

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Обзорная статья

УДК 631.67.03

doi: 10.31774/2658-7890-2022-4-3-58-72

Ретроспективный обзор технологий очистки и подготовки дренажных вод с оросительных систем

Юлия Евгеньевна Домашенко¹, Николай Николаевич Проценко²

²Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹domachenko_u@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2602-5831>

²procenko@ecsexpert.ru

Аннотация. Цель: ретроспективный анализ технологических и технических решений по очистке и подготовке дренажных вод с оросительных систем. **Обсуждения.** В мировой практике для обеспечения безопасного повторного использования дренажных вод выделяют три технологических комплекса. Первый основан на удалении взвешенных и растворимых органических загрязнителей из дренажных вод. Второй включает традиционные методы обессоливания – обратный осмос, электромембранные методы и т. д. Третий технологический комплекс позволяет удалять токсичные загрязнения. При разработке технологий очистки и подготовки дренажных вод для орошения сельскохозяйственных культур учитывалось, что в их состав входят органические и неорганические соединения, токсичные соединения солей. Перспективна технология, основывающаяся на использовании солнечных водоемов. Данный комплекс включает в себя накопители-испарители дренажных вод, испаритель рассолов, допустима минерализация от 10–15 до 200–250 г/дм³. Описанные в статье технологические схемы и методы очистки и подготовки дренажных вод с оросительных систем позволяют решить вопрос утилизации минерализованных сточных вод путем их возврата в цикл орошения и предотвратить сброс их в поверхностные водные объекты. **Выводы.** Как показал проведенный анализ технологических решений по подготовке дренажных вод, перспективны комплексные технические решения, которые основываются на физико-химических и биологических методах очистки. Наиболее распространенным подходом к подготовке дренажных вод является предварительная механическая очистка с дальнейшей адсорбцией на природных сорбентах.

Ключевые слова: дренажные воды, минерализация, технология, очистка, подготовка, повторное использование

Для цитирования: Домашенко Ю. Е., Проценко Н. Н. Ретроспективный обзор технологий очистки и подготовки дренажных вод с оросительных систем // Экология и водное хозяйство. 2022. Т. 4, № 3. С. 58–72. <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2022-4-3-58-72>.

WATER SUPPLY, SEWAGE, CONSTRUCTION SYSTEMS FOR WATER RESOURCES PROTECTION

Review article

Retrospective review of drainage water cleaning and treatment technologies from irrigation systems

Yulya E. Domashenko¹, Nikolay N. Protsenko²

²Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

¹domachenko_u@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2602-5831>

²procenko@ecsexpert.ru

Abstract. Purpose: the retrospective analysis of technological and technical solutions on purification and treatment of drainage water from irrigation systems. **Discussions.** Three technological complexes to ensure the safe reuse of drainage water are distinguished in world practice. The first complex is based on the removal of suspended and soluble organic pollutants from drainage waters. The second complex includes traditional methods of desalination – reverse osmosis, electromembrane methods, etc. The third technological complex allows removing toxic contaminants. When developing technologies for drainage water purification and treatment to irrigate agricultural crops, it was taken into account that they include organic and inorganic compounds and toxic compounds of salts. The technology based on the use of solar reservoirs is the most promising. This complex includes accumulators-evaporators of drainage waters, a brine evaporator, mineralization from 10–15 to 200–250 g/dm³ is acceptable. The technological schemes and methods of purification and treatment of drainage water from irrigation systems described in the article allow solving the issue of saline wastewater disposal by returning them to the irrigation cycle and preventing their discharge into surface water bodies. **Conclusions.** As the analysis of technological solutions for drainage water treatment shows, complex technical solutions based on physicochemical and biological treatment methods are promising. The most common approach to the drainage water treatment is preliminary mechanical cleaning with further adsorption on natural sorbents.

Keywords: drainage water, mineralization, technology, purification, treatment, reuse

For citation: Domashenko Yu. E., Protsenko N. N. Retrospective review of drainage water cleaning and treatment technologies from irrigation systems. *Ecology and Water Management*. 2022;4(3):58–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2022-4-3-58-72>.

Введение. Международным научным сообществом активно разрабатываются алгоритмы выбора оптимальных схем подготовки и очистки дренажных вод с сельскохозяйственных угодий для повторного использования в оросительных мелиорациях или других отраслях производства, включая принципы проектирования систем повторного использования вод [1, 2]. Поставленная задача является достаточно многоуровневой и трудоемкой, требует привлечения значительных объемов информации об эффективных способах и технологиях очистки, включая инновационные системы обессоливания. На современном этапе развития были получены значительные результаты в развитии экспертных систем, выступающих в качестве инструмента поддержки принятия решений для решения различных инженерных и управленческих задач. Данная работа решает вопросы адаптации

экспертной системы для интеллектуального подбора эффективной схемы подготовки дренажных вод. Полученная система позволяет выбрать схемы очистки, включая промежуточные и конечные параметры очищаемой воды, а также капитальные и эксплуатационные расходы для наиболее эффективных схем [3].

Снижение водности поверхностных и подземных источников поливной воды и снижение их качества вызывает необходимость поиска альтернативных резервов водных ресурсов, каковыми могут являться дренажные воды.

Цель исследований – провести ретроспективный анализ технологических и технических решений по очистке и подготовке дренажных вод с оросительных систем.

Обсуждение. По мнению академика РАН В. В. Бородычева, к наиболее перспективным направлениям подготовки дренажных вод относятся следующие [4–6]:

- опреснение высокоминерализованных дренажных вод способом зимнего дождевания;
- испарение дренажной воды в прудах-испарителях;
- прогрев дренажных вод.

В мировой практике для обеспечения безопасного повторного использования дренажных вод выделяют три технологических комплекса. Первый основан на удалении взвешенных и растворимых органических загрязнителей из дренажных вод. Второй включает традиционные методы обессоливания – обратный осмос, электромембранные методы и т. д. Третий технологический комплекс позволяет удалять токсичные загрязнения.

Для очистки сельскохозяйственных дренажных вод от биогенных элементов, в частности фосфора, в условиях пойменных водно-болотных угодий в низовьях р. Мюррей в Южной Австралии использовалась фитоочистка. В качестве объектов исследований были выбраны три вида растений: уруть водная

(*Myriophyllum aquaticum*), гречка расширенная (*Paspalum paspalodes*) и лютик ползучий (*Ranunculus repens*). Период эксперимента составлял 70 дней. При этом использовались четыре модельных раствора с высоким и низким уровнем содержания биогенных элементов и минерализации. Удаление фосфора водными растениями происходило со скоростью $0,043\text{--}0,086\text{ г}/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$, которая была установлена как биоаккумуляция фосфора в растительных тканях [7].

При разработке технологий очистки и подготовки дренажных вод для орошения сельскохозяйственных культур необходимо учитывать, что в их состав входят органические и неорганические соединения, токсичные соединения солей. Поэтому на первом этапе перед процессом опреснения эти категории необходимо очищать от растворимых органических веществ, в т. ч. остатков агрохимикатов и промышленных загрязнителей. Проведенные исследования качественных показателей дренажных и сбросных вод показали, что концентрация химического потребления кислорода (ХПК) колеблется в пределах $50\text{--}250\text{ мг}/\text{дм}^3$. На основании вышесказанного А. Allam и др. разработали технологию очистки дренажных вод, включающую аэрированные лагуны и двухступенчатый обратный осмос или электродиализ для установки мощностью $30000\text{ м}^3/\text{сут}$ [8–10].

Этими же авторами предложено использование для очистки дренажных и сбросных вод ряски обыкновенной (*Lemna gibba*). В основу был положен каскад прудов с проточной системой, в которые была интегрирована ряска обыкновенная. Схема реализована в два пруда, показала высокую эффективность удаления соединений аммиака в диапазоне $(60,2 \pm 6,1)$ и $(80,2 \pm 1,4)\%$ в сравнении с одиночными прудами $((30,6 \pm 7,9)$ и $(56,8 \pm 3,3)\%$) с одинаковым временем обработки от 14 дней [10].

В Бухарской области Узбекистана проводились исследования, посвященные очистке дренажных и сбросных вод с минерализацией $1\text{--}3$, $3\text{--}5\text{ г}/\text{дм}^3$ и свыше $5\text{ г}/\text{дм}^3$ с помощью водорослей вида *Lemna minor*. В результате

проведенных экспериментов установлено, что наблюдается снижение количества сухого остатка до 22 %, а ионов хлора до 28 % [11, 12].

В Центральной долине Калифорнии (США) разработана новая система солнечного термического опреснения. Рассмотрено три направления технико-экономического обоснования: выводить орошаемые земли из оборота по мере снижения продуктивности, проводить деминерализацию дренажных вод методом дистилляции с применением в качестве энергоресурса природного газа или с использованием солнечной энергии как нетрадиционного источника. Полученные результаты показали целесообразность гибридного использования источников энергии (традиционных и нетрадиционных) как альтернативы потере земельных ресурсов из орошаемых севооборотов [13].

Система солнечного термического опреснения была разработана для высокоэффективной очистки дренажных вод в качестве стратегии для повторного использования с целью орошения. В состав данной системы входит паровой абсорбционный тепловой насос с открытым циклом, который соединен с многоканальной дистилляционной установкой и большим параболическим желобом солнечного теплового концентратора. Использование теплового насоса позволило снизить потребление энергии для процесса с 261,87 до 133,2 кВт·ч/м³, т. е. в среднем на 49 % [14].

В России также предложена технология использования солнечных водоемов. Данный комплекс включает в себя накопители-испарители дренажных вод, испаритель рассолов, допустима минерализация от 10–15 до 200–250 г/дм³ [15, 16].

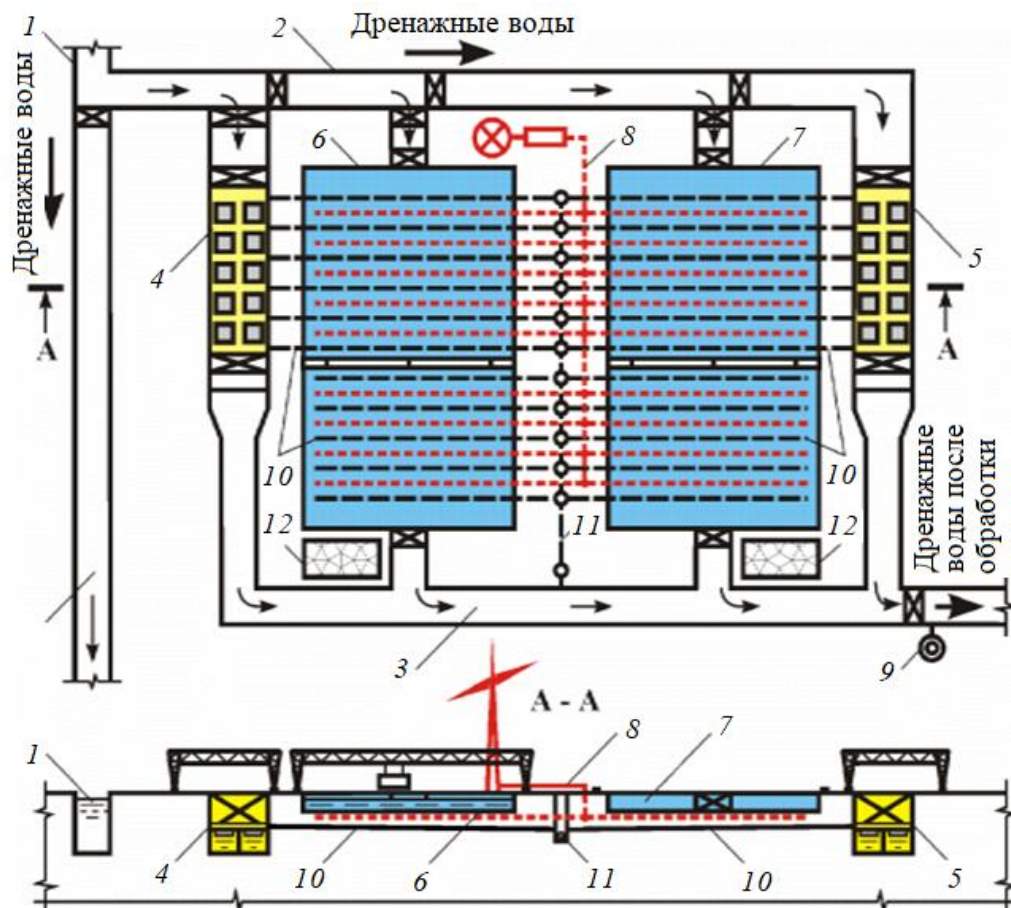
В Египте для очистки дренажных вод был разработан реактор с нисходящей висячей губкой [17]. Исследования проводились в течение одного года при различных гидравлических временах удержания (5,26; 2,63 и 1,5 ч) и соответствующих скоростях загрузки органического вещества (2,01; 1,86

и 4,43 кг ОВ/(м³·сут)). Как показали результаты, при снижении гидравлического времени удержания с 5,26 до 1,5 ч уменьшалась степень очистки по ХПК. Концентрации взвешенных веществ снижены на 85,5 % при гидравлическом времени удержания 5,26 ч, на 90,4 % – при 2,63 ч и на 91,4 % – при 1,5 ч соответственно. Но при этом уменьшилась степень очистки при нитрификации с 85,2 до 82 %. Та же тенденция наблюдалась при удалении фосфора. На основании этого установлено, что оптимальными параметрами процесса являются гидравлическое время удержания 2,63 ч и загрузка органического вещества 2,0 кг ОВ/(м³·сут) [18].

В условиях Казахстана проводились исследования, основанные на методике типизации орошаемых объектов, которая была предложена В. В. Шабановым и Е. П. Рудаченко [19]. Предложены технологии орошения сельскохозяйственных культур оросительной и дренажной водой в соотношении 4:1 и 2:1. Данная технология оптимальна для сельхозтоваропроизводителей, так как не требует сложного аппаратного оформления по контролю концентрации солей. Смешивание оросительной и дренажных, сбросных вод в соотношении 4:1 позволяет достичь минерализации 2,0–2,5 г/дм³, а при соотношении 2:1 – 2,5–3,5 г/дм³ [20].

К одним из распространенных методов подготовки дренажных и сбросных вод относится биохимическая очистка, разработанная в ГНУ «ВНИИГиМ» [21].

Исследования в данном направлении были продолжены И. И. Контровичем, который предложил комплекс сооружений для обработки дренажных вод в процессе их транспортирования по межхозяйственным или внутрихозяйственным коллекторам. При этом исходная минерализация дренажных и сбросных вод не должна превышать 3 г/дм³. Предлагаемый комплекс состоит из блока сорбционной и биохимической очистки (рисунок 1) [22, 23].



1 – открытый дренажный коллектор; 2 – подводящий канал; 3 – отводящий канал;
4, 5 – блок сорбционной очистки; 6, 7 – блок биохимической очистки; 8 – блок аэрации;
9 – блок химической мелиорации; 10 – закрытый горизонтальный дренаж;
11 – коллектор; 12 – площадка для утилизации остатков высшей растительности

1 – open drainage collector; 2 – supply canal; 3 – outlet canal; 4, 5 – sorption purification unit;
6, 7 – block of biochemical purification; 8 – aeration block; 9 – block of chemical reclamation; 10 – closed horizontal drainage; 11 – collector; 12 – a platform for the disposal of the higher vegetation remains

Рисунок 1 – Технология очистки дренажных и сбросных вод в процессе их транспортирования

Figure 1 – Technology for drainage and effluent treatment during their transportation

Одним из перспективных физико-химических методов очистки дренажных вод является применение адсорбции, ионного обмена, обратного осмоса и электродиализа [24, 25].

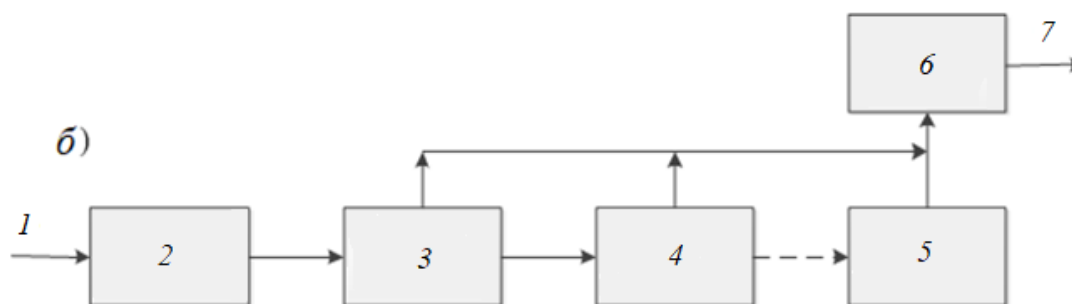
ФГБНУ «РосНИИПМ» предложены три основные технологические схемы сорбционной очистки дренажных вод, представленные на рисунке 2 [26–28].

a)



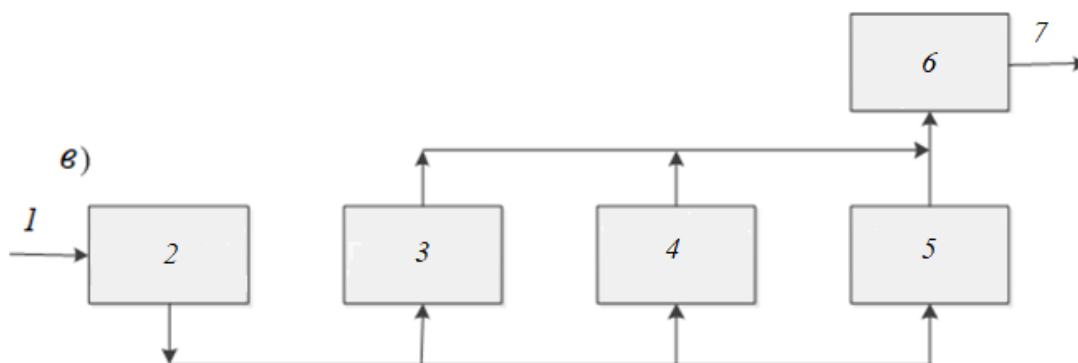
1 – исходная вода; 2 – собирательная емкость механической очистки; 3 – сорбционная емкость; 4 – сорбционный фильтр (адсорбер); 5 – очищенный сток

1 – source water; 2 – collecting capacity of mechanical treatment; 3 – sorption capacity; 4 – sorption filter (adsorber); 5 – cleaned drain



1 – исходная вода; 2 – механическая очистка; 3, 4, 5 – сорбционная очистка в инфильтрационных прудах; 6 – наполнительная емкость; 7 – очищенный сток

1 – source water; 2 – mechanical treatment; 3, 4, 5 – sorption treatment in infiltration ponds; 6 – filling capacity; 7 – cleaned drain



1 – исходная вода; 2 – механическая очистка; 3, 4, 5 – сорбционный фильтр (адсорбер); 6 – наполнительная емкость; 7 – очищенный сток

1 – source water; 2 – mechanical treatment; 3, 4, 5 – sorption filter (adsorber); 6 – filling capacity; 7 – cleaned drain

Рисунок 2 – Технологические схемы сорбционной очистки дренажных вод: *a* – для закрытых коллекторов; *б, в* – для открытых коллекторов
Figure 2 – Technological schemes for drainage water sorption treatment: *a* – for closed collectors; *б, в* – for open collectors

В ГНУ «ВНИИГиМ» также разрабатывались технологии очистки дренажных вод на основе ионообменных методов [29]. Использование ио-

нообменных фильтров позволило обеспечить очисткой 10–50 га орошаемых земель при модуле дренажного стока 0,15–0,025 л/(с·га), при этом пропускная способность узла составила 100 м³/сут.

Следует также остановиться на электромембранном методе, который широко используется в практике подготовки дренажных вод, он нашел применение при снижении общего солесодержания. Авторами предложена технологическая схема со следующим принципом работы: дренажные воды в самотечном режиме поступают на решетки для удаления крупных примесей, далее они направляются на песколовки, а оттуда на блок тонкослойного отстаивания. Доочистка производится на песчаных и электромембранных фильтрах [30]. Эффективность предложенного метода подтверждена исследованиями иракских ученых, которые доказали возможность использования мембран нанофильтрации для опреснения дренажных вод [31].

Предложено техническое решение по подготовке дренажных вод, основывающееся на сочетании методов сепарации и сорбции. В технологии предварительно дренажные и сбросные воды подвергаются обработке в сепараторе для удаления грубодисперсных примесей и дальнейшей очистке в фильтрующих колодцах с фильтрующими элементами, выполненными на основе отходов угольного производства, изготовленными по известной рецептуре и имеющими форму цилиндра с полостью внутри [32, 33].

Описанные технологические методы очистки и подготовки дренажных вод с оросительных систем позволяют решить вопрос утилизации минерализованных сточных вод путем их возврата в цикл орошения и предотвратить сброс их в поверхностные водные объекты.

Выводы. Как показал проведенный анализ технологических решений по подготовке дренажных вод, перспективны комплексные технические решения, которые основываются на физико-химических и биологических методах очистки. Наиболее распространенным подходом к подготов-

ке дренажных вод является предварительная механическая очистка с дальнейшей адсорбцией на природных сорбентах.

Список источников

1. Water reuse: From ancient to modern times and the future / A. N. Angelakis, T. Asano, A. Bahri, B. Jiménez, G. Tchobanoglous // *Frontiers of Environmental Science*. 2018. 6:26. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00026>.
2. Development and validation of system design principles for water reuse systems / D. Joksimovic, D. A. Savic, G. A. Walters, D. Bixio, K. Katsoufidou, S. G. Yiantisios // *Desalination*. 2008. Vol. 218, № 1–3. P. 142–153. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.04.091>.
3. Abdel-Azim R., Allam M. N. Reuse of drainage water in agriculture in Egypt: strategic problems and mitigation measures // *Unconventional Water Use: the WASAMED Project*. 2005. P. 105–117.
4. Бородычев В. В., Конторович И. И. Инженерная защита окружающей среды от воздействия дренажного стока с орошаемых земель // Развитие АПК на основе принципов рационального природопользования и применения конвергентных технологий: материалы междунар. науч.-практ. конф., провед. в рамках Междунар. науч.-практ. форума, посвящ. 75-летию образования Волгогр. гос. аграр. ун-та. Волгоград, 2019. С. 22–31.
5. Бородычев В. В., Конторович И. И. Концепция использования возобновляемых источников энергии для утилизации минерализованного дренажного стока. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2012. 104 с.
6. Бородычев В. В., Конторович И. И. Утилизация дренажного стока с орошаемых земель: исходные требования к разработке процесса // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]*. 2016. № 3(23). С. 83–101. URL: http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec430-field6.pdf (дата обращения: 01.05.2022).
7. Wen L., Recknagel F. In situ removal of dissolved phosphorus in irrigation drainage water by planted floats: preliminary results from growth chamber experiment // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2002. Vol. 90, № 1. P. 9–15. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00292-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00292-4).
8. Sorour M. H., El Defrawy N. M. H., Shaalan H. F. Treatment of agricultural drainage water via lagoon/reverse osmosis system // *Desalination*. 2003. Vol. 152, № 1–3. P. 359–366. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01084-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01084-6).
9. Yadav A., Vashishtha V. K., Yadav H. High-performance solar stills for efficient use of water in agriculture // *Recent Achievements in Mechanical Engineering*. Singapore: Springer, 2021. P. 325–331.
10. Potentials of using duckweed (*Lemna gibba*) for treatment of drainage water for reuse in irrigation purposes / A. Allam, A. Tawfik, A. El-Saadi, A. Negm // *Desalination and Water Treatment*. 2016. Vol. 57, iss. 1. P. 459–467. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.966760>.
11. Снижение минерализации коллекторно-дренажных вод биологическим способом / М. Х. Хамидов, А. К. Жураев, У. А. Жураев, К. Ш. Хамраев, С. К. Уринбаев // *Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков*. 2016. № 13. С. 53–57.
12. Хамидов М. Х., Жураев У. А. Снижение минерализации коллекторно-дренажных вод биологическим способом и использование их в орошаемой земледелии // *Аграрная наука*. 2018. № 10. С. 52–54. <https://doi.org/10.3263/0869-8155-2018-319-10-52-54>.
13. Stuber M. D. Optimal design of fossil-solar hybrid thermal desalination for saline agricultural drainage water reuse // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 89. P. 552–563. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.025>.

14. Pilot demonstration of concentrated solar-powered desalination of subsurface agricultural drainage water and other brackish groundwater sources / M. D. Stuber, C. Sullivan, S. A. Kirk, J. A. Farrand, P. V. Schillaci, B. D. Fojtasek, A. H. Mandell // *Desalination*. 2015. Vol. 355. P. 186–196. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.037>.

15. Бородычев В. В., Конторович И. И. Технология сокращения объемов минерализованного дренажного стока способом интенсифицированного испарения // Основные результаты научных исследований института за 2017 год: сб. науч. тр. / Всерос. науч.-исслед. ин-т гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова. М., 2018. С. 24–34.

16. Конторович И. И. Использование солнечных водоемов для утилизации минерализованного дренажного стока с орошаемых земель // Современные проблемы мелиорации и водного хозяйства: материалы юбилейн. междунар. науч.-практ. конф. М., 2009. Т. 1. С. 395–402.

17. Recent applications of downstream suspension sponge technology for decentralized wastewater treatment / M. Nasr, M. Attia, H. Ezz, M. G. Ibrahim // *Cost Effective Technologies for Solid Waste and Wastewater Treatment*. Elsevier, 2022. P. 59–67. DOI: 10.1016/b978-0-12-822933-0.00014-0.

18. Treatment of agricultural drainage water via downflow hanging sponge system for reuse in agriculture / A. Fleifle, A. Tawfik, O. C. Saavedra, M. Elzeir // *Water Supply*. 2013. Vol. 13, № 2. P. 403–412. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.034>.

19. Шабанов В. В., Рудаченко Е. П. Типизация объектов сельскохозяйственных мелиораций // *Вестник сельскохозяйственной науки*. 1971. № 1. С. 83–86.

20. Магай С. Д. Эффективность и технологии орошения сельскохозяйственных культур минерализованными водами на юге Казахстана // *Гидрометеорология и экология*. 2013. № 2. С. 132–139.

21. Безднина С. Я., Овчинникова Е. В. Биохимическая очистка и регулирование качества коллекторно-дренажных вод // *Методы и технологии комплексной мелиорации и экосистемного водопользования / ВНИИ гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова*. М., 2006. С. 188–203.

22. Конторович И. И. Каталог перспективных ресурсоэкономичных технологий и технических средств для очистки дренажных и сбросных вод гидромелиоративных систем. М.: Россельхозакадемия, 2007. 89 с.

23. Конторович И. И. Технические решения для утилизации дренажных вод // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2011. № 3. С. 1–6.

24. Методы очистки дренажных вод и их использование / Е. Е. Ергожин, Т. К. Чалов, Т. В. Ковригина, К. М. Калмуратова // *Химический журнал Казахстана*. 2019. № 1(65). С. 20–36.

25. Кропина Е. А., Васильев С. М. Перспективы повторного использования дренажно-сбросных вод для орошения // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2010. № 2. С. 22–23.

26. Капустян А. С. Обоснование объема и технические приемы использования дренажных вод на локальных оросительных системах // *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия*. 2016. № 4. С. 150–155.

27. Домашенко Ю. Е., Проценко Н. Н. Анализ зарубежного опыта утилизации сбросных и дренажных вод в оросительных мелиорациях // *Экология и водное хозяйство [Электронный ресурс]*. 2022. Т. 4, № 1. С. 1–13. URL: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=132> (дата обращения: 01.05.2022). <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2022-4-1-1-13>.

28. Васильев Д. Г. Ретехнологизация способа подготовки дренажных и сбросных вод для оросительной мелиорации // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2018. № 5(73). С. 157–160.

29. Пособие по очистке и утилизации дренажно-сбросных вод / ВНИИГиМ, ВНИИОЗ. М.: РАСНХ, 1999. 83 с.

30. Калыбек У. М. Рекомендуемая технологическая схема для опреснения поливных, коллекторно-дренажных вод // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 11-2. С. 52–56.

31. Talaat H. A., Ahmed S. R. Treatment of agricultural drainage water: technological schemes and financial indicators // Desalination. 2007. Vol. 204, № 1–3. P. 102–112. DOI: 10.1016/j.desal.2006.05.011.

32. Пат. 2654763 Российская Федерация, МПК С 09 F 9/02. Способ подготовки сбросных и дренажных вод для сельскохозяйственного использования / Васильев Д. Г., Домашенко Ю. Е., Васильев С. М.; патентообладатель Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. № 2017101951; заявл. 20.01.17; опубл. 22.05.18, Бюл. № 15. 7 с.

33. Vasilyev S. M., Domashenko Yu. E. Scientific rationale for the use of wastewater as an alternative source of irrigation under water deficit // Journal of Environmental Management and Tourism. 2017. Vol. 7, № 4. P. 632–638. [https://doi.org/10.14505/jemt.v7.4\(16\).10](https://doi.org/10.14505/jemt.v7.4(16).10).

References

1. Angelakis A.N., Asano T., Bahri A., Jiménez B., Tchobanoglous G., 2018. Water reuse: From ancient to modern times and the future. *Frontiers of Environmental Science*, 6:26, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00026>.

2. Joksimovic D., Savic D.A., Walters G.A., Bixio D., Katsoufidou K., Yiantsios S.G., 2008. Development and validation of system design principles for water reuse systems. *Desalination*, vol. 218, no. 1-3, pp. 142-153, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.04.091>.

3. Abdel-Azim R., Allam M.N., 2005. Reuse of drainage water in agriculture in Egypt: strategic problems and mitigation measures. *Unconventional Water Use: the WASAMED Project*, pp. 105-117.

4. Borodychev V.V., Kontorovich I.I., 2019. *Inzhenernaya zashchita okruzhayushchey sredy ot vozdeystviya drenazhnogo stoka s oroshaemykh zemel'* [Engineering protection of the environment from the impact of drainage runoff from irrigated lands]. *Razvitie APK na osnove printsipov ratsional'nogo prirodopol'zovaniya i primeneniya konvergentnykh tekhnologii: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, provedennoy v ramkakh Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma, posvyashchennogo 75-letiyu obrazovaniya Volgogradskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Development of the Agro-Industrial Complex Based on the Principles of Rational Environmental Management and Convergent Technologies Use: Proceed. of International Scientific-Practical Conference, devoted to the 75th Anniversary of the Formation of Volgograd State Agrarian University]. Volgograd, pp. 22–31. (In Russian).

5. Borodychev V.V., Kontorovich I.I., 2012. *Kontseptsiya ispol'zovaniya vozobnovlyaemykh istochnikov energii dlya utilizatsii mineralizovannogo drenazhnogo stoka* [The concept of using renewable energy sources for mineralized drainage runoff disposal]. Volgograd, Volgograd State Agrarian University, 104 p. (In Russian).

6. Borodychev V.V., Kontorovich I.I., 2016. [Drainage runoff disposal from irrigated lands: basic requirements for design process]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 3(23), pp. 83-101, available: http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec430-field6.pdf [accessed 01.05.2022]. (In Russian).

7. Wen L., Recknagel F., 2002. In situ removal of dissolved phosphorus in irrigation drainage water by planted floats: preliminary results from growth chamber experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 90, no. 1, pp. 9-15, [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00292-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00292-4).

8. Sorour M.H., El Defrawy N.M.H., Shaalan H.F., 2003. Treatment of agricultural drain-

nage water via lagoon/reverse osmosis system. *Desalination*, vol. 152, no. 1-3, pp. 359-366, [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01084-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01084-6).

9. Yadav A., Vashishtha V.K., Yadav H., 2021. High-performance solar stills for efficient use of water in agriculture. *Recent Achievements in Mechanical Engineering*. Singapore, Springer, pp. 325-331.

10. Allam A., Tawfik A., El-Saadi A., Negm A., 2016. Potentials of using duckweed (*Lemna gibba*) for treatment of drainage water for reuse in irrigation purposes. *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, iss. 1, pp. 459-467, <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.966760>.

11. Khamidov M.Kh., Zhuraev A.K., Zhuraev U.A., Khamrayev K.Sh., Urinbayev S.K., 2016. *Snizhenie mineralizatsii kollektorno-drenazhnykh vod biologicheskim sposobom* [Reduction of mineralization of collector-drainage water by biological method]. *Sel'skokhozyaystvennyye nauki i agropromyshlennyy kompleks na rubezhe vekov* [Agricultural Sciences and Agro-Industrial Complex at the Turn of the Century], no. 13, pp. 53-57. (In Russian).

12. Khamidov M.Kh., Zhuraev U.A., 2018. *Snizhenie mineralizatsii kollektorno-drenazhnykh vod biologicheskim sposobom i ispol'zovanie ikh v oroshaemom zemledelii* [The reduction of mineralization of collector-drainage water by biological method and their use in irrigated farming]. *Agrarnaya nauka* [Agrarian Science], no. 10, pp. 52-54, <https://doi.org/10.3263/0869-8155-2018-319-10-52-54>. (In Russian).

13. Stuber M.D., 2016. Optimal design of fossil-solar hybrid thermal desalination for saline agricultural drainage water reuse. *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 552-563, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.025>.

14. Stuber M.D., Sullivan C., Kirk S.A., Farrand J.A., Schillaci P.V., Fojtasek B.D., Mandell A.H., 2015. Pilot demonstration of concentrated solar-powered desalination of subsurface agricultural drainage water and other brackish groundwater sources. *Desalination*, vol. 355, pp. 186-196, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.037>.

15. Borodychev V.V., Kontorovich I.I., 2018. *Tekhnologiya sokrashcheniya ob'emov mineralizovannogo drenazhnogo stoka sposobom intensivitsirovannogo ispareniya* [Technology for reducing the volume of mineralized drainage runoff by the method of intensified evaporation]. *Osnovnye rezul'taty nauchnykh issledovaniy instituta za 2017 god: sb. nauch. tr. Vseros. nauch.-issled. in-t gidrotekhniki i melioratsii im. A. N. Kostyakova* [Main Results of Scientific Research of the Institute for 2017: Proc. of All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov]. Moscow, pp. 24-34. (In Russian).

16. Kontorovich I.I., 2009. *Ispol'zovaniye solnechnykh vodoemov dlya utilizatsii mineralizovannogo drenazhnogo stoka s oroshaemykh zemel'* [Use of solar reservoirs for the utilization of mineralized drainage runoff from irrigated lands]. *Sovremennyye problemy melioratsii i vodnogo khozyaystva: materialy yubileynoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern Problems of Land Reclamation and Water Management: Proc. of the Anniversary International Scientific-Practical Conference]. Moscow, vol. 1, pp. 395-402. (In Russian).

17. Nasr M., Attia M., Ezz H., Ibrahim M.G., 2022. Recent applications of downstream suspension sponge technology for decentralized wastewater treatment. *Cost Effective Technologies for Solid Waste and Wastewater Treatment*. Elsevier, pp. 59-67, DOI: [10.1016/b978-0-12-822933-0.00014-0](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822933-0.00014-0).

18. Fleifle A., Tawfik A., Saavedra O.C., Elzeir M., 2013. Treatment of agricultural drainage water via downflow hanging sponge system for reuse in agriculture. *Water Supply*, vol. 13, no. 2, pp. 403-412, <https://doi.org/10.2166/ws.2013.034>.

19. Shabanov V.V., Rudachenko E.P., 1971. *Tipizatsiya ob'ektov sel'skokhozyaystvennykh melioratsiy* [Typification of agricultural reclamation objects]. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* [Bulletin of Agricultural Science], no. 1, pp. 83-86. (In Russian).

20. Magay S.D., 2013. *Effektivnost' i tekhnologii orosheniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur mineralizovannymi vodami na yuge Kazakhstana* [Efficiency and agricultural crops irrigation technologies by mineralized waters in the south of Kazakhstan]. *Gidrometeorologiya i ekologiya* [Hydrometeorology and Ecology], no. 2, pp. 132-139. (In Russian).

21. Bezdina S.Ya., Ovchinnikova E.V., 2006. *Biokhimicheskaya ochistka i regulirovanie kachestva kollektorno-drenaznykh vod* [Biochemical purification and regulation of the quality of collector-drainage water]. *Metody i tekhnologii kompleksnoy melioratsii i ekosistemnogo vodopol'zovaniya* [Methods and Technologies of Complex Reclamation and Ecosystem Water Use]. All-Russian Research Institute of Hydrotechnics and Reclamation named after A. N. Kostyakov, Moscow, pp. 188-203. (In Russian).

22. Kontorovich I.I., 2007. *Katalog perspektivnykh resursoekonomichnykh tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv dlya ochistki drenaznykh i sbrosnykh vod gidromeliorativnykh sistem* [Catalog of the Perspective Resource-efficient Technologies and Techniques for the Treatment of Drainage Water and Wastewater of Hydro-reclamation Systems]. Moscow, Rosselkhozakademiya, 89 p. (In Russian).

23. Kontorovich I.I., 2011. *Tekhnicheskie resheniya dlya utilizatsii drenaznykh vod* [Technical solutions for the disposal of drainage waters]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proc. of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 3, pp. 1-6. (In Russian).

24. Ergozhin E.E., Chalov T.K., Kovrigina T.V., Kalmuratova K.M., 2019. *Metody ochistki drenaznykh vod i ikh ispol'zovanie* [Drainage water treatment methods and their use]. *Khimicheskii zhurnal Kazakhstana* [Chemical Journal of Kazakhstan], no. 1(65), pp. 20-36. (In Russian).

25. Kropina E.A., Vasiliev S.M., 2010. *Perspektivy povtornogo ispol'zovaniya drenazhno-sbrosnykh vod dlya orosheniya* [Prospects for the reuse of drainage and waste water for irrigation]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 2, pp. 22-23. (In Russian).

26. Kapustyan A.S., 2016. *Obosnovanie ob'ema i tekhnicheskie priemy ispol'zovaniya drenaznykh vod na lokal'nykh orositel'nykh sistemakh* [Substantiation of the volume and technical methods of using drainage water in local irrigation systems]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 4, pp. 150-155. (In Russian).

27. Domashenko Yu.E., Protsenko N.N., 2022. [Analysis of foreign experience of waste and drainage water utilization in irrigation reclamation]. *Ekologiya i vodnoe khozyaystvo*, vol. 4, no. 1, pp. 1-13, available: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=132> [accessed 01.05.2022], <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2022-4-1-1-13>. (In Russian).

28. Vasiliev D.G., 2018. *Retekhnologizatsiya sposoba podgotovki drenaznykh i sbrosnykh vod dlya orositel'noy melioratsii* [Re-engineering of the treatment method of drainage and wastewater for irrigation]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proc. of Orenburg State Agrarian University], no. 5(73), pp. 157-160. (In Russian).

29. *Posobiye po ochistke i utilizatsii drenazhno-sbrosnykh vod* [Manual for Treatment and Disposal of Drainage and Waste Water]. VNIIGiM, VNIIOZ, Moscow, RASNKh, 1999, 83 p. (In Russian).

30. Kalybek U.M., 2016. *Rekomenduyemaya tekhnologicheskaya skhema dlya opresneniya polivnykh, kollektorno-drenaznykh vod* [Recommended technological scheme for desalination of irrigation, collector and drainage water]. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii* [Modern Trends in the Development of Science and Technology], no. 11-2, pp. 52-56. (In Russian).

31. Talaat H.A., Ahmed S.R., 2007. Treatment of agricultural drainage water: techno-

logical schemes and financial indicators. Desalination, vol. 204, no. 1-3, pp. 102-112, DOI: 10.1016/j.desal.2006.05.011.

32. Vasiliev D.G., Domashenko Yu.E., Vasiliev S.M., 2018. *Sposob podgotovki sbrosnykh i drenazhnykh vod dlya sel'skokhozyaystvennogo ispol'zovaniya* [The Method of Treatment of Waste and Drainage Water for Agricultural Use]. Patent RF, no. 2654763. (In Russian).

33. Vasilyev S.M., Domashenko Yu.E., 2017. Scientific rationale for the use of wastewater as an alternative source of irrigation under water deficit. Journal of Environmental Management and Tourism, vol. 7, no. 4, pp. 632-638, [https://doi.org/10.14505//jemt.v7.4\(16\).10](https://doi.org/10.14505//jemt.v7.4(16).10).

Информация об авторах

Ю. Е. Домашенко – доктор технических наук;

Н. Н. Проценко – аспирант.

Information about the authors

Yu. E. Domashenko – Doctor of Technical Sciences;

N. N. Protsenko – Postgraduate Student.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата,
самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical
violations in scientific publications.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию 13.07.2022; одобрена после рецензирования 06.09.2022;
принята к публикации 12.09.2022.*

*The article was submitted 13.07.2022; approved after reviewing 06.09.2022; accepted for
publication 12.09.2022.*