

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 544.72; 620.3; 614.7; 330.1

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3682>

Новые нанокompозиты для глубокой деоксигенации воды

Т. Е. Фертикова¹, С. В. Фертиков², Е. М. Исаева², В. А. Крысанов², Т. А. Кравченко²✉

¹Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко,
Студенческая, 10, Воронеж 394036, Российская Федерация

²Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

Аннотация

Получены и исследованы новые металл-полимерные нанокompозиты для глубокой деоксигенации воды. Полимерной матрицей служил макро- и монопористый сульфокатионообменник с нанометровым размером пор, металлом – осажденная в порах матрицы нанодисперсная медь. Особенностью исследованных нанокompозитов является натриевая ионная форма, исключающая возможность образования растворимых продуктов окисления меди. Установленная линейная зависимость емкости по меди от числа циклов ионообменного насыщения – химического осаждения показывает, что процесс осаждения металла в поры матрицы не испытывает существенных препятствий на протяжении 10 циклов и способствует получению высокочистых образцов.

Показана высокая эффективность и продолжительность жизненного цикла высокочистой медь - ионообменных нанокompозитов. Экспериментальные исследования деоксигенации воды в аппаратах колонного типа с насадкой нанокompозита подтверждены теоретическим анализом динамики процесса. Экспериментальные данные и теоретический расчет показывают достижимость глубокого уровня деоксигенации воды при практически неизменных значениях pH и электропроводности. Остаточный кислород может быть регулируемым и не превышать 3 мкг/л.

Дано гигиеническое и экономическое обоснование целесообразности применения полученных нанокompозитов. Проанализирована необходимость применения современных нанокompозитных металл-полимерных материалов для глубокого обескислороживания воды, циркулирующей в технологических системах. Металлические компоненты разводящей сети при использовании данной инновации будут защищены от коррозии и, следовательно, обеспечены гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Глубокая химическая деоксигенация воды с помощью медь-ионообменных полимерных нанокompозитов в натриевой форме позволяет решить вопрос о коррозионной стойкости металлов, обеспечив соответствие воды гигиеническим требованиям в широком масштабе.

Конкурентным преимуществом рассматриваемой системы деоксигенации воды по сравнению с известными является отказ от использования драгоценных металлов-катализаторов (палладия, платины), чистого водорода и сложных конструктивных решений. Предложенная новая нанокompозитная установка по деоксигенации воды отличается простотой использования и может быть встроена в систему фильтров для очистки воды.

SWOT-анализ сильных и слабых сторон предлагаемого способа деоксигенации воды показал, что его основными достоинствами являются высокая кислородоемкость нанокompозита, низкое остаточное содержание кислорода (3 мкг/л) в воде, простота эксплуатации деоксигенатора. Проведены расчеты экономической эффективности нанокompозита. Точка безубыточности достигается при получении всего лишь ~100 л нанокompозита и объеме реализации ~1 600 000 рублей, свыше которой может быть получена прибыль. Срок окупаемости при инвестициях в ~15 000 000 рублей достаточно мал и не превышает 2-х лет.

Ключевые слова: металл-полимерные нанокompозиты, деоксигенация воды, гигиенические требования, экономическая эффективность

✉ Кравченко Тамара Александровна, e-mail: krav280937@yandex.ru

© Фертикова Т. Е., Фертиков С. В., Исаева Е. М., Крысанов В. А., Кравченко Т. А., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Благодарности: исследования поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 20-08-00404а).

Для цитирования: Фертикова Т. Е., Фертиков С. В., Исаева Е. М., Крысанов В. А., Кравченко Т. А. Новые нанокompозиты для глубокой деоксигенации воды. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(4): 614–625. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3682>

For citation: Fertikova T. E., Fertikov S. V., Isaeva E. M., Krysanov V. A., Kravchenko T. A. New nanocomposites for deep water deoxygenation. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases* 2021;23(4): 614–625. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3682>

1. Введение

Снизить содержание молекулярного кислорода в воде до уровня, необходимого для современных технологических процессов, возможно, используя традиционные способы деоксигенации – физические, химические, электрохимические и сорбционные. Представляется целесообразным разработать и внедрить в практику водоподготовки инновационный способ глубокого обескислороживания воды с помощью новых нанокompозитных металл-полимерных материалов, оценить его гигиеническую и экономическую эффективность. Предлагаемый подход к деоксигенации воды основан на восстановлении кислорода наночастицами химически активных металлов, осажденными в пористые ионообменные матрицы, с сохранением в них продуктов окисления.

Металл-полимерные нанокompозиты представляют собой трехмерные полимерные цепи из высокопористых материалов, состоящие из полимерного каркаса, наночастиц металла и, как правило, фиксированных ионогенных групп и противоионов. Предпочтительно использование макропористых структур с размерами пор до 100 нм. В макропорах наночастицы металла (порядка 10–30 нм) занимают отдельные участки, локализуясь вблизи ионогенных групп на стенках и в объеме макропор. Ионный обмен обратим, в силу чего возможно многократное осаждение металла в нанопоры [1–4]. Размер частиц металла можно регулировать [5]. Получаются нанокompозитные материалы, внешняя и внутренняя поверхность которых открыта для высокоэффективного проведения сорбционных, химических и электрохимических процессов [6–10]. Металл в ионообменной матрице может быть в виде высокодисперсных частиц (как правило, наночастицы) в нульвалентном состоянии или входить в состав оксидов, малорастворимых гидроксидов, простых и комплексобразующих солей, закрепленных в полимерной матрице. В силу того, что нанокompозиты металл-ионообменник обладают способностью одновременно к электроно- (редокс-) и ионообменным реак-

циям, их называют электроноионообменниками и относят к классу редокситов.

Нанокompозитные материалы на основе полимерных матриц и благородных металлов позволяют снизить содержание кислорода в воде до уровня, необходимого для современных технологических процессов. Достигнутый высокий уровень управления свойствами наночастиц, синтезируемых в различных матрицах, четко указывает на хорошие перспективы использования нанокompозитных материалов при решении проблемы глубокого удаления кислорода из воды [11–15]. Однако в отличие от благородных металлов и чистого водорода, используемых в этих целях, химически активные металлы (медь, железо и др.) в ионообменных матрицах могут иметь более широкое распространение для деоксигенации воды [16–18].

Цель настоящей работы состоит в получении новых медь-ионообменных нанокompозитов (НК) и исследовании их для глубокой деоксигенации воды, в гигиеническом и экономическом обосновании целесообразности их применения.

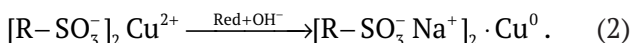
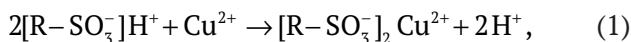
2. Экспериментальная часть

Для реализации поставленных задач были использованы нанокompозиты металл (Cu^0) – сульфокатионообменник (Lewatit K2620). Определение содержания металлического компонента проводилось с помощью комплексометрического титрования, размер частиц металла исследовался с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгенофазового анализа (РФА), состав зерен – с помощью энергодисперсионного анализа (ЭДА). Была изучена динамика деоксигенации воды зернистыми слоями нанокompозитов.

Ионообменной матрицей для получения металлсодержащих НК служил сульфокатионообменник Lewatit K2620 (Германия), представляющий сильнокислотную макропористую смолу на основе шитого полистирола со сферической формой гранул, содержащую сульфокислоты [19]. Отличительным признаком является монопористость. Размер пор строго фиксирован (41 нм).

Высокая ионообменная емкость (1.86 мэкв/см³), оптимальный радиус зерна (0.028 см) способствуют осаждению наночастиц металла и проведению целевого процесса. Высокая степень сшивки в сочетании с компактной структурой гранулы обеспечивают химическую и механическую стабильность данного материала. Металлсодержащие нанокompозиты на основе Lewatit K2620 имеет значительную регулируемую емкость по металлу.

Процесс синтеза НК, содержащих дисперсную медь, возможно рассматривать как процесс ионообменного насыщения фиксированных групп полимера медью из раствора с последующим ее химическим восстановлением [7]. Особенностью синтеза в сравнении с [20] является получение НК в натриевой форме, чтобы обеспечить образование оксидных продуктов окисления меди кислородом в дальнейшем



Числом циклов обработки регулируется количество металлической меди в ионообменнике (от 1 до 10 и выше мэкв/см³).

Определены емкости по металлической меди, размер частиц меди, элементный состав НК. Емкость по металлу – основной параметр, определяющий количественное содержание металла в нанокompозите. С целью определения количества меди в НК переводили металл в растворимое состояние и далее анализировали его концентрацию в растворе.

Размер частиц диспергированного металла устанавливали методом рентгенофазового анализа и с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 6380LV (Япония). Для рентгенографического анализа гранулы медьсодержащего нанокompозита (1 см³) помещали в металлическую кювету. В исследуемой области углов дифракции полимерная матрица не повышает фон рентгенограмм и собственных пиков не дает. Получение рентгенограмм проводили на дифрактометре Thermo ARL X-TRA (Швейцария) с MoK_α-излучением, в интервале углов 2θ = 15–40° методом сканирования по точкам с шагом 0.05° и временем накопления 3 секунды. В качестве эталона использовали медный порошок.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) является одним из более обширно применяемых для диагностики наноматериалов и наноструктур способов. СЭМ – метод анализа по-

верхностной структуры микрообъектов, базирующийся на принципе взаимодействия электронного пучка с веществом, предназначенный для получения изображения поверхности объекта с высоким пространственным разрешением (несколько нанометров), а также данных о составе, строении и некоторых других свойствах приповерхностных слоев.

Установление элементного состава образца проводили с помощью энергодисперсионного анализа. Метод основывается на регистрации характеристического рентгеновского излучения, возбужденного пучком электронов. Образцами для проведения энергодисперсионного анализа служили срезы зерен, подготовленные для СЭМ. Регистрацию спектров осуществляли с помощью приставки сканирующего электронного микроскопа INCA Energy – 250 (Великобритания).

Для исследования динамики поглощения кислорода была сконструирована установка (рис. 1), состоящая из прямоточной колонки 1, заполненной слоем гранулированного нанокompозита 2, через которую пропускали воду с концентрацией кислорода, равновесной атмосферной. Это достигалось путем длительного предварительного и одновременного (во время опыта) азиривания воздухом слоя воды на входе. Скорость потока раствора молекулярного кислорода в дистиллированной воде регулировали расходомером 6.

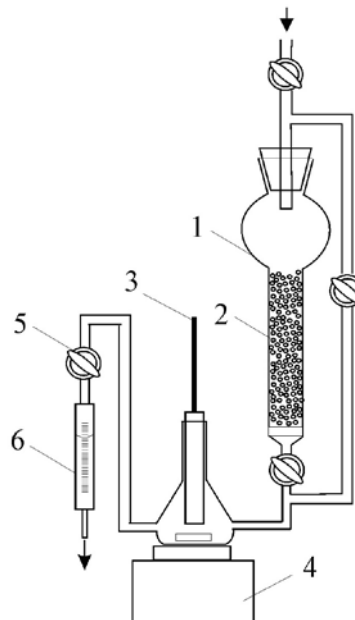


Рис. 1. Схема установки для исследования динамики поглощения кислорода слоем НК: 1 – колонка, 2 – зернистый слой, 3 – кислородомер, 4 – магнитная мешалка, 5 – регулируемый кран, 6 – расходомер воды

Концентрацию окислителя фиксировали анализатором кислорода АКПМ-01 (Россия), который был защищен металлической сеткой от внешних электромагнитных полей. Предел допускаемой погрешности анализатора в диапазоне концентраций 0–2000 мкг/л и 2–20 мг/л составляет $\pm(2.5+0.025 \cdot A)$ и $\pm 0.025 \cdot A$ соответственно, где A – показания кислородомера в выбранной единице измерения. Датчик кислородомера 3 герметично крепился к сосуду, вода в котором перемешивалась магнитной мешалкой 4, что позволяло рассматривать его как реактор идеального смешения. Отдельные элементы установки соединяли между собой полипропиленовыми шлангами, которые минимизировали пропускание кислорода внутрь системы. После обескислороживающей колонки был установлен фильтр смешанного действия (ФСД), улавливающий примесные частицы, которые могут быть вымыты при пропускании воды. Все опыты проводились при комнатной температуре и давлении, равном атмосферному.

Одновременно с регистрацией динамических выходных кривых поглощения кислорода проводился контроль pH и электропроводности отфильтрованной воды. Значение водородного показателя воды определяли с помощью иономера АНИОН-4100 (Россия). Водную пробу объемом 5 мкл для спектрального анализа отбирали микропипеткой. Значения электропроводности воды фиксировали кондуктометром Cond 7110 (Германия). Все растворы в работе приготовлены на дистиллированной воде, имеющей удельную электронную проводимость $5 \cdot 10^{-4}$ См/м при 20 °С.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Физико-химические свойства синтезированных нанокompозитов $Cu^0 \cdot Lewatit K2620$

Нанокompозиты $Cu^0 \cdot Lewatit K2620(Na^+)$ были получены с различным содержанием меди. Получили зависимость емкости НК по меди от количества циклов осаждения (рис. 2). Емкость линейно возрастает с увеличением числа посадок. Из линейной зависимости следует, что процесс осаждения металлической меди в поры НК не испытывает существенных препятствий на протяжении 10 циклов осаждения.

Достаточно маленькие размеры частиц, вычисленные по результатам РФА, позволяют сделать вывод о том, что найденные на микрофотографиях СЭМ глобулы представляют собой ассо-

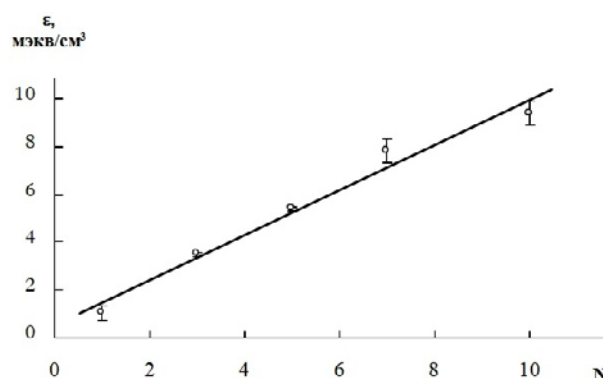


Рис. 2. Зависимость емкости ϵ нанокompозита $Cu^0 \cdot Lewatit K2620$ от количества N циклов осаждения

циаты размером 100–200 нм, состоящие из более мелких структур размером порядка 10–30 нм. По данным энергодисперсионного анализа обнаружено, что полученный НК с емкостью по меди 9.80 ± 0.01 мэkv/cm³ содержит ~18 мас. % меди с преимущественной локализацией в приповерхностных частях зерна (табл. 1).

Таким образом, были получены и охарактеризованы высокочемкие по металлическому компоненту нанокompозиты $Cu^0 \cdot Lewatit K2620(Na^+)$.

3.2. Химическая деоксигенация воды

Исследовался процесс химической деоксигенации воды. Эксперимент проводился в двух последовательно соединенных деоксигенаторах колоночного типа (рис. 1) в течение 150 ч. Размеры первого деоксигенатора определялись необходимостью зафиксировать изменяющиеся цифровые значения на датчике кислорода для регистрации данных во времени. Высота первой колонки составила $L = 42 \cdot 10^{-2}$ м, сечение $S = 1.2 \cdot 10^{-4}$ м², емкость НК составила $\epsilon_{Cu^0} = 6.68 \pm 0.08$ мэkv/cm³ при количестве циклов осаждения $N = 7$. Вода, насыщенная кислородом воздуха, подавалась в обескислороживающую

Таблица 1. Элементный состав нанокompозита $Cu^0 \cdot Lewatit K2620(Na^+)$ емкостью 9.80 ± 0.01 мэkv/cm³ в зависимости от радиального распределения по зерну R/R_0 , R_0 – радиус зерна

Элемент	Весовой %			Средний весовой %
	$R/R_0 = 0$	$R/R_0 = 0.5$	$R/R_0 = 1$	
Cu	5.13	13.97	34.09	17.73 ± 16.79
C	38.06	35.57	37.87	37.17 ± 1.57
O	17.55	14.46	11.69	14.63 ± 3.32
Na	7.14	5.65	3.36	5.38 ± 2.15
S	8.68	6.94	4.05	6.56 ± 2.65

установку со скоростью $u = 0.33$ см/с, которая регулировалась с помощью насоса. Объемная скорость потока соответственно была $u = 0.40$ см³/с ($1.43 \cdot 10^{-3}$ м³/ч). Проходящая вода через первый деоксигенатор поступала во второй деоксигенатор, который доочищал воду на выходе. Общая высота данного фильтра составила $L = 28.5 \cdot 10^{-2}$ м, сечение фильтра $S = 6.83 \cdot 10^{-4}$ м², скорость протока воды $u = 0.058$ см/с, объемная скорость потока соответственно была $u = 0.40$ см³/с ($1.43 \cdot 10^{-3}$ м³/ч), емкость нанокompозита составила $\epsilon_{Cu^0} = 9.38 \pm 0.01$ мэкв/см³ при количестве циклов осаждения $N = 10$.

Полученные результаты представлены в табл. 2. Как видно, концентрация кислорода в воде на выходе из первого деоксигенатора существенно снижается от от 4–6 мг/л до 0.1–0.3 мг/л и после второго фильтра достигает показаний прибора 0.00 мг/л при практически неизмен-

Таблица 2. Экспериментальные данные по восстановлению кислорода растворенного в воде на выходе из первого и второго деоксигенаторов с зернистыми слоями нанокompозита Cu⁰-Lewatit (Na⁺)

Время, ч	Концентрация O ₂ в воде на входе C ₀ , мг/л	Концентрация O ₂ в воде после первого слоя C ₁ , мг/л	Концентрация O ₂ в воде после второго слоя C ₂ , мг/л	pH воды на выходе	Электропроводность воды на выходе κ , мСм/см
0	4.22	3.22	4.60	6.9	1.9
5	4.66	0.08	0.12	7.1	2.2
10	4.70	0.08	0.06	7.7	2.3
15	4.70	0.17	0.00	7.6	1.7
20	4.82	0.08	0.00	7.4	1.8
30	4.88	0.30	0.01	7.0	2.2
40	4.78	0.09	0.03	7.4	1.9
50	4.68	0.19	0.08	7.1	1.7
60	4.80	0.34	0.03	6.8	1.7
70	5.19	0.23	0.03	6.7	1.8
80	5.43	0.43	0.00	7.0	2.0
90	5.53	0.17	0.01	7.1	2.1
100	5.55	0.05	0.03	6.9	2.0
110	5.31	0.47	0.00	7.1	2.5
120	5.76	0.09	0.00	7.3	2.3
130	5.77	0.67	0.00	7.2	2.2
140	5.80	0.66	0.00	7.0	2.0
150	5.75	0.51	0.00	7.1	2.1

ных значениях pH и электропроводности воды. Колебания концентрации (рис. 3) обусловлены, скорее всего, периодическими остановками эксперимента и связанного с этим подсосом кислорода через соединительные шланги. Количество поглощенного кислорода закономерно увеличивается со временем в обоих деоксигенаторах.

С помощью программного продукта (Mathcad), в основу которого положена математическая модель внешней, внутренней диффузии и стадийной реакции окисления [21], был проведен теоретический анализ динамики поглощения кислорода на первом и втором деоксигенаторах. В табл. 3 представлены задаваемые данные для расчета. На рис. 4 приведена теоретическая зависимость относительной концентрации кислорода в воде на выходе из 1-го деоксигенатора, которая показывает через какое время эксперимента концентрация кислорода снизится от $C_0 = 5.0$ мг/л до $C_1 = 0.3$ мг/л и достигнет $C_{lim} = C_1/C_0 = 0.06$. Срок службы первого деокси-

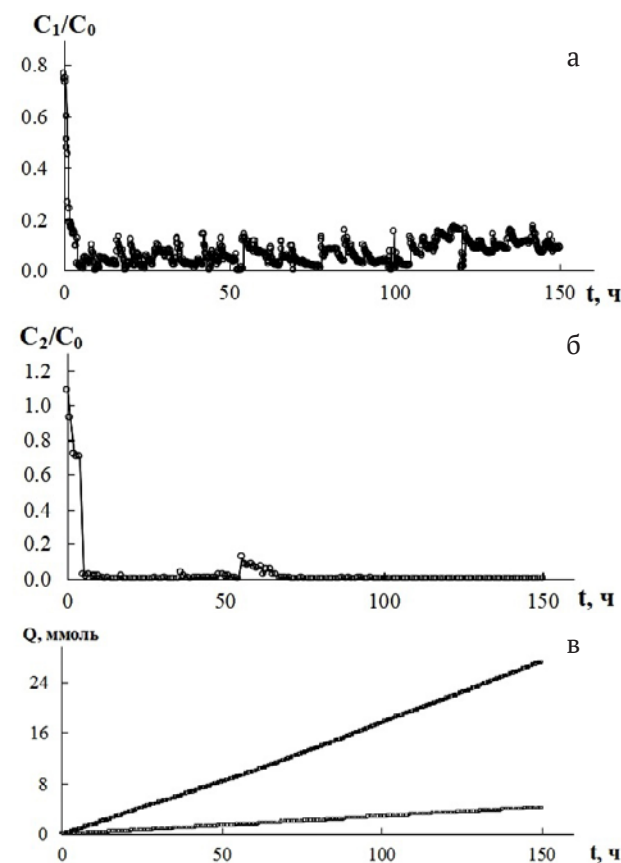


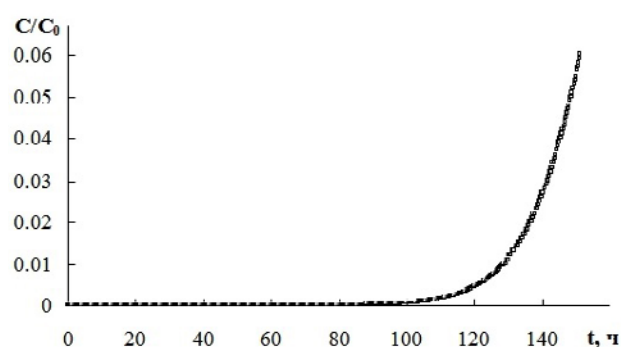
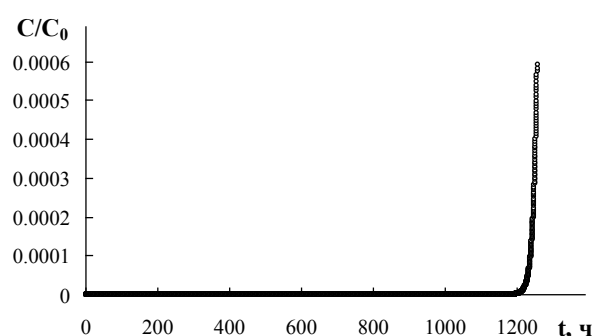
Рис. 3. Кинетические зависимости относительной концентрации кислорода на выходе после первого деоксигенатора C_1/C_0 (а), после второго деоксигенатора C_2/C_0 (б), количество Q (в) поглощенного кислорода из воды после первого (1) и второго (2) деоксигенаторов

Таблица 3. Технологические характеристики установки для деоксигенации воды

Химический деоксигенатор № 1	
1. Высота зернистого слоя L , м	0.42
2. Площадь сечения слоя S , м ²	$1.2 \cdot 10^{-4}$
3. Радиус зерен наноконкомпозита R_0 , м	$2.8 \cdot 10^{-4}$
4. Объем загрузки наноконкомпозита в одну колонку, м ³	$50.4 \cdot 10^{-6}$
5. Коэффициент наполнения колонки зернами, χ	0.70
6. Ионообменная емкость НК по водороду на насыпной объем, мэкв/см ³	1.86
7. Емкость ϵ_{Cu} по меди на насыпной объем, мэкв/см ³ (моль/л)	6.68 ± 0.08 (1.67)
8. Скорость потока воды л/ч (см/с)	1.43 (0.33)
9. Концентрация кислорода в воде на входе в первый деоксигенатор C_0 , мг/л (моль/л)	5.01 ± 0.39 ($1.56 \cdot 10^{-4}$)
10. Концентрация кислорода в воде на выходе из первого деоксигенатора $C(L)$, мг/л (моль/л)	0.30 ($0.9 \cdot 10^{-5}$)
11. Срок службы деоксигенатора, теоретически рассчитан, ч	126
Химический деоксигенатор № 2	
1. Высота зернистого слоя L , м	0.285
2. Площадь сечения слоя S , м ²	$6.83 \cdot 10^{-4}$
3. Радиус зерен наноконкомпозита R_0 , м	$2.8 \cdot 10^{-4}$
4. Объем загрузки наноконкомпозита, м ³	$198 \cdot 10^{-6}$
5. Коэффициент наполнения колонки зернами, χ	0.70
6. Ионообменная емкость НК по водороду на насыпной объем, мэкв/см ³	1.86
7. Скорость потока воды л/ч (см/с)	1.43 (0.058)
8. Емкость ϵ_{Cu} по меди на насыпной объем, мэкв/см ³ (моль/л)	9.38 ± 0.01 (2.37)
9. Концентрация кислорода в воде на входе в химический блок C_0 , мг/л (моль/л)	5.01 ± 0.39 ($1.56 \cdot 10^{-4}$)
10. Концентрация кислорода в воде на выходе из химического блока $C(L)$, мг/л (моль/л)	0.003 ($0.9 \cdot 10^{-7}$)
11. Срок службы фильтра, теоретически рассчитан, ч	1258

генератора составляет 152 ч, что согласуется с экспериментом и позволяет проводить теоретические оценки более продолжительного жизненного цикла наноконкомпозита во 2-м деоксигенаторе.

На рис. 5 приведена теоретическая зависимость относительной концентрации кислорода в воде на выходе из второго деоксигенатора, которая показывает через какое время эксперимента концентрация кислорода изменится от $C_0 = 5.0$ мг/л до $C_2 = 0.003$ мг/л и достигнет $C_{lim} = C_2/C_0 = 0.0006$. Поскольку время работы первого деоксигенатора относительно невелико, то после 152 ч в действии остается только второй деокси-


Рис. 4. Теоретическая зависимость от времени относительной концентрации C/C_0 растворенного в воде кислорода на выходе из 1-го деоксигенатора

Рис. 5. Теоретическая зависимость от времени относительной концентрации C/C_0 растворенного в воде кислорода на выходе из 2-го деоксигенатора

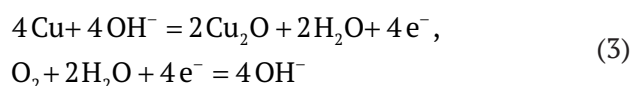
генератор. Однако за счет разных параметров колонки, скорости потока воды, а также большей емкости НК по меди второй деоксигенатор дает низкую концентрацию кислорода (до 0.003 мг/л) в течение значительного срока действия (1258 ч).

Основной достигнутый результат (табл. 4) говорит о том, что первый деоксигенатор обескислороживает воду в течение 152 ч на 94 %. Затем концентрация в нем будет нарастать и скоро достигнет исходной, т. е. первый деоксигенатор перестанет обескислороживать воду, и вся нагрузка ляжет на второй деоксигенатор, длительность работы которого составит ~1260 ч и может быть отрегулирована размерами колонки соизмеримо износу всех фильтров очистительной системы. Степень обескислороживания составит 99.99 %, остаточный кислород 0.003 мг/л.

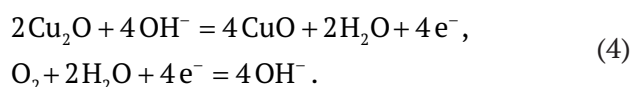
Медь – ионообменный наноконкомпозит использовался в натриевой ионной форме, в которой процесс поглощения кислорода происходит до твердофазных оксидов одно- и двухвалентной меди, что отчетливо фиксируется на срезах зерен НК. Процессы происходят по последовательным маршрутам без участия противоионов натрия

Таблица 4. Результаты лабораторных испытаний деоксигенаторов

Деоксигенатор	Концентрация O ₂ на входе C ₀ , мг/л	Концентрация O ₂ на выходе C, мг/л	C/C ₀	Время эксперимента t _{эксп} , ч	Теоретически рассчитанное время непрерывной работы t, ч	$\frac{C_0 - C}{C_0}, \%$
1	5.01±0.39	0.30	0.06	150	152	94.01
2	5.01±0.39	0.003	0.0006	150	1258	99.99



и



Общая схема



показывает путь химической деоксигенации воды за счет окисления наночастиц меди, осажденных в поры ионообменной матрицы в натриевой форме.

Таким образом, глубокое удаление коррозионно активного растворенного кислорода обеспечивает соответствие воды гигиеническим требованиям (Приложение 1). Вопрос об экономической эффективности жизненного цикла нового нанокompозитного материала рассмотрен в Приложении 2.

Приложение 1

Гигиенический аспект

Качество питьевой воды – фактор окружающей среды, во многом определяющий здоровье и уровень жизни населения. Повышение качества питьевой воды является приоритетом, обозначенным Указом Президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах Российской Федерации на период до 2024 г.». В рамках реализации федерального проекта «Чистая вода» Роспотребнадзором в 2019 г. разработаны и утверждены Методические рекомендации МР 2.1.4.0143-19 «Методика по оценке повышения качества питьевой воды, подаваемой системами централизованного водоснабжения».

Согласно данным докладов [22, 23] о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации и, в частности, на примере Воронежской области, отмечена положительная динамика качества воды из источников централизованного водоснабжения и распределительных сетей.

Удельный вес источников централизованного питьевого водоснабжения на территории России, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям, снизился в 2019 г. по сравнению с 2012 г. (темп прироста – 5.27 %) и составил 14.93 %. В Воронежской области все источники централизованного питьевого водоснабжения соответствовали санитарно-эпидемиологи-

ческим требованиям в 2019 г. Доля населения России и Воронежской области, обеспеченного качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения, составила 85.5 и 88.3 % соответственно.

Согласно данным по состоянию воды из источников централизованного водоснабжения на территории России [22], удельный вес проб воды, не соответствующих требованиям по санитарно-химическим показателям, снизился в течение 2012–2019 гг. с 28.63 до 25.71 % (на 2.92 %), по микробиологическим – с 5.47 до 4.12 % (на 1.35 %). Доля проб воды из распределительной сети, не отвечающих нормативам по санитарно-химическим показателям, уменьшилась с 16.68 до 12.38 % (на 4.3 %), по микробиологическим – с 4.45 до 2.68 % (на 1.77 %).

В рамках реализации федерального проекта «Чистая вода» на территории Воронежской области действует государственная программа «Обеспечение качественными жилищно-коммунальными услугами населения Воронежской области» (на период до 2025 г.). Вода, подаваемая населению для питьевых нужд, должна отвечать гигиеническим требованиям, которые сформулированы в Санитарных правилах и нормах «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества» (СанПиН 2.1.4.1074-01), введенных с 26.09.2001 г. Из анализа данных о качестве питьевой воды из источников централизованного водоснабжения на территории Воронежской области [23] следует положительная динамика: доля проб воды, не отвечающих гигиеническим требованиям по санитарно-химическим показателям, снизилась с 44.4 до 36.0 %, по микробиологическим показателям – с 2.0 до 1.6 % за период 2012–2020 гг. В распределительной сети централизованного водоснабжения области удельный вес проб питьевой воды, не отвечающим гигиеническим нормативам по санитарно-химическим показателям, снизился с 28.0 до 12.7 %, по микробиологическим показателям – с 1.7 до 0.8 %.

Несмотря на положительную динамику, в Воронежской области имеет место вода низкого качества вследствие факторов как природного характера (повышенное содержание железа, марганца, бора, солей жесткости), так и техногенного (антропогенное загрязнение подземных вод; высокая изношенность водопроводных сетей). Для решения этой проблемы нужно применять экологически ориентированные методы хозяйствования; техническое совершенствование, ремонт и замену очистных сооружений, разводящей сети и, наконец, внедрять более совершенные инновационные методы водоподготовки, в частности, использовать нанокompозитные металл – полимерные материалы для глубокого обескислороживания воды. Последнее весьма актуально, поскольку растворенный кислород, содержащийся в

воде, является примесным конкурирующим и коррозионным агентом, который выводит из строя оборудование и трубопроводы, наносит металлам и сплавам существенный ущерб и снижает качество воды, подаваемой населению [24, 25]. В результате в питьевой воде появляются тяжелые металлы, такие как железо, цинк, медь и другие, обладающие токсическим влиянием на организм человека. Железо и марганец, обнаруживаемые в повышенных концентрациях в питьевой воде, вызывают аллергические реакции, болезни кожи и подкожной клетчатки, увеличивают риск развития болезней крови. Кроме того, нежелательным является присутствие молекулярного кислорода в воде, предназначенной для изготовления лекарственных форм препаратов.

Достигнутый в настоящем исследовании результат глубокой деоксигенации воды с помощью инновационной технологии на основе современных металл - ионообменных нанокompозитов служит решением данных проблем.

Приложение 2

Экономическая эффективность жизненного цикла нового нанокompозитного материала
Для расчета экономической эффективности нового

нанокompозитного материала был использован SWOT-анализ как анализ бизнеса в контексте рыночного окружения. Он заключается в исследовании сильных и слабых сторон бизнеса, кроме того, он определяет возможности успешного функционирования организации в сложившихся и прогнозируемых условиях рынка [26].

Проведя анализ сильных и слабых сторон (табл. 5 и 6), можно сделать вывод, что главными конкурентными преимуществами являются:

- высокая кислородоёмкость;
- низкое остаточное содержание кислорода (3 мкг/л);
- простота эксплуатации фильтра.

Также необходимо создание таких благоприятных условий, которые позволили бы больше развивать инновационный проект и повышать его конкурентоспособность. Необходимо справиться с такой угрозой, как отсутствие инвесторов (представить проект так, чтобы он заинтересовал потенциальных потребителей).

В начале освоения выпуска новых изделий производственный процесс характеризуется высокими затратами трудовых, материальных и иных ресурсов. По мере нарастания количества выпускаемых изделий стабилизируется технологический процесс, устраняются технологические и прочие недоработки, налаживаются про-

Таблица 5. Потребительские преимущества разработки по сравнению с аналогами

Свойство	Ловушки для удаления кислорода из хроматографических колонок (Cheminst) [27]	Катализаторы, содержащие палладий (Lanxess) [28]	Предлагаемый нанокompозит, содержащий медь
Использование дополнительных реагентов	Нет	Требуется постоянная подача водорода	Нет
Область применения	Только для хроматографии	Широкий спектр применения	Широкий спектр применения
Регенерация	Не регенерируются	Не требуется	Регенерация требуется только после отработки всего фильтра
Глубина обескислороживания	1 (мкг/л)	< 20 (мкг/л)	3 (мкг/л)
Срок использования без регенерации	–	5 лет	5 лет

Таблица 6. Стратегическое планирование (SWOT-анализ)

Сильные и слабые стороны	Возможности и угрозы
<p>Сильные стороны:</p> <ul style="list-style-type: none"> – разработан материал, который можно использовать для фильтров обескислороживания воды; – кислород удаляется при помощи сорбентов; – высокая глубина очистки, чистота продукта, простота; – высокая кислородоёмкость; – высокий срок службы (5 лет); – простота регенерации фильтра; – высокие мотивации в быстром достижении коммерческого успеха; – применение во многих областях. <p>Слабые стороны:</p> <ul style="list-style-type: none"> – необходимость регенерации сорбента; – отсутствие средств для продвижения. 	<p>Возможности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – способен глубоко обескислороживать воду без драгоценных металлов и чистого водорода; – под слоем воды способен сохранять свои свойства и характеристики несколько лет; – создание благоприятных условий для развития инновационного проекта; – повышение конкурентоспособности. <p>Угрозы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – финансовая нестабильность (возможные изменения в налогообложении, инфляция); – отсутствие инвесторов; – негибкое реагирование на рыночную ситуацию; – невосприимчивость к инновациям.

изводственные связи. В этот период активно проводятся различные технические и организационные мероприятия, которые снижают дестабилизирующее влияние факторов процесса освоения выпуска новых изделий. В результате устанавливаются технически необходимые величины потребления ресурсов, затраты постепенно снижаются и достигают необходимой величины на уровне технически обоснованных норм.

Рассчитаем стоимость материала (табл. 7). В месяц лаборатория сможет произвести 200 литров создаваемого материала. Следовательно, за год – 2400 литров. Также в стоимость входит контроль свойств получаемых продуктов и кондиционирование (подготовка ионообменной основы для внедрения в неё металла).

Контроль свойств предполагает проведение следующих анализов:

- анализ на количество меди в образце; требуется провести его 3 раза, т. е. общая стоимость увеличивается на 900 руб.;

- анализ на кислотность; его проводят 12 раз, т. е. общая стоимость увеличится на 600 руб.;

- анализ на ионы меди; один анализ стоит 50 руб.; его проводят 12 раз, т. е. это составляет 600 руб.

Реактивы и работа по кондиционированию исходного материала для синтеза наполнителя оценивается в 550 руб. Для производства материала необходимо оборудование – колонки, которые изготавливаются только на заказ. Они могут быть сделаны из прозрачного пластика или из стекла. Необходимы 2 колонки. Стоимость одной колонки 9 000 руб. Срок полезного использования 5 лет.

В месяц оборудование способно производить 200 литров. При линейном способе начисление амортизации производится равными долями в течение всего срока полезного использования основных фондов. Норма амортизации ($H_{ам}$) рассчитывается в процентах к первоначальной (восстановительной) стоимости имущества [29]:

$$H_{ам} = (1/n) \cdot 100 \%, \tag{6}$$

где n – срок полезного использования имущества (месяцев или лет).

Норма амортизации: $1/(5*12) * 100\% = 1.66666 \%/мес.$

Стоимость двух колонок составляет $2*9000 = 18000$ руб.

Месячная амортизация: $18000*1.66666 \%/100\% = 300$ руб./мес.

Сумма за год амортизации: $300*12 = 3600$ руб./год.

Линейный способ:

- на конец 1-го года: $18000 - 3600 = 14400$ руб.;

- на конец 2-го года: $14400 - 3600 = 10800$ руб.;

- на конец 3-го года: $10800 - 3600 = 7200$ руб.;

- на конец 4-го года: $7200 - 3600 = 3600$ руб.;

- на конец 5-го года: $3600 - 3600 = 0$.

Также нужно арендовать помещение. Стоимость 1 м^2 400 руб. Нужно помещение 20 кв. метров. Следовательно, $400*20 = 8000$ руб. [30]. Потребуется 2 рабочих. Заработная плата одного рабочего 20000 рублей в месяц.

Отчисления на социальные нужды включают [31]):

- отчисления в Фонд социального страхования (2.9 %) – 1160 руб.;

- отчисления в Пенсионный Фонд (22 %) – 8800 руб.;

- отчисления в Фонды обязательного медицинского страхования (5.1%) – 2040 руб.

Итого отчисления на единый социальный налог (ЕСН) в сумме составляют 11000 руб. Таким образом, заработная плата производственных рабочих составляет 51000 рублей (табл. 8).

На продукцию производственно-технического назначения, реализованную населению, применяется надбавка не более 25 % ($12403*25/100 = 3101$ руб.). Таким образом, цена материала за 1 литр будет 15504 руб.

Для того чтобы продавать наполнители, необходимо зарегистрировать малое предприятие в форме ИП. Стоить это будет 3500 руб. Первая партия будет пробной. Возможные риски при реализации проекта – неполадки оборудования, финансовый кризис, недостаток финансирования. Потенциальные потребители – компании, производящие оборудование для водоподготовки и очистки сточных вод: «ГИДРОТЕХ», «Байер», «Среminst», «Национальные водные ресурсы», «Контур-Аква» и другие.

Необходимо посчитать минимальный объём производства, при котором расходы будут компенсированы доходами, а при производстве и реализации каждой последующей единицы продукции предприятие начинает получать прибыль. Поэтому нужно узнать точку безубыточности.

В месяц будет производиться 200 литров.

Постоянные затраты:

- амортизация (300 руб.);

- аренда помещения (8000 руб.);

- заработная плата (51000 руб.);

- НДС (396400 руб.);

Таблица 7. Стоимость реактивов для 1 литра НК

Реактив	Цена + НДС (20%), руб./кг	Место закупки	Требуемое количество, кг	Стоимость товара + таможенные пошлины (25 %), руб.
Катионит Lewatit K-2620	490	«Lanxess»	1	610
Катионит КУ-2*8	144	«Вектон»	0.5	79
Анионит АВ-17-8	336	«Вектон»	0.5	185
Серная кислота, ХЧ	94	«Вектон»	1	113
Натрия гидроокись, ХЧ	180	«Вектон»	1,25	248
Сульфат меди пятиводный, Ч	580	«Вектон»	4	2552
Дитионит натрия, Германия	852	«Вектон».	3	2811
Итого				6596

Таблица 8. Полная себестоимость продукции за 1 литр НК

Наименование элементов затрат	Цена в руб.
Амортизация	1.5
Материальные расходы	6596
Заработная плата производственных рабочих с начислениями	255
Прочие расходы	
Аренда помещения	40
Контроль свойств	2100
Кондиционирование	550
Итого	9541
НДС 20%	1982
Комиссионные 10%	954
Итого	12477

– комиссионные (190800 руб.).

Поэтому планируемые постоянные затраты составят 646500 рублей в месяц.

Переменные затраты:

– сырьё и материалы (6596 руб.);

– контроль свойств (2100 руб.);

– кондиционирование (550 руб.).

Поэтому планируемые переменные затраты составят 9246 рублей за 1 литр (следовательно, в месяц 1849200 руб.).

Точка безубыточности в денежном выражении – это минимальная величина дохода, при которой полностью окупаются все издержки [32]:

$$BEP = \frac{З_{пост}}{(В - З_{пер})} * В, \tag{7}$$

где BEP – точка безубыточности; З_{пост} – величина постоянных издержек в месяц; З_{пер} – величина переменных издержек в месяц; В – выручка от реализации:

$$BEP = \frac{646500}{(3100800 - 1849200)} * 3100800 = \frac{646500}{1251600} * 3100800 = 1601683 \text{ руб.}$$

Это минимальная величина дохода, при которой полностью окупаются все издержки.

Точка безубыточности в единицах продукции:

$$BEP = \frac{TFC}{P - VC}, \tag{8}$$

где TFC – величина постоянных издержек; VC – величина переменных издержек на единицу продукции; P – стоимость единицы продукции.

$$BEP = \frac{646500}{15504 - 9246} = \frac{646500}{6258} = 103 \text{ литра.}$$

Это минимальное количество продукции, при котором доход от реализации этой продукции полностью перекроет все издержки на её производство (рис. 6).

Точка безубыточности достигается уже при 103 л продукции и объёме реализации 1601683 рубля.

Рассчитаем планируемый объём продаж продукции

Стоимость, руб

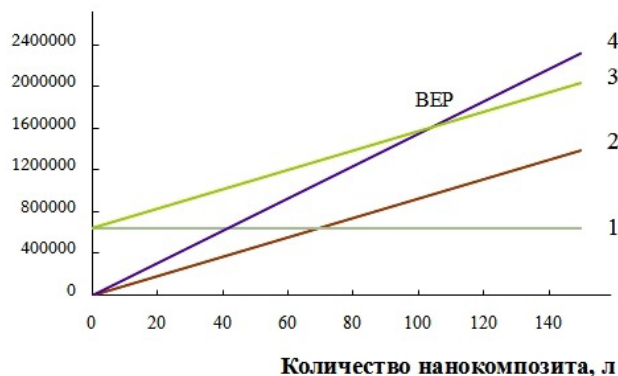


Рис. 6. Зависимость стоимости от количества нанокompозита. 1 – постоянные затраты, 2 – переменные затраты, 3 – общие затраты, 4 – доход, BEP – точка безубыточности

и прибыль за месяц:

Цена × Объём = Переменные затраты на единицу продукции × Объём + Постоянные затраты + Прибыль:

$$15504 * 200 = 9246 * 200 + 646500 + \text{Прибыль}$$

$$3100800 = 1849200 + 646500 + \text{Прибыль}$$

$$\text{Прибыль} = 605500 \text{ руб. в месяц.}$$

$$\text{Планируемый объём продаж} = 3100800 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости = Инвестиции / (Годовая чистая

$$\text{прибыль} + \text{Годовая амортизация}) =$$

$$= 14539200 / (605500 * 12 + 3600) = 2 \text{ года,}$$

т. е. имеет относительно малую продолжительность.

Необходимо учитывать, что отработанный нанокompозит можно регенерировать и вновь ввести в производство.

4. Выводы

Посредством ионообменного насыщения и химического осаждения получены новые медь-ионообменные нанокompозиты в натриевой ионной форме, характеризующиеся узким диапазоном размеров базовых частиц металла и способные восстанавливать растворенный в воде кислород с образованием твердофазных продуктов окисления. Циклический процесс ионообменного насыщения – химического осаждения приводит к линейной зависимости емкости по меди от числа циклов и позволяет получить высокочастотные образцы.

Получены экспериментальные данные по динамике поглощения кислорода зернистыми слоями нанокompозитов колоночного типа. Установлено соответствие экспериментальных выходных кривых с теоретически рассчитанными по предложенной нами ранее математической модели динамики, в основу которой положены

внешняя, внутренняя диффузия и последовательная химической реакции окисления. Эксперимент и расчет показывают достижимость глубокого уровня деоксигенации воды при практически неизменных значениях pH и электропроводности. Остаточный кислород может быть регулируемым и не превышать 3 мкг/л.

Дано гигиеническое и экономическое обоснование целесообразности применения полученных нанокompозитов. Глубокая химическая деоксигенация воды с помощью медь - ионообменных нанокompозитов в натриевой форме позволяет решить вопрос о коррозионной стойкости металлов, обеспечив соответствие воды гигиеническим требованиям в широком масштабе.

Конкурентным преимуществом рассматриваемой системы деоксигенации воды по сравнению с известными является отказ от использования драгоценных металлов-катализаторов (палладия, платины), чистого водорода и сложных конструктивных решений. Предложенная новая нанокompозитная установка по деоксигенации воды отличается простотой использования и может быть встроена в систему фильтров для очистки воды. Точка безубыточности достигается уже при производстве ~100 л нанокompозита и объеме реализации ~1 600 000 рублей, свыше которой может быть получена прибыль. Срок окупаемости при инвестициях в ~15 000 000 рублей достаточно мал и не превышает 2-х лет.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Кравченко Т. А. Поверхностная окислительно-восстановительная реакция в сорбционных процессах. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 1999;1(1): 10–20. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26781449>

2. Zagorodni A. A. Electroseparation with ion exchange materials. In: *Ion exchange materials*. Amsterdam: Elsevier; 2007. pp. 351–376. <https://doi.org/10.1016/b978-008044552-6/50018-6>

3. Kravchenko T. A., Polyanskiy L. N., Krysanov V. A., Zelensky E. S., Kalinichev A. I., Hoell W. H. Chemical precipitation of copper from copper-zink solutions

onto selective sorbents. *Hydrometallurgy*. 2009;95(1-2): 141–144. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.027>

4. Kravchenko T. A., Chayka M. Yu., Konev D. V., Polyanskiy L. N., Krysanov V. A. The influence of the ion-exchange groups nature and the degree of chemical activation by silver on the process of copper electrodeposition into the ion exchanger. *Electrochimica Acta*. 2007;53(2): 330–336. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.04.003>

5. Zolotukhina E. V., Kravchenko T. A. Synthesis and kinetics of growth of metal nanoparticles inside ion-exchange polymers. *Electrochimica Acta*. 2011;56(10): 3597–3604. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.12.019>

6. Kravchenko T. A., Aristov I. V. Kinetics and dynamics of redox sorption. In: *Ion Exchange. Highlights of Russian Science*. D. Muraviev, V. Gorshkov, A. Warshawsky (eds.). New York-Basel: M. Dekker; 2000. pp. 691–764. <https://doi.org/10.1201/9780203908341.ch11>

7. Кравченко Т. А., Полянский Л. Н., Калинин А. И., Конев Д. В. *Нанокompозиты металл-ионообменник*. М.: Наука; 2009. 391 с.

8. Кравченко Т. А., Золотухина Е. В., Чайка М. Ю., Ярославцев А. Б. *Электрохимия нанокompозитов металл-ионообменник*. М.: Наука; 2013. 365 с.

9. Kravchenko T. A., Khorolskaya S. V., Polyanskiy L. N., Kipriyanova E. S. Investigation of the mass transfer process in metal-ion-exchanger nanocomposites. In: *Nanocomposites: synthesis, characterization and application*. X. Wang (ed.). N.Y.: Nova Science Publishers; 2013. pp. 329–348.

10. Sakardina E. A., Kravchenko T. A., Zolotukhina E. V., Vorotyntsev M. A. Silver/ion exchanger nanocomposites as low-temperature redox-catalysts for methanal oxidation. *Electrochimica Acta*. 2015;179: 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.03.227>

11. Dorfner K. *Ion exchangers*. Berlin and New-York: Walter de Gruyter; 1991. 1494 p. <https://doi.org/10.1515/9783110862430>

12. Волков В. В., Кравченко Т. А., Ролдугин В. И. Наночастицы металлов в полимерных каталитических мембранах и ионообменных системах для глубокой очистки воды от молекулярного кислорода. *Успехи химии*. 2013;82(5): 465–482. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19084798>

13. Lebedeva V. I., Petrova I. V., Volkov V. V., Tershchenko G. F., Shkol'nikov E. I., Plyasova L. M., Kochubey D. I., Vaart R. Van Der, Soest-Verecammen E. L. J. Van, Gryaznov V. M. Porous Pd-containing polypropylene membranes for catalytic water deoxygenation. *Kinetics and Catalysis*. 2006;47(6): 867–872. <https://doi.org/10.1134/S0023158406060097>

14. Кирпиков Д. А., Пыхтеев О. Ю., Харитонов

- ва Е. Ю., Цапко Ю. В., Чистяков И. В., Гурский В. С. *Устройство для электрохимической деоксигенации высокоочищенной воды. Описание изобретения к патенту*. Заявка: 2012114642/05, 12.04.2012. Опубл.: 10.10.2013. Бюл. № 28.
15. Яснев И. М., Гурский В. С., Домбровский А. П., Вишнякова Н. Б. Устройство деоксигенации воды высокой чистоты УД ВВЧ-500. *Технологии обеспечения жизненного цикла*. 2017;(2): 71–75. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29847926>
16. Selvaraju T., Ramaraj R. Nanostructured copper particles-incorporated Nafion-modified electrode for oxygen reduction. *Pramana*. 2005;65(4): 713–722. <https://doi.org/10.1007/bf03010459>
17. Du C., Gao X., Chen W. Recent developments in copper-based, non-noble metal electrocatalysts for the oxygen reduction reaction. *Chinese Journal of Catalysis*. 2016;37: 1049–1061. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)61059-2](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)61059-2)
18. Вольф И. В., Романов А. В. Глубокое обессоривание и обескислороживание воды с помощью ионитов и железогидрозакаисного электроноино-обменника. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2006;6(6): 1318–1326.
19. Информация о продукте Lewatit K 2620. Режим доступа: <https://lanxess.com/en/Products-and-Solutions/Products/1/LEWATIT--K-2620>
20. Крысанов В. А., Плотникова Н. В., Кравченко Т. А. *Наноструктурный композит для глубокого удаления кислорода из воды. Патент на полезную модель RU 172 363 U1*. Заявка 2016402416 от 12.10.2016. Опубл. 05.07.2017. Бюл. № 19.
21. Кравченко Т. А., Конев Д. В., Вахнин Д. Д., Чумакова А. В. Электродинамическая модель редокс-сорбции кислорода металлсодержащими нанокompозитами. *Российские нанотехнологии*. 2019;14(11-12): 15–22. <https://doi.org/10.21517/1992-7223-2019-11-12-15-22>
22. *О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2019 году: Государственный доклад*. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 2020. 299 с.
23. Доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Воронежской области в 2020 году». Воронеж: Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Воронежской области; 2021. 193 с.
24. Муравьев А. Г. *Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами*. СПб.: «Крисмас+»; 2009. 248 с.
25. Беликов С. Е. *Справочник для профессионалов. Водоподготовка*. М.: Аква-Терм; 2007. 240 с.
26. Азоев Г. Л. *Конкуренция: анализ, стратегия и практика*. М.: Центр Экономики и маркетинга; 2012. 257 с.
27. Официальный сайт компании «Cheminst». Режим доступа: <https://www.cheminst.ru>
28. Официальный сайт компании «Lanxess». Режим доступа: <https://lanxess.com/en/Products-and-Solutions/Products/1/LEWATIT--K-3433>
29. Трещевский Ю. И., Вертаковой Ю. В., Пидоймо Л. П. *Экономика и организация производства: учебник*. М.: ИНФРА-М; 2014. 381 с.
30. Официальный сайт агентства недвижимости «Трансферт». Режим доступа: <https://transfert-vrn.ru>
31. Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая) от 05.08.2000 N 117-ФЗ (ред. от 20.04.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 20.05.2021). Статья 425. Тарифы страховых взносов.
32. Васина А. А. *Дойти до точки... безубыточности*. Электронная статья. 2008. Режим доступа: https://www.cfin.ru/finanalysis/math/break_even_point.shtml

Информация об авторах

Фертикова Татьяна Евгеньевна, к. м. н., доцент кафедры общей гигиены, Воронежский государственный медицинский университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: tefertikova@vrngmu.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4370-9197>.

Фертиков Сергей Вадимович, студент кафедры экономики и управления организациями, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: fertikov.sersei@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0382-8236>.

Исаева Екатерина Михайловна, к. э. н., доцент кафедры экономики и управления организациями, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ek-isaeva@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0428-037>.

Крысанов Вячеслав Александрович, к. х. н., доцент кафедры физической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: krysanov@chem.vsu.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6580-1939>.

Кравченко Тамара Александровна, д. х. н., профессор кафедры физической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: krav2809837@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9214-7357>.

Поступила в редакцию 06.08.2021; одобрена после рецензирования 22.09.2021; принята к публикации 15.11.2021; опубликована онлайн 25.12.2021.