

## МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 628.112

doi: 10.31774/2712-9357-2026-16-2-167-189

### Исследование оптимальных параметров вакуумно-эжекционного окислителя для обезжелезивания и деманганации подземных вод

Ольга Николаевна Вольская<sup>1</sup>, Александр Алексеевич Пахомов<sup>2</sup>,  
Сергей Викторович Тронеv<sup>3</sup>, Алексей Александрович Чураков<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup>Волгоградский государственный технический университет, Волгоград,

Российская Федерация

<sup>2,3</sup>Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград,

Российская Федерация

<sup>1</sup>volskaya\_o\_8@mail.ru

<sup>2</sup>pahomoff.1954@yandex.ru

<sup>3</sup>stronev@mail.ru

<sup>4</sup>alexei.churakov@yandex.ru

**Аннотация.** **Цель:** определение оптимальных параметров вакуумно-эжекционного окислителя для обезжелезивания и деманганации подземных вод. **Материалы и методы.** Авторами исследовался безреагентный вакуумно-эжекционный окислитель, работа проводилась с подземными водами заволжской зоны Волгоградской области, для которых характерно большое содержание железа (Fe), достигающее 30 мг/л и более, а также содержание марганца (Mn) 3 мг/л и более. Теоретические исследования вакуумно-эжекционного окислителя проводились по плану Рехтшафнера для четырехфакторного эксперимента. По критерию Фишера проверялась адекватность полученных математических моделей. **Результаты.** В результате исследований создана конструкция вакуумно-эжекционного окислителя с оптимальными параметрами для конкретных исходных данных, взятых из практических экспериментов. **Выводы.** В процессе регрессионного анализа, примененного в данном математическом эксперименте, были найдены оптимальные параметры вакуумно-эжекционного окислителя, позволяющие повысить эффективность обезжелезивания и деманганации подземных вод. Данные исследования проводились путем подбора соотношения площадей сопла Вентури и вакуумной камеры – фактор  $x_1 = 1 : 6$ ; соотношения расходов воды и воздуха – фактор  $x_2 = 1 : 5$ ; количества ступеней камеры смешения – фактор  $x_3 = 6$ ; соотношения концентрации  $Fe^{2+} : Mn^{2+}$  – фактор  $x_4 = 10 : 1$ , что позволило получить значение основного критерия  $Y_{Mn^{2+}} = 0,80$  мг/л при фиксированных значениях дополнительных критериев ( $Y_{Fe^{2+}} = 7,0$  мг/л,  $Y_{CO_2} = 30$  мг/л и  $Y_{pH} = 8,50$ ).

**Ключевые слова:** обезжелезивание и деманганация подземных вод, вакуумно-эжекционный окислитель, оптимизация, марганец, железо, регрессионный анализ, ком-промиссная задача

**Источник финансирования:** за счет собственных средств.

**Для цитирования:** Исследование оптимальных параметров вакуумно-эжекционного окислителя для обезжелезивания и деманганации подземных вод / О. Н. Вольская, А. А. Пахомов, С. В. Тронеv, А. А. Чураков // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 2. С. 167–189. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-2-167-189>.



## LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

### Study of optimal parameters of vacuum-ejection oxidizer for ground water iron and manganese removal

Olga N. Volskaya<sup>1</sup>, Alexander A. Pakhomov<sup>2</sup>, Sergey V. Tronev<sup>3</sup>,  
Alexey A. Churakov<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup>Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

<sup>2,3</sup>Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russian Federation

<sup>1</sup>volskayao\_8@mail.ru

<sup>2</sup>pahomoff.1954@yandex.ru

<sup>3</sup>stronev@mail.ru

<sup>4</sup>alexei.churakov@yandex.ru

**Abstract. Purpose:** to determine the optimal parameters of a vacuum-ejection oxidizer for iron and manganese removal from groundwater. **Materials and methods.** The nonchemical vacuum-ejection oxidizer for groundwater from the Trans-Volga zone of the Volgograd region, characterized by high iron (Fe) content reaching 30 mg/l or more, and manganese (Mn) content of 3 mg/l or more is studied. Theoretical studies of the vacuum-ejection oxidizer were conducted according to the Rechtshafner plan for a four-factor experiment. The adequacy of the obtained mathematical models was verified using the Fisher criterion. **Results.** As a result of the research, a vacuum-ejection oxidizer design with optimal parameters for specific initial data taken from practical experiments was created. **Conclusions.** The optimal parameters of the vacuum-ejection oxidizer, which improve the efficiency of groundwater iron and manganese removal, were determined by the regression analysis used in this mathematical experiment. These studies were conducted by selecting the ratio of the Venturi nozzle and vacuum chamber areas – factor  $x_1 = 1 : 6$ ; the ratio of water and air flow rates – factor  $x_2 = 1 : 5$ ; the number of mixing chamber stages – factor  $x_3 = 6$ ; the ratio of the  $\text{Fe}^{2+} : \text{Mn}^{2+}$  concentration – factor  $x_4 = 10 : 1$ , which made it possible to obtain the value of the primary criterion  $Y_{\text{Mn}^{2+}} = 0.80$  mg/l with fixed values of the additional criteria ( $Y_{\text{Fe}^{2+}} = 7.0$  mg/l,  $Y_{\text{CO}_2} = 30$  mg/l and  $Y_{\text{pH}} = 8.50$ ).

**Keywords:** groundwater iron and manganese removal, vacuum-ejection oxidizer, optimization, manganese, iron, regression analysis, trade-off problem

**Funding source:** at their own expenses.

**For citation:** Volskaya O. N., Pakhomov A. A., Tronev S. V., Churakov A. A. Study of optimal parameters of vacuum-ejection oxidizer for ground water iron and manganese removal. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2026;16(2):167–189. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-2-167-189>.

**Введение.** Около 33 % мировых ресурсов воды приходится на подземные воды [1, 2].

Реализация водной стратегии в агропромышленном комплексе (АПК) России в первую очередь направлена на совершенствование методов и технологий очистки воды.

Обеспеченность жилых помещений водопроводом в сельских населенных пунктах России, в зависимости от численности населения, показана

на по данным Росстата, приведенным в докладе Центра стратегических разработок (ЦСР) в 2024 г.<sup>1</sup> (таблица 1).

**Таблица 1 – Обеспеченность жилых помещений водопроводом  
в сельских населенных пунктах России, в зависимости  
от численности населения, 2022 г.**

% домохозяйств

**Table 1 – Provision of private premises with running water in rural  
areas of Russia, depending on population size, 2022**

% of households

Тип водовода	Численность населения в населенном пункте			
	200 и менее	201–1000	1001–5000	более 5000
Централизованный водопровод	51,8	62,4	74,9	80,7
Водопровод из индивидуальной артезианской скважины	14,9	11,9	9,4	11,7
Водопровод из колодца	16,0	12,1	8,2	3,8
Водопровод отсутствует	17,3	13,5	7,5	3,8

Из данных таблицы 1 видно, что в сельской местности водоснабжение обеспечено не только централизованным водопроводом, но и посредством индивидуальных скважин и колодцев, а 9,7 % домохозяйств не обеспечено ни одним видом водопровода.

На территории Среднеахтубинского района Волгоградской области (зона исследований) в основном расположены населенные пункты численностью менее 200 человек каждый и предприятия АПК, которые используют подземные источники. Для большинства подземных вод этой территории характерно наличие Fe и Mn, поэтому в случае их использования для хозяйственно-питьевого водоснабжения воды по концентрации этих металлов должны соответствовать установленным стандартам, а именно СанПиН 2.1.3684-21<sup>2</sup>. Эти два металла являются наиболее распространен-

<sup>1</sup>Сфера водоснабжения и водоотведения в России: текущее состояние и пути развития [Электронный ресурс] / Т. Радченко [и др.]; Центр стратег. разраб. М., 2024. 100 с. URL: <https://www.csr.ru/upload/iblock/f1e/e6706jxusj9j3tja2yhctcvstdt7asbewm.pdf> (дата обращения: 01.06.2026).

<sup>2</sup>Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [Электронный ресурс]: СанПиН 1.2.3685-21: утв. Гл. гос. санитар. врачом Рос. Федерации 28.01.21: введ. в действие с 01.03.21. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

ными в континентальной коре, причем содержание Fe превышает содержание Mn в несколько раз [3].

В п. 9.162 СП 31.13330.2021<sup>3</sup> отмечено, что «при использовании подземных вод, в которых марганец присутствует совместно с железом, следует проверять возможность удаления его непосредственно в процессе обезжелезивания без дополнительного применения реагентов».

В связи с этим авторы будут говорить о методах обезжелезивания, подразумевая присутствие в подземной воде также и марганца.

Для удаления Fe и Mn из воды, забранной из подземных источников, существует значительное количество методов и технологий [4–6], которые не всегда можно применить в сельских населенных пунктах и на предприятиях АПК из-за больших габаритов оборудования, сложности в эксплуатации и требующегося присутствия специалистов.

Поэтому для улучшения качества подземных вод необходима установка, которая одновременно будет эффективной, экономичной и малогабаритной. Авторами предлагается вакуумно-эжекционный окислитель (ВЭО), который отвечает этим требованиям, а именно:

- эффективность удаления Fe и Mn до требуемых концентраций согласно СанПиН 2.1.3684-21;

- экономичен, энергетические затраты на эксплуатацию и обслуживание оборудования для подачи воздуха в систему как основного окислителя Fe и Mn минимальны;

- малогабаритен, минимальные размеры ВЭО позволяют без увеличения площади встраивать его в существующие станции обезжелезивания, помещения ферм, инкубаторов или станций очистки воды для орошения.

Для того чтобы ВЭО отвечал вышеописанным требованиям, необходимо провести исследования его оптимальных параметров, которые позволят изготавливать его в виде модуля любой производительности.

---

<sup>3</sup>Водоснабжение. Наружные сети и сооружения [Электронный ресурс]: СП 31.13330.2021: утв. М-вом стр-ва и жилищ.-коммун. хоз-ва Рос. Федерации 27.12.21: введ. в действие с 28.01.22. Доступ из базы норматив. документации [www.complexdoc.ru](http://www.complexdoc.ru).

**Материалы и методы.** Для удаления железа и марганца существуют безреагентные и реагентные методы очистки. Одним из эффективных безреагентных методов является сочетание аэрации и фильтрации воды. Это связано с тем, что такие установки практичны и просты в эксплуатации. Аэрация – один из способов поддержания стандартов качества воды для различных целей [7], предусматривает обработку воды в основном в прямом контакте ее с воздухом. Существует два основных принципа работы с аэраторами: аэрация путем разбрызгивания воды в воздух и аэрация путем впуска пузырьков воздуха в воду [8].

Аэраторы были единственным оборудованием для обезжелезивания подземных вод на протяжении всего XX в. Российскими учеными Г. И. Николадзе, В. А. Клячко, И. Э. Апельциным, Г. Ю. Ассом, Е. Ф. Золотовой, А. А. Кастальским и др. на протяжении десятилетий предлагались и исследовались разные методы обезжелезивания подземных вод, которые без применения реагентов повышали рН воды исключительно за счет аэрации и окислительно-восстановительного потенциала, путем обогащения ее кислородом воздуха<sup>4</sup> [9–11].

Но аэрационные методы способствуют увеличению коррозионных свойств воды. Для устранения этого явления необходимо из подземных вод удалять двуокись углерода и другие агрессивные газы, растворенные в ней. А. А. Кастальским был предложен наиболее перспективный метод удаления CO<sub>2</sub> – метод вакуумной дегазации воды. Но исследования, проведенные им, требовали громоздкого оборудования с большим количеством колец Рашига, установки вакуум-насоса и подогрева воды, что вело к удорожанию конструкции. Значит, наиболее эффективным методом обезжелезивания подземных вод с большим содержанием железа может быть метод, в котором одновременно протекают и процессы быстрой дега-

---

<sup>4</sup>Николадзе Г. И., Минц Д. М., Кастальский А. А. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1984. 368 с.

зации воды, что влечет за собой повышение рН до 8 и более и увеличение скоростей окисления  $Fe^{2+}$  и  $Mn^{2+}$  [12].

Одним из таких методов является вакуумно-эжекционный, установка, работающая по этому методу, называется вакуумно-эжекционной, основной элемент ее – ВЭО. В окислителе происходит мгновенное объемное вскипание воды из-за образования вакуумных зон, в которых протекает процесс десорбции растворенных газов ( $CO_2$ ,  $H_2S$  и др.), одновременно приводящих к увеличению рН подземной воды, а эжектируемый воздух в ступенях смешения, дробящий капли воды непрерывно, вызывает абсорбцию кислорода.

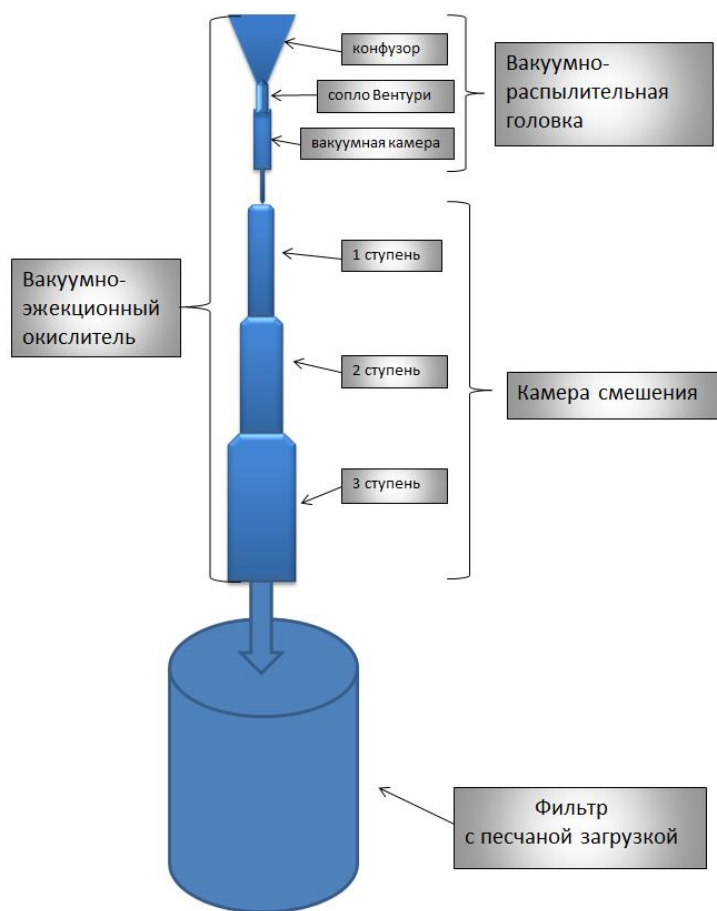
Вакуумная десорбция происходит в вакуумной камере ВЭО, а процесс абсорбции – в ступенях эжекционной камеры смешения (рисунок 1). Вакуумные зоны, возникающие в вакуумно-распылительной головке, в которую входит конфузор, сопло Вентури и вакуумная камера, создает сама струя.

Установка содержит два основных элемента: вакуумно-эжекционный окислитель (ВЭО) и фильтр с песчаной загрузкой (см. рисунок 1).

Так как цель данного исследования – определение параметров ВЭО, авторы не рассматривают работу фильтра.

ВЭО работает следующим образом. Транзитная струя воды, проходя через вакуумно-распылительную головку (ВРГ), образует вакуумные зоны как в сужающем сопле Вентури, так и на выходе из сопла, что создает разрежение, которое способствует процессу объемного «вскипания газов» с одновременным повышением рН. Проходя по ступеням камеры смешения, струя воды продолжает создавать вакуум, что дает возможность эжектировать воздух через окна, расположенные на границе сопряжения ступеней. Воздух, двигаясь в противоположном направлении по отношению к струе, дробит ее на капли с последующей их коалесценцией, создавая эффект водовоздушной эмульсии, которую можно увидеть визуально, если ВЭО бу-

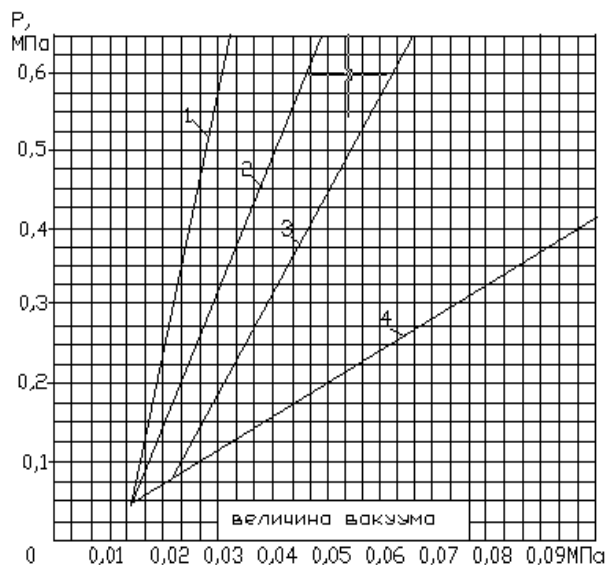
дет выполнен из оргстекла, что и наблюдалось в процессе опытов в лабораторных условиях [13].



**Рисунок 1 – Вакуумно-эжектионная установка**  
**Figure 1 – Vacuum ejection unit**

Из описания работы ВЭО авторами сделаны выводы о методике проведения натуральных экспериментов.

Был проведен ряд исследований ВЭО, смонтированных на действующих станциях обезжелезивания, расположенных в Среднеахтубинском районе Волгоградской области. Исследования выполнялись при различных режимах работы ВЭО, в т. ч. давлении перед установкой; соотношении сечений сопла Вентури и вакуумной камеры для достижения максимального вакуума (рисунок 2); соотношении объема воды и эжектируемого воздуха; количестве ступеней камеры смешения в зависимости от содержания в исходной воде  $Fe^{2+}$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $O_2$ ; соотношении  $Fe^{2+} : Mn^{2+}$  в исходной воде.



- 1 – соотношение площади сопла и вакуумной камеры 1 : 64;  
2 – соотношение площади сопла и вакуумной камеры 1 : 25;  
3 – соотношение площади сопла и вакуумной камеры 1 : 16;  
4 – соотношение площади сопла и вакуумной камеры 1 : 6

1 – nozzle to vacuum chamber area ratio 1 : 64; 2 – nozzle to vacuum chamber area ratio 1 : 25;  
3 – nozzle to vacuum chamber area ratio 1 : 16; 4 – nozzle to vacuum chamber area ratio 1 : 6

**Рисунок 2 – Зависимость величины вакуума от давления перед вакуумно-эжекционным окислителем при различных соотношениях площадей сопла Вентури и вакуумной камеры**

**Figure 2 – Vacuum magnitude dependence on pressure upstream of a vacuum-ejection oxidizer for different Venturi nozzle to vacuum chamber area ratios**

На основании натурных исследований авторами был построен график зависимости величины вакуума от давления перед ВЭО при различных соотношениях площадей сопла Вентури и вакуумной камеры (см. рисунок 2) [14].

Прямая 4 на графике рисунка 2 показывает, что максимальный вакуум достигается при соотношении 1 : 6. Причем нет необходимости давление перед ВЭО поднимать выше 0,4 МПа, что дает возможность сократить энергетические затраты, положительно влияющие на выбор метода обезжелезивания.

Для выяснения вопроса, связанного с установлением количества ступеней камеры смешения, необходимым условием был химический анализ исходной воды. Количество ступеней определялось по формуле, полученной путем статистической обработки экспериментальных данных:

$$K_{\text{ст}} = 0,02 \text{ Fe}^{2+} + 0,04 \text{ CO}_2 + 0,16 \text{ H}_2\text{S} - 0,05 \text{ O}_2, \quad (1)$$

где  $K_{\text{ст}}$  – число ступеней с округлением в большую сторону;

$\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$  – концентрации соответственно железа, двуокиси углерода, сероводорода, кислорода, мг/л.

Согласно анализу результатов практических экспериментов, количество ступеней должно находиться в диапазоне от 2 до 6 шт. для окисления  $\text{Fe}^{2+}$ . Если же в воде присутствует  $\text{Mn}^{2+}$ , количество ступеней должно увеличиться в диапазоне от 4 до 8 в зависимости от его содержания.

Соотношение в исходной воде  $\text{Fe}^{2+} : \text{Mn}^{2+}$  играет важную роль в окислении и дальнейшем удалении  $\text{Mn}^{2+}$ . Для успешного протекания процесса деманганации необходимо присутствие в воде железа  $\text{Fe}^{2+}$ , которое при окислении в ВЭО образует гидроксид железа, на поверхности которого адсорбируется марганец  $\text{Mn}^{2+}$ . Этот процесс успешно протекает при рН ниже 8,5. В результате промышленных экспериментов авторами установлено, что 50–70 % окисления  $\text{Fe}^{2+}$  происходит в самом ВЭО, где образованный гидроксид железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  адсорбирует  $\text{Mn}^{2+}$ , окисляя его до  $\text{Mn}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{4+}$ . Можно сделать вывод, что реакции окисления и  $\text{Fe}^{2+}$ , и  $\text{Mn}^{2+}$  в ВЭО протекают на порядок быстрее, чем при классических аэрационных методах, даже при рН 7,5.

По результатам производственных экспериментов, выполненных кафедрой водоснабжения МГСУ (Г. И. Николадзе, В. Б. Викулина и др.) на нескольких подземных источниках, сделаны выводы, что для эффективной деманганации соотношение концентраций  $\text{Fe}^{2+} : \text{Mn}^{2+}$  в исходной воде должно быть не менее 7 : 1 [15]. Это было подтверждено и экспериментами, проведенными авторами с водами Среднеахтубинского района Волгоградской области. На одной станции обезжелезивания соотношение  $\text{Fe}^{2+} : \text{Mn}^{2+}$  в исходной воде было равно 6 : 1, на другой станции 10 : 1, на третьей 14 : 1.

Промышленные экспериментальные данные, отражающие результаты определения оптимальных параметров ВЭО, были подтверждены мате-

математическим моделированием с помощью оригинальной программы, разработанной Волгоградским аграрным университетом [16].

Математическое моделирование особенно полезно в сочетании с практическими экспериментами, они часто дополняют друг друга и дают возможность более глубоко изучать сложные физические явления.

Для определения оптимальных параметров ВЭО были назначены факторы, которые непосредственным образом влияли на эффективность абсорбционно-десорбционных процессов, протекающих в установке.

На основании предварительных натуральных экспериментов для выбранных факторов были установлены уровни и интервалы варьирования (таблица 2).

**Таблица 2 – Факторы, влияющие на физико-химические процессы, возникающие в вакуумно-эжекционном окислителе**

**Table 2 – Factors influencing the physicochemical processes occurring in a vacuum ejection oxidizer**

Фактор	Уровень фактора			Интервал варьирования $\epsilon$
	0	-1	+1	
$x_1$ – соотношение площади сопла Вентури и вакуумной камеры	1 : 6	1 : 4	1 : 8	1 : 2
$x_2$ – соотношение расходов воды и воздуха	1 : 5	1 : 3	1 : 7	1 : 2
$x_3$ – количество ступеней камеры смешения, шт.	6	4	8	2
$x_4$ – соотношение концентрации железа и марганца $Fe^{2+} : Mn^{2+}$	10 : 1	6 : 1	14 : 1	4 : 1

Практические исследования и численное моделирование, имевшие целью выявление оптимальных параметров ВЭО, носили идентичный характер при выходных факторах, а именно содержании в исходной воде марганца  $Mn^{2+}$  и железа  $Fe^{2+}$  (мг/л),  $CO_2$  (мг/л), pH (ед. pH).

$$Y_{Mn^{2+}} = 0,792 + 0,011x_1 - 0,008x_2 - 0,043x_1x_2 + 0,038x_1x_3 - 0,031x_1x_4 + 0,028x_2x_3 + 0,139x_1^2 + 0,121x_2^2 + 0,082x_3^2 + 0,073x_4^2, \quad (2)$$

$$Y_{Fe^{2+}} = 6,94 - 0,05x_1 - 0,04x_2 + 0,31x_1x_2 - 0,29x_1x_3 - 0,21x_1x_4 + 0,18x_2x_3 - 0,18x_2x_4 + 0,16x_3x_4 + 1,23x_1^2 + 1,09x_2^2 + 0,92x_3^2 + 0,77x_4^2, \quad (3)$$

$$Y_{CO_2} = 29,7 - 0,3x_1 + 0,2x_2 - 0,1x_3 - 0,1x_4 + 1,9x_1x_2 - 1,7x_1x_3 -$$

$$-1,4x_1x_4 + 1,1x_2x_3 - 1,1x_2x_4 - 0,9x_3x_4 + 5,2x_1^2 + 4,4x_2^2 + 3,3x_3^2 + 2,9x_4^2, \quad (4)$$

$$Y_{\text{pH}} = 8,514 - 0,014x_1 + 0,01x_2 + 0,006x_3 + 0,084x_1x_2 + 0,073x_1x_3 + \\ + 0,051x_1x_4 - 0,041x_2x_3 - 0,038x_2x_4 - 0,031x_3x_4 - 0,224x_1^2 - 0,189x_2^2 - \\ - 0,169x_3^2 - 0,140x_4^2. \quad (5)$$

Для проверки адекватности математических моделей, полученных с помощью формул (2)–(5), был применен критерий Фишера:

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2(y)}, \quad (6)$$

где  $S^2(y) = (\sum_1^N \sum_1^n [y_{iq} - y_i]^2) / N(n-1)$  – изменение значений повторов опытов (дисперсия);

$S_{\text{ад}}^2 = n \sum_1^N (\bar{y}_i - y_i)^2 / (N - [k + 1])$  – изменение разброса средних значений экспериментальных данных относительно поверхности отклика;

$N$  – количество строк матрицы;

$n$  – количество повторностей эксперимента;

$y_{iq}$  – значение величины  $i$  в опыте  $d$ ;

$y_i$  – величина, возникающая при несоответствии между математической моделью и натурными экспериментами;

$\bar{y}_i$  – среднеарифметическое значение величины несоответствия между математической моделью и натурными экспериментами;

$k$  – количество факторов.

**Результаты и их обсуждение.** При произведенных численных расчетах были получены уравнения регрессии в кодированном виде.

Значения критериев Фишера по формуле (6) для марганца  $\text{Mn}^{2+}$  –  $F = 0,8533$ , для железа  $\text{Fe}^{2+}$  –  $F = 0,7812$ , для  $\text{CO}_2$  –  $F = 0,8351$ , для pH –  $F = 0,7776$ , т. е.  $F_{0,05} > F$  (здесь  $F_{0,05} = 2,1646$  – справочная величина при уровне значимости 5 %), такие значения показывают адекватность математических моделей экспериментальным данным.

В результате расчетов, проведенных с помощью оригинальной программы [16], выявлены коэффициенты регрессии в канонической форме и значения критерия Фишера в точке оптимизации, поэтому регрессионные уравнения (2)–(5) преобразуются в уравнения канонической формы:

$$Y_{\text{Mn}^{2+}} - 0,792 = 0,162x_1^2 + 0,109x_2^2 + 0,076x_3^2 + 0,069x_4^2, \quad (7)$$

$$Y_{\text{Fe}^{2+}} - 6,94 = 1,40x_1^2 + 1,06x_2^2 + 0,88x_3^2 + 0,68x_4^2, \quad (8)$$

$$Y_{\text{CO}_2} - 29,7 = 6,3x_1^2 + 4,2x_2^2 + 3,1x_3^2 + 2,2x_4^2, \quad (9)$$

$$Y_{\text{pH}} - 8,514 = -0,256x_1^2 - 0,100x_2^2 - 0,204x_3^2 - 0,163x_4^2. \quad (10)$$

В результате анализа вышеуказанных уравнений выявлены закономерности, имеющие форму четырехмерных параболоидов.

С помощью решения компромиссной задачи определялись оптимальные конструктивные параметры ВЭО. В качестве основного критерия оптимизации ВЭО было принято содержание  $\text{Mn}^{2+}$  в подземной воде, а вспомогательными критериями назначены  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{CO}_2$ , pH.

Целью решения компромиссной задачи являлось определение значений факторов ( $x_1$  – соотношение площади сопла Вентури и вакуумной камеры;  $x_2$  – соотношение расходов воды и воздуха;  $x_3$  – количество ступеней камеры смешения, шт.;  $x_4$  – соотношение концентраций железа и марганца  $\text{Fe}^{2+} : \text{Mn}^{2+}$ ) при фиксированных значениях дополнительных критериев ( $Y_{\text{Fe}^{2+}} = 7,0$  мг/л,  $Y_{\text{CO}_2} = 30$  мг/л и  $Y_{\text{pH}} = 8,50$ ).

Уравнения регрессии (2)–(5), являясь целевыми функциями для решения компромиссных задач по оптимизации параметров ВЭО, дали возможность определить зоны компромиссов, в результате которых улучшали один показатель качества подземной воды, а другие показатели из задействованных в эксперименте, проводимом в соответствии с планом Рехтшафнера, ухудшали. Для двух исследуемых факторов ( $x_1$  и  $x_2$ ;  $x_1$  и  $x_3$ ;  $x_1$  и  $x_4$ ;  $x_2$  и  $x_3$ ;  $x_2$  и  $x_4$ ;  $x_3$  и  $x_4$ ) и фиксируемых факторов на уровнях, оптимальных по основному критерию:  $x_1 = -0,04$ ,  $x_2 = 0,03$ ,  $x_3 = 0,01$  и  $x_4 = 0$ , построены двумерные сечения поверхностей откликов (рисунки 3–8).

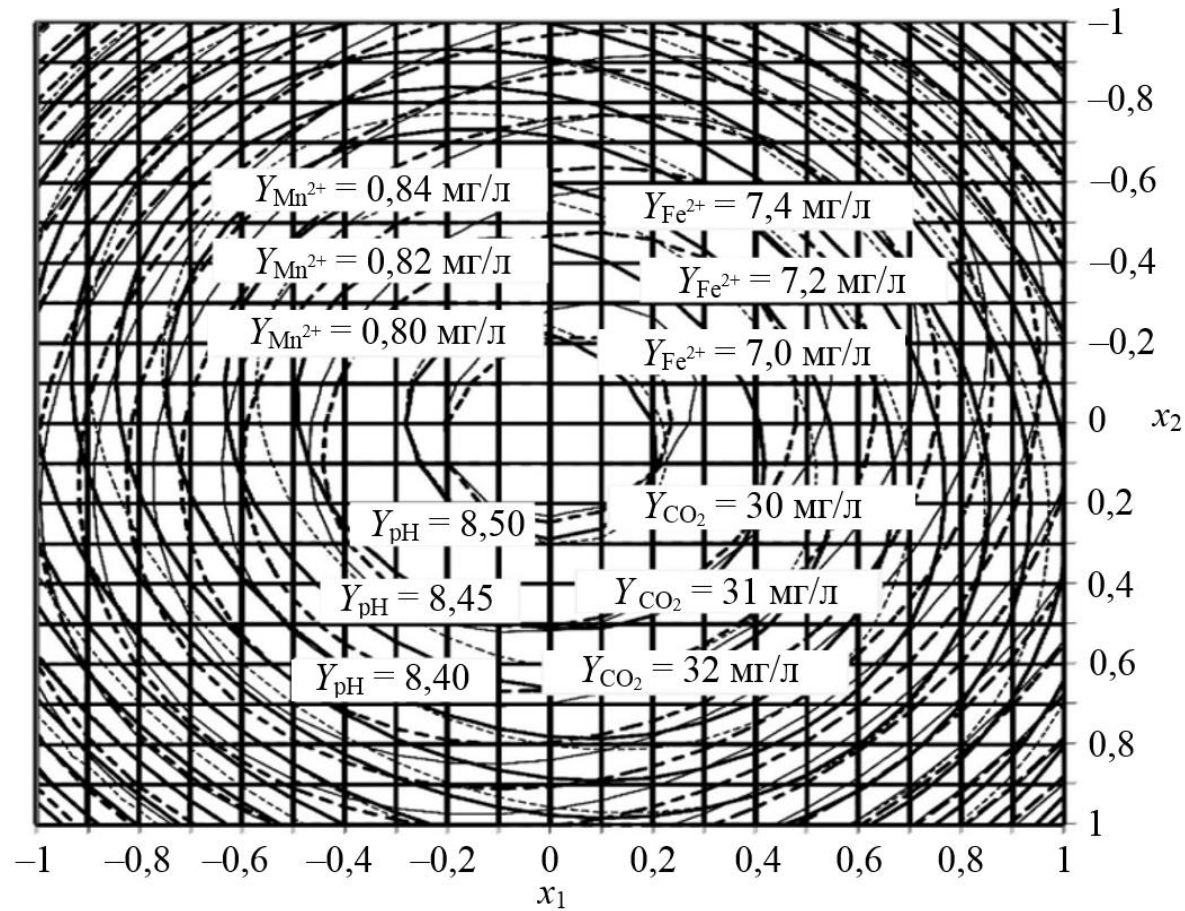


Рисунок 3 – Факторные оценки соотношения площади сопла Вентури и вакуумной камеры ( $x_1$ ) и соотношения расходов воды и воздуха ( $x_2$ ), объясняющие изменение качества воды по показателям  $Y_{Mn^{2+}}$ ,  $Y_{Fe^{2+}}$ ,  $Y_{CO_2}$  и  $Y_{pH}$  при  $x_3 = 0,01$  и  $x_4 = 0$

Figure 3 – Factor analyses of the ratio of the Venturi nozzle area and the vacuum chamber ( $x_1$ ) and the ratio of water and air flow rates ( $x_2$ ), explaining the change in water quality according to the indicators  $Y_{Mn^{2+}}$ ,  $Y_{Fe^{2+}}$ ,  $Y_{CO_2}$  and  $Y_{pH}$  at  $x_3 = 0.01$  и  $x_4 = 0$

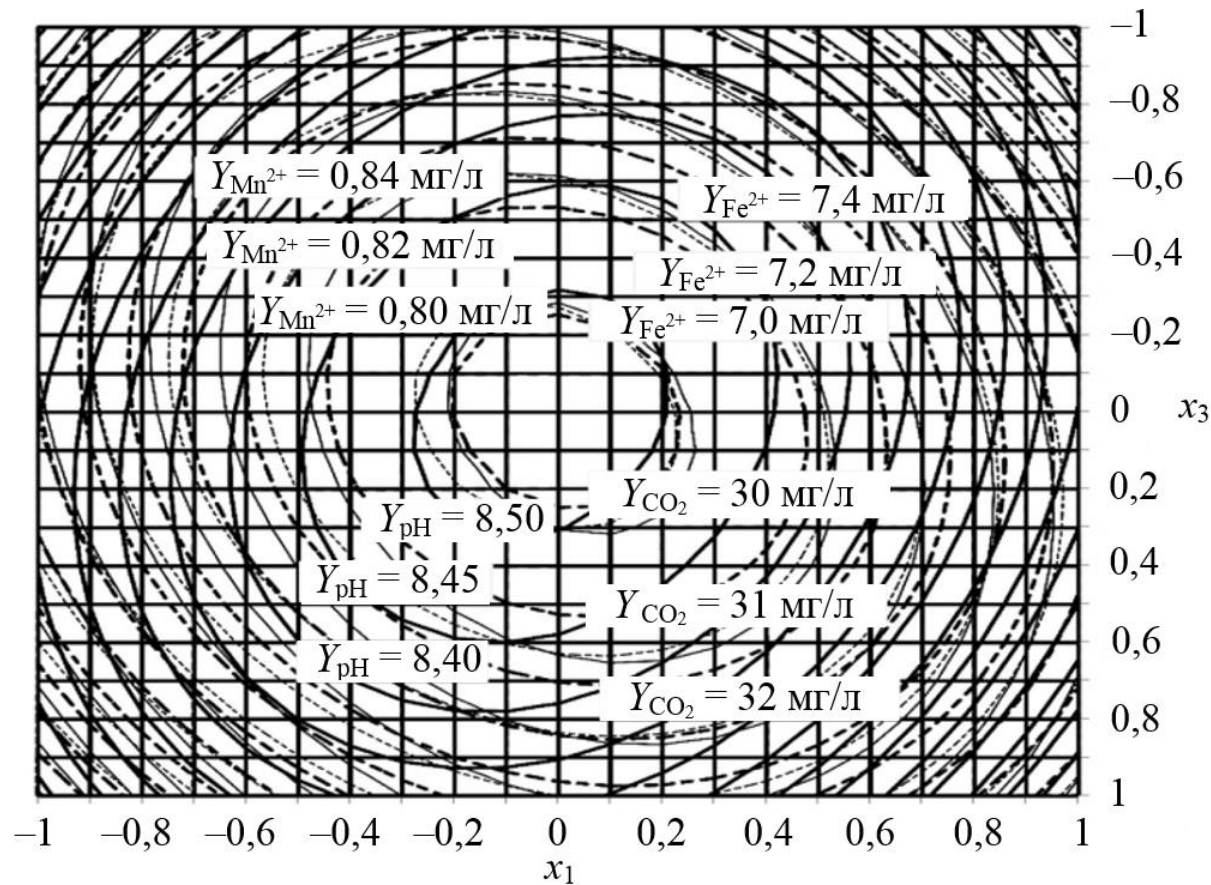
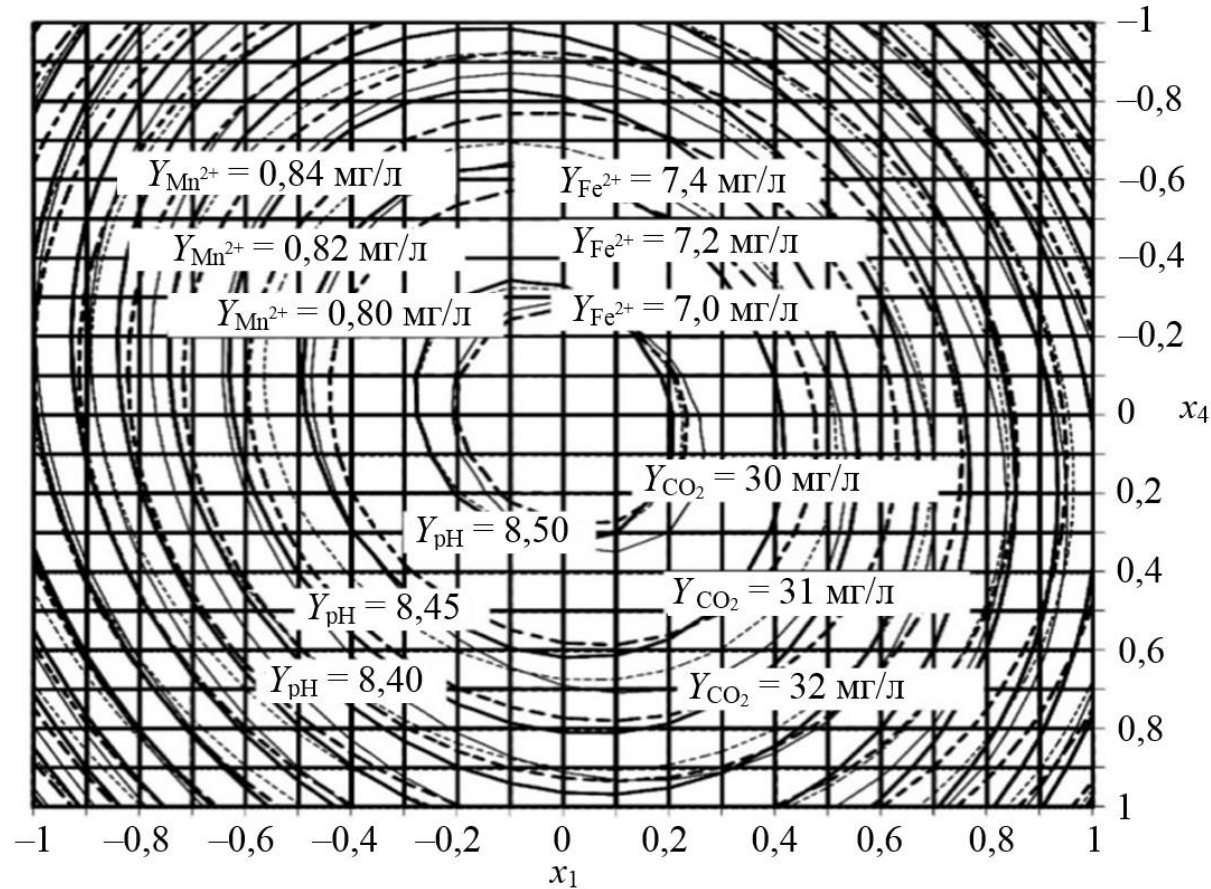


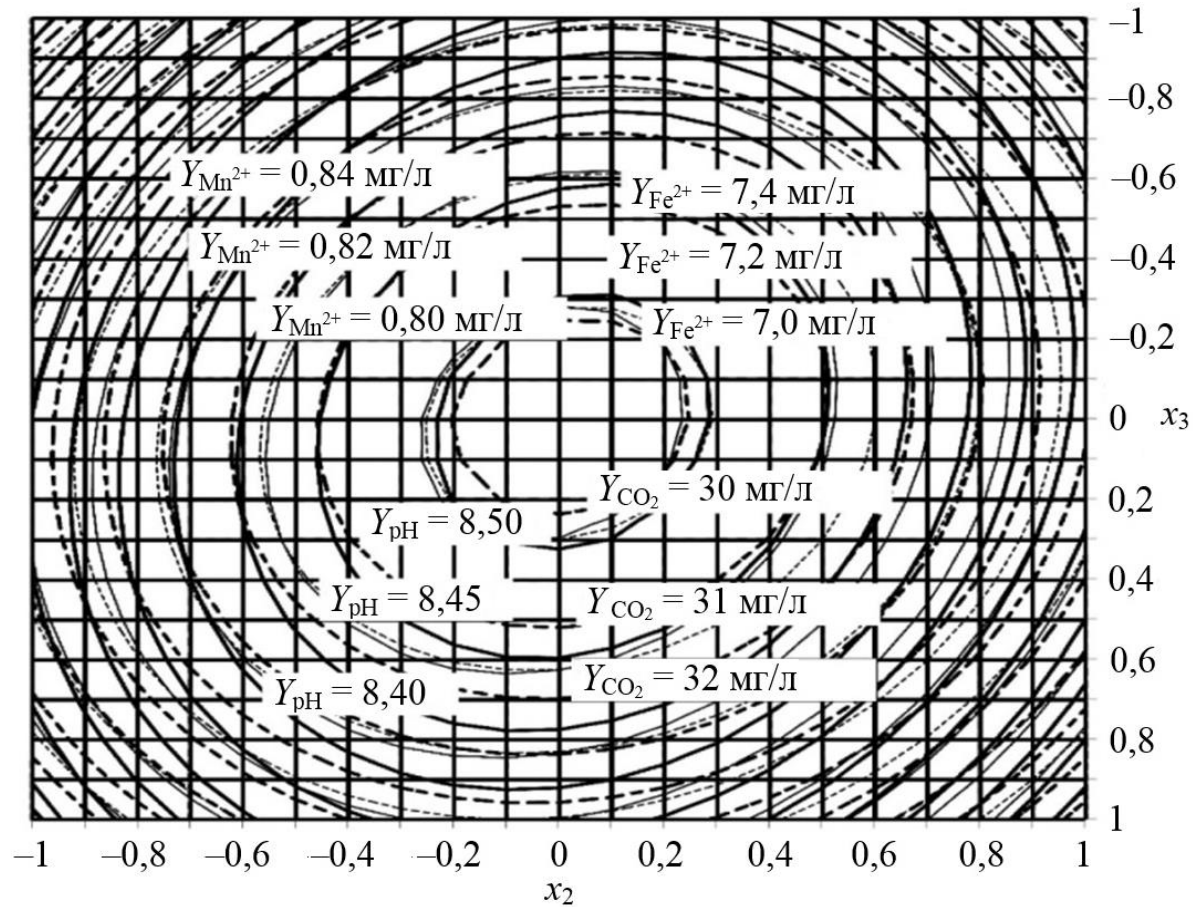
Рисунок 4 – Факторные оценки соотношения площади сопла Вентури и вакуумной камеры ( $x_1$ ) и количества ступеней камеры смешения ( $x_3$ ), объясняющие изменение качества воды по показателям  $Y_{Mn^{2+}}$ ,  $Y_{Fe^{2+}}$ ,  $Y_{CO_2}$  и  $Y_{pH}$  при  $x_2 = 0,03$  и  $x_4 = 0$

Figure 4 – Factor analyses of the ratio of the Venturi nozzle area and the vacuum chamber ( $x_1$ ) and the number of stages of the mixing chamber ( $x_3$ ), explaining the change in water quality according to the indicators  $Y_{Mn^{2+}}$ ,  $Y_{Fe^{2+}}$ ,  $Y_{CO_2}$  and  $Y_{pH}$  at  $x_2 = 0.03$  and  $x_4 = 0$



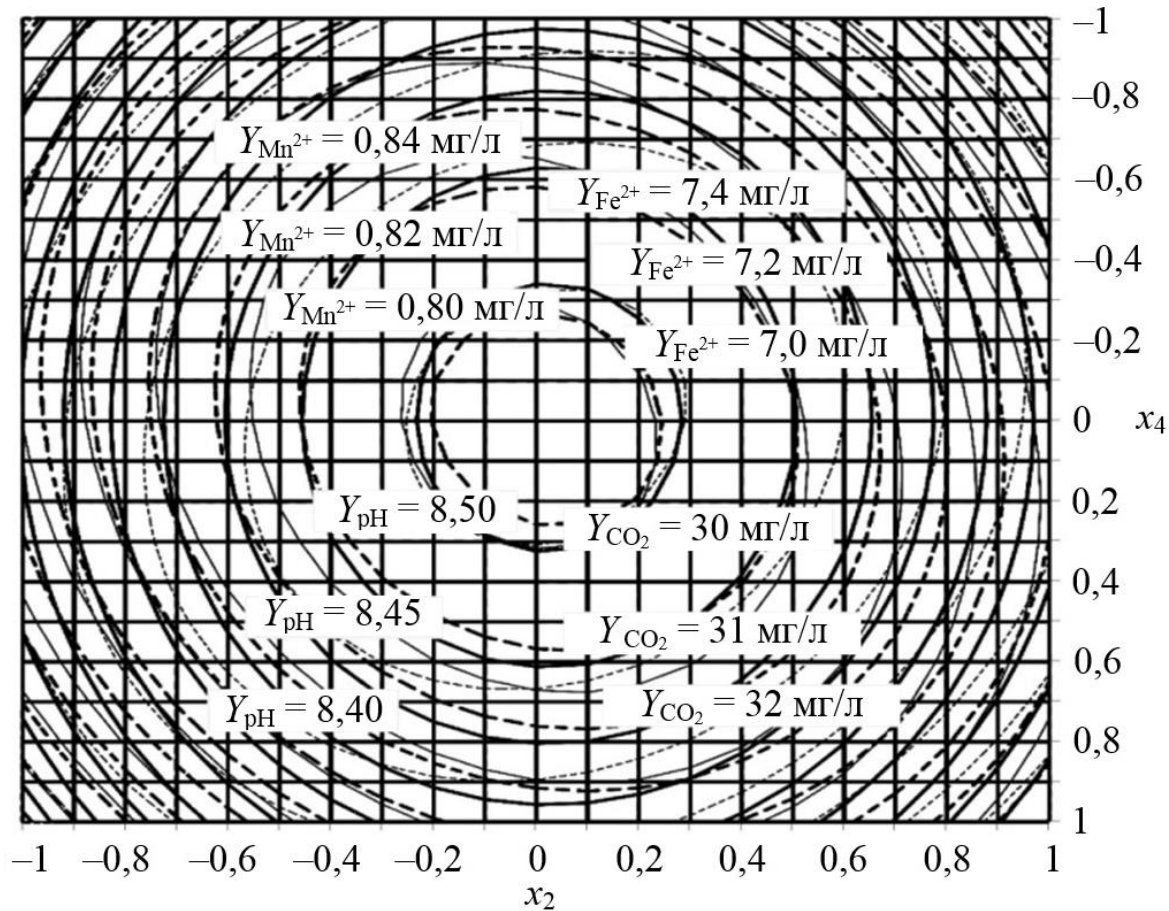
**Рисунок 5 – Факторные оценки соотношения площади сопла Вентури и вакуумной камеры ( $x_1$ ) и соотношения концентраций  $Fe^{2+} : Mn^{2+}$  ( $x_4$ ), объясняющие изменение качества воды по показателям  $Y_{Mn^{2+}}$ ,  $Y_{Fe^{2+}}$ ,  $Y_{CO_2}$  и  $Y_{pH}$  при  $x_2 = 0,03$  и  $x_3 = 0,01$**

**Figure 5 – Factor analyses of the ratio of the area of the Venturi nozzle and the vacuum chamber ( $x_1$ ) and the ratio of the concentrations of  $Fe^{2+} : Mn^{2+}$  ( $x_4$ ), explaining the change in water quality according to the indicators  $Y_{Mn^{2+}}$ ,  $Y_{Fe^{2+}}$ ,  $Y_{CO_2}$  and  $Y_{pH}$  at  $x_2 = 0.03$  and  $x_3 = 0.01$**



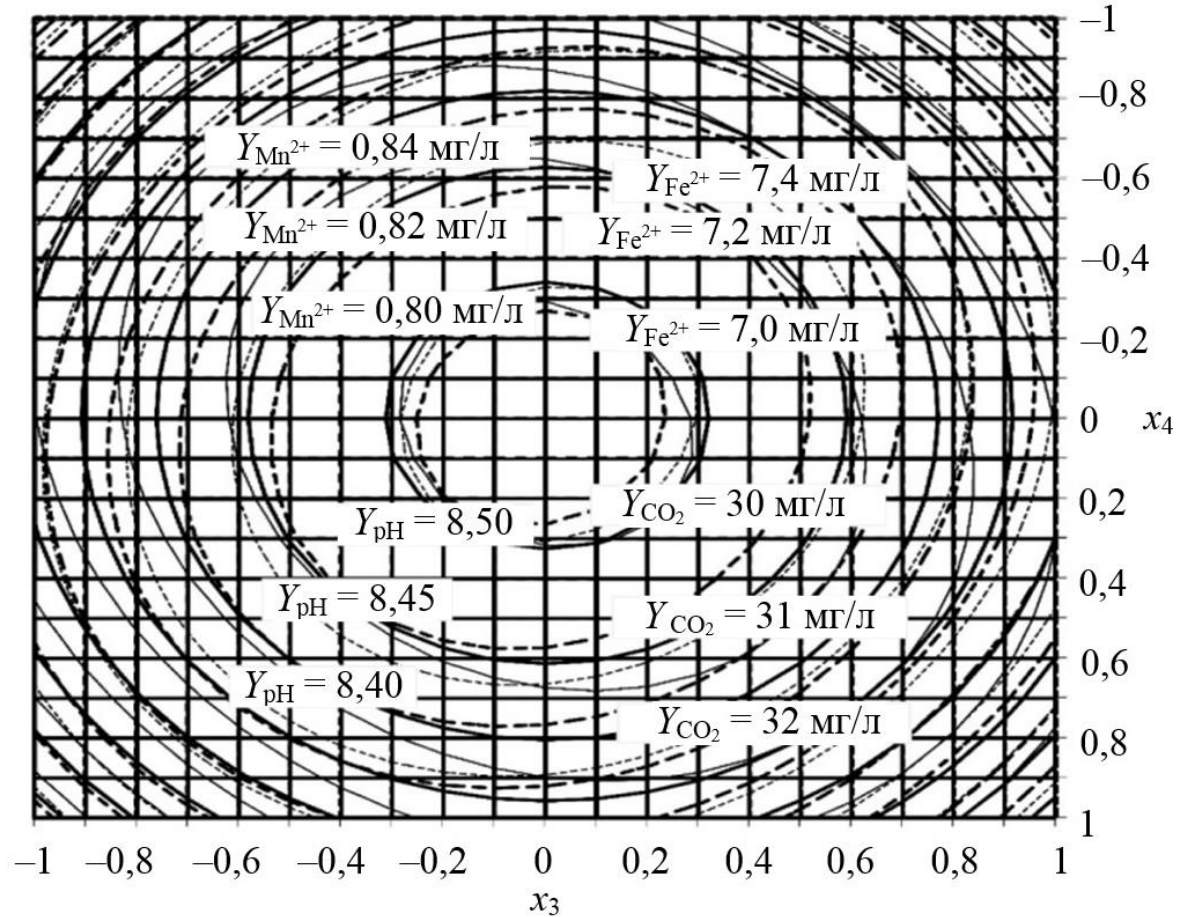
**Рисунок 6 – Факторные оценки соотношения расходов воды и воздуха ( $x_2$ ) и количества ступеней камеры смешения ( $x_3$ ), объясняющие изменение качества воды по показателям  $Y_{Mn^{2+}}$ ,  $Y_{Fe^{2+}}$ ,  $Y_{CO_2}$  и  $Y_{pH}$  при  $x_1 = -0,04$  и  $x_4 = 0$**

**Figure 6 – Factor analyses of the ratio of water and air flow rates ( $x_2$ ) and the number of mixing chamber stages ( $x_3$ ), explaining the change in water quality according to the indicators  $Y_{Mn^{2+}}$ ,  $Y_{Fe^{2+}}$ ,  $Y_{CO_2}$  and  $Y_{pH}$  at  $x_1 = -0.04$  and  $x_4 = 0$**



**Рисунок 7 – Факторные оценки соотношения расходов воды и воздуха ( $x_2$ ) и соотношения концентраций  $\text{Fe}^{2+} : \text{Mn}^{2+}$  ( $x_4$ ), объясняющие изменение качества воды по показателям  $Y_{\text{Mn}^{2+}}$ ,  $Y_{\text{Fe}^{2+}}$ ,  $Y_{\text{CO}_2}$  и  $Y_{\text{pH}}$  при  $x_1 = -0,04$  и  $x_3 = 0,01$**

**Figure 7 – Factor analyses of the ratio of water and air flow rates ( $x_2$ ) and the ratio of  $\text{Fe}^{2+} : \text{Mn}^{2+}$  ( $x_4$ ), explaining the change in water quality according to the indicators  $Y_{\text{Mn}^{2+}}$ ,  $Y_{\text{Fe}^{2+}}$ ,  $Y_{\text{CO}_2}$  and  $Y_{\text{pH}}$  at  $x_1 = -0.04$  and  $x_3 = 0.01$**



**Рисунок 8 – Факторные оценки количества ступеней камеры смешения ( $x_3$ ) и соотношения концентраций  $Fe^{2+} : Mn^{2+}$  ( $x_4$ ), объясняющие изменение качества воды по показателям  $Y_{Mn^{2+}}$ ,  $Y_{Fe^{2+}}$ ,  $Y_{CO_2}$  и  $Y_{pH}$  при  $x_1 = -0,04$  и  $x_2 = 0,03$**

**Figure 8 – Factor analyses of the number of mixing chamber stages ( $x_3$ ) and the ratio of  $Fe^{2+} : Mn^{2+}$  ( $x_4$ ), explaining the change in water quality according to the indicators  $Y_{Mn^{2+}}$ ,  $Y_{Fe^{2+}}$ ,  $Y_{CO_2}$  and  $Y_{pH}$  at  $x_1 = -0.04$  and  $x_2 = 0.03$**

Результаты решения компромиссной задачи по нахождению оптимальных значений факторов сведены в таблицу 3.

**Таблица 3 – Результаты решения компромиссной задачи по нахождению оптимальных значений факторов**

**Table 3 – Results of solving the compromise problem on finding optimal factor values**

Двумерное сечение относительно факторов	Номер рисунка двумерного сечения	Значение фиксируемого фактора	Общая зона оптимума в кодируемом виде	Общая зона оптимума в раскодированном виде
$x_1 - x_2$	1	$x_3 = 0,01;$ $x_4 = 0$	$x_1 = -0,1...0,1;$ $x_2 = -0,1...0,1$	$x_1 = 1 : 5,8...1 : 6,2;$ $x_2 = 1 : 4,8...1 : 5,2$
$x_1 - x_3$	2	$x_2 = 0,03;$ $x_4 = 0$	$x_1 = -0,1...0,1;$ $x_3 = -0,1...0,1$	$x_1 = 1 : 5,8...1 : 6,2;$ $x_3 = 6$ шт.
$x_1 - x_4$	3	$x_2 = 0,03;$ $x_3 = 0,01$	$x_1 = -0,1...0,1;$ $x_3 = -0,1...0,1$	$x_1 = 1 : 5,8...1 : 6,2;$ $x_4 = 9,6 : 1...10,4 : 1$
$x_2 - x_3$	4	$x_1 = -0,04;$ $x_4 = -0,02$	$x_2 = -0,1...0,1;$ $x_3 = -0,1...0,1$	$x_2 = 1 : 4,8...1 : 5,2;$ $x_3 = 6$ шт.
$x_2 - x_4$	5	$x_1 = -0,04;$ $x_3 = 0,01$	$x_2 = -0,1...0,1;$ $x_3 = -0,1...0,1$	$x_2 = 1 : 4,8...1 : 5,2;$ $x_4 = 9,6 : 1...10,4 : 1$
$x_3 - x_4$	6	$x_1 = -0,04;$ $x_2 = 0,03$	$x_2 = -0,1...0,1;$ $x_3 = -0,1...0,1$	$x_3 = 6$ шт.; $x_4 = 9,6 : 1...10,4 : 1$

**Выводы.** В процессе регрессионного анализа, примененного в данном математическом эксперименте, были найдены оптимальные параметры ВЭО, которые положительно влияют на эффект обезжелезивания и деманганизации подземных вод. Данные исследования проводились при изменении соотношения площадей сопла Вентури и вакуумной камеры – фактор  $x_1$ ; соотношения расходов воды и воздуха – фактор  $x_2$ ; количества ступеней камеры смешения – фактор  $x_3$  и соотношения концентраций  $Fe^{2+} : Mn^{2+}$  – фактор  $x_4$ .

Регрессионные математические модели 2-го порядка, описанные уравнениями (7)–(10), позволили решить компромиссные задачи для выявления оптимальных конструктивных параметров ВЭО при назначении основного критерия оптимизации (содержание в воде  $Mn^{2+}$ ) и дополнительных критериев (содержание в воде  $Fe^{2+}$ ,  $CO_2$  и pH).

В ходе решения задач определены значения факторов ( $x_1 = 1 : 5,8...$

...1 : 6,2;  $x_2 = 1 : 4,8$ ...1 : 5,2;  $x_3 = 6$  шт. и  $x_4 = 9,6 : 1 \dots 10,4 : 1$ ), значение основного критерия составит 0,80 мг/л при фиксированных значениях дополнительных критериев ( $Y_{\text{Fe}^{2+}} = 7,0$  мг/л,  $Y_{\text{CO}_2} = 30$  мг/л и  $Y_{\text{pH}} = 8,5$ ). Необходимо отметить, что технологические параметры ВЭО, рассматриваемые в данной работе, универсальны при любой концентрации марганца в исходной воде.

### Список источников

1. Famiglietti J. S. The global groundwater crisis // *Nature Climate Change*. 2014. Vol. 4. P. 945–948. DOI: 10.1038/nclimate2425.
2. Aeration-manganese sand filter-ultrafiltration to remove iron and manganese from water: Oxidation effect and fouling behavior of manganese sand coated film / L. H. Cheng, Zh. Zh. Xiong, Sh. Cai, D. W. Li, X. H. Xu // *Journal of Water Process Engineering*. 2020. Vol. 38. Article number: 101621. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101621. EDN: OJLTEA.
3. Iron and manganese removal from groundwater using limestone filter with iron-oxidized bacteria / H. A. Aziz, H. A. Tajarudin, T. H. L. Wei, M. Y. D. Alazaiza // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2020. Vol. 17, № 5. P. 2667–2680. DOI: 10.1007/s13762-020-02681-5. EDN: LOJLKS.
4. Marsidi N., Hasan H. A., Abdullah S. R. S. A review of biological aerated filters for iron and manganese ions removal in water treatment // *Journal of Water Process Engineering*. 2018. Vol. 23. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.01.010.
5. Penggunaan bahan alam zeolit, pasir silika, dan arang aktif dengan kombinasi teknik shower dalam filterisasi Fe, Mn, dan Mg pada air tanah di UPN “Veteran” Yogyakarta / A. Mugiyanoro, I. Husna Rekinagara, C. Dian Primaristi, J. Soesilo // *Seminar Nasional Kebumian Ke-10*. 2017. № 492. P. 1127–1137.
6. Kombinasi tray aerator dan filtrasi untuk menurunkan kadar besi (Fe) dan mangan (Mn) pada air sumur / M. Al Kholif, S. Sugito, P. Pungut, J. Sutrisno // *Ecotrophic: Jurnal Ilmu Lingkungan (Journal of Environmental Science)*. 2020. Vol. 14, № 1. DOI: 10.24843/EJES.2020.v14.i01.p03. EDN: OEMOBB.
7. The combination of aeration and filtration system in reducing water pollution: An experimental study / R. Ronny, B. Y. M. Badjuka, J. Jasman, R. Rusli, H. B. Notobroto // *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*. 2020. Vol. 10, № 5. P. 2103–2110. DOI: 10.18517/ijaseit.10.5.12381. EDN: YMBMXB.
8. Muliawan A., Ilmianih R. Metoda pengurangan zat besi dan mangan menggunakan filter bertingkat dengan penambahan UV sterilizer skala rumah tangga // *Jurnal Ilmiah Giga*. 2016. Vol. 19, № 1. P. 1–8. DOI: 10.47313/jig.v19i1.298.
9. Асс Г. Ю. Выбор способа обезжелезивания воды по величине окислительно-восстановительного потенциала // *Водоснабжение и санитарная техника*. 1969. № 10. С. 14–17.
10. Золотова Е. Ф., Асс Г. Ю. Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода. М.: Стройиздат, 1975. 176 с.
11. Кастальский А. А., Лебедева Н. С. Методы расчета установок по обезжелезиванию воды аэрацией // *Водоснабжение и санитарная техника*. 1956. № 1. С. 14–19.
12. Улучшение качества оросительной воды методом вакуумной обработки / Е. П. Боровой, О. Н. Вольская, С. М. Григоров, А. А. Чураков, Л. В. Камышанова // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессио-*

нальное образование. 2023. № 4(72). С. 379–388. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-38. EDN: QNWRKD.

13. Абдурасулов А. И., Тагибаев Д. Д., Мамбетова Р. Ш. Моделирование технологического процесса очистки воды фильтрованием // Наука и новые технологии. 2013. № 4. С. 44–45. EDN: VCWHVB.

14. Боровой Е. П., Вольская О. Н., Чураков А. А. Совершенствование технологий очистки и активации подземных вод для эффективного использования в системе хозяйственно-питьевого водоснабжения: монография. Волгоград: Изд-во ВолГТУ, 2020. 101 с. EDN: JIVQEO.

15. Исследование оптимальных параметров фильтрующей песчаной загрузки для обезжелезивания подземных вод вакуумно-эжекционным методом / О. Н. Вольская, А. А. Пахомов, С. В. Тронеv, А. А. Чураков // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. 2026. Т. 18, № 1. С. 92–101. DOI: 10.36508/RSATU.2026.61.80.012.

16. Дегтярев Ю. П., Филатов А. И. Регрессионный анализ на ПЭВМ // Повышение надежности и эффективности использования сельскохозяйственной техники: сб. науч. тр. Волгоград: Волгоградский СХИ, 1992. С. 128–131.

## References

1. Famiglietti J.S., 2014. The global groundwater crisis. Nature Climate Change, vol. 4, pp. 945-948, DOI: 10.1038/nclimate2425.

2. Cheng L.H., Xiong Zh.Zh., Cai Sh., Li D.W., Xu X.H., 2020. Aeration-manganese sand filter-ultrafiltration to remove iron and manganese from water: Oxidation effect and fouling behavior of manganese sand coated film. Journal of Water Process Engineering, vol. 38, article number: 101621, DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101621, EDN: OJLTEA.

3. Aziz H.A., Tajarudin H.A., Wei T.H.L., Alazaiza M.Y.D., 2020. Iron and manganese removal from groundwater using limestone filter with iron-oxidized bacteria. International Journal of Environmental Science and Technology, vol. 17, no. 5, pp. 2667-2680, DOI: 10.1007/s13762-020-02681-5, EDN: LOJLKS.

4. Marsidi N., Hasan H.A., Abdullah S.R.S., 2018. A review of biological aerated filters for iron and manganese ions removal in water treatment. Journal of Water Process Engineering, vol. 23, pp. 1-12, DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.01.010.

5. Mugiyantoro A., Husna Rekinagara I., Dian Primaristi C., Soesilo J., 2017. *Penggunaan bahan alam zeolit, pasir silika, dan arang aktif dengan kombinasi teknik shower dalam filterisasi Fe, Mn, dan Mg pada air tanah di UPN “Veteran” Yogyakarta* [The use of natural materials zeolite, silica sand, and activated charcoal in combination with the shower technique in the filtration of Fe, Mn, and Mg in groundwater at UPN “Veteran” Yogyakarta]. *Seminar Nasional Kebumihan Ke-10* [10th National Seminar on Earth Sciences], no. 492, pp. 1127-1137. (In Indonesian).

6. Al Kholif M., Sugito S., Pungut P., Sutrisno J., 2020. *Kombinasi tray aerator dan filtrasi untuk menurunkan kadar besi (Fe) dan mangan (Mn) pada air sumur* [Combination of tray aerator and filtration to reduce iron (Fe) and manganese (Mn) levels in well water]. *Ecotrophic: Jurnal Ilmu Lingkungan* [Ecotrophic: Journal of Environmental Science], vol. 14, no. 1, DOI: 10.24843/EJES.2020.v14.i01.p03, EDN: OEMOBB. (In Indonesian).

7. Ronny R., Badjuka B.Y.M., Jasman J., Rusli R., Notobroto H.B., 2020. The combination of aeration and filtration system in reducing water pollution: An experimental study. International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology, vol. 10, no. 5, pp. 2103-2110, DOI: 10.18517/ijaseit.10.5.12381, EDN: YMBMXB.

8. Muliawan A., Ilmianih R., 2016. *Metoda pengurangan zat besi dan mangan menggunakan filter bertingkat dengan penambahan UV sterilizer skala rumah tangga* [Iron and manganese reduction method using a multi-stage filter with the addition of a household-scale

UV sterilizer]. *Jurnal Ilmiah Giga* [Giga Scientific Journal], vol. 19, no. 1, pp. 1-8, DOI: 10.47313/jig.v19i1.298. (In Indonesian).

9. Ass G.Yu., 1969. *Vybor sposoba obezhelezivaniya vody po velichine okislitel'no-vosstanovitel'nogo potentsiala* [Selecting a water iron removal method based on the value of the oxidation-reduction potential]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Engineering], no. 10, pp. 14-17. (In Russian).

10. Zolotova E.F., Ass G.Yu., 1975. *Ochistka vody ot zheleza, ftora, margantsa i sero-vodoroda* [Water Purification from Iron, Manganese, Fluorine, and Hydrogen Sulfide]. Moscow, Stroyizdat Publ., 176 p. (In Russian).

11. Kastal'sky A.A., Lebedeva N.S., 1956. *Metody rascheta ustanovok po obezhelezivaniyu vody aeratsiey* [Calculation methods for water iron removal units by aeration]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Technique], no. 1, pp. 14-19. (In Russian).

12. Borovoy E.P., Volskaya O.N., Grigorov S.M., Churakov A.A., Kamysheva L.V., 2023. *Uluchshenie kachestva orositel'noy vody metodom vakuumnoy obrabotki* [Improving the quality of irrigation water by vacuum treatment]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 4(72), pp. 379-388, DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-38, EDN: QNWRKD. (In Russian).

13. Abdurasulov A.I., Tagibayev D.D., Mambetova R.Sh., 2013. *Modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa ochistki vody fil'trovaniem* [Modeling of technological process of water purification filtration]. *Nauka i novye tekhnologii* [Science and New Technologies], no. 4, pp. 44-45, EDN: VCWHVB. (In Russian).

14. Borovoy E.P., Volskaya O.N., Churakov A.A., 2020. *Sovershenstvovanie tekhnologii ochistki i aktivatsii podzemnykh vod dlya effektivnogo ispol'zovaniya v sisteme khozyaystvenno-pit'evogo vodosnabzheniya: monografiya* [Improving Groundwater Purification and Activation Technologies for Effective Use in the Domestic Drinking Water Supply System: monograph]. Volgograd, VolGTU Publ., 101 p., EDN: JIVQEO. (In Russian).

15. Volskaya O.N., Pakhomov A.A., Tronev S.V., Churakov A.A., 2026. *Issledovanie optimal'nykh parametrov fil'truyushchey peschanoy zagruzki dlya obezhelezivaniya podzemnykh vod vakuumno-ezheksionnym metodom* [Research of optimal parameters of filtering sand loading for deaeration of groundwater by vacuum ejection method]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P. A. Kostycheva* [Bulletin of Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev], vol. 18, no. 1, pp. 92-101, DOI: 10.36508/RSATU.2026.61.80.012. (In Russian).

16. Degtyarev Yu.P., Filatov A.I., 1992. *Regressionnyy analiz na PEVM* [Regression analysis of personal computer]. *Povyshenie nadezhnosti i effektivnosti ispol'zovaniya sel'skokhozyaystvennoy tekhniki: sb. nauch. tr.* [Increasing the Reliability and Efficiency of Agricultural Machinery: coll. of sci. papers]. Volgograd, Volgograd Agricultural Institute, pp. 128-131. (In Russian).

---

#### **Информация об авторах**

**О. Н. Вольская** – доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, кандидат технических наук, Волгоградский государственный технический университет (400074, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр-т им. В. И. Ленина, д. 28), volskaya\_o\_8@mail.ru;

**А. А. Пахомов** – профессор кафедры прикладной геодезии, природообустройства и водопользования, доктор технических наук, Волгоградский государственный аграрный университет (400002, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр-т Университетский, д. 26), pahomoff.1954@yandex.ru;

**С. В. Тронеv** – профессор кафедры эксплуатации и технического сервиса машин в АПК,

доктор технических наук, Волгоградский государственный аграрный университет (400002, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр-т Университетский, д. 26), stronev@mail.ru;

**А. А. Чураков** – доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, кандидат технических наук, Волгоградский государственный технический университет (400074, Волгоградская обл., г. Волгоград, пр-т им. В. И. Ленина, д. 28), alexei.churakov@yandex.ru.

#### *Information about the authors*

**О. Н. Volskaya** – Associate Professor of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures, Candidate of Technical Sciences, Volgograd State Technical University (400074, Volgograd region, Volgograd, Lenin ave., 28), volskayao\_8@mail.ru;

**А. А. Pakhomov** – Professor of the Department of Applied Geodesy, Environmental Management and Water Management, Doctor of Technical Sciences, Volgograd State Agrarian University (400002, Volgograd region, Volgograd, Universitetsky ave., 26), pahomoff.1954@yandex.ru;

**С. В. Tronev** – Professor of the Department of Operation and Technical Service of Machines in the Agricultural Sector, Doctor of Technical Sciences, Volgograd State Agrarian University (400002, Volgograd region, Volgograd, Universitetsky ave., 26), stronev@mail.ru;

**А. А. Churakov** – Associate Professor of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures, Candidate of Technical Sciences, Volgograd State Technical University (400074, Volgograd region, Volgograd, Lenin ave., 28), alexei.churakov@yandex.ru.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.  
All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 10.04.2026; одобрена после рецензирования 10.06.2026;  
принята к публикации 25.06.2026.*

*The article was submitted 10.04.2026; approved after reviewing 10.06.2026; accepted for  
publication 25.06.2026.*