

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 628.162

АНДРЕЮК
Светлана Васильевна

ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ НИТРАТОВ
МЕТОДОМ ИОННОГО ОБМЕНА

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.23.04 – водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

Минск 2019

Работа выполнена в Учреждении образования «Брестский государственный технический университет»

Научный руководитель

Житенев Борис Николаевич,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» Учреждения образования «Брестский государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

Гуринович Анатолий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Экономика, организация строительства и управление недвижимостью» Белорусского национального технического университета;

Ющенко Виктор Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплогазоводоснабжение и вентиляция» Учреждения образования «Полоцкий государственный университет»

Оппонирующая организация

Государственное научное учреждение «Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 22 января 2020 г. в 16⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.10 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, e-mail tg_v_73@tut.by, тел. ученого секретаря 8(017)292-76-22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 16 декабря 2019 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.10
доктор технических наук, профессор



П. И. Дячек

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при общем обеспечении централизованным водоснабжением 83,7% потребителей Республики Беларусь водоснабжение многих сельских населенных пунктов (до 56% сельского населения), усадеб городской и пригородной зон (до 7% городского населения) основывается на использовании подземных вод, которые эксплуатируются шахтными колодцами, либо неглубокими индивидуальными скважинами. Имея, как правило, хорошие вкусовые качества, эти воды подвержены изменению химического и микробиологического состава под влиянием антропогенных факторов. Обзор литературных данных и результаты гидрохимических наблюдений указывают на высокую степень загрязненности подземных вод азотистыми соединениями: максимальные концентрации нитратов превышают допустимые по гигиеническим требованиям к источникам нецентрализованного питьевого водоснабжения в 5 и более раз и отмечены в 41% всех проб источников нецентрализованного водоснабжения в Брестской области, при среднереспубликанском уровне 24,5%. Столь высокие уровни загрязнения воды шахтных колодцев и скважин нитратами заслуживают самого серьезного внимания, так как отрицательное влияние нитратов, содержащихся в воде, проявляется в заболевании метгемоглобинемией (в особенности у детей грудного и младшего возраста). Длительное употребление воды с повышенным содержанием азотистых соединений вызывает болезни обмена веществ и нервной системы.

Современные масштабы нитратного загрязнения источников централизованных и нецентрализованных систем питьевого водоснабжения требуют конкретных предложений в практике проектирования, строительства и эксплуатации водозаборных скважин и шахтных колодцев с целью обеспечения населения питьевой водой, свидетельствуют об актуальности и целесообразности создания высокоэффективных технологий очистки воды от нитратов.

В настоящее время в Республике Беларусь не существует реализованной универсальной технологии очистки подземных вод от минеральных азотистых соединений. Имеющиеся на теоретическом уровне методы удаления из воды нитратов в силу недостатков эксплуатационного характера не находят применения. Для решения существующей проблемы выполнены комплексные теоретические и экспериментальные исследования процессов очистки подземных вод от нитратов с целью разработки высокоэффективной технологии и устройств, позволяющих вовлечь в водопользование дополнительные источники водоснабжения на территории Республики Беларусь, сократить заболеваемость населения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами. Диссертационная работа включена в утвержденные научные планы Учреждения образования «Брестский государственный технический университет» на 2016-2018 гг. Диссертация выполнялась в рамках государственной темы, зарегистрированной БелИСА 18.07.2014, «Разработка перспективных технологий и сооружений для очистки природных и сточных вод»: раздел 2.2 «Разработка высокоэффективной технологии удаления нитратов из воды для питьевого водоснабжения» (№ГР 20141703, сроки выполнения 2014–2019 гг.).

Работа соответствует приоритетным направлениям государственной программы «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2016–2020 годы (подпрограмма 5 «Чистая вода»), утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 326 от 21.04.2016.

Работа выполнялась в рамках научно-исследовательской работы: «Исследовать процессы и разработать технологию очистки подземных вод от азотистых соединений в целях водоснабжения сельского населения Республики Беларусь», № 00/211, Брест, 2000.

Цель и задачи исследований. Цель выполненной диссертационной работы – разработать технологию очистки подземных вод от нитратов, обеспечивающую получение воды питьевого качества, с использованием метода ионного обмена.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

– изучить химические свойства соединений азота и механизм их миграции через почвы в водоносный горизонт; выполнить аналитический обзор методов очистки воды от азотистых соединений с установлением области применения и основных закономерностей процесса удаления нитратов из подземных вод методом ионного обмена в системах питьевого водоснабжения;

– получить экспериментально-статистические зависимости процесса очистки подземных вод от нитратов методом ионного обмена, описывающие влияние на эффект удаления нитратов скорости фильтрации, температуры обрабатываемой воды, величины отношения высоты загрузки фильтрационной колонки к ее диаметру, с учетом анионного состава воды;

– разработать математическую модель динамики ионного обмена в процессе очистки воды от нитратов с определением кинетической константы; выполнить оптимизацию режима регенерации ионообменных материалов;

– разработать эффективную технологию очистки подземных вод от нитратов методом ионного обмена, методику расчета ионообменного фильтра проектируемых водоочистных систем и устройств, позволяющие

обеспечить удаление из воды нитратов до значений ниже предельно допустимой концентрации.

Объект исследования – подземные воды Республики Беларусь.

Предмет исследования – технологические процессы очистки воды от нитратов методом ионного обмена.

Научная новизна заключается в установлении зависимостей влияния скорости фильтрации, температуры обрабатываемой воды, величины отношения высоты загрузки фильтрационной колонки к ее диаметру на процесс очистки воды от нитратов методом ионного обмена с определением оптимальных значений указанных факторов, при которых обеспечивается максимальный эффект очистки; в разработке математической модели динамики ионного обмена для очистки воды от нитратов в различных технологических условиях ведения процесса, для наиболее эффективных ионообменных смол, с определением кинетической константы выходной кривой ионного обмена; в оптимизации технологического режима регенерации ионообменных материалов; в разработке технологии очистки воды от нитратов методом ионного обмена, методики расчета ионообменного фильтра проектируемых водоочистных систем и устройств.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные положения диссертационной работы:

1. Экспериментально-статистические зависимости процесса очистки подземных вод от нитратов методом ионного обмена, описывающие влияние на эффект удаления нитратов скорости фильтрации, температуры обрабатываемой воды, величины отношения высоты загрузки фильтрационной колонки к ее диаметру, позволяющие определить оптимальные значения указанных факторов с учетом анионного состава воды.

2. Математическая модель динамики ионного обмена для очистки воды от нитратов на сильноосновных анионитах с определением кинетической константы выходной кривой, позволяющая выполнить расчет ресурса ионообменного фильтра. Оптимизация режима регенерации ионообменных материалов, определяющая концентрации, скорость фильтрации регенерирующих растворов и сравнительную эффективность их применения с учетом продолжительности регенерации.

3. Технология очистки подземных вод от нитратов методом ионного обмена, методика расчета ионообменного фильтра проектируемых водоочистных систем и устройств, позволяющие обеспечить удаление из воды нитратов до значений ниже предельно допустимой концентрации для нецентрализованных (локальных), индивидуальных систем питьевого водоснабжения.

Личный вклад соискателя ученой степени. Совместно с руководителем диссертационной работы, канд. техн. наук, доцентом Житеневым Б. Н. обоснованы научно-практические направления, поставлены цели, определены задачи и методы проведения исследований, выполнено планирование экспериментов, а также написание печатных работ. Сов-

местно с канд. техн. наук, доцентом Лысенковой Т. М., канд. техн. наук, доцентом Яромским В. Н. выполнено написание печатных работ, посвященных теоретическому анализу методов очистки воды от нитратов, определению обменной емкости ионитов по отношению к нитрат-ионам. В публикациях с соавторами вклад автора определяется рамками результатов, излагаемых в диссертации. При этом лично соискателем выполнен обзор научно-технической литературы; разработаны технология и экспериментальные установки; выполнены обобщение и анализ результатов экспериментов, моделирование процессов очистки воды от нитратов на ЭВМ; обоснованы технологические схемы, параметры оборудования; разработана методика расчета.

Апробация результатов диссертации. Результаты проведенных исследований были доложены: на Международной научно-практической конференции по проблемам водохозяйственного, промышленного и гражданского строительства и экономико-социальных преобразований в условиях рыночных отношений «Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды», Брест, 1998; Международной 53-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА, Минск, 1999; Международной 54-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА, Минск, 2000; Международных научно-технической и научно-практической конференциях, Брест, 2010, 2016; научном семинаре «Проблемы энергетической эффективности в различных отраслях», Брест, 2016; Международной научно-практической конференции молодых ученых «Современные тенденции развития науки», Ровно, 2016; V Международной научной экологической конференции, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ, Краснодар, 2017; Международном научном семинаре «Перспективные технологии очистки природных вод для питьевого и технического водоснабжения», Брест, 2017.

Опубликование результатов диссертации. По материалам диссертации опубликованы 22 печатные работы, в том числе 7 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, общим объемом 3,1 авторских листа; 8 статей в сборниках трудов и материалах конференций; 1 патент на полезную модель; других публикаций – 6.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка источников и приложений. Полный объем диссертации 152 страницы. Работа содержит 125 страниц машинописного текста, 25 таблиц на 14 страницах, 39 рисунков на 15 страницах, список использованных источников на 11 страницах в количестве 123 наименования, включая 22 авторские работы, и 5 приложений на 16 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе диссертационной работы выполнен аналитический обзор методов и проанализированы общие принципы построения технологических схем очистки воды от азотистых соединений. В настоящее время существующие физико-химические и биологические методы удаления из воды нитратов, в силу недостатков технологического и эксплуатационного характера, не всегда могут быть применены. Теоретический анализ возможных методов удаления азотистых соединений из подземных вод показал, что в индивидуальных, нецентрализованных системах питьевого водоснабжения при производительности до 150 м³/ч для очистки подземных вод от нитратов в концентрациях 2–3 предельно допустимые (ПДК) предпочтительнее использовать метод ионного обмена при условии его оптимизации и применения устройств доочистки и обеззараживания как заключительной стадии водоподготовки.

Во второй главе приведено описание объектов исследования, характеристика используемых при проведении исследования методов, оборудования. Дан обзор современного состояния экологической проблемы загрязнения подземных вод нитратами по ряду стран: Республика Беларусь, Российская Федерация, США, Великобритания, Дания, Нидерланды, Венгрия, Франция, Германия. Исследованы причины и механизм миграции соединений азота в водоносный горизонт. Показано, что эти вещества попадают в систему подземных вод из различных источников – естественных или антропогенных. Главными естественными источниками являются почвенный азот, богатые азотом биологические отложения и атмосферные осадки. Основными источниками антропогенной деятельности, активно влияющими на состав подземных вод, являются азотные удобрения, дренажные воды септических бассейнов, животноводческие фермы, места сброса хозяйственных и промышленных сточных вод. Анализ геохимии минеральных азотистых соединений показал, что подземные воды многих регионов, в том числе Республики Беларусь, содержат нитраты в концентрациях 2–3 ПДК (100–150 мг/дм³), препятствующих их использованию для питьевого водоснабжения. Особую остроту проблема приобретает в сельской местности, где для водоснабжения используются шахтные колодцы.

С учетом изучения химических свойств минеральных азотистых соединений и теоретического анализа возможных методов их удаления из подземных вод целью выполненных экспериментальных исследований стало совершенствование и оптимизация процессов ионообменной очистки подземных вод и процессов регенерации ионообменных материалов, а также разработка технологии очистки подземной воды от нитратов методом ионного обмена с последующим использованием сорбции на активированных углях как заключительной стадии доочистки питьевой воды.

В третьей главе представлены результаты исследований по совершенствованию процесса удаления нитратов из подземных вод методом ионного обмена: определена обменная емкость по нитратам различных ионообменных смол (таблица 1); выполнены исследование и оптимизация технологического режима процесса очистки воды от нитратов для наиболее эффективных ионообменных смол; исследовано изменение анионного состава подземных вод и его влияние на процесс удаления нитратов; разработана математическая модель динамики ионного обмена для очистки воды от нитратов на сильноосновных анионитах; выполнены исследование и оптимизация технологического режима регенерации ионообменных

смол, участвующих в процессе очистки воды.

Таблица 1. – Результаты экспериментальных исследований по определению обменной ёмкости ионитов

Марка ионита	Обменная ёмкость ионитов по отношению к нитрат-ионам, мг-экв/дм ³		
	Динамическая		Полная статическая
	рабочая	полная	
«Purolite NRW-600(OH)»	550	1050	1500
«AB-17-8чС»	440	840	1200
«Lewatit MonoPlus®SR7»	450	910	1344

Примечание – Рабочая емкость ионита соответствует проскоку нитрат-ионов в фильтрат в концентрации ПДК

Таблица 2. – Оптимальные параметры работы ионообменной колонки при использовании различных анионитов

Марка ионита	Скорость, V, м/ч	Величина отношения H/d	Температура, t, °С
«Purolite NRW-600(OH)»	14	5,6	19
«AB-17-8чС»	12,4	4,4	18
«Lewatit MonoPlus®SR7»	13	4,8	17,7

Исследование наиболее эффективных анионитов проводилось с применением математического планирования экспериментов, целью которого являлось изучение влияния на эффективность процесса очистки воды от нитратов основных факторов работы ионообменной колонки с определением их оптимальных значений (таблица 2):

– скорости фильтрации воды V, м/ч;

– величины отношения высоты загрузки фильтрационной колонки к ее диаметру H/d ;

– температуры обрабатываемой воды t, °С.

По результатам эксперимента получены уравнения регрессии $\mathcal{E}=f(V, H/d, t)$ в виде многочленов второй степени от трех переменных, дающие возможность прогнозировать

эффективность работы установки в любом заданном режиме ведения процесса ионообменной очистки. Проверка воспроизводимости опытов осуществлялась с помощью критерия Кохрена ($G_{расч}=0,530$; $G_{табл}=0,616$). Значимость коэффициентов регрессии определялась с учетом значения критерия Стьюдента ($t=2,57$ для доверительной вероятности $P=0,95$ и 5 степеней свободы). Адекватность зависимостей подтверждена по критерию Фишера

при 5%-м уровне значимости ($F_{\text{расч}}=3,80$, $F_{\text{табл}}=5,05$).

Полученные экспериментально-статистические зависимости процесса ионообменной очистки позволяют представить поверхность отклика на факторной плоскости линиями зависимости эффекта очистки от указанных факторов (рисунки 1–4).

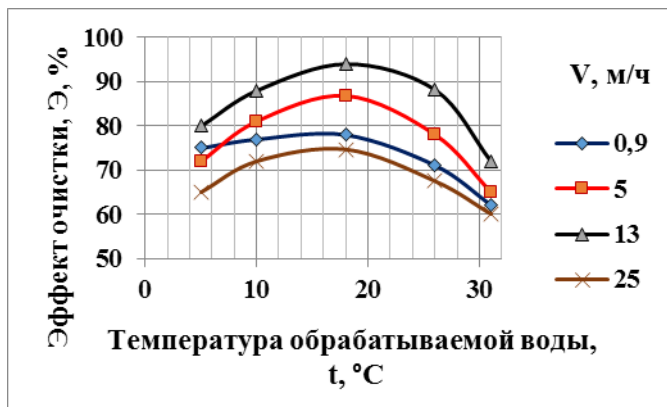


Рисунок 1. – Зависимость эффекта удаления нитратов от температуры

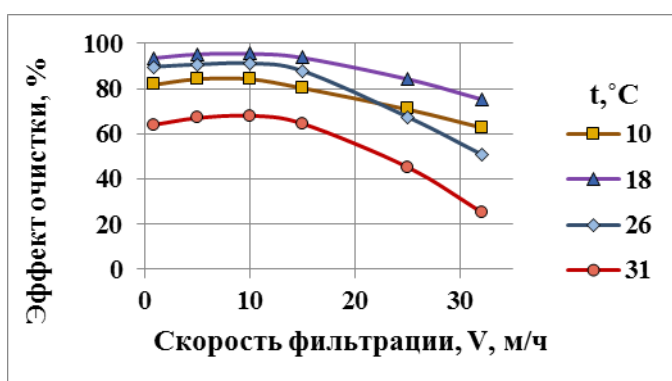


Рисунок 2. – Зависимость эффекта удаления нитратов от скорости фильтрации

вале $V=10\text{--}32$ м/ч и фиксированных значениях фактора H/d наблюдается соответственно уменьшение эффекта очистки $\mathcal{E}=f(V)$ на 20–30% (рисунок 2). При фиксированном параметре температуры t , °C, снижение эффекта ($\mathcal{E}=f(V)<50\%$) наблюдается также при увеличении скорости V , м/ч, когда фактор H/d имеет значение меньше единицы (рисунок 3). Этот факт можно объяснить недостаточной высотой неподвижного слоя ионита по сравнению со скоростью фильтрации раствора, когда обмен протекает в неравновесных условиях – степень использования ионита снижается, падает эффект очистки.

Наименьшее влияние на эффект удаления нитратов из исследованных факторов оказывает температура воды (рисунок 1). С изменением температуры t , °C, при фиксированных значениях фактора H/d с увеличением скорости фильтрации V , м/ч, наблюдается изменение эффекта очистки $\mathcal{E}=f(t)$, %, не более чем на 15%, что является положительным моментом, поскольку в процессе работы ионообменной колонки подаваемая потребителю вода может иметь температуру источника водоснабжения.

Установлено более сильное влияние на эффект очистки значений скорости фильтрации обрабатываемой воды V , м/ч, и фактора H/d (рисунки 2–4). При изменении скорости V , м/ч, в интер-

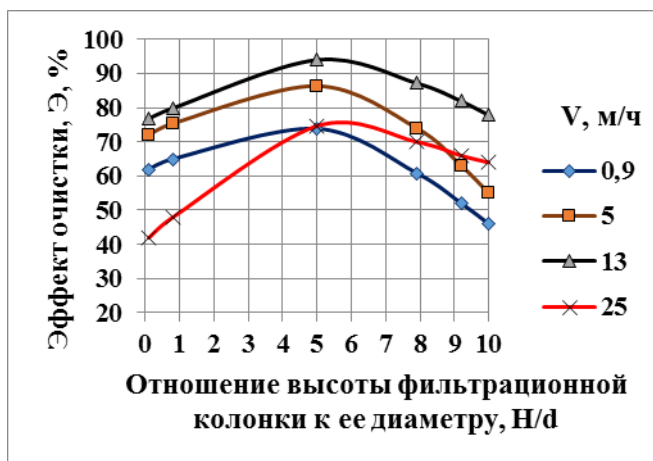


Рисунок 3. – Зависимость эффекта удаления нитратов от фактора H/d при фиксированном значении температуры

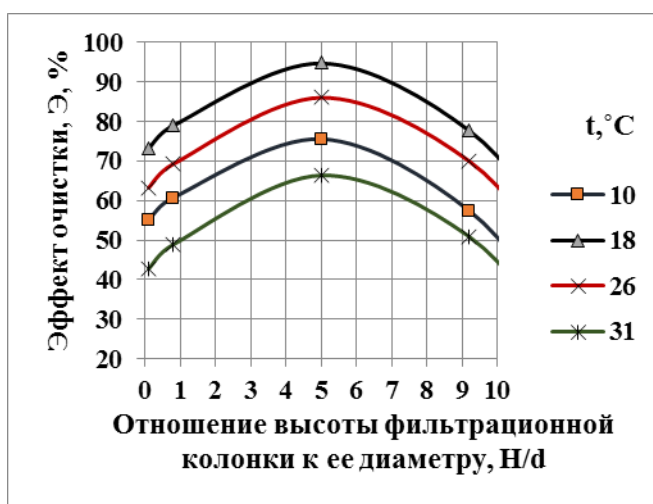


Рисунок 4. – Зависимость эффекта удаления нитратов от фактора H/d при фиксированном значении скорости

ды от нитратов с учетом варьирования факторов работы ионообменной колонки по уравнениям линейной регрессии (95% -й значимости):

– для фактора температуры обрабатываемой воды t , °C, в интервале $t = 5-18^{\circ}\text{C}$,

$$\mathcal{E} = 1,03 \cdot t + 78,46, \% \quad (1)$$

– для фактора скорости фильтрации V , м/ч, в интервале $V = 10-32$ м/ч,

$$\mathcal{E} = -0,69 \cdot V + 99,28, \% \quad (2)$$

– для фактора H/d , в интервале $H/d = 0,1-5$,

$$\mathcal{E} = 3,71 \cdot (H/d) + 77,77, \% \quad (3)$$

В результате увеличения значения фактора H/d степень использования ионита повышается (рисунки 3,4) и увеличивается эффект удаления нитратов: в интервале значений $H/d=0,1-5$ наблюдается изменение эффекта $\mathcal{E}=f(H/d)$ до 19%. При этом дальнейшее увеличение фактора H/d в интервале $H/d=5,5-12$ приводит к снижению $\mathcal{E}=f(H/d)$ до 30%, что определяется сопротивлением слоя, склонностью узких колонок к пристенным эффектам и каналообразованию.

Для эффективного использования ионита и получения высокого эффекта очистки параметр скорости V поддается варьированию в процессе эксплуатации ионообменной колонки, а значение фактора H/d может быть задано изначально.

В области оптимальных значений частные решения полученных экспериментально-статистических зависимостей позволяют оценить изменение эффекта очистки во-

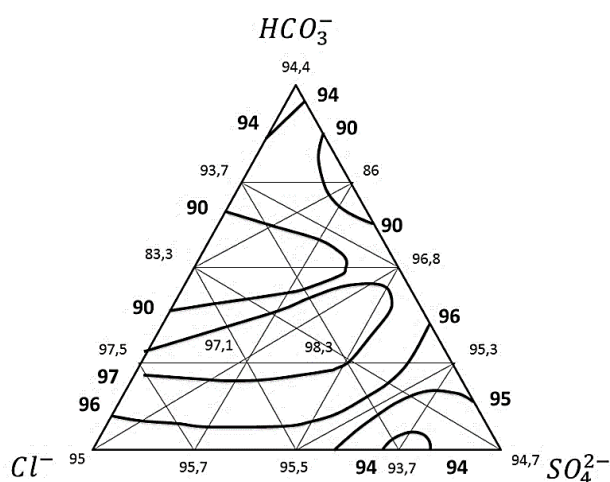


Рисунок 5. – Треугольная диаграмма эффекта удаления нитратов из водных растворов различного анионного состава при исходной концентрации нитратов 100 мг/дм³

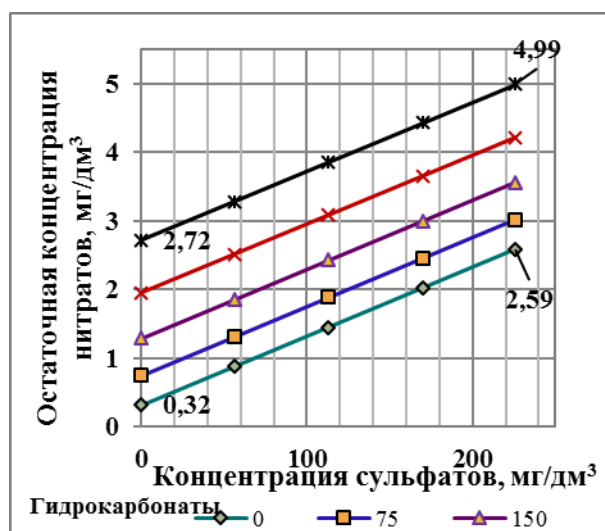


Рисунок 6. – Влияние концентрации сульфатов на процесс удаления нитратов из водных растворов различного анионного состава

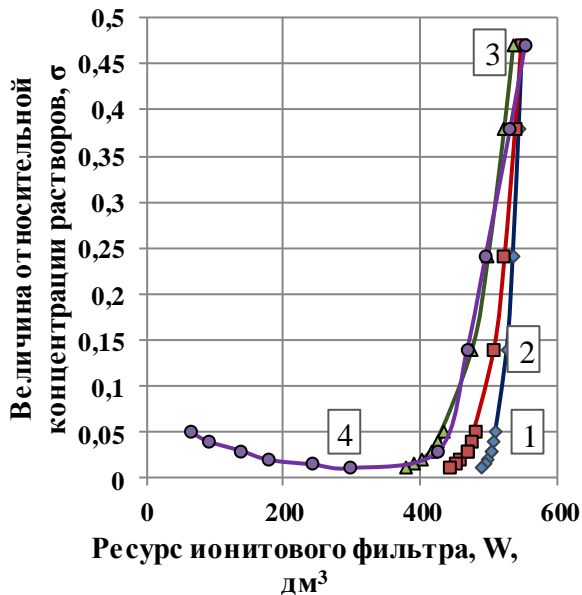
Установлено, что анионный состав подземных вод оказывает влияние на эффективность процесса удаления нитратов методом ионного обмена. Минеральный состав исходных растворов был ограничен содержанием анионов Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} и NO_3^- в концентрациях (мг/дм³): хлоридов – до 174, гидрокарбонатов – до 300, сульфатов – до 226, нитратов – до 100 (общая минерализация – до 10 мг-экв/дм³), – что характерно для исследуемых подземных вод региона. По результатам экспериментальных данных построены треугольные диаграммы в виде изолиний, ограничивающих области с одинаковыми значениями эффекта удаления нитратов, позволяющие прогнозировать эффективность процесса очистки воды от нитратов методом ионного обмена для воды с различным анионным составом (рисунок 5). Наибольшую конкуренцию нитрат-ионам в ионообменном процессе составляют сульфат-ионы (рисунок 6). При этом ионы подземных вод исследуемого региона, поглощаемые сильноосновным анионитом, располагаются в порядке сродства следующим образом:
 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$.

В целом, изменение анионного состава воды в процессе удаления нитратов ионным обменом не ухудшает её природных свойств и соответствует качеству и физиологической полноценности питьевой воды.

Анализ асимптотических решений, предложенных для описания динамики ионного обмена (рисунок 7), показал, что полученным экспериментальным данным соответствует математическая модель в форме уравнения:

$$W = \frac{a_0}{C_0} \cdot m + \frac{V}{k \cdot C_0} \cdot \ln \frac{\sigma}{1 - \sigma}, \text{ м}^3, \quad (4)$$

где W – объем очищенной воды, м^3 ; m – объем анионита, м^3 ; V – скорость фильтрации, м/с ; σ – относительная концентрация нитратов в воде, $\sigma = C/C_0$ (C – ПДК, мг-экв/дм^3 ; C_0 – концентрация нитратов, мг-экв/дм^3 , в исходной воде), k – кинетическая константа, $(\text{дм}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})/\text{мг-экв}$, выходной кривой ионного обмена; a_0 – полная обменная емкость анионита по нитратам, мг-экв/дм^3 .



- 1 – при $kC_0=0,0189, \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;
 2 – при $kC_0=0,0106, \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; 3 – при $a_0m/C_0=0,54, \text{ м}^3, kC_0=0,007, \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;
 4 – эксперимент

Рисунок 7. – Расчетные («1», «2», «3») и экспериментальная («4») кривые ионообменной очистки воды от нитратов

Значение емкости анионита по нитратам рассчитали в соответствии с рядом селективности для сильноосновных анионитов и влиянием анионного состава обрабатываемой воды на процесс ионного обмена. По результатам эксперимента найдено значение кинетической константы:

$$k = 4,3 \cdot 10^{-3} (\text{дм}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})/\text{мг-экв}.$$

Тогда уравнение выходной кривой, описывающей процесс удаления нитратов из подземных вод методом ионного обмена на анионите марки «Purolite NRW-600(OH)», будет иметь вид

$$W = 0,54 + 0,04 \cdot \ln \frac{\sigma}{1 - \sigma}, \text{ м}^3. \quad (5)$$

Полученные результаты эксперимента (при найденной кинетической константе) дают возможность по данным анализа исходной воды и характеристике анионита рассчитать ресурс ионообменного фильтра при заданном объеме ионообменной смолы (уравнения 4, 5) или рассчитать её объем (уравнение б), который может обеспечить заранее заданный ресурс фильтра:

$$m = \frac{C_0}{a_0} \cdot \left(W - \frac{V}{k \cdot C_0} \cdot \ln \frac{\sigma}{1 - \sigma} \right), \text{ м}^3. \quad (6)$$

В четвертой главе представлены результаты исследований по оптимизации процессов регенерации ионообменных смол, участвующих в процессе удаления нитратов из подземных вод методом ионного обмена. Изучено влияние на процесс регенерации основных факторов, определяющих условия работы ионообменной колонки (рисунок 8):

оптимальная концентрация щелочного раствора для регенерации анионита $c = 4\%$ – для гидроксида натрия, $c = 6\%$ – для карбоната натрия; наиболее благоприятными значениями скорости w пропускания регенерирующего раствора являются скорости фильтрации в диапазоне $w = 2–4$ м/ч; время

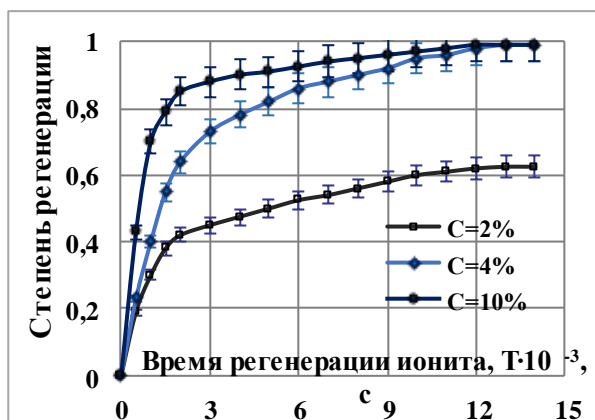


Рисунок 8. – Кривые зависимости степени регенерации от концентрации регенерирующего раствора NaOH при скорости $w=2$ м/ч и значении фактора $H/d=5$

90%-й регенерации зависит линейно от величины отношения высоты загрузки фильтрационной колонки к ее диаметру: значения в интервале $H/d=4,4–5,6$ являются оптимальными. В индивидуальной системе питьевого водоснабжения для регенерации анионита, участвующего в процессе удаления нитратов, целесообразно использование карбоната натрия, проявляющего более слабые щелочные свойства.

Пятая глава диссертационной работы посвящена разработке технологии очистки воды от нитратов в индивидуальных, нецентрализованных системах питьевого водоснабжения, в частности для пресных подземных вод Беларуси.

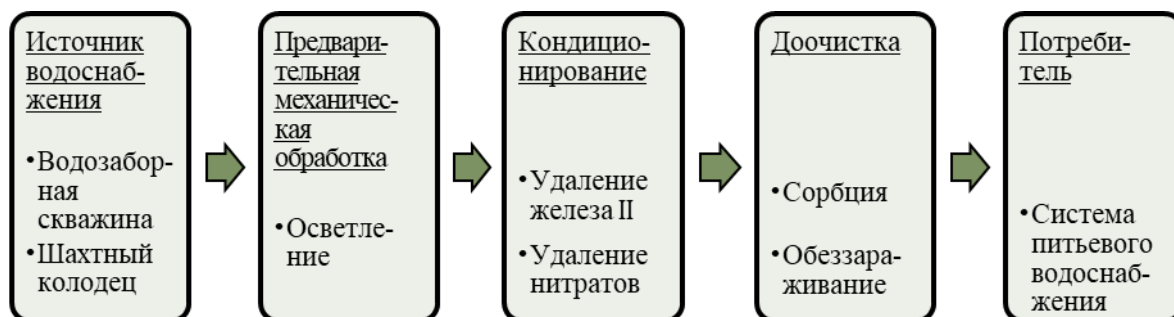


Рисунок 9. – Блок-схема водоподготовки для удаления нитратов

С учетом показателей качества исходной воды, в процесс очистки от соединений азота следует включать (рисунок 9): осветление (предварительная механическая обработка для исключения попадания мелких частиц в устройства последующей водоподготовки); кондиционирование (основная стадия: удаление нитратов; обезжелезивание – при необходимости); сорбцию (заключительная стадия обработки воды) и обеззараживание при необходимости. По результатам теоретических и экспериментальных исследований разработаны технология и устройства очистки подземных вод от нитратов методом ионного обмена. На рисунках 10, 11 представлены варианты технологической схемы для индивидуальной системы питьевого водоснабжения и конструкция водозаборного шахтного колодца с очисткой подземных вод, содержащих нитраты в концентрациях выше ПДК.

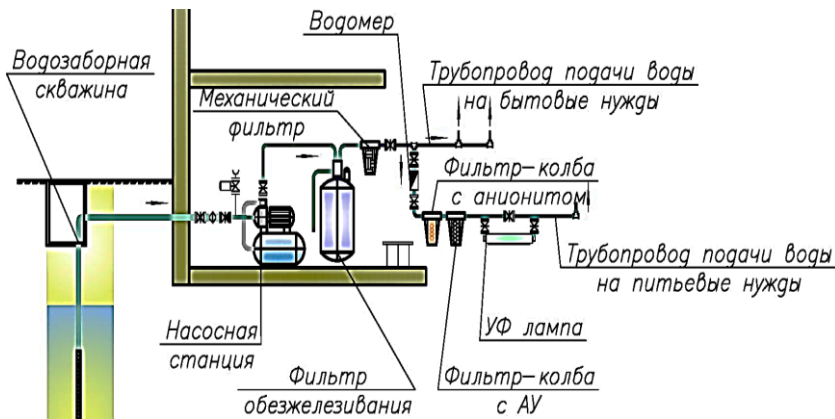


Рисунок 10. – Технологическая схема очистки подземных вод, содержащих нитраты и соединения железа (II) в концентрациях выше ПДК, для индивидуальной системы питьевого водоснабжения

данным анализа исходной воды и характеристике анионита рассчитать ресурс ионообменного фильтра или объем ионообменной смолы.

В технико-экономических расчетах диссертационной работы определена экономическая эффективность технологии очистки воды от нитратов в индивидуальных системах питьевого водоснабжения. Рассмотрены варианты технологии очистки подземных вод, содержащих нитраты и соединения железа (II) в концентрациях, превышающих ПДК, для хозяйственных и питьевых нужд в системе индивидуального водоснабжения и вариант закупки бутилированной питьевой воды. Выполнено сравнение годовых эксплуатационных затрат (общих и по статьям расходов) с определением себестоимости очистки 1 м³ подземных вод. Внедрение технологии очистки подземных вод от нитратов методом ионного обмена позволит вовлечь в использование дополнительные водные источники, уменьшить отрицательную нагрузку на здоровье населения, снизить затраты потребителя (при использовании метода водоподготовки как альтернативы покупке питьевой бутилированной воды).

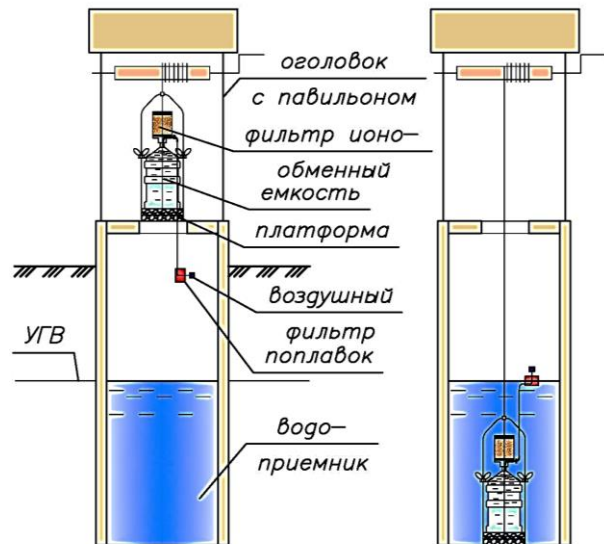


Рисунок 11. – Водозаборный шахтный колодец с очисткой воды от нитратов (патент на полезн. модель ВУ 11081)

Разработаны технические рекомендации по проектированию и расчету сооружений очистки воды от нитратов методом ионного обмена для питьевых целей (утвержденные УП «Институт «Брестстройпроект» 23.02.2018), в том числе методика расчета ионообменного фильтра для очистки воды от нитратов, позволяющая по

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Изучены химические свойства и механизм миграции соединений азота, присутствующих в подземных водах Республики Беларусь, через почвы в водоносный горизонт; выполнен аналитический обзор методов очистки воды от азотистых соединений с установлением области применения и основных закономерностей процессов извлечения нитратов из водных растворов. Установлено, что в индивидуальных, нецентрализованных системах питьевого водоснабжения при производительности до 150 м³/ч для удаления из подземных вод нитратов в концентрациях 2–3 ПДК предпочтительнее использовать метод ионного обмена при условии его оптимизации и применения последующей сорбции на активированных углях как заключительной стадии водоподготовки [1, 8, 15, 17, 19, 21].

2. Полученные экспериментально-статистические зависимости процесса очистки подземных вод от нитратов методом ионного обмена, описывающие влияние на эффект удаления нитратов скорости фильтрации, температуры обрабатываемой воды, величины отношения высоты загрузки фильтрационной колонки к ее диаметру, позволили определить оптимальные значения указанных факторов $V=13$ м/ч, $t=18$ °С, $H/d = 5$, которые обеспечивают максимальный эффект очистки с учетом анионного состава воды [2, 9, 10, 20]. На основании полученных экспериментальных данных построены треугольные диаграммы, позволяющие прогнозировать эффект очистки воды от нитратов методом ионного обмена для воды с различным анионным составом. Установлено, что наибольшее влияние на процесс ионообменной очистки подземных вод от нитратов оказывает концентрация сульфат-ионов в воде [13, 18].

3. Экспериментально получена математическая модель динамики ионного обмена (уравнение 5), позволяющая выполнить расчет ресурса ионообменного фильтра, участвующего в процессе очистки воды от нитратов, найдено значение кинетической константы ионного обмена $k = 4,3 \cdot 10^{-3}$, (дм³·м⁻²·с⁻¹)/мг-экв, и рассчитаны параметры уравнения выходной кривой для эффективных ионообменных смол при очистке воды от нитратов [6, 14]. Экспериментально установлены факторы, оказывающие наиболее сильное влияние на процесс регенерации ионообменных смол, участвующих в процессе очистки подземных вод от нитратов методом ионного обмена: выявлены оптимальные значения концентрации c , %, скорости фильтрации w , м/ч, регенерирующих растворов, значение фактора H/d при регенерации; приведена сравнительная характеристика щелочных растворов по степени регенерации анионита; в индивидуальной системе питьевого водоснабжения для регенерации анионита целесообразно использование реагента карбоната натрия с учетом полученных оптимальных значений: $c = 6$ %; $w = 2-4$ м/ч; $H/d = 4,4-5,6$ [3, 12].

4. На основании проведенных теоретических исследований, лабораторных и полупроизводственных испытаний разработана эффективная технология очистки подземных вод от нитратов методом ионного обмена, состоящая из механического фильтра, ионообменного фильтра с сильноосновным анионитом, сорбционного фильтра с активированным углем, УФ-лампы обеззараживания, обеспечивающая удаление из воды нитратов до значений ниже предельно допустимой концентрации для нецентрализованных (локальных), индивидуальных систем питьевого водоснабжения. Разработана методика расчета ионообменного фильтра для очистки подземных вод от нитратов, отличающаяся тем, что позволяет по данным анализа исходной воды (значение концентраций нитратов и сульфатов) и характеристике анионита (обменная емкость по нитрат-иону) рассчитать ресурс ионообменного фильтра при заданном объеме ионообменной смолы или рассчитать её объем, который может обеспечить заранее заданный ресурс фильтра [4, 5, 6, 7, 11, 16, 22].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Полученные экспериментальные зависимости эффекта удаления нитратов методом ионного обмена от скорости фильтрации, температуры обрабатываемой воды и от величины отношения высоты загрузки фильтрационной колонки к ее диаметру, оптимальные параметры указанных факторов могут использоваться для прогноза эффективности работы устройств в любом заданном режиме процесса ионообменной очистки, а также при расчете ионообменного фильтра.

2. Полученная математическая модель динамики ионного обмена может использоваться проектными организациями для расчета ресурса ионообменного фильтра при заданном объеме ионообменной смолы или для расчета объема смолы, который может обеспечить заранее заданный ресурс фильтра.

3. Разработанные технология, конструкция устройства, методика расчета ионообменного фильтра для очистки подземных вод от нитратов методом ионного обмена могут использоваться проектными и строительными организациями для расчета и монтажа технологических схем подготовки воды, содержащей нитраты в концентрациях, превышающих ПДК.

4. Результаты диссертационной работы внедрены в УП «Институт «Брестстройпроект»; в учебный процесс на кафедре водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Учреждения образования «Брестский государственный технический университет». Экономическая значимость разработанной технологии заключается в снижении затрат потребителя при использовании метода водоподготовки как альтернативы покупке питьевой бутилированной воды.



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Яромский, В. Н. О конструировании аппаратов индивидуального пользования для очистки азотсодержащих вод / В. Н. Яромский, Т. М. Лысенкова, С. В. Соколюк // Вестник Брестского политехнического института. – 2000. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – С. 56–57.

2. Яромский, В. Н. Очистка природных вод от минеральных азотсодержащих соединений / В. Н. Яромский, Т. М. Лысенкова, С. В. Соколюк // Вестник Брестского политехнического института. – 2000. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – С. 58–60.

3. Житенев, Б. Н. Исследование и оптимизация процессов регенерации ионообменных материалов, участвующих в процессе очистки вод от соединений азота / Б. Н. Житенев, С. В. Андреюк // Вестник БрГТУ. – 2010. – №2: Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – С. 21–25.

4. Андреюк, С. В. Технологические схемы и аппаратурное оформление процессов ионообменной очистки подземных вод от азотистых соединений / С. В. Андреюк, Г. А. Волкова, Н. Ю. Сторожук // Вестник БрГТУ. – 2013. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 40–42.

5. Житенев, Б. Н. Снижение массовой концентрации нитратов в воде шахтных колодцев для водоснабжения / Б. Н. Житенев, С. В. Андреюк // Вестник БрГТУ. – 2016. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 62–65.

6. Житенев, Б. Н. Технологические решения подготовки воды с примесями соединений азота и железа для питьевого водоснабжения / Б. Н. Житенев, С. В. Андреюк // Вестник БрГТУ. – 2017. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 95–98.

7. Андреюк, С. В. Экономическая эффективность технологии удаления нитратов в индивидуальных системах питьевого водоснабжения / С. В. Андреюк, Б. Н. Житенев, О. П. Белоглазова // Вестник БрГТУ. – 2018. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 126–131.

Статьи в сборниках трудов и материалах конференций

8. Яромский, В. Н. О содержании минеральных азотистых соединений в подземных водах / В. Н. Яромский, Т. М. Лысенкова, С. В. Соколюк // Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды: труды Международной научно-практической конференции по проблемам водохо-

зяйственного, промышленного и гражданского строительства, и экономико-социальных преобразований в условиях рыночных отношений / Под ред. В. Е. Валуева. – Биберах-Брест-Ноттингем: Центр Трансфера Технологий (ЦТТ), TEMPUSTACIS, 1998. – С. 109–113.

9. Яромский, В. Н. Исследование методов очистки подземных вод от нитратов и нитритов / В. Н. Яромский, Т. М. Лысенкова, С. В. Соколюк // Материалы Международной 53-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА: в 3 ч. – Минск, 1999. – Ч.3. – С. 110.

10. Соколюк, С. В. Исследование методов очистки природных вод от нитратов и нитритов / С. В. Соколюк // Материалы Международной 54-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА: в 7 ч. – Минск, 2000. – Ч.7. – С. 129.

11. Андреюк, С. В. Общие принципы построения технологических схем современных малогабаритных установок для очистки и кондиционирования воды / С. В. Андреюк // Сборник материалов Международной научно-технической конференции, Брест, 22–23 апреля 2010 г. / Брестский гос. технический ун-т.; под ред. Т. В. Строкач – Брест : Из-во БрГТУ, 2010. – С. 225.

12. Житенев, Б. Н. Использование ионитовых противоточных фильтров в процессах ионообменной очистки воды, содержащей нитраты / Б. Н. Житенев, С. В. Андреюк // Проблемы энергетической эффективности в различных отраслях: материалы научного семинара, Брест, БрГТУ, 25 марта 2016 года / Под ред. В. С. Северянина, В. Г. Новосельцева – Брест: УО «БрГТУ», 2016. – С. 44–47.

13. Андреюк, С. В. Исследование методов физико-химической очистки природных вод от нитратов / С. В. Андреюк // Сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Брест, 6–8 апреля 2016 г.: в 2-ч. / УО «Брестский гос. технический ун-т.»; под ред. А.А. Волчека [и др.]. – Брест, 2016. – Ч.II. – С. 159–163.

14. Житенев, Б. Н. Исследование метода ионообменной очистки природных вод от нитратов / Б. Н. Житенев, С. В. Андреюк, М. А. Таратенкова // Современные тенденции развития науки: материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых, Ровно, 12 мая 2016 г. / Национальный ун-т водного хоз-ва и природопользования. – Ровно, 2016. – С. 132–134.

15. Житенев, Б. Н. Проблема загрязнения подземных вод соединениями азота / Б. Н. Житенев, С. В. Андреюк // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. по материалам V Междунар. науч. экол. конф. / сост. В. В. Корунчикова; под ред. И. С. Белюченко. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – С. 449–451.

Патент

16. Водозаборный шахтный колодец: патент на полезн. модель ВУ 11081, МПК E03B3/08 / Б. Н. Житенев, С. В. Андреюк, Н. С. Житенева; заявитель Брестский гос. техн. ун-т. – № u20150330; заявл. 25.09.2015; опубл. 15.03.2016.

Другие публикации

17. Яромский, В. Н. Исследование процесса очистки подземных вод от азотистых соединений методом ионного обмена / В. Н. Яромский, Т. М. Лысенкова, С. В. Соколюк; БГТУ. – Минск, 1999. – 16 с.: Библиогр.: 4 назв. – Деп. в БелИСА 03.08.99, № Д199984.

18. Яромский, В. Н. Влияние анионного состава подземных вод на эффект удаления нитратов методом ионного обмена / В. Н. Яромский, Т. М. Лысенкова, С. В. Соколюк; БГТУ. – Минск, 1999. – 12 с.: Библиогр.: 2 назв. – Деп. в БелИСА 10.11.99, № Д1999111.

19. Яромский, В. Н. Исследование и оценка эффективности очистки водных систем от азотистых соединений методом сорбции / В. Н. Яромский, Т. М. Лысенкова, С. В. Соколюк; БГТУ. – Минск, 1999. – 12 с.: Библиогр.: 4 назв. – Деп. в БелИСА 10.11.99, № Д1999110.

20. Соколюк, С. В. Об эффективности ионообменной очистки природных вод от азотистых соединений на различных ионообменных смолах / С. В. Соколюк; Брестский политех. ин-т. – Брест, 2000. – 36 с.: Библиогр.: 3 назв. – Деп. в БелИСА 10.03.2000, № Д200029.

21. Житенев, Б. Н. Современное состояние проблемы загрязнения подземных вод Беларуси соединениями азота и пути ее решения / Б. Н. Житенев, С. В. Андреюк // Производственно-технический и научно-практический журнал «Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение». – 2016/4 (100) – Москва: ООО «Издательский дом «Орион». – С. 52–57.

22. Житенев, Б. Н. Технологические схемы водоподготовки для удаления нитратов на ионообменных смолах в нецентрализованных системах питьевого водоснабжения / Б. Н. Житенев, С. В. Андреюк // Производственно-технический и научно-практический журнал «Вода Magazine». – 2018/5(129) – Москва: ООО «Издательский дом «Экомедиа». – С. 40–43.

РЕЗІЮМЭ

Андрэюк Святлана Васільеўна

Тэхналогія ачысткі падземных вод ад нітратаў метадам іённага абмену

Ключавыя словы: водазабеспячэнне, тэхналогія, ачыстка вады, падземныя воды, нітраты, іённы абмен, сорбцыя, пітная вада.

Аб'ект даследавання – падземныя воды ў Рэспубліцы Беларусь.

Прадмет даследавання – тэхналагічныя працэсы ачысткі вады ад нітратаў метадам іённага абмену.

Мэта работы – стварыць эфектыўную тэхналогію ачысткі падземных вод ад нітратаў для забеспячэння насельніцтва якаснай пітной вадой.

Метады даследавання і апаратура: выкарыстоўваліся фізіка-хімічныя, тэхналагічныя і матэматычныя метады.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Выкананы сістэмны аналіз якаснага складу падземных вод, якія выкарыстоўваюцца для цэнтралізаванага і нецэнтралізаванага водазабеспячэння. Распрацаваныя эксперыментальна-статыстычныя ўраўненні працэсу ачысткі падземных вод ад нітратаў на розных тыпах іонаабменных смол, якія апісваюць залежнасць эфекту ачысткі ад хуткасці фільтрацыі, тэмпературы зыходнай вады і ад велічыні адносін вышыні фільтруючай загрузкі да дыяметра фільтра, дазволілі вызначыць аптымальныя значэння, якія забяспечваюць максімальны эфект ачысткі. Атрымана матэматычная мадэль дынамікі працэсу іённага абмену пры ачыстцы вады ад нітратаў, тэхналогія рэгенерацыі іёнаабменных матэрыялаў. Створаны ўдасканаленая тэхналогія ачысткі вады ад нітратаў і метадыка разліку іёнаабменнага фільтра, якая дазваляе па дадзеных аналізу зыходнай вады і характарыстыцы аніаніта разлічыць рэсурс фільтра пры зададзеным аб'ёме аніаніта або разлічыць аб'ём аніаніта, які можа забяспечыць зададзены рэсурс фільтра. Прымяненне тэхналогіі дазваляе знізіць утрыманне нітратаў да 45 мг/л, пры гэтым патрабаваны ўзровень нітратаў у пітной вадзе можа быць прыняты ніжэй дапушчальнай канцэнтрацыі, што павысіць надзейнасць тэхналогіі ачысткі пры нязначным зніжэнні рэсурсу фільтра. Распрацаваны рэкамендацыі па разліку і праектаванню фільтраў для ачысткі вады ад нітратаў метадам іённага абмену для пітных патрэб, якія могуць выкарыстоўвацца арганізацыямі, якія ажыццяўляюць працоўку праектна-каштарыснай дакументацыі па падрыхтоўцы вады з падземных крыніц водазабеспячэння для розных катэгорый спажыўцоў вады.

Ступень выкарыстання атрыманых вынікаў. Атрыманыя вынікі ўкаранены ў навучальны працэс і перададзены ў УП «Інстытут «Брэтстройпраект» да праектавання аб'ектаў прамысловага і грамадзянскага прызначэння.

Галіна прымянення распрацаванай тэхналогіі – сістэма гарадскога, сельскагаспадарчага і прамысловага водазабеспячэння.

РЕЗЮМЕ

Андреюк Светлана Васильевна

Технология очистки подземных вод от нитратов методом ионного обмена

Ключевые слова: водоснабжение, технология, очистка воды, подземные воды, нитраты, ионный обмен, сорбция, питьевая вода.

Объект исследования – подземные воды Республики Беларусь.

Предмет исследования – технологические процессы очистки воды от нитратов методом ионного обмена.

Цель работы – создать эффективную технологию очистки подземных вод от нитратов для обеспечения населения качественной питьевой водой.

Методы исследования и аппаратура: использовались физико-химические, технологические и математические методы.

Полученные результаты и их новизна. Выполнен системный анализ качественного состава подземных вод, используемых для централизованного и нецентрализованного питьевого водоснабжения. Разработанные экспериментально-статистические уравнения процесса очистки подземных вод от нитратов на различных типах ионообменных смол, описывающие зависимость эффекта очистки от скорости фильтрации, температуры обрабатываемой воды и от величины отношения высоты фильтрующей загрузки к диаметру фильтра, позволили определить оптимальные значения, которые обеспечивают максимальный эффект очистки. Получена математическая модель динамики процесса ионного обмена при очистке воды от нитратов, технология регенерации ионообменных материалов. Созданы усовершенствованная технология очистки воды от нитратов и методика расчета ионообменного фильтра, позволяющая по данным анализа исходной воды и характеристике анионита рассчитать ресурс фильтра при заданном объеме ионита или рассчитать объем ионита, который может обеспечить определенный ресурс фильтра. Применение технологии позволяет снизить содержание нитратов до 45 мг/л и ниже допустимой концентрации, что повысит надежность технологии очистки при незначительном снижении ресурса фильтра. Разработаны рекомендации по расчету и проектированию сооружений очистки воды от нитратов методом ионного обмена для питьевых нужд, которые могут использоваться организациями, осуществляющими разработку проектно-сметной документации по подготовке воды из подземных источников для различных категорий водопотребителей.

Степень использования полученных результатов. Полученные результаты внедрены в учебный процесс и переданы в УП «Институт «Брестстройпроект» для проектировании объектов промышленного и гражданского назначения.

Область применения разработанной технологии – система городского, сельскохозяйственного и промышленного водоснабжения.

SUMMARY

Svetlana Andreyuk

The technology of groundwater purification from nitrates by the ion exchange method

Key words: water supply, technology, water treatment, groundwater, nitrates, ion exchange, adsorption, drinking water.

The objects of the research – the groundwater of the Republic of Belarus.

The subject of the research – technological processes of groundwater purification from nitrates by the ion exchange method.

The aim of the research – to create an effective technology of groundwater purification from nitrates by the ion exchange method for providing people with high-quality drinking water.

Research methods and equipment: physical, chemical, technological and mathematical methods.

The innovative nature of the research. It has been made a systematic analysis of the groundwater for centralized and decentralized water supply.

The developed experimental-statistical equations of groundwater purification from nitrates on different types of ion exchanging resins describe filtration speed – response, water temperature – response, the height of the filter bed to the diameter of the filter – response assessments. The equations have determined the maximum effect of the cleaning.

The mathematical model of the ion exchanging process for groundwater purification from nitrates and the technology of the regeneration of ion exchanging materials have been created.

The improved technology of groundwater purification from nitrates and the method of calculating an ion exchanging filter which helps to calculate the filter resource have been established.

The technology can reduce the nitrate level to 45 mg/l and increase the reliability of cleaning technology with a slight decrease of the filter resource.

The recommendations for design and construction facilities for groundwater purification can be used by Belarusian construction companies.

The use of the research:

The results have been introduced into the educational process and can be used by DUP «Breststrojproject» for design and construction facilities for groundwater purification.

The scope of the technology – urban, agricultural and industrial water supply systems.

Научное издание

АНДРЕЮК
Светлана Васильевна

**ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ НИТРАТОВ
МЕТОДОМ ИОННОГО ОБМЕНА**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.23.04 – водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

Издательство БрГТУ.

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/235 от 24.03.2014 г., № 3/1569 от 16.10.2017 г.

Подписано в печать 10.12.2019 г.

Гарнитура «Times New Roman». Формат 60×84 1/16.
Бумага «Performer», Уч. изд. л. 1,25. Усл. печ. л. 1,16.

Заказ № 1643. Тираж 80 экз.

Отпечатано на ризографе Учреждения образования
“Брестский государственный технический университет”.
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.