

УДК 628.16

## ВОДОПОДГОТОВКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

© 2016 г. И.Н. Липунов<sup>1</sup>, И.Г. Первова<sup>1</sup>, В.Н. Санакоев<sup>2</sup>,  
А.Ф. Никифоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет»,  
г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

**Ключевые слова:** качество воды, водоподготовка подземных вод, окисление-фильтрация, озонирование воды, технологическая установка, доочистка воды, питьевое водоснабжение, обеззараживание воды.



И.Н. Липунов



И.Г. Первова



В.Н. Санакоев



А.Ф. Никифоров

Объектом исследования являются подземные воды разведочно-эксплуатационных скважин, расположенных на юго-западной окраине г. Екатеринбурга, которые требуют предварительной водоподготовки с целью доведения качества воды до требований СанПиН 2.1.4.1074-01. На лабораторной установке экспериментально установлены оптимальные параметры (доза озона, время контакта воды с озоновоздушной смесью, скорость фильтрования воды, остаточная концентрация озона) технологических процессов обезжелезивания, деманганации и обеззараживания воды по схеме «окисление-фильтрация», которые позволяют обеспечить требуемое качество подземных вод для использования их в системе автономного питьевого водоснабжения.

Разработана технология и технологическая установка водоподготовки подземных вод производительностью 5 м<sup>3</sup>/ч для создания автономной системы питьевого водоснабжения.

Создание систем автономного питьевого водоснабжения для социально значимых учреждений (детские сады и ясли, школы, больницы и т. п.) может быть основано на использовании вод подземных источников, которые по сравнению с поверхностными водами в значительно меньшей степени подвержены техногенному загрязнению и сезонному изменению химического и бактериологического состава. Однако и к водам подземных источников, используемых для питьевого водоснабжения, предъявляются требования к качеству в соответствии с нормами СанПиН 2.1.4.1074-01 [1]. В частности, после откачки вод скважин, пройденных Уральской гидрологической экспедицией на территории Свердловского областного клинического психоневрологического госпиталя для ветеранов войн (СОКПГВВ), проведенный анализ вод подземного горизонта показал повышенное содержание железа, марганца и бактерий группы кишечной палочки. При разработке технологии, обеспечивающей качество этих вод для создания автономной системы питьевого водоснабжения, возникла необходимость в дополнительной очистке и обеззараживании подземных вод. В основу технологии положен комбинированный метод «окисление-фильтрация» с использованием в качестве окислителя озона, который является не только сильным окислителем, но и обладает высокими бактерицидными свойствами.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе представлены результаты исследований и разработки технологических процессов доочистки и обеззараживания подземных вод с целью создания системы автономного питьевого водоснабжения для двух значимых медицинских учреждений г. Екатеринбурга – Свердловского областного онкологического диспансера (ГБУЗ СО «СООД») и СОКПГВВ, расположенных на юго-западной окраине города. На территории госпиталя разведаны значительные запасы подземных вод, пройдены две разведочно-эксплуатационные скважины, которыми вскрыта водообильная зона субмеридионального простираия, приуроченная к зоне повышенной трещиноватости в биотит-роговообманковых гранитах.

Подземные воды имеют грунтовый характер, глубина их залегания составляет 3,1 м, дебит одной скважины при опытной откачке 2,4 л/с. Класс подземных вод – гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией 272–296 мг/л, нейтральные ( $\text{pH} = 6,8\text{--}7,6$ ), умеренно-жесткие (3,78–4,02 мг-экв/л). Химические и бактериологические показатели определены в аккредитованных лабораториях Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Свердловской области (Роспотребнадзор). Полученные результаты показали, что эти воды не могут быть использованы в системе хозяйствственно-питьевого водо-

снабжения без предварительной доочистки и обеззараживания, поскольку обладают повышенным содержанием ионов железа, марганца и бактерий группы кишечной палочки (табл. 1).

**Таблица 1.** Химические и бактериологические показатели воды разведочно-эксплуатационной скважины

Показатели	Количество	СанПиН 2.1.4.1074-01
Водородный показатель (рН), ед.	6,8–7,6	6,5–8,5
Общая жесткость, ммоль/л	3,78–4,02	7,0
Окисляемость ( $KMnO_4$ ), мг $O_2/\lambda$	1,28–1,76	5,0
Нитраты ( $NO_3^-$ ), мг/л	30,13	45,0
Сульфаты ( $SO_4^{2-}$ ), мг/л	46,1–47,3	500
Фториды ( $F^-$ ), мг/л	0,11–0,13	1,5
Хлориды ( $Cl^-$ ), мг/л	31,9–35,4	350
Цинк (Zn, суммарно), мг/л	0,024–0,040	5,0
Железо (Fe, суммарно), мг/л	<b>0,75–1,0</b>	0,3
Марганец (Mn, суммарно), мг/л	<b>0,11–0,19</b>	0,1
Медь (Cu, суммарно), мг/л	0,01	1,0
Мышьяк (As, суммарно), мг/л	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$
Бериллий ( $Be^{2+}$ ), мг/л	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Бор (B, суммарно), мг/л	0,05	0,5
Свинец (Pb, суммарно), мг/л	$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Селен (Se, суммарно), мг/л	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Стронций ( $Sr^{2+}$ ), мг/л	0,36–0,38	7,0
Сухой остаток, мг/л	272–296	1000
Коли-индекс	<b>230–1100</b>	не более 3
Общее микробное число	0–13	не более 100

Для разработки технологии доочистки и обеззараживания вод скважин была принята двухступенчатая схема водоподготовки «окисление-фильтрация», в которой в качестве окислителя использовался озон. В такой схеме на первой ступени происходят окисление и коагуляция примесей, на второй – осуществляются процессы разделения образующейся гетерогенной системы и обеззараживания воды [2, 3]. Преимущества озона по сравнению с другими окислителями:

– озонирование воды в сочетании с процессом фильтрации эффективно используется для разрушения сложных органоминеральных комплексов, окисления и удаления тяжелых металлов, окисления и последующей сорбции растворенных органических веществ, в т. ч. и природного происхождения. Воды подземных источников в своем составе содержат железо в форме растворимых гуминовых комплексов, а органику – в виде природного гуминового комплекса;

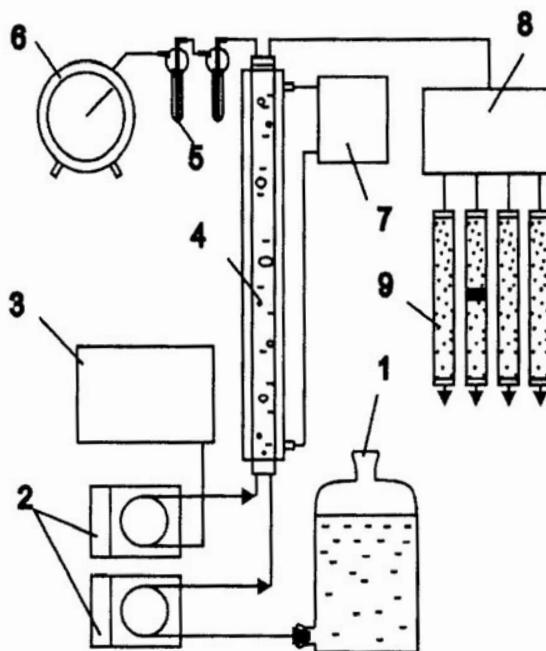
– pH подземных вод 6,8–7,6. При данном значении pH озона окисляет весь содержащийся в воде марганец (II) в течение 10–15 мин и переводит его в малорастворимую форму марганца (IV), в то время как хлор способен окислить только 50 % содержащегося марганца (II) за 69–90 мин [4];

– озон обладает сильным бактерицидным действием, эффективно участвует в процессе обеззараживания воды.

Опыт эксплуатации установок химводоподготовки подземных вод для питьевых целей с использованием в качестве окислителя озона показал, что процесс озонирования значительно упрощает технологическую схему водоподготовки, способствует глубокому обеззараживанию и очистке воды от железа и марганца без ухудшения ее вкусовых качеств [5]. Такие технологические установки хорошо зарекомендовали себя для подготовки как поверхностных, так и подземных вод в питьевых целях.

Тем не менее, применение подобных схем водоподготовки требует отработки оптимальных условий ведения технологического процесса и в первую очередь процесса озонирования: расхода озона на окисление органических и минеральных примесей и обеззараживания воды; времени контакта озоновоздушной смеси с обрабатываемой водой, определения влияния химической природы и концентрации загрязняющих веществ на степень очистки. Превышение дозы озона может привести в ряде случаев к появлению в обрабатываемой воде токсичных продуктов химических реакций [6].

Отработку оптимальных параметров технологического процесса доочистки и обеззараживания воды разведочно-эксплуатационной скважины проводили на укрупненной лабораторной установке, состоящей из емкости, перистальтического насоса, генератора озона, контактной камеры, поглотителя, газового счетчика, термостата, распределительного устройства и фильтра (рис. 1).



**Рис. 1.** Лабораторная установка для доочистки и обеззараживания подземных вод: 1 – емкость для воды; 2 – перистальтический насос; 3 – генератор озона; 4 – контактная камера; 5 – поглотитель; 6 – газовый счетчик; 7 – термостат; 8 – распределительное устройство; 9 – фильтр.

В качестве источника озона использовали генератор производительностью по озону 0,1–1,0 мг/мин. Контактная камера озонирования представляла собой колонку диаметром 30 мм и высотой 1500 мм, выполненную из кварцевого стекла. Фильтр изготовлен из стеклянной трубы диаметром 30 мм, высотой 1000 мм. В качестве фильтрующей загрузки использовали кварцевый песок (0,8–2,0 мм), активированный уголь (1–3 мм), измельченный антрацит (0,8–2,0 мм), а также двухслойную загрузку, состоящую из кварцевого песка и активированного угля.

В контактной камере вода, подаваемая перистальтическим насосом, подвергается обработке озоном, поступающим в виде озоновоздушной смеси из генератора озона, в результате чего идут процессы обеззараживания воды, окисления железа и марганца с образованием труднорастворимых соединений  $\text{Fe(OH)}_3$  и  $\text{MnO}_2$ . При этом происходит повышение показателя цветности озонированной воды. Образующаяся гетерогенная

система направляется на фильтры с соответствующей фильтрующей загрузкой. На фильтрах происходит разделение гетерогенной системы, в результате чего снижается концентрация железа и марганца за счет процессов адсорбции их малорастворимых соединений и происходит осветление озонированной воды.

Такая установка позволяет регулировать дозу озона, время пребывания обрабатываемой воды в контактной камере, температуру воды, скорость фильтрования через фильтрующую загрузку. Использование в установке нескольких фильтров обеспечивает выбор природы фильтрующего материала. Расход озоновоздушной смеси контролировали газовым счетчиком, концентрацию озона в озоновоздушной смеси и остаточную концентрацию озона определяли йодометрическим методом [7]. Дозу озона ( $\Delta$ ), необходимую для процессов обеззараживания и окисления загрязняющих веществ обрабатываемой воды, рассчитывали по формуле

$$\Delta = \frac{a \cdot t}{V}, \text{ мг/л,}$$

где  $a$  – производительность генератора озона, мг/мин;

$t$  – время озонирования, мин;

$V$  – объем обрабатываемой воды, л.

Содержание ионов железа и марганца в исследуемой воде, а также цветность воды определяли фотоколориметрическим методом [7]. Бактериологические показатели исследуемых проб воды устанавливали в аккредитованной лаборатории Роспотребнадзора.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На лабораторной установке проведен комплекс исследований по установлению влияния дозы озона, времени контакта обрабатываемой воды с озоновоздушной смесью в контактной камере, температуры воды, концентрации загрязняющих веществ, скорости фильтрования на степень очистки по железу, марганцу и обеззараживания воды до нормативных показателей СанПин 2.1.4.1074-01. При этом дозу озона варьировали в пределах 1÷3 мг/л, время контакта воды с озоновоздушной смесью в контактной камере 3÷15 мин, температуру воды 8÷12 °C, скорость фильтрования воды через фильтрующую загрузку 5÷10 м/ч, концентрацию железа 0,75÷1,25 мг/л, концентрацию марганца 0,10÷0,25 мг/л.

В результате проведенных исследований установлены оптимальные параметры процессов обезжелезивания, деманганации, осветления и обеззараживания воды подземных источников: доза озона 1,5 мг/л, время контак-

та воды с озоновоздушной смесью 12 мин, скорость фильтрования 7,5 м/ч, остаточная концентрация озона 0,1÷0,3 мг/л.

Показатели качества исследуемой и обработанной воды на укрупненной лабораторной установке по схеме «окисление-фильтрация» доказывают (табл. 2), что обработанная вода может быть использована в системе автономного питьевого водоснабжения, поскольку содержание в ней железа, марганца и величина коли-индекса соответствуют требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01.

**Таблица 2.** Показатели качества исходной и подготовленной для питьевого водоснабжения воды по схеме «окисление–фильтрация»

Показатели	Исходная вода	Вода после обработки
Водородный показатель (рН), ед.	7,6	6,8
Содержание Fe (общ.), мг/л	1,0	0,1
Содержание Mn, мг/л	0,13	0,03
Коли-индекс	1100	н/о
Общее микробное число	13	н/о

Результаты проведенных исследований положены в основу разработки принципиальной схемы и технологической установки доочистки и обеззараживания вод разведочно-эксплуатационных скважин с целью создания автономной системы водоснабжения всех лечебных корпусов СОКПГВВ.

Анализ различных технологических схем водоподготовки с использованием озонаторных установок, описанных в литературе [8], позволил разработать принципиальную технологическую схему доочистки и обеззараживания артезианских вод, исключающую стадию предварительной очистки исходной воды на песчаном фильтре, что существенно сокращает энергетические затраты водоподготовки. Принципиальная схема водоподготовки включает следующие стадии технологического процесса (рис. 2).

На первой стадии исходная вода насыщается озоновоздушной смесью, затем в контактном аппарате происходит процесс окисления примесей и обеззараживания воды. На второй стадии процесса происходит удаление взвешенных веществ путем фильтрации воды через загрузку кварцевого песка, а также адсорбция органических примесей на поверхности активированного угля. На третьей стадии предусмотрена дополнительная обработка очищенной и обеззараженной воды облучением ультрафиолетовыми

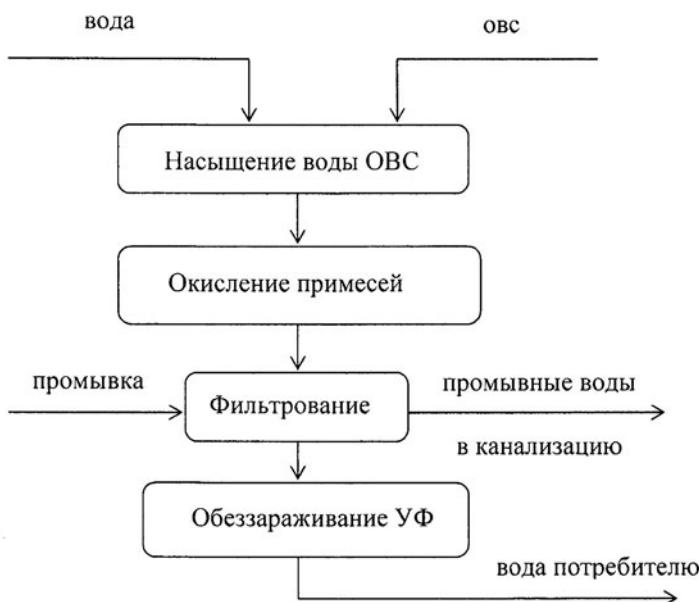
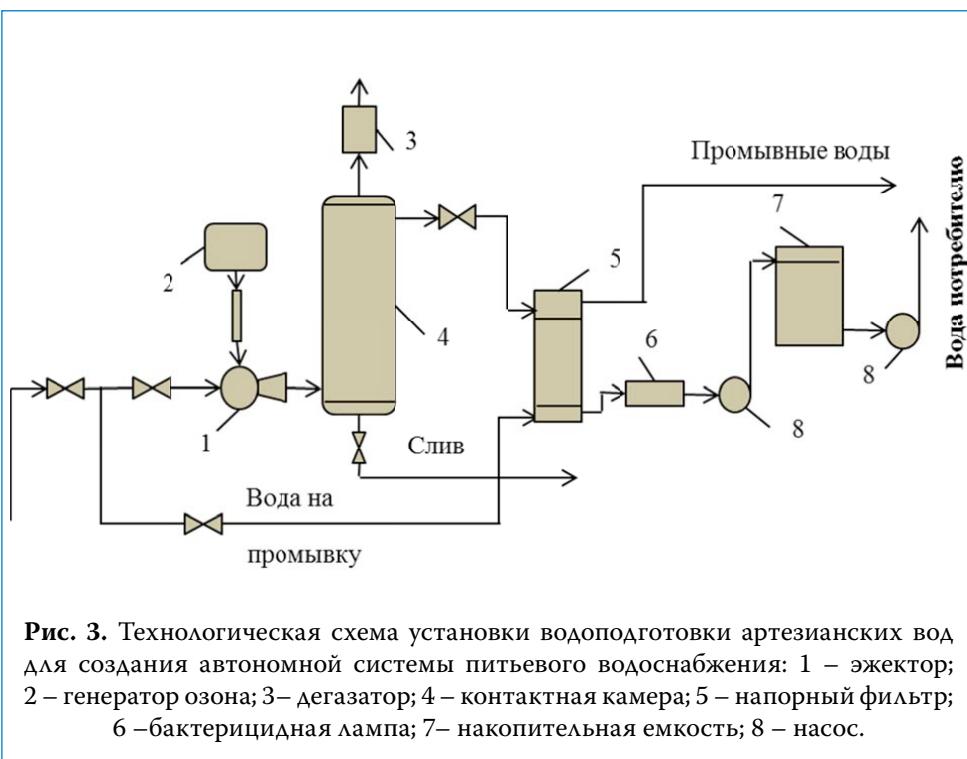


Рис. 2. Принципиальная схема водоподготовки артезианских вод.

лучами, после чего вода подается потребителю. Предусмотрена также стадия промывки фильтров, образующиеся промывные воды сбрасываются в канализацию. Данная схема позволяет проводить очистку вод, содержащих избыточную концентрацию соединений железа, марганца, органических веществ, и их обеззараживание. Разработанная технологическая установка водоподготовки подземных вод производительностью 5 м<sup>3</sup>/ч для создания автономной системы питьевого водоснабжения лечебных корпусов госпиталя представлена на рис 3.

Исходная вода из скважины центробежным насосом и озоновоздушная смесь, вырабатываемая генератором озона 2, через эжектор 1 подаются в контактную камеру 4, где происходят процессы окисления содержащихся в воде железа, марганца и органических веществ и ее обеззараживание. Не прореагировавший озон направляется в дегазатор 3 и разрушается. Предусмотрена комплектация установки генератором озона ООЧ-30 производительностью по озону 30 кг/ч, характеризующимся высокой гибкостью по производительности озона благодаря модульности крепления различного количества озонирующих элементов. Для повышения коэффициента смешения воды и озоновоздушной смеси в технологической установке используется эжекторная схема смешения. Вода в эжекторе, благодаря своей



**Рис. 3.** Технологическая схема установки водоподготовки артезианских вод для создания автономной системы питьевого водоснабжения: 1 – эжектор; 2 – генератор озона; 3 – дегазатор; 4 – контактная камера; 5 – напорный фильтр; 6 – бактерицидная лампа; 7 – накопительная емкость; 8 – насос.

кинетической энергии, захватывает массу озоновоздушной смеси и разбивает ее до состояния водовоздушной эмульсии. Применение эжектора позволяет значительно уменьшить объем контактной камеры и получить коэффициент поглощения озона до 90, при этом высота контактной камеры не превышает 2,0 м.

Из контактной камеры обработанная озоном вода подается в первую камеру напорного фильтра 5, заполненную кварцевым песком, где происходит удаление грубодисперсных примесей. Во второй камере, заполненной активированным углем, осуществляется процесс адсорбции не окисленных в контактной камере органических веществ. Во избежание вторичного бактериального загрязнения воды после прохождения через слой активированного угля, который является хорошей питательной средой для развития микроорганизмов, предусмотрена ее обработка бактерицидными лучами 6. Далее очищенная и обеззараженная вода подается в накопительную емкость 7, откуда центробежным насосом 8 направляется потребителю.

Комплекс проведенных исследований на укрупненной лабораторной установке по подготовке подземных вод разведочно-эксплуатационных

скважин позволил установить основные технологические параметры процессов обезжелезивания, деманганации, осветления и обеззараживания, позволяющие использовать воду подземных источников для создания автономной системы питьевого водоснабжения. Проведенные исследования положены в основу разработки технологии и технологической установки водоподготовки производительностью 5 м<sup>3</sup>/ч.

Выбор оборудования для установки проведен с таким расчетом, что периодические колебания состава воды по содержанию железа до 1,25 мг/л и марганца до 0,25 мг/л позволяют проводить целенаправленную корректировку технологического процесса и снизить энергетические затраты на получение озона без ухудшения эффективности процессов очистки и обеззараживания. Разработано техническое задание на проектирование промышленной установки, внедрение которой позволит решить важную социально-значимую проблему, связанную с созданием автономных систем питьевого водоснабжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Минздрав России, 2002. 225 с.
2. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Усольцев В.А. Технология озонирования и сорбция на активированных углях // Водоснабжение и санитарная техника. 1995. № 2. С. 16–20.
3. Алексеева Л.П., Драгинский В.Л. Подготовка питьевой воды для городов и поселков республики Саха // Водоснабжение и санитарная техника. 1995. № 6. С. 15–18.
4. Николадзе Г.И., Минц Д.М., Кастельский А.А. Подготовка воды для питьевого водоснабжения. М.: Стройиздат, 1984. 368 с.
5. Брунов С.Н., Жаворонкова В.М. Замена первичного хлорирования озонированием // Водоснабжение и санитарная техника. 1994. № 1. С. 5–6.
6. Апельцина Е.И., Алексеева Л.П., Черская Н.О. Проблемы озонирования при подготовке питьевой воды // Водоснабжение и санитарная техника. 1992. № 3. С. 9–16.
7. Аурье Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984. 448 с.
8. В.Ф. Кожинов. Очистка питьевой и технической воды. М.: Стройиздат, 1971. 303 с.

#### Сведения об авторах:

Липунов Игорь Николаевич, канд. хим. наук, профессор, кафедра физико-химической технологии защиты биосферы, ФГБОУ ВПО «Уральский лесотехнический университет» (ФГБОУ ВПО УГЛТУ), Россия, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37; e-mail: biosphera@usfeu.ru

Первова Инна Геннадьевна, д-р хим. наук, доцент, заведующий кафедрой физико-химической технологии защиты биосферы, ФГБОУ ВПО «Уральский лесотехнический университет» (ФГБОУ ВПО УГЛТУ), Россия, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37; e-mail: biosphera@usfeu.ru

Санакоев Владилен Нодарович, ведущий инженер, отдел метрологии, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» (ФГАОУ ВПО УрФУ), Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: vyppe@rambler.ru

Никифоров Александр Федорович, д-р хим. наук, профессор, кафедра водного хозяйства и технологии воды, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» (ФГАОУ ВПО УрФУ), Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: vyppe@rambler.ru