 5,4 л дистиллированной воды, составила всего около 1,1 Бк, в то время как накопленная активность ^{226}Ra в объеме материала КАРБОВЕР в экспериментальной установке составляла более 125 Бк.

Таблица 3
Удельная активность ^{226}Ra в дистиллированной воде после промывки материала КАРБОВЕР, насыщенного ^{226}Ra

Суммарный объем отфильтрованной дистиллированной воды до отбора пробы на анализ, л	УА ^{226}Ra , Бк/кг
0,2	1,82±0,36
2,4	0,15±0,03
5,4	0,12±0,02

В реальных условиях природные подземные воды имеют обычно достаточно высокую минерализацию и содержат взвешенные и растворенные минеральные компоненты в форме различных химических соединений. По этой причине процессы сорбции природных радионуклидов при фильтрации через материал КАРБОВЕР реальных природных вод и растворов этих радионуклидов в дистиллированной воде серьезно отличаются. В первую очередь это связано с тем, что механизмы сорбции растворенных в природной воде минеральных компонент и природных радионуклидов могут быть конкурирующими. С учетом этой закономерности нами проведены исследования сорбционных характеристик материала КАРБОВЕР с использованием реальной природной воды из артезианской скважины, которая дополнительно была обогащена природными радионуклидами ^{210}Pb и ^{210}Po (табл. 4).

Сравнение данных табл. 2 и 4 показывает, что сорбционная активность фильтрующего материала КАРБОВЕР при фильтрации природной воды оказывается несколько ниже, чем при фильтрации дистиллированной воды, тем не менее, она по-прежнему является достаточно высокой. Интересно также, что сорбционная активность материала КАРБОВЕР по отношению к ^{210}Pb и ^{210}Po оказалась примерно такой же, как и к ^{226}Ra . Причем и динамика снижения сорбционной активности материала КАРБОВЕР по отношению к этим природным радионуклидам остается практически одинаковой, несколько отличаясь в лучшую сторону для ^{210}Pb .

Рассмотрим результаты специальных исследований, в которых через материал КАРБОВЕР

Таблица 2
Изменение удельной активности ^{226}Ra (УА ^{226}Ra) в дистиллированной воде в процессе фильтрации через материал КАРБОВЕР

Суммарный объем отфильтрованной дистиллированной воды с растворенным Ra до отбора пробы на анализ, л	УА ^{226}Ra , Бк/кг
0,0	21,34±4,27
1,2	4,81±0,96
3,4	7,65±1,53
6,6	8,08±1,62
9,3	8,95±1,79

Таблица 4

Изменение удельной активности радионуклидов в природной воде в процессе фильтрации ее через материал КАРБОВЕР

Суммарный объем отфильтрованной воды до отбора пробы на анализ, л	УА радионуклидов, Бк/кг		
	²²⁶ Ra	²¹⁰ Po	²¹⁰ Pb
0,0	6,73±1,27	3,01±0,60	2,56±0,51
3,0	2,61±0,52	1,33±0,27	0,86±0,19
10,0	3,61±0,72	1,74±0,35	1,12±0,22
19,0	4,58±0,92	1,66±0,33	0,80±0,16

фильтровалась вода из артезианской скважины с достаточно высокой минерализацией (около 0,9 г/л), обогащенная всеми основными гигиенически значимыми природными радионуклидами ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po (табл. 5).

Как следует из анализа данных табл. 5, динамика снижения сорбционной активности материала КАРБОВЕР по отношению к ²²⁶Ra и ²¹⁰Po в пределах погрешности измерений практически одинакова. Однако сорбционная активность материала по отношению к ²¹⁰Pb оказалась несколько ниже, чем по отношению к ²¹⁰Po, для которого она остается достаточно высокой. Как и в случае фильтрации дистиллированной воды, обогащенной ²¹⁰Pb, материал КАРБОВЕР довольно быстро насыщается этим радионуклидом и далее перестает его осажждать. Так, после фильтрации 15 л воды с содержанием ²¹⁰Pb на уровне около 7 Бк/кг этот радионуклид практически перестает осаждаться.

Что касается природного радионуклида ²³⁸U, то как сорбционная активность, так и сорбционная емкость материала КАРБОВЕР по отношению к этому радионуклиду оказались достаточно высокими. На начальном этапе фильтрации высокоминерализованной природной воды наблюдается практически полное удаление ²³⁸U из нее. По мере насыщения сорбционная активность материала КАРБОВЕР постепенно снижается. Тем не менее она остается достаточно высокой даже после фильтрации 0,5 м³ природной воды в расчете на 1 кг фильтрующего материала.

Следует отметить, что проблемы с качеством воды источников питьевого водоснабжения населения, связанные с повышенным содержанием ²³⁸U, в нашей стране встречаются довольно редко. Во-первых, это связано с довольно высоким значением уровня вмешательства для этого радионуклида в питьевой воде (3 Бк/кг), во-вторых, в большинстве случаев этот радионуклид находится в слабо растворимой форме и довольно прочно удерживается в твердой фазе вмещающих пород. Тем не менее, в ряде регионов страны (Оренбургская и Челябинская области, Красноярский край и др.) встречаются подземные природные воды с довольно высоким содержанием этого радионуклида. Анализ результатов экспериментальных исследований позволил получить оценку сорбционных свойств материала КАРБОВЕР по отношению к основным гигиенически значимым природным радионуклидам, которые чаще всего присутствуют в природных подземных водах (табл. 6). Для большей наглядности сорбционная активность фильтрующего материала КАРБОВЕР в табл. 6 определена по формуле:

$$CA = (1 - UA_{После} / UA_{До}) \times 100\% ,$$

где $UA_{До}$ и $UA_{После}$ — удельная активность радионуклида в природной воде до и после фильтрации через экспериментальную установку с фильтрующим материалом КАРБОВЕР.

При исследованиях сорбционных свойств материала КАРБОВЕР нами не анализировались

Таблица 5

Изменение удельной активности радионуклидов в природной воде, обогащенной ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po, при фильтрации через материал КАРБОВЕР

Суммарный объем отфильтрованной воды до отбора пробы на анализ, л	УА радионуклидов, Бк/кг			
	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²¹⁰ Po	²¹⁰ Pb
0,0	0,82±0,16	4,85±0,97	3,20±0,64	6,98±1,39
5,0	0,10±0,05	2,73±0,55	1,36±0,27	4,59±0,59
15,0	0,31±0,08	3,39±0,68	2,29±0,46	7,07±1,41

Таблица 6

Сорбционные свойства материала КАРБОВЕР по отношению к отдельным природным радионуклидам при фильтрации природной воды

Сорбционная характеристика	Природные радионуклиды			
	^{226}Ra	^{238}U	^{210}Po	^{210}Pb
Сорбционная активность, %	68	88	58	66
Сорбционная емкость, Бк/кг	3500	>700	800	900

процессы осаждения других изотопов ^{238}U и ^{226}Ra , которые обычно присутствуют в природных водах. Совершенно очевидно, что фильтрующие свойства материала КАРБОВЕР, полученные для ^{238}U и ^{226}Ra , в полной мере могут быть интерпретированы и на другие их изотопы в силу их полной химической аналогии.

Заключение. Таким образом, анализ полученных результатов показал, что плазменно фильтрующий материал ПСУМ® в чистом виде характеризуется высокой сорбционной активностью по отношению к природному радионуклиду ^{226}Ra в воде. При фильтрации дистиллированной воды с растворенным в ней ^{226}Ra через данный материал наблюдается снижение удельной активности радионуклида в воде не менее чем в 100 раз. Этот вывод распространяется и на природные радионуклиды ^{224}Ra и ^{228}Ra , которые в химическом отношении являются полными аналогами радионуклида ^{226}Ra .

Композитный фильтрующий материал КАРБОВЕР также обладает высокой сорбционной активностью по отношению к основным наиболее распространенным в подземных водах при-

родным радионуклидам ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{228}Ra , ^{238}U , ^{235}U , ^{210}Pb и ^{210}Po , которая обеспечивает снижение их удельной активности в отфильтрованной воде до 80%.

С учетом одновременно достаточно высокой сорбционной емкости по отношению к указанным природным радионуклидам фильтрующие материалы КАРБОВЕР с различным массовым содержанием ПСУМ® могут использоваться для эффективной очистки питьевой воды от указанных природных радионуклидов. При этом увеличение массового содержания ПСУМ® в составе фильтрующего материала КАРБОВЕР при одновременном увеличении удельной площади его поверхности на единицу массы материала позволит заметно улучшить также и его сорбционные характеристики.

По сравнению с традиционными фильтрующими материалами природного происхождения материал КАРБОВЕР обладает одним интересным отличием, которое может положительно повлиять на перспективы его использования для очистки питьевой воды от природных радионуклидов — его плотность составляет около 0,130 г/см³. Это во многом уникальное свойство материалов КАРБОВЕР может сыграть положительную роль при обращении с отходами, которые образуются в процессе очистки питьевой воды.

Физико-химические свойства сорбента КАРБОВЕР могут служить основанием для применения новых фильтрующих материалов, созданных на основе технологии ПСУМ®, для очистки больших объемов питьевой воды от природных и техногенных радионуклидов.

Литература

1. Справочник «Дозы облучения населения Российской Федерации в 1999 году» / под ред. П. В. Рамзаева.— СПб.: СПбНИИРТ, 2001.— 29 с.
2. Botezatu E. Contribution of the dietary ingestion to the natural radiation exposure of Romanian population // J. Hyg. Public Health.— 1994.— № 44 (1-2).— P. 19-21.
3. Барковский А. Н., Барышков Н. К., Кормановская Т. А., Кувшинников С. И., Липатова О. Е., Перминова Г. С., Репин В. С., Романович И. К., Стамат И. П., Тутельян О. Е. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2004 году: справочник.— СПб., 2006.— 62 с.
4. Bradley E. J. Contract Report. National radionuclides in environmental media. NRPB-M439. 1993.— 54 p.
5. Muth H., Rajewsky B., Hantke H. J. et al. The normal radium content and the $^{226}\text{Ra}/\text{Ca}$ ratio of various food, drinking water and different organs and tissues of the human body // Health Phys.— 1960.— № 2.— P. 239-245.
6. Источники и эффекты ионизирующего излучения. Отчет НКДАР ООН 2000 года Генеральной Ассамблее с научными приложениями. Т. 1: Источники (часть 1): пер. с англ., под ред. акад. РАМН Л. А. Ильина и проф. С. П. Ярмоненко.— М.: РАДЭКОН, 2002.— 308 с.
7. Гончарова Ю. Н., Басалаева Л. Н., Кадука М. В. и др. Оценка доз облучения населения различных регионов Российской Федерации природными и техногенными радионуклидами за счет потребления питьевой воды // Радиационная гигиена.— 2010.— Т. 3, № 2.— С. 39-45.

8. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПиН 2.6.1.2523-09. Зарегистрированы Министерством юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный № 14534.
9. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. СанПиН 2.6.1.2800-10. Зарегистрированы Министерством юстиции Российской Федерации 27 января 2011 г., регистрационный № 19527.
10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). СП 2.6.1.2612-10. Зарегистрированы Министерством юстиции Российской Федерации 11 августа 2010 г., регистрационный № 18115.
11. *Шутов В. Н., Стамат И. П., Швыдко Н. С. и др.* Суммарная удельная альфа- и бета-активность и удельная активность радионуклидов в воде. Методика выполнения измерений. — СПб., 2007. Свидетельство об аттестации № 1212/07 от 26.10.2007 г.
12. *Басалаева Л. Н., Кадука М. В., Салазкина Н. В., Стамат И. П. и др.* Организация и проведение комплексного радиационно-гигиенического обследования системы водоснабжения г. Тверь. Отчет по Договору № 25-01/2007 от 31 января 2007 года.— СПб., 2007.— 29 с.
13. Патент на изобретение № 2544645 (РФ). Установка для производства сорбента типа КАРБОВЕР-ПСУМ®, 2015 г.

Поступила в редакцию: 10.06.2015 г.

Контакт: *Касаткин Валерий Иванович*, тел.: 8 911-214-73-24.

Сведения об авторах:

Мосягин Игорь Геннадьевич — д-р мед. наук, профессор, начальник медицинской службы Главного командования Военно-морского Флота, Санкт-Петербург, Адмиралтейский проезд, д. 1; e-mail: mosyagin-igor@mail.ru;

Куликов Алексей Владимирович — подполковник медицинской службы, д-р мед. наук, профессор, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института кораблестроения и вооружения Военно-Морского Флота, Военный научно-учебный центр Военно-морского флота «Военно-медицинская академия», Санкт-Петербург, ул. Рузовская, д. 10; тел.: 8 (921) 091-88-46;

Бузов Евгений Яковлевич — контр-адмирал, Лауреат Ленинской премии, кандидат технических наук, генеральный директор ЗАО «Медико-биологический научно-исследовательский центр «Дискретная нейродинамика», Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 14; тел.: 8 (921) 999-74-33;

Касаткин Валерий Иванович — полковник медицинской службы, д-р мед. наук, профессор, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института Кораблестроения и вооружения Военно-морского флота, Военный научно-учебный центр Военно-морского флота «Военно-медицинская академия», Санкт-Петербург, ул. Рузовская, д. 10; тел.: 8 (911) 214-73-24;з

Пониматкин Владимир Павлович — д-р эконом. наук, заместитель генерального директора ЗАО «Медико-биологический научно-исследовательский центр «Дискретная нейродинамика», Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 14; тел.: 8 (921) 633-37-77.

Подписной индекс:
Агентство «Роспечать» — **58010**