



Очистка питьевой воды от фторидов методом обратного осмоса

А. А. Шабарин*, В. Н. Водяков, А. В. Котин,
О. А. Кувшинова, Ю. И. Матюшкина

ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

*shab_aa@mail.ru

Введение. Одной из важнейших задач в сфере санитарно-эпидемиологического благополучия населения Российской Федерации является обеспечение его доброкачественной питьевой водой, безопасной в эпидемиологическом отношении и безвредной по химическому составу. Одной из главных задач водоочистки является регулирование содержания фторид-ионов в питьевой воде. Цель настоящей работы – изучение возможности очистки водопроводной воды от ионов фтора методом обратного осмоса.

Материалы и методы. Для удаления фторид-ионов была использована установка Alfa Laval PilotUnit 2.5" RO/NF с комплектом мембранных элементов спирального типа RO99-2517/48. Контроль за содержанием фторид-ионов проводили потенциометрическим методом с использованием рН-метра/милливольметра Hanna HI 2211. В качестве индикаторного электрода использовали фторид-селективный электрод марки ЭЛИС 131 F, в качестве электрода сравнения – стандартный хлоридсеребряный электрод марки ЭВЛ-1М3. Градуировочные и буферные растворы изготавливали из реактивов марки х.ч. и ч.д.а., согласно ГОСТ 4386-89.

Результаты исследования. При однократном пропускании воды через обратноосмотическую мембрану содержание фторид-ионов сократилось с $2,29 \pm 0,02$ мг/л до $0,240 \pm 0,015$ мг/л; при двукратном – еще в 2 раза. По мере возрастания содержания фторид-ионов в ретентате наблюдалось некоторое увеличение концентрации F^- и в фильтрате. После очистки воды, содержащей 20 мг/л ионов фтора, его концентрация в фильтрате не превышала 0,5 мг/л.

Обсуждение и заключения. Использование установки Alfa Laval PilotUnit 2.5" RO/NF с комплектом мембранных элементов спирального типа RO99-2517/48 позволяет эффективно очищать водопроводную воду от ионов фтора до уровня ниже предельно допустимой концентрации. Данное исследование открывает перспективу применения обратного осмоса для очистки водопроводной воды с высоким содержанием фторид-ионов.

Ключевые слова: водопроводная вода, ионы фтора, фториды, обратный осмос, потенциометрический анализ

Для цитирования: Очистка питьевой воды от фторидов методом обратного осмоса / А. А. Шабарин [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 1. С. 36–47. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.036-047



Purification of Drinking Water from Fluorides by Reverse Osmosis

A. A. Shabarin*, V. N. Vodyakov, A. V. Kotin,
O. A. Kuvshinova, Y. I. Matushkina

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

*shab_aa@mail.ru

Introduction. An important task in the sphere of sanitary and epidemiological welfare of the population of the Russian Federation is provision of drinking water. Tap water must not contain pathogenic bacteria and dangerous chemicals. Purification systems regulate the concentration of fluoride ions in drinking water. The aim of this paper is to study the possibility of purifying tap water from fluoride ions by reverse osmosis.

Materials and Methods. We used the Alfa Laval PilotUnit 2.5 "RO/NF with a set of spiral-type membrane elements RO99-2517/48 to remove fluoride ions. We measured the concentration of fluoride ions by the potentiometric method using the Hanna HI 2211 (pH/mV/T). Fluoride-selective electrode ELIS 131 F was used as an indicator electrode and the standard chloride-silver electrode EVL-1M3 was used as a reference electrode. Both the calibration and buffer solutions were prepared from chemically pure reagents and A. R. purity for analysis reagents according to GOST 4386-89.

Results. A single passage of water through the reverse osmosis membrane reduced the concentration of fluoride ions from 2.29 ± 0.02 to 0.240 ± 0.015 mg/l. Double passage of water reduced the concentration by a factor of two. As the concentration of fluoride ions increased in the retentate, the concentration in the filtrate slightly increased too. Purification of water reduced the concentration of fluoride ions from 20 mg/l, to 0.5 mg/l.

Discussion and Conclusions. Thus, using the Alfa Laval PilotUnit 2.5" RO/NF with a set of spiral-type membrane elements RO99-2517/48 filters tap water of ions of fluoride to the maximum allowable concentration. This study opens the perspective of using reverse osmosis to purify tap water with high concentration of fluoride ions.

Keywords: tap water, fluoride ions, fluorides, reverse osmosis, potentiometric analysis

For citation: Shabarin A. A., Vodyakov V. N., Kotin A. V., Kuvshinova O. A., Matushkina Y. I. Purification of Drinking Water from Fluorides by Reverse Osmosis. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):36–47. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201801.036-047

Введение

Одной из важнейших задач в сфере санитарно-эпидемиологического благополучия населения Российской Федерации является обеспечение его доброкачественной питьевой водой, безопасной в эпидемиологическом отношении и безвредной по химическому составу [1]. Одной из главных проблем водоочистки является регулирование содержания фторид-ионов в питьевой воде. Фтор относится к микроэлементам, содержание которых в воде для нормальной жизнедеятельности человека должно находиться в строго определенных пределах [2].

Длительное употребление населением воды с концентрацией фтора ниже 0,7 мг/л способствует в совокупности с другими факторами повышенной заболеваемости кариесом. Использование воды с концентрацией фтора, превышающей 1,5 мг/л, вызывает флюороз. Именно поэтому в РФ и других странах нормативные документы, в частности СанПиН¹, регламентируют содержание фтора в питьевой воде от 0,7 до 1,5 мг/л, в зависимости от климатической зоны. На территории РФ большинство природных вод, используемых для водообеспечения, содержат

¹ СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества (взамен СанПиН 2.1.4.559-96). URL: <http://docs.cntd.ru/document/901798042>

либо повышенные, либо пониженные концентрации фтора. При этом фторирование или дефторирование воды применяется очень редко из-за высокой стоимости традиционных технологий.

Цель настоящей работы – изучение эффективности очистки водопроводной воды от ионов фтора методом обратного осмоса.

Обзор литературы

Фтор относится к наиболее распространенным загрязнителям, оказывающим токсикологическое влияние на организм человека. При поражении выделительной системы гиперфтороз находит свое выражение в первую очередь в поражении почек как у детей, так и у взрослых, а также в накоплении фтора в биосубстратах (моча, волосы)² [3]. Известно, что фтор и его производные токсичны, причем даже в большей степени, чем свинец [4–6]. В перечень государств, где действует запрет на фторирование воды, входят Япония, Индия, Китай, Израиль и многие страны Европейского союза.

Влияние фтора на органы и системы организма человека обусловлено рядом биохимических реакций [7–8]. Ион фтора способен образовывать соединения с углеродом и водородом, вызывая разрушение живой клетки. Токсическое действие фторидов обусловлено тем, что они легко проникают через мембраны клеток, оказывают угнетающее действие на ферменты и приводят к токсико-метаболическим нарушениям, в т. ч. у детей разного возраста [9–11].

Ряд авторов отмечает, что фтористые соединения провоцируют про-

цессы сенсбилизации в организме [12–14], подавляют клеточный и гуморальный иммунитет, фагоцитоз, меняют основные нервные процессы, вегетативный тонус, при длительном действии вызывают задержку нервно-психического развития [15], синдром нарушения внимания с гиперреактивностью и эмоциональные расстройства³ [16–18].

В настоящее время высокая степень очистки промышленных сточных вод от ионов фтора может быть достигнута только при использовании энергозатратного, дорогостоящего импортного водоочистного оборудования, что снижает технико-экономические показатели работы предприятий в десятки раз⁴⁻⁵ [19–21].

Очевидно, целесообразно применять такие технологии, которые позволяют возвращать очищенную воду в производственный цикл, извлекать фторид-ионы и использовать содержащиеся их соединения в качестве вторичного сырья, а также применять в процессе очистки экономически доступные методы и материалы.

Методы, обеспечивающие извлечение ионов фтора из воды поверхностных и подземных источников, можно разделить на 4 группы: осаждение и соосаждение; сорбционные; ионообменные и физико-электрохимические [22–24]. В последнюю группу входят электрокоагуляция и мембранные методы: электродиализ, нанофильтрация и обратный осмос.

Такое деление довольно условно, поскольку один и тот же механизм извлечения фтора, а также реагенты, от-

² **Анкин В. В., Долгачева Т. А.** Причинная связь содержания фтора в питьевых водах Мордовии и заболеваемости населения (болезнями выделительной системы) // XLIV Огарёвские чтения : мат-лы науч. конф. Саранск : Изд-во Морд. ун-та, 2016. С. 495–500. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26380457>

³ **Авцын А. П., Жаворонков А. А.** Патология флюороза. Новосибирск : Наука, 1981. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001069867>

⁴ **Чуркин Р. А.** Разработка технологии очистки сточных вод от фторид-ионов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2011. 20 с. URL: <http://www.dissercat.com/content/razrabotka-tehnologii-ochistki-stochnykh-vod-ot-florid-ionov>

⁵ **Смирнова Е. Е.** Технология очистки сточных вод от токсичных соединений фтора : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПб. : СЗГЗТУ, 2006. 23 с. URL: <http://www.dissercat.com/content/tehnologiya-ochistki-stochnykh-vod-ot-toksichnykh-soedinenii-flora>



ответственные за данный процесс, могут отнестись к разным методам [25].

Метод осаждения (коагуляции), обеспечивающий извлечение фтора свежесформированными осадками гидроксидов магния, алюминия, железа и фосфата кальция, экономически выгодно использовать для поверхностных вод, осветляемых перед подачей в сеть, хотя в некоторых случаях его применяют и для подземных вод.

С развитием технологий получения высокоэффективных коагулянтов полиоксисульфатов и полиоксихлоридов алюминия стало возможным использование их в качестве реагентов в процессах обесфторивания. При этом снижается расход не только коагулянта (в среднем на 25–30 %) по сравнению с сульфатом алюминия, но и щелочных реагентов (извести, соды), а также улучшается процесс седиментации и отстаивания. Установлена эффективная сорбция ионов фтора матрицей активного гидроксида алюминия, формирующегося в процессе гидролиза полигидроксосолей алюминия, вследствие соразмерности ионов F^- и OH^- [21].

Использование методов осаждения и соосаждения при обесфторивании воды обуславливает необходимость фильтрования через различные сорбенты. Широкое применение получили следующие материалы: активированный оксид алюминия, фосфатсодержащие, глинистые и почвенные, магниевые сорбенты, активированный уголь и др. [26].

Известно, что анионообменные смолы различной основности, поверхность которых насыщена OH^- или анионами, способны удалять из воды ионы фтора [23]. Наибольшая емкость присуща анионитам, содержащим четвертичную аминогруппу. В начале процесса фильтрования через анионитовый фильтр практически все ионы фтора задерживаются загрузкой, поэтому до 1,2 мг $F^-/л$

фильтрат разбавляют исходной водой. Повышение содержания фтора в фильтрате до уровня, превышающего предельно допустимую концентрацию (ПДК) (1,5 мг/л), свидетельствует об окончании цикла. Смолу отмывают пересыщенным раствором хлорида натрия или соляной кислотой.

Несмотря на 90–95%-ное удаление фтора, метод характеризуют высокая себестоимость процесса из-за стоимости материала, его предобработки, регенерации, необходимости утилизации обогащенных фтором отходов; снижение эффективности очистки в присутствии конкурентноспособных анионов; низкий pH очищенной воды и загрязнение ее хлорид-ионами.

Электрокоагуляционное обесфторивание позволяет удалять фторид-ионы без применения химических реагентов, вместе с которыми в воду поступает значительное количество дополнительных солей, благодаря формированию высокоактивного гидроксида алюминия вследствие анодного растворения алюминиевых и дюралюминиевых электродов [22]. Для снижения энергозатрат варьируют токовую нагрузку и расстояние между электродами, а электролиз ведут при постоянном или переменном токе.

Положительными моментами применения электрокоагуляции при обесфторивании являются простота технологической схемы; отсутствие складских помещений, реагентов и аппаратуры для их приготовления (либо регенерации); довольно высокий эффект очистки. Основные недостатки данного метода – значительный расход электроэнергии и металлического алюминия, быстрая пассивация электродов.

В 2000-2010-е гг. широкое применение в различных отраслях промышленности нашли мембранные процессы: электродиализ, ультрафильтрация, нанофильтрация и обратный осмос⁶ [27].

⁶ Мулдер М. Введение в мембранную технологию. М.: Мир, 1999. 513 с. URL: <http://bookshare.net/index.php?id1=4&category=biol&author=mulder-m&book=1999>

Наночлнфнтрацнонне мембраны, которые характернзуются относнтельно невысокой задержнвающей способностью по отношению к одновалентным ионам, могут успешно применяться для очнстки воды от ионов фтора, эффективно сннжая их количество, но при этом не задержнвая полностью [23].

Для очнстки жесткой грунтовой воды с повышенным содержанием ионов железа(II), стронция, ннتراتнв, фторидов технология обратного осмоса наиболее выгодна по сравненню с другими, поскольку обеспечивает высокую эффективность очнстки от ионо- и молекулярно-растворенных примесей. Основными факторами, влияющими на процесс обезфторнвания воды методом обратного осмоса, являются ее химический состав (в частности, исходная концентрация F^-), расход, рН, давление, температура и др.⁷

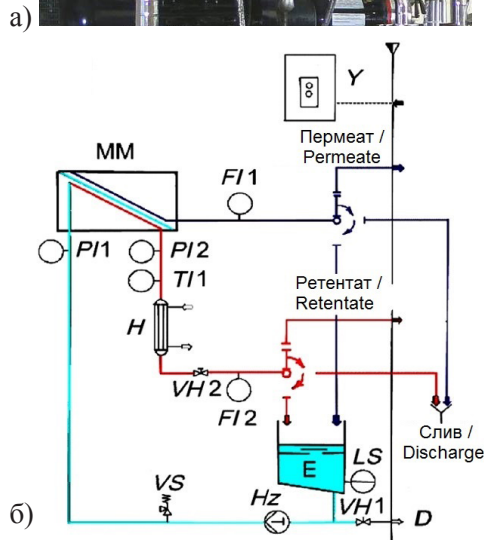
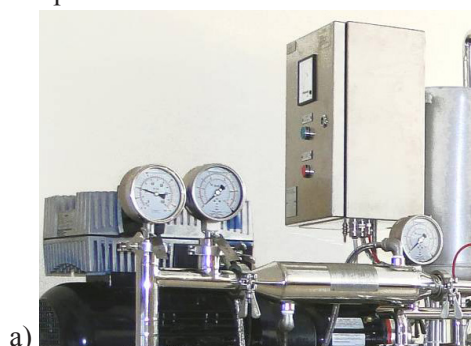
Некоторые исследователи [23; 27] отмечают следующие положительные моменты использования процесса обратного осмоса при водоподготовке: высокая эффективность удалення не только ионов фтора, но и различных неорганических и органических веществ, пестнцидов, микроорганизмов; одновременная очнстка и дезинфекция воды; отсутствие химических реагентов; работа в широком диапазоне рН; гарантированное постоянное качество воды; осуществленне процесса в простом и автоматнзированном операционном режиме с использованием компактной модульной системы при минимальных трудовых ресурсах; высокий ресурс мембран.

Таким образом, примененне обратного осмоса в качестве метода обезфторнвания воды является актуальным.

Материалы и методы

Отработка технологии мембранного обезфторнвания питьевой воды проводилась на пнлотной установке Alfa Laval PilotUnit 2.5" RO/NF (рис. 1)

с комплектом мембранных элементов спирального типа RO99-2517/48.



Р и с. 1. Общий вид (а) и принципиальная схема (б) лабораторной установки PilotUnit 2.5" RO/NF: D – поток в канализацию; E – резервуар; F1, F2 – ротаметры; G – подвод/отвод теплоносителя; H – теплообменник; Hz – насос циркуляционный; Y – подача электропитания; LS – датчик уровня; MM – мембранный модуль; PI1–2 – манометры; TI1 – термометр; VH1, VH2 – запорно-регулирующая арматура; VS – клапан предохранительный

Fig. 1. The general view (a) and schematic diagram (b) of the laboratory installation PilotUnit 2.5" RO/NF: D – flow in the sewer; E – tank; F1–2 – rotameters; G – supply/discharge of coolant; H – heat exchanger; Hz – circulation pump; Y – power supply; LS – sensor level; MM – membrane module; PI1–2 – pressure gauges; TI1 – thermometer; VH1–2 – shut-off and control valves; VS – safety valve

⁷ URL: <http://booksshare.net/index.php?id1=4&category=biol&author=mulder-m&book=1999>



Полимерные обратноосмотические (из эфиров целлюлозы) мембранные модули спирального типа с площадью фильтрации 1 м² по данным изготовителя обеспечивают производительность до 500 л/ч.

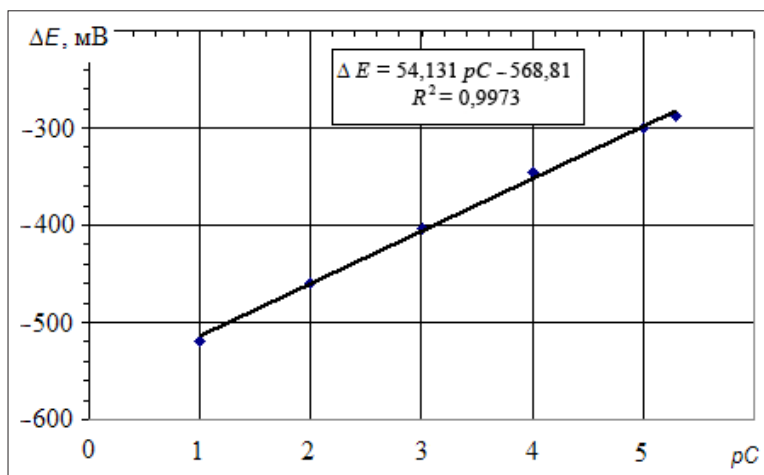
Получение обесфторенной воды на установке PilotUnit 2.5" производилась в следующей последовательности.

1. После монтажа мембранного элемента спирального типа RO99-2517/48 в мембранный модуль *ММ* в резервуар *Е* установки заливалось 14 л водопроводной воды, которая при комнатной температуре подвергалась циркуляции по замкнутому контуру в течение 2–3 мин. После этого с помощью дросселя *ВН2* устанавливался расход ретентата 13,4 л/мин (по ротаметру *FI2*). При этом давление ретентата составляло 40 бар (по манометру *PI2*), а расход пермеата – 0,42 л/мин (по ротаметру *FI1*). Циркуляция через мембрану под давлением продолжалась 20–25 мин. Каждые 5 мин проводилось измерение жесткости ретентата и фильтрата кондуктометром TDS-3. Затем насос отключался, отработанная вода сливалась в канализацию.

Согласно ГОСТ 4386-89⁸, содержание фторид-ионов в питьевой воде необходимо определять фотометрическим и потенциометрическим методами. Применение второго метода более предпочтительно, поскольку он позволяет достаточно точно определить концентрацию фторид-ионов в широком диапазоне. Кроме того, применение потенциометрического метода ограничивающих растворов позволяет значительно увеличить экспрессность и улучшить воспроизводимость и правильность анализа [28].

Потенциометрическое определение фторид-ионов проводили на pH-метре/милливольтметре Hanna HI 2211. В качестве индикаторного электрода использовали фторид-селективный электрод марки ЭЛИС 131 F, в качестве электрода сравнения – стандартный хлоридсеребряный электрод марки ЭВЛ-1МЗ. Градуировочные и буферные растворы изготавливали из реактивов марки х.ч. и ч.д.а., согласно ГОСТ 4386-89⁸.

Из рис. 2 видно, что определение фторид-ионов возможно до $5 \cdot 10^{-6}$ моль/л, или 0,095 мг/л.



Р и с. 2. Зависимость изменения потенциала фторид-селективного электрода от *pC* фторида натрия

Fig. 2. The dependence of change in the potential of fluoride-selective electrode on *pC* of sodium fluoride

⁸ ГОСТ 4386-89. Вода питьевая. Методы определения массовой концентрации фторидов. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-4386-89>

Потенциометрическое определение фторид-ионов в образцах воды проводили методом ограничивающих растворов. При этом сначала измеряли разность потенциалов электродов в растворе фторида натрия с концентрацией 10^{-5} моль/л – $pC = 5 (E_n)$, исследуемой воде – $lgC_x (E_x)$ и растворе фторида натрия с концентрацией 10^{-4} моль/л – $pC = 4 (E_o)$. В градуировочные растворы и исследуемую воду добавляли буферный раствор с $pH = 5,5$. Концентрацию фторид-ионов с учетом разбавления буферным раствором рассчитывали по формуле:

$lgC_x = (E_x - E_o) (pC_o - pC_n) / (E_n - E_o) - pC_o$,
затем полученную молярную концентрацию пересчитывали на мг/л F^- :

$$m = C_x \cdot 19 \cdot 1000,$$

где C_x – молярная концентрация фторид ионов, моль/л; 19 – молярная масса фторид ионов, г/моль; 1000 – пересчетный множитель.

Результаты исследования

Очистку водопроводной воды (поступающей из артезианского источника, расположенного в пос. Ялга Республики Мордовия) от ионов фтора проводили на установке, представленной на рис. 1.

Установлено, что при однократном пропускании воды через мембранный элемент RO99-2517/48 содержание фторид-ионов сократилось с $2,29 \pm 0,02$ мг/л до $0,240 \pm 0,015$ мг/л. После двукратной очистки – еще почти в 2 раза (табл. 1). Для подтверждения результатов эксперимента в пропущенную через мембрану воду вводили фторид натрия в интервале концентраций 5–20 мг/л. По мере возрастания содержания фторид-ионов в исследуемой воде наблюдалось некоторое увеличение концентрации F^- в фильтрате. После очистки воды, содержащей 20 мг/л ионов фтора, его концентрация не превышала 0,5 мг/л (таблица).

Таблица

Table

Результаты определения фторид-ионов в образцах воды ($n = 5; P = 0,95$)

The results of measuring fluoride ions in water samples ($n = 5; P = 0.95$)

№ п/п	Объект исследования / Object of study	Найдено F^- , мг/л / Found F^- , mg/l	S_r
1	2	3	4
1	Исходная вода из водопровода / Initial tap water	$2,290 \pm 0,020$	0,008
2	Полученный пермеат (вода после мембранной фильтрации) / The resulting permeate (water after membrane filtration)	$0,240 \pm 0,015$	0,050
3	Двукратный пропуск водопроводной воды через мембранный элемент / Double pass of tap water through a membrane element	$0,130 \pm 0,010$	0,070
4	Введение в пермеат 5 мг/л F^- / Introduction of 5 mg/l F^- to permeate	$5,210 \pm 0,110$	0,016
5	Пермеат с 5 мг/л F^- , после мембранной фильтрации / Permeate with 5 mg/l F^- , after membrane filtration	$0,180 \pm 0,012$	0,070
6	Введение в пермеат 10 мг/л F^- / Introduction of 10 mg/l F^- to permeate	$10,250 \pm 0,200$	0,016
7	Пермеат с 10 мг/л F^- , после мембранной фильтрации / Permeate with 10 mg/l F^- , after membrane filtration	$0,340 \pm 0,018$	0,040
8	Введение в пермеат 15 мг/л F^- / Introduction of 15 mg/l F^- to permeate	$15,300 \pm 0,180$	0,009



1	2	3	4
9	Пермеат с 15 мг/л F^- , после мембранной фильтрации / Permeate with 15 mg/l F^- , after membrane filtration	0,360 ± 0,019	0,040
10	Введение в пермеат 20 мг/л F^- / Introduction of 20 mg/l F^- to permeate	20,300 ± 0,260	0,010
11	Пермеат с 20 мг/л F^- , после мембранной фильтрации / Permeate with 20 mg/l F^- , after membrane filtration	0,470 ± 0,023	0,040

Обсуждение и заключения

Таким образом, использование установки Alfa Laval PilotUnit 2.5" RO/NF с комплектом мембранных элементов спирального типа RO99-2517/48 позволяет эффективно очищать водопроводную воду от ионов

фтора до уровня ниже ПДК. Данное исследование открывает перспективу применения обратного осмоса для получения высококачественной питьевой воды из артезианских источников с высоким содержанием фторид-ионов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Горяев Д. В., Тихонова И. В., Торотенкова Н. Н. Гигиеническая оценка качества питьевой воды и риски для здоровья населения Красноярского края // Анализ риска здоровью. 2016. № 3. С. 35–43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27557647>
2. Сатыго Е. А., Данилов Е. О. Оценка содержания фтора в воде для планирования эндогенной профилактики кариеса зубов // Стоматология детского возраста и профилактика. 2011. Т. 10, № 2. С. 64–66. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16753215>
3. Developmental fluoride neurotoxicity: a systematic review and meta-analysis / A. L. Choi [et al.] // Environmental Health Perspectives. 2012. Vol. 120, no. 10. P. 1362–1368. URL: <https://www.pubfacts.com/detail/22820538/Developmental-fluoride-neurotoxicity-a-systematic-review-and-meta-analysis>
4. High prevalence of dental fluorosis among adolescents is a growing concern: a school based cross-sectional study from Southern India / A. Verma [et al.] // Environmental Health and Preventive Medicine. 2017. Vol. 22, no. 1. DOI: 10.1186/s12199-017-0624-9
5. Fluoride exposure and indicators of thyroid functioning in the Canadian population: implications for community water fluoridation / A. M. Barberio [et al.] // Journal of Epidemiology and Community Health. 2017. Vol. 71, no. 10. P. 1019–1025. DOI: 10.1136/jech-2017-209129
6. Савченков М. Ф. Гигиеническая оценка воды с различным содержанием фтора // Сибирский медицинский журнал. 2008. Т. 77, № 2. С. 65–67. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21481665>
7. Фесенко М. Е., Комар В. Н., Стасюк А. И. Состояние нервно-психического развития детей, употребляющих питьевую воду с повышенным содержанием фтора // Здоровье ребенка. 2011. № 8. С. 58–60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/sostoyanie-nervno-psihicheskogo-razvitiya-detey-upotrebyayuschih-pitievuyu-vodu-s-povyshennym-soderzhaniem-ftora>
8. Экспериментальные исследования механизмов иммунной защиты в динамике фтористой интоксикации / Т. К. Ядыкина [и др.] // Медицинская иммунология. 2015. Т. 17, № 5. С. 81–89. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24499030>
9. Оценка воздействия фтора на детское население Иркутской области / Н. В. Ефимова [и др.] // Медицина труда и промышленная экология. 2009. № 1. С. 23–26. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12448685>
10. Патология щитовидной железы у детского населения при сочетанном воздействии дефицита йода и фтористого загрязнения окружающей среды / М. Ф. Савченков [и др.] // Гигиена и санитария. 2016. Т. 95, № 12. С. 1201–1205. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28089949>
11. Ayoob S., Gupta A. K. Fluoride in drinking water: a review on the status and stress effects // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2006. Vol. 36, no. 6. P. 433–487. DOI: 10.1080/10643380600678112

12. Хроническая фтористая интоксикация как фактор риска развития атеросклероза / О. Ю. Коротенько [и др.] // Гигиена и санитария. 2015. Т. 94, № 5. С. 91–94. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23936452>
13. Нарушения в системе гемостаза у рабочих с профессиональным флюорозом как фактор риска ишемической болезни сердца / С. Н. Филимонов [и др.] // Медицина труда и промышленная экология. 2005. № 4. С. 35–38. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17644429>
14. **Narsimha A., Sudarshan V.** Contamination of fluoride in groundwater and its effect on human health: a case study in hard rock aquifers of Siddipet, Telangana State, India // Applied Water Science. 2017. Vol. 7, no. 5. P. 2501–2512. DOI: 10.1007/s13201-016-0441-0
15. **Ullah R., Zafar M. S., Shahani N.** Potential fluoride toxicity from oral medicaments: a review. 2017. Vol. 20, no. 8. P. 841–848. DOI: 10.22038/IJBMS.2017.9104
16. **Dos Santos C. C., Santos E. L., Goncalves F.** Evaluation of contaminants in fluorosilicic acid used for public water fluoridation in the Santos region, Brazil // Water Science and Technology-Water Supply. 2017. Vol. 17, no. 4. P. 921–928. DOI: 10.2166/ws.2016.191
17. **Алексеев Л. С., Ивлева Г. А., Аль-Амри З.** Техничко-гигиенические аспекты фторирования питьевой воды // Вестник МГСУ. 2012. № 3. С. 154–158. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17965319>
18. Токсическое действие фторида натрия при экспериментальном флюорозе / Е. В. Уланова [и др.] // Acta Biomedica Scientifica. 2009. № 1. С. 275–277. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13010334>
19. **Прончева Л. Е., Чудновский С. М.** Новая технология регулирования содержания фтора в питьевой воде // Современные наукоемкие технологии. 2004. № 1. С. 64–65. URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=21564>
20. **Локшин Э. П., Беликов М. Л.** Очистка стоков от фтора (в порядке обсуждения) // Цветные металлы. 2010. № 11. С. 18–21. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15516189>
21. Fluoride in drinking water: the problem and its possible solutions / Y. Veressina [et al.] // Estonian Acad. Sci. Chem. 2001. Vol. 50, no. 2. P. 81–88. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.553.6538&rep=rep1&type=pdf>
22. Defluoridation of Sahara water by small plant electrocoagulation using bipolar aluminium electrodes / N. Mameri [et al.] // Separation and Purification Technology. 2001. Vol. 24, no. 1. P. 113–119. URL: <http://booksc.org/book/14194777/ff152d>
23. **Meenakshi A., Maheshwari R. C.** Fluoride in drinking water and its removal // Journal of Hazardous Materials. 2006. Vol. 137, no. 1. P. 456–463. URL: http://www.academia.edu/31292220/Fluoride_in_drinking_water_and_its_removal
24. **Пилат Б. В.** Способ глубокой очистки питьевых и сточных вод от фтора // Экологические системы и приборы. 2006. № 1. С. 50. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12937708>
25. **Ахмедова Г. Р., Ногаева К. А., Нуркеев С. С.** Способы и технологии обесфторивания воды // Наука, новые технологии и инновации. 2012. № 2. С. 110–113. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25402791>
26. **Тарасевич Ю. И.** Физико-химические основы и технологии применения природных и модифицированных сорбентов в процессах очистки воды // Химия и технология воды. 1998. Т. 20, № 1. С. 42–52.
27. Use of membrane technology for potable water production / A. Gupta [et al.] // Desalination. 2004. Vol. 170. P. 105–112. URL: <https://www.lenntech.com/abstracts/1327/use-of-membrane-technology-for-potable-water-production.html>
28. Ионметрическое определение молибдена (VI) в растворах травления / А. А. Шабарин [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82, № 4. С. 25–27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25941880>

Поступила 10.11.2017; принята к публикации 14.12.2017; опубликована онлайн 20.03.2018



Об авторах:

Шабарин Александр Александрович, доцент кафедры общей и неорганической химии, Институт физики и химии, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), кандидат химических наук, ResearcherID: W-1047-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6804-8471>, shab_aa@mail.ru

Водяков Владимир Николаевич, профессор кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, Россия, г. Саранск, пос. Ялга, ул. Российская, д. 7), доктор технических наук, ResearcherID: G-6800-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4687-1798>, vnvod@mail.ru

Котин Александр Владимирович, заведующий кафедрой механизации переработки сельскохозяйственной продукции, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, Россия, г. Саранск, пос. Ялга, ул. Российская, д. 7), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: W-1087-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8235-0052>, mpxxp@mail.ru

Кувшинова Ольга Александровна, доцент кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции, Институт механики и энергетики, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430904, Россия, г. Саранск, пос. Ялга, ул. Российская, д. 7), кандидат технических наук, ResearcherID: S-8884-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6457-5565>, olga-kuvshinova@rambler.ru

Матюшкина Юлия Ивановна, доцент кафедры общей и неорганической химии, Институт физики и химии, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68), кандидат химических наук, ResearcherID: W-1052-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9840-7244>, yrusyaeva@mail.ru

Вклад соавторов:

А. А. Шабарин: анализ литературных данных, разработка методик исследования; В. Н. Водяков: постановка задачи исследования и редактирование; А. В. Котин: научное руководство; О. А. Кувшинова: анализ литературных данных; Ю. И. Матюшкина: проведение экспериментальных работ.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Goryayev D. V., Tikhonova I. V., Korotenkova N. N. [Hygienic assessment of drinking water quality and risks to public health in Krasnoyarsk region]. *Analiz riska zdorovyu* = Health Risk Analysis. 2016; 3:35–43. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=27557647> (In Russ.)
2. Satygo E. A., Danilov E. O. The evaluation of fluorine in water for planning endogenous prevention of dental caries. *Stomatologiya detskogo vozrasta i profilaktika* = Dentistry of Childhood and Prevention. 2011; 10(2):64–66. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=16753215> (In Russ.)
3. Choi A. L., Sun G., Zhang Y., Grandjean Ph. Developmental fluoride neurotoxicity: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Health Perspectives*. 2012; 120(10):1362–1368. Available at: <http://www.pubfacts.com/detail/22820538/Developmental-fluoride-neurotoxicity-a-systematic-review-and-meta-analysis>
4. Verma A., Shetty B. K., Guddattu V., Chourasia M. K., Pundir P. High prevalence of dental fluorosis among adolescents is a growing concern: a school based cross-sectional study from Southern India. *Environmental Health and Preventive Medicine*. 2017; 22(1). DOI: 10.1186/s12199-017-0624-9
5. Barberio A. M., Hosein F. S., Quinonez C., McLaren L. Fluoride exposure and indicators of thyroid functioning in the Canadian population: Implications for community water fluoridation. *Journal of Epidemiology and Community Health*. 2017. 71(10):1019–1025. DOI: 10.1136/jech-2017-209129
6. Savchenkov M. F. The hygienic evaluation of water with various content of fluorine. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal* = Siberian Medical Journal. 2008; 77(2):65–67. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21481665> (In Russ.)

7. Fesenko M. E., Komar V. N., Stasyuk A. I. [The state of neuro-psyche development of children drinking water with a high content of fluorine]. *Zdorovye rebenka* = The Health of the Child. 2011; 8:58–60. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/v/sostoyanie-nervno-psihicheskogo-razvitiya-detey-upotrebyayuschih-pitievuyu-vodu-s-povyshennym-soderzhaniem-flora> (In Russ.)
8. Yadykina T. K., Mikhaylova N. N., Ulanova E. V., Alekhina D. A., Zhukova A. G. [Experimental studies of immune mechanisms in the dynamics of fluoride intoxication]. *Meditsinskaya immunologiya* = Medical Immunology. 2015; 17(5):81–89. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=24499030> (In Russ.)
9. Efimova N. V., Dorogova V. B., Zhouba O. M., Nikiforova V. A. Evaluating fluorine effects in children of Irkutsk area. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya* = Occupational Medicine and Industrial Ecology. 2009; 1:23–26. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=12448685> (In Russ.)
10. Savchenkov M. F., Efimova N. V., Manueva R. S., Nikolaeva L. A., Shin N. S. Thyroid gland pathology in children population exposed to the combination of iodine deficiency and fluoride pollution of environment. *Gigiyena i sanitariya* = Hygiene and Sanitation. 2016; 95(12):1201–1205. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=28089949> (In Russ.)
11. Ayoob S., Gupta A. K. Fluoride in drinking water: A review on the status and stress effects. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2006; 36(6):433–487. DOI: 10.1080/10643380600678112
12. Korotenko O. Yu., Panev N. I., Zakharenkov V. V., Filimonov S. N., Semenova E. A., Panev R. N. Chronic fluoride intoxication as a risk factor for the development of atherosclerosis. *Gigiyena i sanitariya* = Hygiene and Sanitation. 2015; 94(5):91–94. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23936452> (In Russ.)
13. Filimonov S. N., Lukianova M. V., Razumov V. V., Koryakin M. A., Gorbatsky Ya. A., Epifantseva N. N., Danilov I. P. Hemostasis disorders in patients with occupational fluorosis are risk factors for IHD. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya* = Occupational Medicine and Industrial Ecology. 2005; 4:35–38. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17644429> (In Russ.)
14. Narsimha A., Sudarshan V. Contamination of fluoride in groundwater and its effect on human health: A case study in hard rock aquifers of Siddipet, Telangana State, India. *Applied Water Science*. 2017; 7(5):2501–2512. DOI: 10.1007/s13201-016-0441-0
15. Ullah R., Zafar M. S., Shahani N. Potential fluoride toxicity from oral medicaments: a review. 2017; 20(8):841–848. DOI: 10.22038/IJBMS.2017.9104
16. Dos Santos C. C., Santos E. L., Goncalves F. Evaluation of contaminants in fluorosilicic acid used for public water fluoridation in the Santos region, Brazil. *Water Science and Technology-Water Supply*. 2017; 17(4):921–928. DOI: 10.2166/ws.2016.191
17. Alekseev L. S., Ivleva G. A., Al-Amri Z. Technical and hygienic aspects of potable water fluorination. *Vestnik MGSU* = MGSU Bulletin; 2012; 3:154–158. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17965319> (In Russ.)
18. Ulanova E. V., Fomenko D. V., Kizichenko N. V., Yadykina T. K., Maslennikova E. N. Toxic action of sodium fluoride in experimental fluorosis. *Acta Biomedica Scientifica*. 2009; 1:275–277. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=13010334> (In Russ.)
19. Proncheva L. E., Chudnovskiy S. M. [New technology of regulation of fluoride in drinking water]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii* = Modern High Technologies. 2004; 1:64–65. Available at: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=21564> (In Russ.)
20. Lokshin E. P., Belikov M. L. Waste-water cleaning with fluorine removal. *Tsvetnyye metally* = Non-Ferrous Metals. 2010; 11:18–21. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=15516189> (In Russ.)
21. Veressinina Y., Trapido M., Anelik V., Munter R. Fluoride in drinking water: The problem and its possible solutions. *Estonian Acad. Sci. Chem*. 2001; 50(2):81–88. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.553.6538&rep=rep1&type=pdf>
22. Mameri N., Lounici H., Belhocine D., Grib H., Piron D. L., Yahiat Y. Defluoridation of Sahara water by small plant electrocoagulation using bipolar aluminium electrodes. *Separation and Purification Technology*. 2001; 24(1):113–119. Available at: <http://booksc.org/book/14194777/ff152d>



23. Meenakshi A., Maheshwari R. C. Fluoride in drinking water and its removal. *Journal of Hazardous Materials*. 2006; 137(1):456–463. Available at: http://www.academia.edu/31292220/Fluoride_in_drinking_water_and_its_removal
24. Pilat B. V. [The Method of deep purification of drinking and waste water of fluorine]. *Ekologicheskiye sistemy i pribory* = Ecological Systems and Devices. 2006; 1:50. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=12937708> (In Russ.)
25. Akhmedova G. R., Nogaeva K. A., Nurkeev S. S. Methods and technologies of water defluorination. *Nauka, novyye tekhnologii i innovatsii* = Science, New Technologies and Innovations. 2012; 2:110–113. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25402791> (In Russ.)
26. Tarasevich Yu. I. [Physicochemical bases and technologies of using natural and modified sorbents in water purification processes]. *Khimiya i tekhnologiya vody* = Water Chemistry and Technology. 1998; 20(1):42–52. (In Russ.)
27. Gupta A., Arora M., Maheshwari R. C., Jain S. K. Use of membrane technology for potable water production. *Desalination*. 2004; 170:105–112. Available at: <http://www.lenntech.com/abstracts/1327/use-of-membrane-technology-for-potable-water-production.html>
28. Shabarin A. A., Matushkina Y. I., Lazareva A. P., Belyanushkin A. V. Ionometric determination of molybdenum (VI) in etching solutions. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* = Factory laboratory. Diagnostics of materials. 2016; 82(4):25–27. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25941880> (In Russ.)

Submitted 10.11.2017; revised 14.12.2017; published online 20.03.2018

About the authors:

Aleksander A. Shabarin, Associate Professor, General and Inorganic Chemistry Chair, Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Chemistry), ResearcherID: W-1047-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6804-8471>, shab_aa@mail.ru

Vladimir N. Vodyakov, Professor, Chair of Mechanization of Processing of Agricultural Products, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: G-6800-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4687-1798>, vnvod@mail.ru

Aleksander V. Kotin, Head of Chair of Mechanization of Processing of Agricultural Products, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: W-1087-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8235-0052>, mpexp@mail.ru

Olga A. Kuvshinova, Associate Professor, Chair of Mechanization of Processing of Agricultural Products, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: S-8884-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6457-5565>, olga-kuvshinova@rambler.ru

Yulia I. Matushkina, Associate Professor, General and Inorganic Chemistry Chair, Institute of Physics and Chemistry, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Chemistry), ResearcherID: W-1052-2017, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9840-7244>, yrusyaeva@mail.ru

Contribution of the co-authors:

A. A. Shabarin: the analysis of the literature data, development of methodologies; V. N. Vodyakov: statement of the research problem and editing; A. V. Kotin: scientific supervision; O. A. Kuvshinova: the analysis of literature data; Y. I. Matushkina: experimental work.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.