

Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов

Water supply, sewage, water conservation construction systems

Научная статья
УДК 628.16
DOI: 10.14529/build250207

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЖЕЛЕЗА, МАРГАНЦА И АММОНИЯ

М.Г. Новосёлов¹, М.Ю. Белканова^{2✉}

¹ Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

✉ belkanovami@susu.ru

Аннотация. Изучена работа системы очистки воды высокой минерализации для нужд металлообрабатывающего предприятия, в составе которой используется установка обратного осмоса. Выявлены причины неудовлетворительной работы системы очистки и выработаны рекомендации по ее улучшению на основе оценки качества воды в пробах на стадиях водоочистки и оценки склонности исходной воды к образованию отложений на мембранах обратного осмоса. Целью работы является разработка эффективной технологии очистки высокоминерализованной воды, одновременно содержащей ионы аммония и железа, на основе исследования действующей системы очистки воды на предприятии. Подземные воды имеют хлоридно-сульфатный кальциево-магниевый тип и не отвечают требованиям к питьевой воде по мутности, общей минерализации, жесткости общей, аммоний, железу общему, силикатам, магнию, марганцу, натрию, стронцию и хлоридам. Показатели качества воды на различных стадиях водоподготовки определяли по стандартным методикам. Для анализа поверхности зерна фильтрующего материала применяли растровую электронную микроскопию высокого разрешения. Локальный анализ элементного состава зерна фильтрующего материала и осадка его поверхности проводили методом энергодисперсионной спектроскопии. Исследованы гипотетический состав подземных вод, качество воды на различных стадиях водоподготовки, рассчитаны индекс плотности осадка, индекс насыщения Ланжелье и энергия Гиббса углекислотного равновесия в аэраторе, проведена оценка работы аэрации. Выявлены причины снижения производительности установки обратного осмоса и частой замены загрузки напорных фильтров. Исследуемая вода, подаваемая на установку обратного осмоса, не удовлетворяет требованиям по жесткости общей, железу общему. Доказана недостаточность удельного расхода воздуха в аэраторе. Наблюдалась коагуляция зернистого фильтрующего материала карбонатом кальция и аморфным кремнием. Предложены технические решения повышения эффективности аэрации-дегазации и обезжелезивания на этапе предварительной очистки воды перед обратным осмосом. Предложенные решения будут актуальными для проектирования и эксплуатации технологических схем очистки подземных вод сложного состава.

Ключевые слова: высокоминерализованная подземная вода, обратный осмос, аэрация, индекс Ланжелье, аммоний, железо, Сорбент АС

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность инженеру А.В. Гацембилеру, специалисту по эксплуатации станции водоподготовки группы компаний “LD” (г. Челябинск) за содействие в исследовании и активное участие в сборе данных.

Для цитирования. Новосёлов М.Г., Белканова М.Ю. Исследование технологии очистки подземных вод с высоким содержанием железа, марганца и аммония // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2025. Т. 25, № 2. С. 51–61. DOI: 10.14529/build250207

Original article

DOI: 10.14529/build250207

STUDIES INTO THE TECHNOLOGY OF PURIFYING GROUNDWATER WITH A HIGH CONTENT OF IRON, MANGANESE, AND AMMONIUM

M.G. Novoselov¹, M.Yu. Belkanova²✉

¹ South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

✉ belkanovami@susu.ru

Abstract. The paper studies the operation of a highly mineralized water purification system with a reverse osmosis unit for the needs of a metalworking enterprise. It identifies the reasons for the unsatisfactory operation of the water purification system and develops recommendations for its improvement based on the assessment of water quality in samples at water treatment stages and the assessment of the tendency of the feed water to form silt on reverse osmosis membranes. The work aims to develop an effective technology for purifying highly mineralized water, which contains both ammonium and iron ions, based on the study of the existing water purification system at the enterprise. Groundwater is chloride-sulphate calcium-magnesium and does not meet the requirements for drinking water in terms of turbidity, total mineralization, total hardness, ammonium, total iron, silicates, magnesium, manganese, sodium, strontium, and chlorides. Standard methods were used to determine water quality indicators at various water treatment stages. High-resolution scanning electron microscopy was used to analyze the surface of the filter material grain. The elemental composition of the filter material grain and its surface sediment were analyzed locally using energy dispersive spectrometry. The hypothetical composition of groundwater and the quality of water at various water treatment stages were investigated; the silt density index, the Langelier index, and the Gibbs energy of carbon dioxide equilibrium in the aerator were calculated; the aeration system performance was assessed. The reasons for the performance slowdown of the reverse osmosis unit and the frequent replacement of the pressure filter media were identified. The tested water supplied to the reverse osmosis unit does not meet the requirements for total hardness and total iron. +The insufficiency of the specific air flow rate in the aerator was proven. Mudding of granular filter material with calcium carbonate and amorphous silicon was observed. Technical solutions are proposed to increase the efficiency of aeration-degassing and iron removal at the preliminary water purification stage before reverse osmosis. The proposed solutions will be relevant for the design and operation of process flows for complex groundwater purification.

Keywords: highly mineralized underground water, reverse osmosis, aeration, Langelier index, ammonium, iron, Sorbent AC

Acknowledgements. The authors express profound gratitude to A.V. Gatsembiler, water treatment plant engineer of the LD group of companies in Chelyabinsk, for his assistance in the study and active participation in data collection.

For citation. Novoselov M.G., Belkanova M.Yu. Studies into the technology of purifying groundwater with a high content of iron, manganese, and ammonium. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2025;25(2):51–61. (in Russ.). DOI: 10.14529/build250207

Введение

В некоторых районах при отсутствии сетей централизованного водоснабжения или дефиците поверхностных вод человек вынужден осваивать территории с подземными водами, непригодными для питьевого водоснабжения. Подземные воды могут содержать значительное количество диоксида углерода, железа, марганца, иона аммония, фтора, бария, кремния, мышьяка. Кроме того, вода в источнике может быть высокоминерализованная, содержать органические соединения, радон, альфа-активность. В некоторых случаях в подземных водах присутствует аммоний природного происхождения и аммоний антропогенного происхождения [1]. Сложный состав подземных вод может потребовать дорогостоящих технических решений. Сегодня метод обратного осмоса занял первое место в очистке подземных вод сложного состава, особенно для обессоливания [2–7]. Но обратный осмос требует качественной предочистки [2, 7], которая может быть основана на методах дегаза-

ции, обезжелезивания, деманганации, ионного обмена и др. Содержащиеся в воде растворенный диоксид углерода, ионы аммония придают воде свойства буферных растворов, затрудняя её обработку [8, 9]. Низкое содержание аммония и диоксида углерода в исходной воде является условием эффективного обезжелезивания и деманганации [10–12]. Аэрация подземных вод остается актуальным по сей день методом дегазации [10, 13] воды. С другой стороны, задача деаммонизации хорошо решается окислением хлором и адсорбцией на катионите, если в исходной воде отсутствуют ионы железа и кальция [12, 14]. Дегазация также рекомендуется при удалении аммония в виде аммиака из щелочной среды [15]. Высокое содержание в воде коллоидов кремния снижает эффективность обезжелезивания фильтрованием на каталитических загрузках [16] и повышает эффективность обезжелезивания коагуляцией. Поэтому сложный состав подземных вод – это не только высокие концентрации каких-либо компонентов, а ещё вза-

имное их влияние на процессы обработки воды. Таким образом, разработка эффективной технологии очистки высокоминерализованных вод, одновременно содержащих ионы аммония и железа, является сложной наукоёмкой задачей и может потребовать специальных исследований для выработки наилучшего технического решения. С такой задачей столкнулось челябинское металлообрабатывающее предприятие при очистке подземной воды для технических целей.

Целью данной работы является исследование опыта очистки высокоминерализованной воды, одновременно содержащей ионы аммония и железа. В исследовании выявляются причины неудовлетворительной работы водоподготовки и вырабатываются рекомендации по ее улучшению на основе оценки качества воды в пробах на стадиях обработки воды и оценки склонности исходной воды к образованию отложений [17] на мембранах установки обратного осмоса (УОО). Результаты исследования используются в разработке эффективной технологии очистки высокоминерализованных вод, одновременно содержащих ионы аммония и железа. Предложенные решения будут актуальными для проектирования и эксплуатации технологических схем очистки подземных вод сложного состава.

Материалы и методы

Установка для очистки воды

Объектом исследования является водоподготовительная установка (ВПУ), обеспечивающая

водой питьевого и технического качества металлообрабатывающее предприятие из скважины глубиной 80 метров и дебетом 198 м³/сут. Технологическая схема водоподготовки, представленная на рис. 1, включает УОО. Однако опыт эксплуатации показал неустойчивость работы УОО и неэффективность предварительной очистки от железа. Основные технические характеристики системы водоподготовки представлены в табл. 1. При эксплуатации ВПУ были выявлены следующие проблемы: быстрое загрязнение полипропиленовых картриджей префильтров УОО отложениями соединений железа и заметный рост сопротивления префильтра; снижение производительности УОО; отложения на мембранах, удаляемые при химической мойке; замена загрузки напорных фильтров-осветлителей каждые 6 месяцев.

Исходная вода с расходом 5,6 м³/ч подается через фильтры механической очистки ФМО 1–2 в безнапорный аэратор барботажного типа, предварительно в воду дозируется раствор гидроксида натрия 80–90 мг/л по активному веществу насосом-дозатором НД 1. Аэрированная вода насосом второго подъема НС 2 подается через контактные камеры КК 1–2 на фильтры-осветлители ФО 1–4 с каталитической загрузкой Сорбент АС. Осветленная и обезжелезенная вода подается на мембранные установки УОО 1 и 2, одновременно вводится ингибитор солеотложения Аминат К с дозировкой 10 мг/л по активному веществу. На входе в мембранную установку вода проходит фильтрацию на префильтре 5 мкм. Пермеат поступает в резервуа-

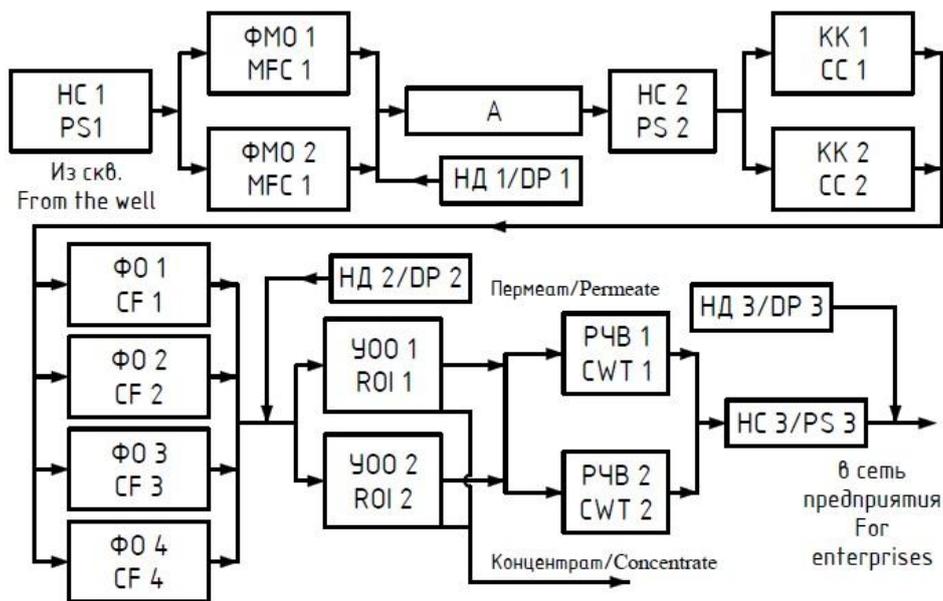


Рис. 1. Технологическая схема ВПУ:

НС 1 – насосная станция первого подъема воды из скважины; ФМО 1, ФМО 2 – фильтры механической очистки, 130 мкм; А – аэратор 3 м³ для насыщения воды кислородом воздуха; НС 2 – насосная станция второго подъема; КК 1, КК 2 – контактная камера; ФО 1–ФО 4 – фильтры-осветлители с каталитической загрузкой; УОО 1, УОО 2 – установки обратного осмоса со встроенным префильтром; РЧВ 1, РЧВ 2 – резервуары чистой воды; НС 3 – насосная станция третьего подъема; НД 1 – насос дозирования едкого натра; НД 2 – насос дозирования Амината К; НД 3 – насос дозирования известкового молока

Таблица 1

Характеристики водоподготовительной установки

Наименование характеристики	Значение
Производительность станции, м ³ /сут	120,0
Максимальный часовой расход, м ³ /ч	5,0
Количество установок обратного осмоса, шт.	2
Подмес исходной воды, %	0,0
Расход фильтрата (пермеата), м ³ /ч	1,6
Сброс концентрата, м ³ /ч	0,9
Степень извлечения пермеата, %	64
Максимальный суточный объем стоков, м ³ /сут	21,6
Максимальный забор воды из скважин, м ³ /сут	134,4
Часовой расход исходной воды, м ³ /ч	5,6
Расход воздуха на аэрацию, м ³ /ч	12,0
Удельный расход воздуха, м ³ /м ³	2,14

ры чистой воды РЧВ 1–2, а концентрат сбрасывается в канализацию. Обессоленная вода подается насосной станцией третьего подъема НС 3 в сеть технического водоснабжения предприятия, при этом вода стабилизируется раствором кальцинированной соды дозировкой 80–90 мг/л по активному веществу насосом-дозатором НД 3.

УОО представлена моделью RO4040-8-8. HRLE и содержит восемь мембранных элементов низкого давления.

Характеристика воды из скважины

Анализ качества подземных вод, предоставленный службой эксплуатации ВПУ, представлен в табл. 2.

По материалам архива Челябинского филиала Федерального бюджетного учреждения «Территориальный фонд геологической информации по Уральскому федеральному округу» гидрологические изыскания в районе расположения подземного водоисточника показали, что подземные воды, вскрытые скважиной в 2014 г., имели хлоридно-карбонатный кальциево-натриевый тип и не отвечали требованиям к воде хозяйственно-питьевого назначения с превышением нормы: железа – 50 мг/л; аммония – 7,5 мг/л; кремния – 16 мг/л; марганца – 0,47 мг/л; магния – 133,7 мг/л; хлоридов – 1245 мг/л; сульфатов – 1000 мг/л (К.П. Лозовой. Отчет «Проведение поисковых и оценочных работ на подземные воды на участке «Енисей-

Таблица 2

Показатели качества исходной воды

Наименование показателя	Единицы измерения	Значение	Требования к питьевой воде по СанПиН 1.2.3685-21
Цветность	град	5,2 ± 2,1	≤ 20
Мутность	ЕМФ	84 ± 12	≤ 1,5
Водородный показатель	ед. рН	6,8 ± 0,15	6–9
Общая минерализация	мг/л	5692 ± 280	≤ 1000
Жесткость общая	мг-экв/л	53 ± 5,8	≤ 7
Окисляемость перманганатная	мг О/л	3,9 ± 0,4	≤ 5
Щелочность общая	мг-экв/л	4,6 ± 0,6	не нормируется
Аммоний	мг/л	17,3 ± 2,4	≤ 1,5
Железо общее	мг/л	8,1 ± 0,7	≤ 0,3
Кальций	мг/л	561 ± 62	не нормируется
Силикаты (по кремнию)	мг/л	16 ± 1	≤ 10
Магний	мг/л	302 ± 45	≤ 50
Марганец	мг/л	1,55 ± 0,26	≤ 0,1
Натрий	мг/л	325 ± 33	≤ 200
Стронций	мг/л	12,6 ± 1,3	≤ 7
Гидрокарбонаты	мг/л	281 ± 28	не нормируется
Нитриты	мг/л	0,12 ± 0,06	≤ 3,3
Нитраты	мг/л	22 ± 3,3	≤ 45
Сульфаты	мг/л	324 ± 86	≤ 500
Хлориды	мг/л	1720 ± 86	≤ 350

ский», расположенном в Ленинском районе г. Челябинска, по состоянию на 01.02.2014 г.» Лицензия ЧЕЛ02489ВП. Текст и текстовые приложения, г. Челябинск. 2014 г.). При этом за четыре месяца наблюдений анионный состав подземных вод изменился с хлоридно-сульфатного на хлоридно-гидрокарбонатный, отмечалось резкое ухудшение органолептических показателей и повышение содержания железа с 7 до 50 мг/л. Химический состав воды исследуемого водоисточника (рис. 2) аналогичен составу подземных вод, представленному в архивных материалах территориального фонда геологической информации.

Ca ²⁺		Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺
HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	
Ca(HCO ₃) ₂	CaSO ₄	CaCl ₂	MgCl ₂
			NaCl; KCl

Рис. 2. Гипотетический солевой состав исходной воды

Подземные воды имеют хлоридно-сульфатный кальциево-магниевый тип и не отвечают требованиям СанПиН 1.2.3685-21 по следующим показателям: мутность, общая минерализация, жесткость общая, аммоний, железо общее, силикаты, магний, марганец, натрий, стронций, хлориды.

Содержание свободной углекислоты CO₂ в исходной воде определяется из уравнения первой ступени диссоциации угольной кислоты для интервала значений pH 5–8,4 по следующему выражению [15]:

$$[CO_2] = \frac{44 \cdot \text{Щ}_o}{K_1 \cdot 10^{pH+0,5\sqrt{\mu}}} = \frac{44 \cdot 4,6}{3,39 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{6,7+0,5\sqrt{0,1563}}} = 75,6 \text{ мг/л,}$$

где Щ_o = 4,6 – щелочность общая исходной воды, мг-экв/л; μ = 0,1563 – ионная сила исходной воды; K₁ = 3,39 · 10⁻⁷ – константа равновесия первой ступени диссоциации угольной кислоты при температуре исходной воды 9,5 °С.

Методы исследования

Показатели качества воды на различных стадиях водоподготовки определяли по стандартным методикам ГОСТ Р 51232–98.

Для анализа поверхности зерна фильтрующего материала применяли растровую электронную микроскопию высокого разрешения, локальный анализ элементного состава зерна и осадка на зерне фильтрующего материала проводили методом энергодисперсионной спектроскопии (EDX).

Используемые приборы и оборудование: ртутный лабораторный термометр по ГОСТ 215-73 с ценой деления 0,1 °С, пределы измерения 0–50 °С; микропроцессорный высокоточный ОВП-метр ОРР-169-Е; рН-метр рН-150МИ с датчиком ТДЛ-1000-06; фотометр фотоэлектрический КФК-3; кондуктометр АНИОН 4120 с датчиком ДКВ-1, комплекс сканирующей электронной микроскопии Jeol JSM 700IF, EDS Oxford INCA X-max 80, WDS Oxford INCA WAVE, EBSD и HKL.

Вычисление индекса плотности осадка (SDI) воды на входе в УОО проводили по методике, описанной в [4], при давлении 2,07 бара (0,21 МПа). В каждом опыте воду объемом 500 мл пропускали через калиброванную мембрану 0,45 мкм. Время, затраченное на отбор 500 мл фильтрата, фиксировали.

Индекс насыщения Ланжелье (LSI) вычисляли по выражению

$$LSI_{конц} = pH_{конц} - pH_{насыщ},$$

где pH_{конц} – водородный показатель концентрата установки обратного осмоса; pH_{насыщ} – расчетный водородный показатель насыщенного раствора, который определяется с учетом номограммы [17] согласно выражению

$$pH_{насыщ} = f_1(t) - f_2(Ca^{2+}) - f_3(\text{Щ}) + f_4(P),$$

где f₁(t) – функция температуры воды; f₂(Ca²⁺) – функция содержания в воде катиона кальция в мг/л; f₃(Щ) – функция щелочности воды; f₄(P) – функция общего соледержания воды.

Аэрактор предназначен для удаления свободной углекислоты CO₂ и насыщения исходной воды кислородом воздуха, это необходимое условие для процесса гидратации железа (II). Если рассматривать природную воду как гидрокарбонатный буферный раствор с системой равновесия между растворенным углекислым газом CO₂, гидрокарбонат-ионом HCO₃⁻ и карбонат-ионом CO₃²⁻, то процесс аэрации может нарушать это равновесие, изменяя концентрацию углекислоты [8, 9]. Оценить углекислотное равновесие при аэрации предлагается расчётом изменения концентраций [CO₂], [HCO₃⁻] и [CO₃²⁻], а также расчётом изменения энергии Гиббса, которая является условием диссоциации угольной кислоты по уравнению H₂CO₃ = H₂O + CO₂ = H⁺ + HCO₃⁻ = 2H⁺ + CO₃²⁻.

Формулы для расчета концентраций с учетом констант равновесия при диссоциации в две стадии [8, 9]:

$$[HCO_3^-] = \frac{\text{Щ}_o[H^+]}{K_{д2}+[H^+]}; [CO_2] = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{K_{д1}};$$

$$[CO_3^{2-}] = \text{Щ}_o - [HCO_3^-];$$

$$K_{д1} = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[CO_2]} = 4,45 \cdot 10^{-7};$$

$$K_{д2} = \frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = 5,60 \cdot 10^{-11}.$$

Аэрирование воды приводит к уменьшению энергии Гиббса. Рассчитать её можно по известным концентрациям по формуле

$$\Delta G_{298,15}^0 = -527,6[CO_3^{2-}] + 623,3[CO_2].$$

Результаты и обсуждение

Технологическая схема содержит две установки обратного осмоса, что повышает её надежность. Степень отбора пермеата по данным табл. 1 составляет 64 %. Экономически эффективная эксплуатация УОО начинается со степени отбора пермеата 70 % и выше [18]. Чем выше селективность мембран и степень извлечения пермеата, тем выше вероятность и интенсивность появления отложений [18–21].

Результаты эксперимента по определению SDI для воды на входе в УОО представлены в табл. 3. Показатели практически одинаковы для обеих установок и усреднены по значению для удобства дальнейшего расчета, температура воды при заборе проб составила 10 °С.

Расчет индекса плотности осадка SDI:

$$SDI_5 = \frac{100}{T} \left(1 - \frac{t_1}{t_5}\right) = \frac{100}{5} \left(1 - \frac{40}{60}\right) = 6,7;$$

$$SDI_{10} = \frac{100}{T} \left(1 - \frac{t_1}{t_{10}}\right) = \frac{100}{10} \left(1 - \frac{40}{90}\right) = 5,5;$$

$$SDI_{15} = \frac{100}{T} \left(1 - \frac{t_1}{t_{15}}\right) = \frac{100}{15} \left(1 - \frac{40}{115}\right) = 4,35.$$

Для устойчивой работы УОО необходимо обеспечить индекс SDI подаваемой воды не выше 3 [4, 6, 17, 22]. Индекс плотности осадка SDI_{15} находится в пределах допустимого $3 \leq SDI_{15} \leq 5$, но в зоне нестабильной работы. Вода, подаваемая

на УОО, при значении SDI 3–5 считается проблемной.

Для расчета LSI выполнен отбор проб исходной воды, воды после аэрации, воды после фильтрования (на входе в УОО), пермеата и концентрата. Лабораторные исследования качества воды в пробах представлены в табл. 4. Показатели практически одинаковы для обеих установок и усреднены по значению для удобства дальнейшего расчета.

По данным табл. 4 видно, что температура воды растет по мере прохождения воды от стадии к стадии обработки воды, что является закономерным. Однако отсутствие разницы температуры воды при аэрации поднимает вопрос о качестве процесса аэрации, потому что обильная продувка воды воздухом комнатной температуры повышает температуру аэрируемой воды. Контактные камеры КК 1–2, выполненные из корпусов напорных фильтров, избыточны в данном случае, так как процесс подщелачивания протекает быстро.

Исходная вода, вода после аэрации и дозации гидроксида натрия, а также вода после фильтрации согласно значениям ОВП до 100 мВ имеют переходный окислительно-восстановительный характер среды и содержат преимущественно железо (II). Закономерное увеличение ОВП при аэрации до 6 мВ связано с обогащением воды кислородом и удалением свободной двуокиси углерода [10]. Водородный показатель равномерно растет в предпочтиске и резко падает в пермеате до величины 5,8, поскольку мембраны УОО удаляют бикарбонаты, но не удаляют углекислый газ.

Небольшое снижение щелочности общей при каталитическом фильтровании для реакции обезжелезивания допустимо [10, 15, 16], так как при

Таблица 3

Время фильтрования проб для расчета SDI

Проба	t_1	t_5	t_{10}	t_{15}
Время, с	40	60	90	115

Таблица 4

Лабораторный анализ качества воды

Показатель	Точка отбора воды				
	Исходная	После аэратора	Поступающая на УОО	Пермеат	Концентрат
Температура, °С	9,5	9,5	10,0	14,0	10,5
ОВП, мВ	72	78	108	150	152
pH	6,8	7,4	7,5	5,8	7,6
Общее солесодержание, мг/л	6875	6934	6913	64	16525
Жесткость общая, мг-экв/л	48	48	48	0,3	120
Жесткость кальциевая, мг-экв/л	26	26	26	0,2	56
Щелочность общая, мг-экв/л	4,6	5,5	5,2	0,1	12,3
Железо общее, мг/л	8,1	7,4	1,3	0,4	1,4
Марганец, мг/л	0,1	–	–	–	–
Ион аммония, мг/л	10,9	9,0	11,0	0,4	33,3

окисления и гидратации железа (II) происходит расход гидрокарбонатов с выделением CO_2 .

Снижение железа общего при аэрации с 8,1 мг/л до 7,4 мг/л сопровождается образованием осадка гидроксида железа (III). Далее снижение концентрации железа общего обеспечивает фильтр с каталитической загрузкой до значения 1,3 мг/л, что является недостаточным и снижает производительность УОО. Содержание марганца в пробе исходной воды оказалось близким к нулю по сравнению с анализом исходной воды, сделанным до запуска установки в эксплуатацию. Вероятно, снижение марганца в пробах воды связано с гидрогеологией участка и не связано с методами и средствами измерения.

С учетом погрешности измерения содержание аммония при аэрации и фильтрации не изменяется. Одновременное присутствие ионов аммония и железа снижает эффективность удаления этих ионов [11, 12]. Обессоливание воды на мембране снижает содержание аммония до величины 0,4 мг/л.

Согласно номограммам [17] имеем индекс насыщения концентрата $\text{LSI} = 0,65$. Значит, возможно образование осадка карбоната кальция на мембранах.

Согласно расчетам (табл. 5), гидрокарбонатное равновесие смещается в сторону образования карбонатов, но pH еще не достигает критического значения 8,3, поэтому количество карбонатов незначительно. Снижение энергии Гиббса подтверждает процесс декарбонизации.

При дозировании в исходную воду гидроксида натрия происходит нейтрализация части диоксида углерода с образованием гидрокарбоната натрия, кроме того, щелочь может расходоваться на осаждение магния и железа (II). Уравнение материального баланса для расчета дозы едкого натра q_{NaOH} , мг/л, имеет вид

$$q_{\text{NaOH}} = M(\text{NaOH}) \cdot \left(\text{Щ}_o + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{CO}_2] + \frac{[\text{Fe}_{\text{общ}}]}{M(\text{Fe}^{2+})} \right),$$

где $M(\text{NaOH}) = 40 \frac{\text{мг}}{\text{ммоль}}$, $M(\text{Fe}^{2+}) = 27,93 \frac{\text{мг}}{\text{ммоль}}$.

Учитывая результаты анализов проб в табл. 4 и 5, можно определить, что концентрация магния $[\text{Mg}^{2+}]$ не меняется в пробах, а изменение происходит по щелочности общей Щ_o , концентрации диоксида углерода $[\text{CO}_2]$ и железу общему $[\text{Fe}_{\text{общ}}]$, тогда расход гидроксида натрия составит

$$q_{\text{NaOH}} = 40((5,5 - 4,6) + (1,64 - 0,49) + \left(\frac{8,1-7,4}{27,93}\right)) \approx 83 \text{ мг/л.}$$

Результат расчета количества гидроксида натрия соответствует режиму дозирования реагента 80–90 мг/л по активному веществу. Этот результат также свидетельствует о том, что процесс удаления уголекислоты в аэраторе реализован химическим методом, в то время как удаление уголекислоты аэрацией не существенно. Причиной неэффективной работы физического метода дегазации может являться низкий удельный расход воздуха ($2,14 \text{ м}^3/\text{м}^3$). Удельный расход воздуха для аэратора является ключевым технологическим параметром процесса дегазации-аэрации. Например, для вентиляторной градирни необходимый расход воздуха составляет 4–5 м^3 на 1 м^3 воды в процессе обезжелезивания воды аэрацией, для барботажных дегазаторов – 10 $\text{м}^3/\text{м}^3$ [15]. Авторы способа обезжелезивания [23] рекомендуют эффективный удельный расход воздуха 4–10 м^3 на 1 м^3 воды. При удельном расходе воздуха менее 4 $\text{м}^3/\text{м}^3$ происходит недостаточное окисление железа и марганца кислородом воздуха. При удельном расходе воздуха более 10 $\text{м}^3/\text{м}^3$ растут энергозатраты на компримирование воздуха без заметного улучшения качества очистки воды. Время оборота воды в аэраторе составит 3 $\text{м}^3 / 5,6 \text{ м}^3/\text{ч} \approx 32$ мин, что сопоставимо со временем окисления и гидратации железа (II) – 30–40 мин [15]. Но при щелочении эта реакция протекает быстрее и в аэраторе накапливается осадок гидроксилов железа.

Надежная работа УОО зависит от соблюдения норм качества подаваемой на установку воды [6]. В табл. 6 представлено сравнение качества воды, поступающей на УОО, с рекомендованными значениями [6]. Исследуемая вода не удовлетворяет требованиям по следующим показателям: жесткость общая, железо общее.

Технологическая схема ВПУ включает этап предочистки от железа на фильтрах осветлителях ФО1–ФО4 с каталитической загрузкой Сорбент АС (см. рис. 1). Морфология поверхности зерна Сорбента АС 0,7–1,4 и осадка на зерне сорбента после 6 месяцев эксплуатации представлены на рис. 3. В табл. 7 представлен элементный состав зерна и осадка на зерне сорбента после 6 месяцев эксплуатации. Отработанный сорбент перед исследованием предварительно промывает в дистиллированной воде и просушен при 120 °С.

Морфология и элементный состав в сравнении показывают, что относительно однородная поверхность зерна сорбента с небольшим содержанием железа и кальция покрыта трещиноватым

Таблица 5

Результаты расчёта уголекислотного равновесия при аэрации

Проба	$[\text{HCO}_3^-]$, мг-экв	$[\text{CO}_2]$, мг-экв/л	$[\text{CO}_3^{2-}]$, мг-экв/л	ΔG , кДж/моль
Исходная вода	4,6	1,64	0,0016	1019,9
Вода после аэрации	5,5	0,49	0,0077	302,2

Качество воды, поступающей на УОО

Наименование показателя	Единицы измерения	Качество исходной воды	Качество воды перед УОО	Требования к воде, подаваемой на УОО, не более
Взвешенные вещества	мг/л	148,3	< 1	0,6
Жесткость общая	мг-экв/л	53	48	20
Общее солесодержание (сухой остаток)	мг/л	6875 (5692)	6913	50 000
Цветность	градус	5,2	1	3
pH	ед. pH	7,35	7,5	3 – 10
Коллоидный индекс (SDI)	мг/л	–	4,35	до 5
Железо общее	мг/л	7,1	1,3	0,1
Нефтепродукты	мг/л	–	–	отсутствие
Сероводород	мг/л	нет	нет	отсутствие
Свободный активный хлор	мг/л	нет	нет	0,1
Окисляемость перманганатная	мг О/л	3,9	1,3	2,0

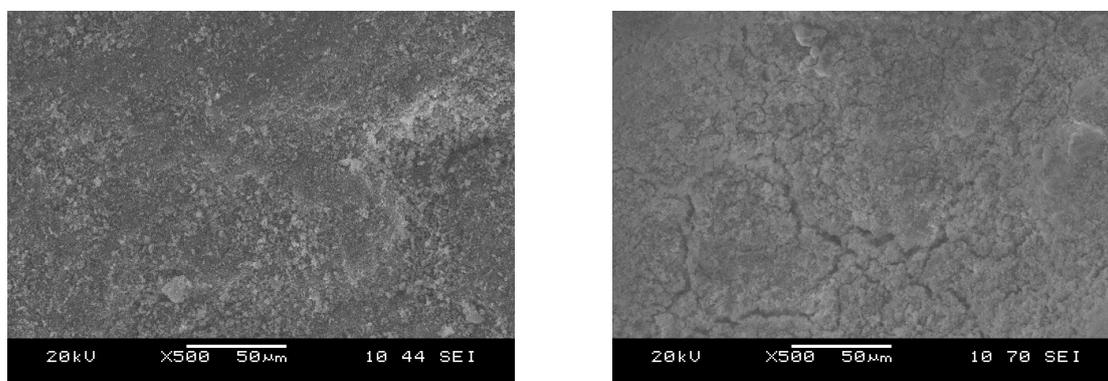


Рис. 3. Поверхность зерна сорбента (слева) и осадка на сорбенте (справа)

Элементный состав зерна сорбента (1) и осадка на сорбенте (2), %

Таблица 7

	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe
1	–	39,73	0,82	4,26	49,4	–	1,22	0,68	–	3,89
2	13,0	44,7	0,11	–	6,85	0,12	–	11,4	0,18	23,64

слоем с большим содержанием железа, кальция, кислорода и углерода. Сорбент – алюмосиликат – прирастает небольшим количеством кремния. Согласно данным табл. 7, отложения на сорбенте представлены карбонатами, силикатами железа, марганца и кальция.

Выводы

Вода подземного источника, исследуемая ВПУ, имеет хлоридно-сульфатный кальциево-магниевый тип и относится к высокоминерализованным водам со значительным содержанием железа, магния, аммония. Кроме этого, в воде высокое содержание стронция и свободного диоксида углерода. Сложный химический состав воды вызывает затруднения с выбором подходящих методов очистки воды, вносит погрешность в результаты измерения показателей качества проб.

Высокая жесткость 48 мг-экв/л и положительный индекс Ланжелье 0,65 в сочетании с остаточным содержанием железа 1,3 мг/л после предочистки являются основной причиной понижения производительности УОО и частого применения химической мойки мембран.

Технологическая схема предочистки не решает задачу снижения жесткости общей. Предочистка реализована по традиционному методу обезжелезивания – аэрация с последующим одноступенчатым фильтрованием на каталитической загрузке Сорбент АС, метод усилен подщелачиванием. Обычно в схемах предочистки используют ступень Na-катионирования для предварительного умягчения. Однако высокие эксплуатационные затраты на покупку и хранение поваренной соли нерациональны и неприемлемы для предприятия. Вопрос рентабельного снижения

жесткости общей требует дополнительной проработки.

В технологической схеме в одном аппарате – аэраторе – совмещены химический и физический методы удаления углекислоты. Целесообразнее их разделить, а подщелачивание организовать после аэратора. В контактных камерах нет необходимости, так как процесс подщелачивания протекает быстро.

Эффективность работы аэратора недостаточна. Для улучшения удаления углекислоты необходимо повысить удельный расход воздуха до $4 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и более. Кроме того, для воды, содер-

жащей аммоний, можно рекомендовать вторую ступень аэрации для удаления аммиака при pH 9.

Снижение эффективности обезжелезивания вызвано коагуляцией зернистого фильтрующего материала карбонатом кальция и аморфным кремнием в течение полугода эксплуатации, а также наличием в исходной воде иона аммония. Не исключено наличие органических соединений. Необходимо применить зернистый фильтрующий материал с низкой пористостью, например, кварцевый песок, и предусмотреть связывание аммония и органических соединений хлором до поступления воды на УОО.

Список литературы

1. Тырина Н.С. Исследование механизма и параметров сорбции аммония на юрских глинистых породах Московского региона // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2009. № 2. С. 136–142.
2. Дытнерский Ю.И. Обратный осмос и ультрафильтрация. М.: Химия, 1978. 351 с.
3. Хванг С.Т. Мембранные процессы разделения / пер. с англ. Е.П. Моргуновой, Ю.Н. Жилина; под ред. Ю.И. Дытнерского. М.: Химия, 1981. 464 с.
4. Федоренко В.И. Основные критерии для технологического расчета и эксплуатации мембранных систем водоподготовки // *Мембраны*. 2003. Т. 17, № 1. С. 22–29.
5. Подходы к проектированию и оптимизации водоподготовительных установок, основанных на интегрированных мембранных технологиях / А.А. Пантелеев, В.Ф. Очков, К.А. Орлов, С.С. Гавриленко // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2013. № 6 (86). С. 14–18.
6. Жадан А.В., Бушуев Е.Н. Обоснование выбора схемы предварительной обработки воды на ТЭС на основе метода ультрафильтрации // *Вестник ИГЭУ*. 2014. № 2. С. 1–5.
7. Новосёлов М.Г., Белканова М.Ю. Технологический анализ работы установки обратного осмоса на подземном водозаборе // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. 2021. Т. 21, № 2. С. 60–68. DOI: 10.14529/build210206
8. Рушников А.Ю. Влияние аэрации на углекислотное равновесие в воде. Часть 1 // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. 2015. № 11 (167). С. 32–35.
9. Рушников А.Ю. Влияние аэрации на углекислотное равновесие в воде. Часть 2 // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. 2016. № 2 (170). С. 30–35.
10. Золотова Е.Ф., Асс Г.Ю. Очистка воды от железа, фтора, марганца и сероводорода. М.: Стройиздат, 1975. 176 с.
11. Лифшиц О.В. Справочник по водоподготовке котельных установок. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1976. 288 с.
12. Ramune` Albrektiene, Mindaugas Rimeika, Birute` Tamulaitiene` and Violeta Voišniene, Technology for treatment of groundwater simultaneously containing iron, manganese, ammonium and organic matter // *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*. 2017. Vol. 66, no. 8, pp. 665–672, DOI: 10.2166/aqua.2017.017, URL: <http://iwaponline.com/aqua/article-pdf/66/8/665/223234/jws0660665.pdf>
13. Дзюбо В.В., Алферова Л.И. Оценка способов дегазации-аэрации подземных вод // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2008. № 2 (2). С. 58–62.
14. Никашина В.А., Серова И.Б., Кац Э.М. Очистка артезианской питьевой воды от иона аммония на природном клиноптилолитсодержащем туфе. Математическое моделирование и расчет процесса сорбции // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2008. Т. 8, № 1. С. 23–29.
15. Клячко В.А., Апельцин И.Э. Очистка природных вод. М.: Стройиздат, 1971. 580 с.
16. Николадзе Г.И. Обезжелезивание природных и оборотных вод. М.: Стройиздат, 1978. 161 с.
17. Рушников А.Ю. О некоторых особенностях расчёта индекса стабильности воды Ланжелье // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. 2017. № 7 (187). С. 24–29.
18. Спицов Д.В., Андрианов А.П. Совершенствование конструкции мембранных аппаратов с целью сокращения эксплуатационных затрат при эксплуатации мембранных установок // *Успехи современной науки*. 2017. Т. 4, № 2. С. 41–44.
19. Севрюкова Е.А., Меркулова А.И. Разработка средств предотвращения отложений в установках обратного осмоса // *Актуальные проблемы повышения эффективности производств микроэлектроники: сб. науч. тр.; под ред. В.И. Каракеяна*. М., 2016. С. 117–124.

20. Влияние выбора антискаланта на величину эксплуатационных затрат для установок обратного осмоса / В.А. Головесов, А.Г. Першов, Г.Д. Сухов, Г.Я. Рудакова // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15, № 8. С. 1163–1174.

21. Спицов Д.В., Ширкова Т.Н., Первов А.Г. Радикальное сокращение расходов воды на собственные нужды установок подготовки питьевой воды из подземных водоисточников // Инновации и инвестиции. 2020. № 1. С. 316–323.

22. Нахабо А.В. Самаркина Е.В. Исследование проблемы повышенных расходов воды мембранных установок на собственные нужды // Вестник ИрГТУ. 2015. № 9 (104). С. 151–155.

23. Патент № 2285669С1 Российская Федерация. Способ очистки подземных вод от железа, марганца и солей жесткости: № 2005114564/15/: заявл. 14.05.2005; опубл. 20.10.2006 / М.Г. Журба, Ж.М. Говорова, О.Б. Говоров, Э.Г. Амосова, П.И. Долгополов, В.А. Роговой, С.П. Журавлёв. 9 с.

References

1. Tyrina N.S [Study of the mechanism and parameters of ammonium sorption on Jurassic clay rocks of the Moscow region]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya* [Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology], 2009, no. 2, pp. 136–142. (in Russ.)

2. Dytnerskiy Yu. I. *Obratnyy osmos i ul'trafil'tratsiya* [Reverse osmosis and ultrafiltration]. Moscow: Chemistry, 1978. 351 p. (in Russ.)

3. Khvang S.T. *Membrannyye protsessy razdeleniya* [Membrane Separation Processes]. Tr. from engl. by E.P. Morgunova, Yu.N. Zhilin; ed. Yu.I. Dytnerskiy. Moscow: Chemistry, 1981. 464 p. (in Russ.)

4. Fedorenko V.I. [Main criteria for technological calculation and operation of membrane water treatment systems]. *Membrany* [Membranes], 2003, vol. 17, no. 1, pp. 22–29. (in Russ.)

5. Panteleyev A.A., Ochkov V.F., Orlov K.A., Gavrilenko S.S. [Approaches to the design and optimization of water treatment plants based on integrated membrane technologies]. *Energoberezheniye i vodopodgotovka* [Energy Saving and Water Treatment], 2013, no. 6 (86), pp. 14–18. (in Russ.)

6. Zhadan A.V., Bushuyev Ye.N. [Substantiation of the choice of a scheme for preliminary water treatment at thermal power plants based on the ultrafiltration method]. *Vestnik ISPU* [Proceedings of the Ivanovo State Power Engineering University], 2014, no. 2, pp. 1–5. (in Russ.)

7. Novosolov M.G. Belkanova M.Yu. [Technological analysis of the operation of a reverse osmosis plant at an underground water intake]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 60–68. (in Russ.) DOI: 10.14529/build210206

8. Rushnikov A.Yu. [Effect of aeration on carbon dioxide balance in water. Part 1]. *Santekhnika, Otopleniye, Konditsionirovaniye* [Plumbing, Heating, Air conditioning], 2015, no. 11 (167), pp. 32–35. (in Russ.)

9. Rushnikov A.Yu. [Effect of aeration on carbon dioxide balance in water. Part 2]. *Santekhnika, Otopleniye, Konditsionirovaniye* [Plumbing, Heating, Air conditioning], 2016, no. 2 (170), pp. 30–35. (in Russ.)

10. Zolotova Ye.F., Ass G.Yu. *Ochistka vody ot zheleza, ftora, margantsa i serovodoroda* [Water purification from iron, fluorine, manganese and hydrogen sulfide]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975. 176 p. (in Russ.)

11. Lifshits O.V. *Spravochnik po vodopodgotovke kotel'nykh ustanovok* [Reference book on water treatment of boiler installations]. 2nd ed., processed and additional. Moscow: Energiya, 1976, 288 p. (in Russ.)

12. Ramune` Albrektiene, Mindaugas Rimeika, Birute` Tamulaitiene` and Violeta Voišniene,` Technology for treatment of groundwater simultaneously containing iron, manganese, ammonium and organic matter. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 2017, vol. 66, no. 8, pp. 665–672, DOI: 10.2166/aqua.2017.017, URL: <http://iwaponline.com/aqua/article-pdf/66/8/665/223234/jws0660665.pdf>

13. Dzyubo V.V., Alferova L.I. [Assessment of methods of degassing-aeration of groundwater]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye* [Water Purification. Water Treatment. Water Supply], 2008, no. 2 (2), pp. 58–62. (in Russ.)

14. Nikashina V.A., Serova I.B., Kats E.M. [Purification of artesian drinking water from ammonium ion on natural clinoptilolite-containing tuff. Mathematical modeling and calculation of the sorption process]. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy* [Sorption and Chromatographic Processes], 2008, vol. 8, no. 1, pp. 23–29. (in Russ.)

15. Klyachko V.A., Apel'tsin I.E. *Ochistka prirodnykh vod* [Purification of natural waters]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971. 580 p. (in Russ.)

16. Nikoladze G.I. *Obezzelezivaniye prirodnykh i oborotnykh vod* [Deferrization of natural and circulating waters]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978. 161 p. (in Russ.)

17. Rushnikov A.Yu. [On some features of the calculation of the Langelier water stability index]. *Santekhnika, Otopleniye, Konditsionirovaniye* [Plumbing, Heating, Air Conditioning], 2017, no. 7 (187), pp. 24–29. (in Russ.)

18. Spitsov D.V., Andrianov A.P. [Improving the design of membrane devices in order to reduce operating costs in the operation of membrane plants]. *Uspekhi sovremennoy nauki* [Advances in Modern Science], 2017, vol. 4, no. 2, pp. 41–44. (in Russ.)

19. Sevryukova Ye.A., Merkulova A.I. [Development of means to prevent deposits in reverse osmosis plants]. *Aktual'nyye problemy povysheniya effektivnosti proizvodstv mikroelektroniki. Sbornik nauchnykh trudov*. [Actual problems of increasing the efficiency of microelectronics production. Collection of scientific papers]. Ed. V.I. Karakeyana. Moscow, 2016, pp. 117–124. (in Russ.)

20. Golovesov V.A., Pershov A.G., Sukhov G.D., Rudakova G.YA. [Influence of the choice of antiscalant on the value of operating costs for reverse osmosis plants]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of the MGSU], 2020, vol. 15, no. 8, pp. 1163–1174. (in Russ.)

21. Spitsov D.V., Shirkova T.N., Pervov A.G. [Radical reduction of water consumption for own needs of installations for the preparation of drinking water from underground water sources]. *Innovatsii i investitsii* [Innovation and Investment], 2020, no. 1, pp. 316–323. (in Russ.)

22. Nakhabo A.V., Samarkina Ye.V. [Study of the problem of increased water consumption of membrane plants for own needs]. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of the Irkutsk State Technical University], 2015, no. 9 (104), pp. 151–155. (in Russ.)

23. Zhurba M.G., Govorova Zh.M., Govorov O.B., Amosova E.G., Dolgoplov P.I., Rogovoy V.A., Zhuravlov S.P. *Sposob ochistki podzemnykh vod ot zheleza, margantsa i soley zhestkosti* [Method for purification of groundwater from iron, manganese and hardness salts]. Patent RF no RU 2285669C1, № 2005114564/15; application 14.05.2005. published 20.10.2006, 9 p. (in Russ.)

Информация об авторах:

Новосёлов Максим Григорьевич, аспирант, Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия; maximnovoselov220@gmail.com

Белканова Марина Юрьевна, кандидат химических наук, доцент кафедры «Градостроительство, инженерные сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; belkanovami@susu.ru

Information about the authors:

Maxim G. Novoselov, postgraduate, South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia; maximnovoselov220@gmail.com

Marina Yu. Belkanova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Town Planning, Engineering Networks and Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; belkanovami@susu.ru

Статья поступила в редакцию 22.01.2025, принята к публикации 03.02.2025.

The article was submitted 22.01.2025, approved after reviewing 03.02.2025.