

УДК 628.16

Б.Н. Житенёв, С.В. Андреюк

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОДГОТОВКИ ВОДЫ С ПРИМЕСЯМИ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА И ЖЕЛЕЗА ДЛЯ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

**Введение.** В утвержденной решением коллегии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 11.08.2011 № 72-Р. Водной стратегии Республики Беларусь на период до 2020 года показано современное состояние систем водоснабжения и водоотведения:

— нецентрализованными источниками водоснабжения (шахтными колодцами) пользуются 1,4 млн человек, основную часть которых составляет сельское население – 1,1 млн человек. Из 42,6 тысяч общественных источников нецентрализованного водоснабжения, находящихся под контролем учреждений государственного санитарного надзора, около 11 процентов источников не соответствуют санитарным требованиям. Основное несоответствие нормативам по санитарно-химическим показателям зарегистрировано по содержанию нитратов;

— обеспеченность сельского населения централизованным водоснабжением составляет 57 процентов.

Приоритетными проблемами использования подземных вод являются:

— недостаточный уровень обеспеченности централизованным водоснабжением, особенно сельского населения;

— недостаточный уровень обеспечения населения качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения;

— несоответствие питьевой воды в системах нецентрализованного водоснабжения нормативам качества по нитратам и другим показателям;

### ЧЕМ ОПАСНЫ НИТРАТЫ?

— возникновением злокачественных заболеваний желудочно-кишечного тракта; создаются условия для перехода нитратов в нитрозоамины под влиянием микроорганизмов. Нитрозоамины (канцерогенные вещества) всасываются в кровь и циркулируют по всему организму;

— синтезом канцерогенных N-нитрозосоединений;

— некрозом (гибелью) разнообразных клеток.

В особенности чувствительны к действию  $N_0$  клетки головного мозга, миокарда и эндотелия;

— развитием язвенного колита и болезни Крона;

— возникновением разной степени гипотензии, которая способна привести к развитию острой почечной недостаточности;

— нарушением водно-электролитного обмена организма, что приводит к гипертонической болезни, заболеваниям почек. Вследствие этого развивается сердечная недостаточность;

— нарушением свертываемости крови;

— возникновением воспалительных процессов в паренхиматозных органах;

— поражением печени;

— развитием частых инфекций верхних дыхательных путей, обусловленные развитием метгемоглобинемией, которая является следствием хронической нитратной интоксикации;

— поражением поджелудочной и щитовидной желез, что приводит к развитию сахарного диабета;

— развитием анемии, которая приводит к нарушению памяти, внимания, интеллекта.

Острое отравление бывает при одномоментном попадании в организм больших доз нитратов [2].

Наиболее актуальна проблема нитратного загрязнения для систем нецентрализованного водоснабжения, т. е. систем водоснабжения индивидуальных. В соответствии с [3]. **Система водоснабжения индивидуальная** — это система водоснабжения, обеспечивающая питьевой водой отдельные усадебные жилые (дачные) дома. В качестве источника водоснабжения для таких систем используются шахтные колодцы или водозаборные скважины преимущественно глубиной до 10 метров, в качестве водоподъемных устройств для шахтных колодцев используется либо ворот, либо погружной насос типа «Гном». Подъем воды из водозаборных скважин с отметкой статического уровня воды до 8 метров осуществляется насосными станциями с пневмобаком.

Вместе с тем, присутствие нитратов в воде не препятствует использованию её для хозяйственных целей. Разбавленные растворы нитратов не придают воде окраску, это позволяет потреблять воду с примесями азотистых соединений для хозяйственных целей: стирки белья, умывания, пользования душем, уборки помещений, поливке зелёных насаждений и т. п.

Наиболее эффективное решение потребности в питьевой воде является использование бутилированной воды, однако в сельской местности, да и на загородных участках, это сопряжено с рядом проблем:

— удалённость от мест реализации бутилированной воды;

— сравнительно высокая стоимость бутилированной воды;

— неудобства, связанные с необходимостью погрузки, транспортировки, разгрузки.

Решить проблему можно путем кондиционирования воды на месте её использования. Учитывая, что очистка воды от нитратов достаточно сложная задача, целесообразно удалять азотистые соединения лишь из воды, используемой на питьевые цели.

*Житенёв Борис Николаевич, к.т.н., доцент, профессор кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета.*

*Андреюк Светлана Васильевна, старший преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.*

Для удаления аммонийного азота, нитратов и нитритов из природной воды эффективны окислительные, сорбционные и ионообменные методы, кроме того, могут применяться электродиализ, обратный осмос и дувка воздухом.

Для воды, содержащей относительно небольшое количество нитрат- и нитрит-ионов (в концентрациях – до трех предельно допустимых), могут эффективно использоваться ионообменные фильтры с сильноосновными анионитами, например: «Purolite NRW-600(OH)», «Lewatit MonoPlus® SR 7», «AB-17-8чС» [4].

**Экспериментальная часть.** Выполненными ранее исследованиями [4, 6, 7] установлено, что ресурс ионитового фильтра определяется содержанием в исходной воде различных анионов, в первую очередь – нитратов и сульфатов. С целью определения обменной емкости анионитов по нитратам были проведены эксперименты на модельном растворе, который содержал сульфаты ( $S_0 = 0,31$  мг-экв/л), а также хлориды, гидрокарбонаты, нитриты общее солесодержание, исключая нитраты, составляло:  $S = 24$  мг – экв/л. В раствор добавлялись нитраты до концентрации  $C_0 = 1,61$  мг - экв/л.

Объем анионита «Purolite NRW-600(OH)», использованного для эксперимента, составлял  $m = 0,06 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , полная статическая обменная ёмкость анионита по нитратам  $A_0 = 2100$  мг-экв/л [4, 6], скорость фильтрации в эксперименте составляла  $V = 0,25 \cdot 10^{-3}$  м/с, объём воды, пропущенной до проскока нитратов, в концентрации, равной исходной  $W = 80 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  или 80 л.

Откуда:

– обменная емкость, израсходованная на сорбцию ионов солей, исключая нитраты:  $S' = S \cdot W = 24$  (мг-экв/л)  $\cdot$  80 (л) = 1939 мг-экв;

– обменная емкость анионита, затраченная на сорбцию нитратов:  $N_a = C_0 \cdot W = 1,61$  (мг-экв/л)  $\cdot$  80 (л) = 128,8  $\approx$  129 мг-экв;

– что составляет 80% от полной статической обменной емкости анионита, оставшейся для сорбции нитратов:

– полная динамическая обменная ёмкость анионита по нитратам составила:

$$W = \frac{a_0}{C_0} \cdot m + \frac{0,119}{C_0} \cdot \ln \frac{\sigma}{1-\sigma} \text{ мг-экв/л.}$$

Кинетику ионного обмена можно представить как необратимую реакцию второго порядка, для которой справедливо уравнение:

$$W = \frac{a_0}{C_0} \cdot m + \frac{0,133}{C_0} \cdot \ln \frac{\sigma}{1-\sigma}. \quad (1)$$

При этом асимптотическое решение имеет вид:

$$W = \frac{a_0}{C_0} \cdot m + \frac{0,1095}{C_0} \cdot \ln \frac{\sigma}{1-\sigma}, \quad (2)$$

где  $W$  – объём очищенной воды,  $m$  – масса (объем) анионита,  $V$  – скорость течения воды,  $\sigma$  ( $\sigma = C / C_0$ ) – отно-

сительная концентрация нитратов в воде ( $C$  – предельно допустимая концентрация (ПДК);  $C_0$  – концентрация нитратов в природной воде),  $k$  – константа скорости необратимой реакции второго порядка.

На основании экспериментальных данных получены значения параметров:

$$\left( \frac{a_0}{C_0} \right) \cdot m = 78,12 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ и } (k \cdot C_0) = 4,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}.$$

Уравнение выходной кривой имеет вид:

$$W = 78,12 \cdot 10^{-3} + \frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{4,2 \cdot 10^{-2}} \cdot \ln \frac{\sigma}{1-\sigma} \quad (3)$$

или

$$W = 0,07812 + 0,00595 \cdot \ln \frac{\sigma}{1-\sigma}.$$

Полученные результаты эксперимента дают возможность по данным анализа исходной воды и характеристике высокоосновного анионита рассчитать ресурс ионитового фильтра при заданном объёме сорбента (уравнение 2) или рассчитать объём сорбента (уравнение 4), который может обеспечить заранее заданный ресурс фильтра

$$\varepsilon = \frac{129}{2100 - 1939} = 0,8 \quad (4)$$

С учётом оптимальных параметров работы ионообменного фильтра при использовании различных типов ионообменных смол (анионитов) получены математические модели, позволяющие рассчитать ресурс фильтра:

– для анионита марки «Purolite NRW-600(OH)»:

$$a_0 = \frac{N_a}{m} = \frac{129}{0,6} = 2150; \quad (5)$$

– для анионита марки «AB-17-8чС»:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = k \cdot (a_0 - a) \cdot C. \quad (6)$$

– для анионита марки «Lewatit MonoPlus® SR 7»:

$$W = \frac{a_0}{C_0} \cdot m + \frac{V}{k \cdot C_0} \cdot \ln \frac{\sigma}{1-\sigma}, \quad (7)$$

**Пример расчёта ресурса ионообменного фильтра  $W$ .**  
**Исходные данные:**

– константа скорости необратимой реакции второго порядка  $k = 4,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ ;

– относительная величина обменной ёмкости анионита, затраченной на сорбцию нитратов  $\varepsilon = 0,80$ ;

– содержание сульфатов  $S_0 = 0,63$  мг-экв/л, или 30 мг/л;

– содержание нитратов  $C_0 = 1,61$  мг-экв/л, или 100 мг/л;

– ПДК по нитратам  $C = 0,72$  мг-экв/л, или 45 мг/л;

– объём анионита  $m = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  или 1 л;

– полная статическая обменная емкость анионита

(«Purolite NRW-600(OH)»)  $A_0 = 2100$  мг-экв/л;

– скорость фильтрации  $V = 0,25 \cdot 10^{-3}$  м/с.

Расчёт:

$$1. a_0 = \frac{\varepsilon \cdot A_0 \cdot C_0}{C_0 + \varepsilon \cdot S_0} = \frac{0,8 \cdot 2100 \cdot 1,61}{1,61 + 0,8 \cdot 0,63} = 1279 \text{ экв/м}^3; \quad (8)$$

$$2. \frac{a_0}{C_0} \cdot m = \frac{1279}{1,61} \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 794,70 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; \quad (9)$$

$$3. k \cdot C_0 = 4,2 \cdot 10^{-2} \cdot 1,61 = 6,76 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{экв} \cdot \text{с}; \quad (10)$$

$$4. \frac{V}{k \cdot C_0} = \frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{6,76 \cdot 10^{-2}} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; \quad (11)$$

$$5. \sigma = \frac{C}{C_0} = \frac{0,72}{1,61} = 0,447; \quad (12)$$

$$6. \ln \frac{\sigma}{1-\sigma} = \ln \frac{0,447}{1-0,447} = -0,213. \quad (13)$$

Откуда

$$W = \frac{a_0}{C_0} \cdot m + \frac{V}{k \cdot C_0} \cdot \ln \frac{\sigma}{1-\sigma} = 794,70 \cdot 10^{-3} + 3,7 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,213) = 793,91 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ или } 794 \text{ л.} \quad (14)$$

Таким образом, при уровне загрязнения воды нитратами 2 ПДК и с потреблением питьевой воды в размере 2,5 л/сут на человека объем анионита 1 л позволит обеспечить кондиционной питьевой водой семью из четырёх человек в течение:

$$P = \frac{794}{2,5 \cdot 4} = 79 \text{ суток.} \quad (15)$$

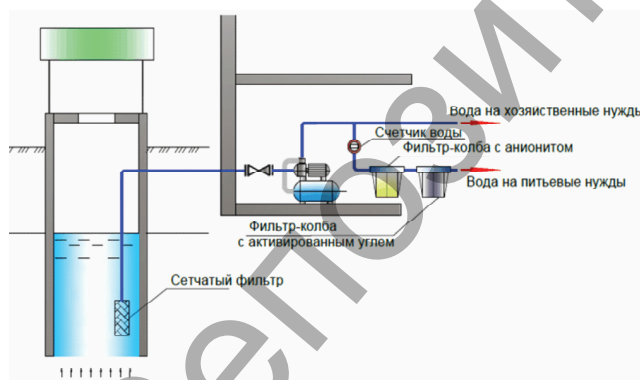


Рисунок 1. Технологическая схема очистки воды, содержащей примеси азотистых соединений в концентрациях выше ПДК для питьевых целей

Система водоснабжения по предлагаемому технологическому решению (рис. 1) работает следующим образом: вода забирается из шахтного колодца насосной станцией с пневмобаком (возможно использование погружного насоса, например типа «Гном», однако это увеличивает количество включений), затем она разделяется на два потока:

— вода для стирки белья, умывания, пользования душем, уборки помещений, поливки зеленых насаждений и т. п.;

— вода для питьевых целей.

Первый поток предполагает использование воды без предварительной очистки, поскольку вода в шахтных колодцах в большинстве случаев не содержит примеси железа в концентрациях выше ПДК. Второй поток проходит двухступенчатую очистку: ионообменную и сорбционную. Ионообменная позволяет удалить примеси азотистых соединений, сорбционная улучшить органолептические показатели качества воды для питьевых целей. В качестве ионообменных смол следует использовать сильноосновные аниониты, например: «Purolite NRW-600(OH)», «Lewatit MonoPlus® SR 7», «AB-17-8чС». В результате реализации данной технологии качество воды по солевому составу соответствует требованиям [8]. Поскольку контроль качества воды на содержание примесей азотистых соединений требует специальных знаний и оборудования, то для упрощенного контроля предлагается использовать счетчик воды, с помощью которого осуществляется измерение объема воды, пропущенной через ионообменный фильтр, который не должен превышать ресурс фильтра (уравнение 14).

При использовании в качестве водозаборного сооружения неглубоких скважин наряду с примесями в виде азотистых соединений зачастую присутствуют примеси в виде соединений железа, в этом случае необходимо на первой ступени очистки освободиться от последних. Присутствие примесей железа затрудняет использование воды для хозяйственных целей: стирки белья, умывания, пользования душем и т. п. Направление такой воды на ионообменный фильтр приводит к блокировке поверхности зёрен соединениями железа и отравлению ионообменной смолы. Обезжелезивание может быть осуществлено «упрощенной аэрацией», для этого в технологии предусматривается установка фильтра обезжелезивания (рис. 2). В дальнейшем выделяется поток для питьевых целей, как в рассмотренной ранее технологии.

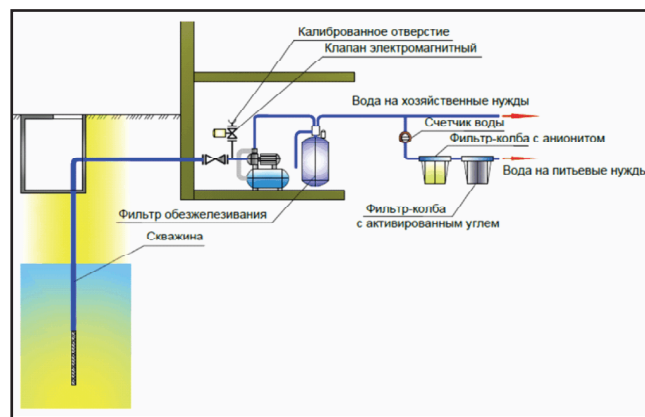


Рисунок 2. Технологическая схема очистки воды, содержащей примеси азотистых соединений и соединений железа в концентрациях выше ПДК для хозяйственных и питьевых целей

### Заключение

1. Проанализированы причины несоответствия качества потребляемой воды нормативным документам. Отмечается, что значительная часть населения, проживающая в сельской местности, потребляет для питьевых

целей воду с повышенным содержанием примесей в виде соединений азота.

2. На основании данных литературы показано, что употребление воды, содержащей примеси в виде соединений азота в концентрациях выше ПДК = 45 мг/л, может привести к тяжелейшим заболеваниям.

3. Выполненные исследования показали высокую эффективность очистки воды методом ионного обмена с использованием сильноосновных анионитов: «Purolite NRW-600(OH)», «Lewatit MonoPlus® SR 7», «AB-17-8чС» для питьевых целей.

4. Разработана методика расчета ресурса ионообменного фильтра для удаления примесей в виде соединений азота.

5. Приведены технологические схемы очистки подземных вод от нитратов и железа для систем индивидуального водоснабжения.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Водная стратегия Республики Беларусь на период до 2020 года: решение коллегии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 11.08.2011 № 72.

2. Иванова, Э. Химические вещества в окружении человека / Э. Иванова, П. Бондарева – Минск : МОО «Эко-фера», 2006. – 34 с.

3. Строительство. Водоснабжение питьевое: термины и определения: СТБ 1884-2008 – Минск: Госстандарт, 2008.

4. Житенев, Б.Н. Современное состояние проблемы загрязнения подземных вод Беларуси соединениями азота и пути ее решения / Б.Н. Житенёв, С.В. Андreyuk // Вестник БрГТУ. Водоочистка, Водоподготовка, Водоснабжение. – 2016. – № 4 (100). – С. 52–57.

5. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества: Санитарные правила и нормы. – Минск: Минздрав Республики Беларусь, 1999.

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

7. Водозаборный шахтный колодец: пат. 11081 ВУ, МПК E03B3/08 / Б.Н. Житенёв, С.В. Андreyuk; заявитель Брестский гос. техн. ун-т. №u20150330; заявл. 25.09.2015; опубл. 30.06.2016 / Гос. реестр полезн. моделей.

8. Требования к физиологической полноценности питьевой воды: санитарные нормы и правила // постановление Минздрава Республики Беларусь №166 от 25.10.2012 г.

*Материал поступил в редакцию 05.09.17*

#### ZHITENEV B.N., ANDREYUK S.V. Technological solutions in water treatment, with impurities of nitrogen compounds and iron for drinking water

The article contains proposals on the technological solution of water treatment problems containing impurities in the form of nitrogen and iron compounds for individual drinking water supply systems. The reasons for the discrepancy between the quality of consumed water and normative documents are analyzed.

On the basis of the studies performed, variants of technological solutions for the purification of groundwater from nitrates and iron for the systems of individual drinking water supply.

УДК 663.18

**Б.Н. Житенев, Е.С. Рыбак**

#### ОБЕСЦВЕЧИВАНИЕ И ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ ОРГАНИЧЕСКИЕ ПРИМЕСИ, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**Введение.** В водной стратегии Республики Беларусь на период до 2020 года, утвержденной решением коллегии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 11.08.2011 № 72-Р [1], отмечается, что около 2 млн человек в республике используют воду с содержанием железа выше санитарной нормы 0,3 мг/л.

Основными причинами такого состояния являются:

- недостаточный уровень обеспеченности централизованным водоснабжением, особенно сельского населения;
- недостаточный уровень обеспечения населения качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения.

Решение первой проблемы связано со строительством систем централизованного водоснабжения, что требует дополнительных инвестиций.

Вторая связана с неудовлетворительным состоянием систем централизованного водоснабжения, а именно это:

- отсутствие сооружений очистки воды перед подачей её потребителям;
- недостаточное качество очистки воды в действующих системах централизованного водоснабжения.

Последняя проблема связана с неудовлетворительным проектированием сооружений подготовки воды, принятием неверных технологических решений, что впоследствии сказывается на их работоспособности. В Республике Беларусь наиболее распространенным методом удаления железа из воды, предназначенной для питьевого водоснабжения, является упрощенная аэрация с фильтрованием.

По данным работ [1–7], при обезжелезивании методом упрощенной аэрации с фильтрованием сначала происходит

*Рыбак Екатерина Сергеевна, ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267*