ОЧИСТКА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ОТ СТРОНЦИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫМ МЕТОДОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЛИНОПТИЛОЛИТА

В.И. Щербаков, З.С.А. Аль-Амри, А.В. Михайлин*

Воронежский государственный технический университет (ВГТУ),

394006, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14;

**Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ. В настоящее время термин «жесткость» используется для описания суммарной концентрации в воде кальция, магния и стронция в эквивалентном выражении. Будучи близок к кальцию по химическим свойствам, стронций резко отличается от него по своему биологическому действию. Длительное употребление воды с повышенным содержанием стронция (Sr) приводит к развитию различных заболеваний; особенно он опасен для детей. По лимитирующему показателю вредности стронций относится к санитарно-токсикологическому классу вредности.

Целью исследований являлось определение эффективности сорбции стабильного стронция на клиноптилолите в условиях повышенной жесткости подземной воды. На основании экспериментальных исследований на лабораторном фильтре с клиноптилолитом построены выходные кривые зависимости остаточной концентрации жесткости и стронция в фильтрате от относительных объемов пропущенной воды. В результате исследований получены положительные результаты применения клиноптилолита Холинского месторождения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стронций, подземные воды, химический состав, сорбент, клиноптилолит, имитант, жесткость, фильтр, загрузка, продолжительность фильтроцикла

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Щербаков В.И., Аль-Амри З.С.А., Михайлин А.В. Очистка питьевой воды от стронция фильтрационным методом с применением клиноптилолита // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 4 (103). С. 457–463. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.457-463

DRINKING WATER PURIFICATION FROM STRONTIUM BY THE FILTRATION METHOD USING CLINOPTILOLITE

V.I. Shcherbakov, Z.S.A. Al'-Amri, A.V. Mikhaylin*

Voronezh State Technical University (VSTU), 14 Moscow Avenue, Voronezh, Russian Federation, 394026;

**Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),*

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337

ABSTRACT. At present, the term "water hardness" is used to describe the total concentration of calcium, magnesium, and strontium in equivalent terms. Strontium is close to calcium by its chemical properties but differs from it dramatically by the biological effect. Long-term use of water with an increased content of strontium (Sr) leads to the development of various diseases among the population. Especially, it is dangerous for children. Strontium refers to the sanitary-toxicological hazard class by the limiting harmfulness indicator. The aim of the studies was to determine the effectiveness of stable strontium sorption on clinoptilolite in conditions of increased groundwater hardness. Based on experimental studies on the laboratory clinoptilolite filter, the output dependences of the residual concentration of hardness and strontium in the filtrate on the relative volumes of the filtrated water were plotted. As a result of the research, positive results of application of clinoptilolite of Kholinsky deposit were obtained.

KEY WORDS: strontium, groundwater, chemical composition, sorbent, clinoptilolite, simulant, water hardness, filter, loading, duration of filter cycle

FOR CITATION: Shcherbakov V.I., Al'-Amri Z.S.A., Mikhaylin A.V. Ochistka pit'yevoy vody ot strontsiya fil'tratsionnym metodom s primeneniym klinoptilolita [Drinking Water Purification from Strontium by Filtration Method Using Clinoptilolite]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 4 (103), pp. 457–463. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.457-463

Стронций и фтор по воздействию на живые организмы являются антагонистами. Поэтому повышенное содержание стабильного стронция в питьевой воде, содержащей фтор, снижает величину риска появления этих заболеваний в организме людей [1–4].

Проблема очистки воды от стабильного стронция остро возникла в последнее десятилетие в связи с использованием в питьевом водоснабжении РФ больших объемов артезианской воды водоносных горизонтов с содержанием стабильного стронция, в 5–20 раз превышающим предельно допустимую

концентрацию 7 мг/дм^3 . Повышенные концентрации стабильного стронция обнаружены в скважинах Смоленской, Воронежской областей, Нижнем Новгороде и других населенных пунктах. Установлена закономерная тенденция увеличения содержания стронция с глубиной залегания водоносных слоев.

Анализ публикаций, включая патенты, показал, что проблема очистки воды от стабильного стронция весьма актуальна [5–8]. При решениях задачи умягчения воды, несмотря на обширную литературу, сведений о методах удаления из подземных вод стронция практически нет [9–13].

Подземная вода содержит стабильный стронций в количестве до 30 мг/дм^3 , превышающем санитарно-гигиеническую норму ($7,0 \text{ мг Sr}^{2+}/\text{дм}^3$) для питьевой воды¹.

Цель работы — исследование эффективности сорбции стабильного стронция на клиноптилолите в условиях повышенной жесткости подземной воды.

В основу настоящих исследований положен метод, разработанный Никашиной В.А. и Зайцевой Е.В. Однако авторами не рассматривалось влияние катионов жесткости воды на сорбционные свойства клиноптилолита по стабильному стронцию. В ходе исследований требовалось установить:

- продолжительность фильтроцикла по Sr^{2+} при условии очистки до уровня ПДК для жесткой воды;
- динамическую обменную емкость (ДОЕ) по Sr^{2+} ;
- селективность загрузки по Sr^{2+} на фоне высоких концентраций Ca^{2+} в подземной воде.

Для исследований в качестве сорбента выбран клиноптилолит Холинского месторождения, предложенный для очистки подземных вод от стронция. Цеолитовый сорбент выпускается ПО «Заря» по ТУ 6-00-04873044-102-93 и предназначается для очистки питьевой воды. Цеолит марки СПЦ-1 фракционировался на стандартных ситах с отбором фракций $0,5 \dots 1 \text{ мм}$, являющихся целевыми фракциями (по ТУ). Указанная фракция была принята в условии соотношения диаметров модели фильтра и зерна сорбента, которое должно быть не менее 15, для исключения пристенного эффекта в процессе фильтрования. Принятые фракции загрузки вписываются в рекомендуемые размеры фракций по ТУ для марки клиноптилолита ($0,5 \dots 3,0 \text{ мм}$).

Лабораторный фильтр имел следующие параметры: диаметр $d_{\text{ф}} = 16 \text{ мм}$; высота загрузки клиноптилолита $h_{\text{кл}} = 0,55 \text{ м}$; объем загрузки $V_{\text{кл}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.

Подготовка загрузки к работе осуществлялась следующим образом:

- вначале загрузка в фильтре отмывалась водопроводной водой от пыли путем взрыхления (подачи воды снизу вверх) с интенсивностью $3 \dots 4 \text{ дм}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при обеспечении 50%-ного расширения загрузки в течение 10 мин;

- после отмывки проводилась «зарядка» клиноптилолита в рабочую Na-ионную форму согласно рекомендациям [14–15], для чего пропускался регенерационный раствор $0,5N$ поваренной соли (30 г/дм^3) со скоростью $0,5 \text{ м/ч}$ (с удельным расходом $q = 1,7 \text{ мл/мин}$). Общее количество пропущенного раствора NaCl составляло $1 : 1$ от относительных объемов;

- далее проводилась отмывка клиноптилолита водопроводной водой снизу вверх с интенсивностью $3 \dots 4 \text{ дм}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ до прозрачности отмывочной воды, так как первые порции ее оказывались мутными.

Для эксперимента в динамических условиях на клиноптилолите использовалась реальная подземная вода. Имитацию содержания гидрокарбоната кальция для обеспечения требуемой жесткости осуществляли насыщением подземной воды диоксидом углерода с последующей добавкой расчетного количества раствора оксида кальция. Необходимую концентрацию стронция обеспечивали растворением в имитате нитрата стронция [16–17].

Осредненный состав имитата, используемого в эксперименте, по основным макрокомпонентам представлен в табл. 1. Приготовленный имитат фильтровали на модели фильтра с загрузкой клиноптилолита с линейной скоростью $3 \dots 4 \text{ м/ч}$ (объемный расход до 12 мл/мин). Через определенные промежутки времени производился отбор проб фильтрата (по 500 мл), в которых определяли содержание Sr^{2+} и Ж_0 .

На основании экспериментальных исследований на фильтре с клиноптилолитом построены выходные кривые зависимости остаточной концентрации жесткости, мг-экв/дм^3 , стронция, мг/дм^3 , в фильтрате от количества относительных объемов пропущенной воды к объему загрузки.

На рис. 1 и 2 представлены выходные кривые $C_{(\text{Ж}, \text{Sr})}^{2+} = f(V_{\text{отн}})$.

Как следует из рис. 1, снижение жесткости до регламента СанПиН 2.1.4.1074-01 достигается при пропуске 105 относительных объемов на объем загрузки, а исходных значений — при пропуске 180 относительных объемов. При этих значениях концентрация кальция также достигает исходных величин. Однако для такого количества (180 относительных объемов на объем загрузки) пропущенной воды концентрация стронция в фильтрате остается ниже допустимого уровня, клиноптилолит обладает селективностью по стронцию.

На рис. 2 показано, что обеспечение норматива фильтрата по стронцию (7 мг/дм^3) в динамике может быть достигнуто при пропуске 260 относитель-

¹ СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения.

Табл. 1. Физико-химический состав подземной воды после внесения гидрокарбоната кальция и нитрата стронция (имитат)

Показатели	Имитат	СанПиН 2.1.4.1074-01
Температура °С	15	–
Водородный показатель pH при температуре пробы	7,4	6,0...9,0
Щелочность общая, мг-экв/дм ³	6,9 ± 0,4	≥ 0,5
Мутность, мг/дм ³	<< 0,5	≤ 1,5
Цветность, град.	< 1	≤ 20
Жесткость (Ca ²⁺ +Mg ²⁺), мг-экв/дм ³	10 ± 0,3	≥ 7,0
Кальций Ca ²⁺ , мг-экв/дм ³ / мг/дм ³	7,1 ± 0,2 / 142,3 ± 4	– / 30...140
Магний Mg ²⁺ , мг-экв/дм ³ / мг/дм ³	2,9 / 35,3	– / 5
Натрий Na ⁺ , мг-экв/дм ³ / мг/дм ³	0,3 / 6,9	– / 200
Калий K ⁺ , мг-экв/дм ³ / мг/дм ³	0,03 / 1,2	– / –
Хлориды Cl ⁻ , мг-экв/дм ³ / мг/дм ³	1,85 / 65,6	– / 350
Сульфаты SO ₄ ²⁻ , мг-экв/дм ³ / мг/дм ³	1,79 / 86	– / 500
Гидрокарбонаты HCO ⁻³ , мг-экв/дм ³ / мг/дм ³	6,9 / 421	– / 30...450
Нитраты NO ⁻³ , мг-экв/дм ³ / мг/дм ³	0,73 / 45,3	– / 45
Стронций Sr ²⁺ , мг-экв/дм ³ / мг/дм ³	0,73 / 32	– / 7
Железо (суммарно) Fe, мг/дм ³	0,45 ± 0,05	0,3
Сухой остаток, мг/дм ³	625	1000

Рис. 1. Зависимость жесткости от относительного объема профильтрованной подземной воды (исходная жесткость 10,25 мг-экв/дм³) **Рис. 2.** Зависимость концентрации стронция от относительного объема профильтрованной подземной воды (исходная концентрация Sr 32 мг/дм³)

ных объемов воды на объем загрузки, так как количество пропущенной воды увеличивается более чем в 1,4 раза.

По результатам экспериментов определена ДОЕ клиноптилолита по стронцию при обеспечении уровня его концентрации в фильтрате 7 мг/дм³ и исходного содержания 32 мг/дм³:

$DOE_{Sr} = 9 \cdot 32 \text{ мг/дм}^3 + 17 \text{ дм}^3 \cdot (32 \text{ мг/дм}^3 - 7 \text{ мг/дм}^3) + 17 \cdot 7/2 = 288 + 25 + 59,5 = 772,5 \text{ мг,}$
или $\Theta_{Sr} = 43,8 \text{ мг;}$

$DOE_{Sr} = 772,5 / (438 \times 0,1) = 176,4 \text{ мг-экв/дм}^3.$

Механизм ионного обмена катионов жесткости на клиноптилолите для указанного фильтроцикла 260 объемов на объем приводит к увеличению содержания иона натрия в среднем на 3 мг-экв/дм³ (69 мг/дм³).

В процессе эксперимента кислотность pH фильтрата несколько увеличивалась ($\Delta_{\max} = 0,6$) вследствие аэрации и декарбонизации имитата. В условиях эксперимента применен имитат, содержащий двухвалентное железо в количестве до 0,5 мг/дм³, которое не было предварительно удалено.

Окисление и гидролиз железа (II) в гидроксид железа (III) оказывали неблагоприятное влияние и снижали эффективность работы загрузки клиноптилолита в фильтре.

ДОЕ клиноптилолита по общей жесткости при условии ее восстановления в фильтрате до исходной (см. рис. 1) составляет $DOE_{ж} = 3 \text{ дм}^3 \times 10,25 \text{ мг-экв/дм}^3 + 15 \cdot 10,25/2 = 30,75 + 76,88 = 107,63 \text{ мг-экв/0,1 дм}^3$, а отнесенная к кубическим дециметрам загрузки величина $DOE_{ж} = 1076,3 \text{ мг-экв/дм}^3$ загрузки.

Долевая часть сорбционной емкости клиноптилолита от сорбируемой жесткости составляет $176,4 : 1076,3 = 0,164$, т.е. 16,4 %.

В усредненной пробе фильтрата в объеме 26 дм³, полученных за фильтроцикл (до $C_{Sr} = 7 \text{ мг/дм}^3$), концентрация стронция составляет (см. рис. 2)

$C_{Sr} = [9 \text{ дм}^3 \cdot 0 + 17 \cdot (7)/2]/26 = 2,3 \text{ мг/дм}^3$,

а общая жесткость (см. рис. 1)

$Ж = [3 \text{ дм}^3 \cdot 0 + 15 \cdot (10,25/2) + 8 \cdot 10,25] = 6,1 \text{ мг-экв/дм}^3.$

Таким образом, чтобы обеспечить необходимую концентрацию в усредненной пробе (в соответствии с опытами Никашиной В.А., где в усредненной пробе в конце фильтроцикла концентрация стронция составляла 3,5 мг/дм³, а жесткость 7 мг-экв/дм³), можно в данном эксперименте увеличить объем усредненной пробы до 32...33 дм³, что составит примерно 330 относительных объемов при условии поддержания концентрации Sr^{2+} в фильтрате 7 мг/дм³ $C_{Sr} = [59,5 + 7 \cdot 7] / 33 = 3,3 \text{ мг/дм}^3$ [13–18]. В данном случае жесткость в усредненной пробе составит

$Ж = (158,9 + 7 \cdot 10,25) / 33 = 6,98$, или ~7,0 мг-экв/л.

Сравнение результатов экспериментов, проведенных на подземной воде, представлено в табл. 2.

Как следует из табл. 2, при большей (в 1,44 раза) скорости фильтрования стронцийсодержащего имитата через клиноптилолит ДОЕ в условиях более мелкодисперсной фракции ($d_3 = 0,5...1 \text{ мм}$), а следовательно, более скорой кинетики, в 1,67 раза выше, чем в эксперименте Никашиной В.А. ($d_3 = 0,5...3 \text{ мм}$). Расчет продолжительности фильтроцикла для идентичных условий по высоте загрузки для нашего эксперимента составит 3,9 сут, что соответствует расчетным параметрам технологии очистки воды от стабильного стронция на клиноптилолите, разработанной В.А. Никашиной.

Табл. 2. Сравнительные данные экспериментов по очистке подземной воды от стабильного стронция на клиноптилолите Холинского месторождения

Параметры	Эксперимент № 1	Эксперимент № 2
Расход воды на установке, м ³ /ч	0,5	$0,72 \cdot 10^{-3}$
Объем загрузки, м ³	0,28	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Исходная концентрация стронция в воде, мг/дм ³	30	30 ± 2
Диаметр фильтра, мм	500	16
Площадь фильтрации, м ²	0,2	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Высота загрузки, м	1,4	0,5
Объем пропущенного фильтрата до ПДК до Sr^{2+} , м ³	40	$26 \cdot 10^{-3}$
Объем усредненной пробы до достижения концентрации $Sr^{2+} = 3,5 \text{ мг/дм}^3$ и $Ж_{об} = 7,0 \text{ мг-экв/дм}^3$	48	$33 \cdot 10^{-3}$
Скорость фильтрования, м/ч	2,5	3,6
Относительные объемы фильтрата при концентрации $Sr^{2+} = 3,5 \text{ мг/дм}^3$	171	330
ДОЕ клиноптилолита по Sr^{2+} , мг-экв/дм ³ загрузки	106	176,4
Фильтроцикл для идентичных условий по высоте загрузки (1,4 м), сут	4,0	3,9

Актуальность проблемы, связанной с повышенным содержанием стабильного стронция в питьевой воде, постоянно возрастает [18–20]. Это связано с увеличением потребления воды и истощением водоносных горизонтов, а также с ускорением выщелачивания минералов из-за увеличения кислотности осадков.

Можно сделать следующие выводы:

1. Клиноптилолит Холинского месторождения, модифицированный в Na-форму, является сравнительно слабым ионообменником по отношению к катионам жесткости. Поэтому процесс сорбции стабильного стронция происходит на фоне катиона кальция практически в продолжение всего фильтроцикла.

2. Определена общая ДОО клиноптилолита по катионам жесткости и стабильному стронцию, которая составила 1076,3 мг-экв/дм³ загрузки и 176,4 мг-экв/дм³ загрузки соответственно. Долевая часть общей обменной емкости клиноптилолита по стронцию составляет 16,4 %, что указывает на до-

статочную селективность клиноптилолита по Sr²⁺ при отношении концентрации Sr: Ж_{об} = 0,73:10,25 мг-экв/дм³. Эффективность удаления стронция до норм ПДК в три раза выше по сравнению с катионами жесткости (Ca²⁺ и Mg²⁺), а эффект полного извлечения выше в шесть раз.

3. Сравнение результатов эксперимента с имеющимися данными по технологии очистки подземной воды от стабильного стронция показал, что полученная продолжительность фильтроцикла в эксперименте, равная 3,9 сут, согласуется с расчетным значением других исследователей.

4. Результаты исследований показали, что для обеспечения ПДК в фильтрате по стронцию (7 мг/дм³) можно пропустить через загрузку из клиноптилолита 260 относительных объемов воды на объем загрузки, а для обеспечения в усредненной пробе фильтрата концентрации 3,5 мг/дм³ Sr²⁺ и предельно-допустимой для питьевой воды жесткости 7 мг-экв/дм³ — 330 относительных объемов на объем загрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. России 2032626 МПК C02F1/28. Способ очистки питьевой воды от стронция: / В.А. Никашина, Е.В. Зайцева; заяв. и патентообл. Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН. № 4953765/26. Заявл. 28.06.1991; опубл. 10.04.1995, бюл. № 26.
2. Зухурова М.А. Электрохимическое поведение стронция (II) в водно-спиртовых растворах: дис. ... канд. хим. наук. Душанбе, 2009. 165 с.
3. Bedelean H., Maicaneanu A., Burca S. et al. Removal of heavy metal ions from wastewaters using natural clays // Clay Minerals. 2009. Vol. 44. Pp. 487–495.
4. Санджиева Д.А. Сорбционное концентрирование на природных минеральных сорбентах как основа очистки природных и сточных вод: дис. ... канд. хим. наук. Астрахань, 2005. 125 с.
5. Говорова Ж.М., Журба М.Г. Обоснование водоочистных технологий и их инвестирования. М., 2012. 176 с.
6. Журба М.Г. Тенденции развития науки и практики водоснабжения. Волгоград: ВоГТУ, 2013. 90 с.
7. Говорова Ж.М., Магомадов З.Р. Модернизация водозаборно-очистных станций малых населенных пунктов // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 1. С. 47–48.
8. Menon E.S., Menon P.S. Working guide to pumps and pumping stations: Calculations and Simulations. Oxford, Linacre House, Jordan Hill, 2010. 283 p.
9. Говорова Ж.М. Интенсификация процессов очистки воды, содержащей антропогенные примеси // Вода: химия и экология. 2012. № 7. С. 30–38.
10. Журба М.Г., Ганбаров Э.С., Говорова Ж.М. и др. Тенденции развития безреагентных водоочистных технологий // Водоочистка. 2010. № 1. С. 40–44.
11. Manos M.J., Ding N., Kanatzidis M.G. Layered Metal Sulfides: Exceptionally Selective Agents for Radioactive Strontium Removal // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 2008 Mar 11. 105 (10). Pp. 3696–3699.
12. Paulus W.J., Komarneni S., Roy R. Bulk Synthesis and Selective Ion Exchange of Strontium Ions in Mica // Nature. 1992. No. 357. Pp. 571–573.
13. Anthony R.G., Dosch R.G., Gu D. et al. Use of Silicotitanates for Removing Cesium and Strontium from Defense Waste // Industrial and Engineering Chemistry Research/ 1994. Vol. 33. Pp. 2702–2705.
14. Behrens E.A., Sylvester P., Clearfield A. Assessment of a Sodium Nonatitanate and Pharmacosiderite — Type Ion Exchangers for Strontium and Cesium Removal from DOE Waste Simulants // Environment Science Technology. 1998. Vol. 32. Pp. 101–107.
15. Bortun A.I., Bortun L.N., Clearfield A. Evaluation of Synthetic Inorganic Exchangers for Cesium and Strontium Removal from Contaminated Ground Water and Wastewater // Solvent Extraction and Ion Exchange. 1997. No. 15. Pp. 909–929.
16. Marinin D.V., Brown G.N. Studies of Sorbent/Ion Exchange Materials for the Removal of Radioactive Strontium from Liquid Radioactive Waste and High Hardness Groundwaters // Waste Manage. 2000. Vol. 20. Issue 7. Pp. 545–553.
17. Chegrouche S., Mellah A., Barkat M. Removal of strontium aqueous solutions by adsorption onto activated carbon: kinetic and thermodynamics studies // Desalination. 2009. 235. Pp. 306–318.
18. Rao S.V.S., Biplob P., Lal K.B. et al. Effective removal of cesium and strontium from radioactive wastes using chemical treatment followed by ultra filtration // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2000. 246. Pp. 413–418.
19. Журба М.Г., Говоров О.Б., Говорова Ж.М. Предпроектные испытания инновационных технологий водоподготовки и их влияние на обоснование инвестиций // Водоснабжение и канализация. 2010. № 2. С. 64–70.
20. Говорова Ж.М., Магомадов З.Р. Технология подготовки питьевых вод из маломощных эвтрофированных водоемов // Вестник МГСУ. 2009. № 3. С. 99–106.

Поступила в редакцию в декабре 2016 г.

Принята в доработанном виде в феврале 2017 г.

Одобрена для публикации в марте 2017 г.

Об авторах: **Щербakov Владимир Иванович** — доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики, водоснабжения и водоотведения, **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**, 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14, 8 (473) 246-40-10, scher@vgtu.vrn.ru;

Аль-Амри Заед Садик Абрахем — аспирант кафедры гидравлики, водоснабжения и водоотведения, **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**, 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14, 8 (473) 246-40-10, zaidalamry@mail.ru;

Михайлин Алексей Викторович — старший преподаватель кафедры водоснабжения и водоотведения, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8 (499) 183-36-29, mav0154@mail.ru.

REFERENCES

1. Patent of Russia 2032626 IPC C02F1/28. *Sposob ochistki pit'yevoy vody ot strontsiya* [Method for drinking water purification from strontium]. Nikashina V.A., Zaitseva E.V.; Applicant and patent holder: Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences. No. 4953765/26; declared. 28.06.1991; publ. 10.04.1995, bul. No. 26. (In Russian)
2. Zuhurova M.A. *Elektrokhimicheskoe povedenie strontsiya (II) v vodno-spirovnykh rastvorakh: dissertatsiya ... kandidata khimicheskikh nauk* [Electrochemical Behavior of Strontium (II) in Water-Alcohol Solutions: thesis of the candidate of chemical sciences]. Dushanbe, 2009. 165 p.
3. Bedeleian H., Maicaneanu A., Burca S., et al. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters Using Natural Clays. *Clay Minerals*. 2009, vol. 44, pp. 487–495.
4. Sandzhieva D.A. *Sorbcionnoe koncentrirovaniye na prirodnykh mineral'nykh sorbentakh kak osnova ochistki prirodnykh i stochnykh vod: dis. ... kandidata khimicheskikh nauk* [Sorption Concentration on the Natural Mineral Sorbents as the Basis of Natural and Waste Waters: thesis of the candidate of chemical sciences]. Astrahan', 2005. 125 p. (In Russian)
5. Govorova Zh.M., Zhurba M.G. *Obosnovaniye vodoochistnykh tekhnologiy i ikh investirovaniya* [Substantiation of Water Treatment Technologies and Their Investments]. Moscow, 2012. 176 p. (In Russian)
6. Zhurba M.G. *Tendentsii razvitiya nauki i praktiki vodosnabzheniya* [Trends in the Development of the Science and Practice of Water Supply]. Volgograd, VoGTU Publ., 2013. 90 p. (In Russian)
7. Govorova Zh.M., Magomadov Z.R. Modernizatsiya vodozaborno-ochistnykh stantsiy malykh naselennykh punktov [Upgrading the Water Intake and Wastewater Treatment Plants of Small Settlements]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Construction]. 2012, no. 1, pp. 47–48. (In Russian)
8. Menon E.S., Menon P.S. *Working Guide to Pumps and Pumping Stations*. Oxford, Linacre House, Jordan Hill, 2010. 283 p.
9. Govorova Zh.M. Intensifikatsiya protsessov ochistki vody, soderzhashchey antropogennye primesi [Intensification of Purification Processes of Water Containing Anthropogenic Admixtures]. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: Chemistry and Ecology]. 2012, no. 7, p. 30–38. (In Russian)
10. Zhurba M.G., Ganbarov Je.S., Govorova Zh.M., et al. Tendentsii razvitiya bezreagentnykh vodoochistnykh tekhnologiy [Trends in the Development of Reagent-Free Water Treatment Technologies]. *Vodoochistka* [Water treatment]. 2010, no. 1, pp. 40–44. (In Russian)
11. Manos M. J., Ding N., Kanatzidis M.G. Layered Metal Sulfides: Exceptionally Selective Agents for Radioactive Strontium Removal. *Proc. of the National Academy of Sciences of the USA*. 2008 Mar 11, 105 (10), pp. 3696–3699.
12. Paulus W.J., Komarneni S., Roy R. Bulk Synthesis and Selective Ion Exchange of Strontium Ions in Mica. *Nature*. 1992, 357, pp. 571–573.
13. Anthony R.G., Dosch R.G., Gu D., et al. Use of Silicotitanates for Removing Cesium and Strontium from Defense Waste. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 1994, 33, pp. 2702–2705.
14. Behrens E.A., Sylvester P., Clearfield A. Assessment of a Sodium Nonatitanate and Pharmacosiderite — Type Ion Exchangers for Strontium and Cesium Removal from DOE Waste Simulants. *Environment Science Technology*. 1998, 32, pp. 101–107.
15. Bortun A.I., Bortun L.N., Clearfield A. Evaluation of Synthetic Inorganic Exchangers for Cesium and Strontium Removal from Contaminated Ground Water and Wastewater. *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 1997, 15, pp. 909–929.
16. Marinin D.V., Brown G.N. Studies of Sorbent/Ion Exchange Materials for the Removal of Radioactive Strontium from Liquid Radioactive Waste and High Hardness Groundwaters. *Waste Manage*. 2000, vol. 20, issue 7, pp. 545–553.
17. Chegrouche S., Mellah A., Barkat M. Removal of Strontium Aqueous Solutions by Adsorption onto Activated Carbon: Kinetic and Thermodynamics Studies. *Desalination*. 2009, 235, pp. 306–318.
18. Rao S.V.S., Biplob P., Lal K.B., et al. Effective Removal of Cesium and Strontium from Radioactive Wastes Using Chemical Treatment Followed by Ultra Filtration. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2000, 246, pp. 413–418.
19. Zhurba M.G., Govorov O.B., Govorova Zh.M. Predproektnye ispytaniya innovatsionnykh tekhnologiy vodopodgotovki i ikh vliyaniye na obosnovaniye investitsiy [Pre-testing of Innovative Water Treatment Technologies and Their Impact on Investment Justification]. *Vodosnabzhenie i kanalizatsiya* [Water Supply and Sewerage]. 2010, no. 2, pp. 64–70. (In Russian)
20. Govorova Zh.M., Magomadov Z.R. Tekhnologiya podgotovki pit'evykh vod iz malomoshchnykh evtrofirovannykh vodoemov [Technology of Preparation of Drinking Water from Low-Power Eutrophied Reservoirs]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2009, no. 3, pp. 99–106. (In Russian)

Received in December 2016.

Adopted in revised form in February 2017.

Approved for publication in March 2017.

About the authors: **Shherbakov Vladimir Ivanovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Hydraulics, Water Supply and Water Disposal, **Voronezh State Technical University (VSTU)**, 14 Moscow Avenue, Voronezh, Russian Federation, 394026, +7 (473) 246-40-10, scher@vgasu.vrn.ru;

Al'-Amri Zaed Sadik Abraham — Graduate Student of Department of Hydraulics, Water Supply and Water Disposal, **Voronezh State Technical University (VSTU)**, 14 Moscow Avenue, Voronezh, Russian Federation, 394026, +7 (473) 246-40-10, zaidalamry@mail.ru;

Mihaylin Aleksey Viktorovich — Senior Lecturer of the Department of Water Supply and Water Disposal, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337, +7 (499) 183-36-29, mav0154@mail.ru.