

Водные биоресурсы и среда обитания
2025, том 8, номер 2, с. 35–45
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



Aquatic Bioresources & Environment
2025, vol. 8, no. 2, pp. 35–45
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

УДК 628.35

https://doi.org/10.47921/2619-1024_2025_8_2_35

EDN: BPXUDR



Для цитирования: Лассана Диоп, Степаненко Е.И., Волкова И.В. Фиторемедиация сточных вод кожевенного завода с помощью ряски малой (*Lemna minor*). *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2025. Т. 8, № 2: 35–45. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2025_8_2_35.

For citation: Lassana Diop, Stepanenko E.A., Volkova I.V. Phytoremediation of tannery wastewater using common duckweed (*Lemna minor*). *Aquatic Bioresources & Environment*. 2025. Vol. 8, no. 2: 35–45. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2025_8_2_35. (In Russian).

ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ СТОЧНЫХ ВОД КОЖЕВЕННОГО ЗАВОДА С ПОМОЩЬЮ РЯСКИ МАЛОЙ (*LEMNA MINOR*)

Диоп Лассана*, Е. И. Степаненко, И. В. Волкова

Астраханский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «АГТУ»),
Астрахань 414025, Россия

*E-mail: lassanakarifo@gmail.com

Аннотация

Введение. В условиях ухудшения состояния водных экосистем из-за сброса неочищенных сточных вод, особенно от кожевенных производств, возрастает необходимость внедрения экологически безопасных методов очистки. **Актуальность.** Традиционные методы очистки сточных вод кожевенных заводов требуют значительных финансовых и энергетических затрат и не всегда применимы в развивающихся странах. Фиторемедиация — это перспективный и экономически эффективный способ устранения загрязнений с использованием водных растений. **Цель** работы — оценить эффективность ряски малой (*Lemna minor*) в очистке сточных вод кожевенного завода на стадии преддубления в гидропонной системе. **Методы.** Исследование проводилось в лабораторных условиях. Были подготовлены пять образцов воды с различной степенью разбавления сточных вод дистиллированной водой. В каждый аквариум помещалась ряска. Проводился анализ гидрохимических показателей (ХПК, БПК₅, NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻, взвешенные вещества) до и после воздействия растения. **Результаты.** Наибольшую эффективность показал образец с 75 % сточных вод и 25 % дистиллированной воды: снижение ХПК — на 52,13 %, БПК₅ — на 77,0 %, NH₄⁺ — на 31,75 %, взвешенных веществ — на 80,51 %, полное устранение нитратов и нитритов. Рост ряски был наиболее интенсивным в этом образце. **Выводы.** Ряска малая (*Lemna minor*) продемонстрировала высокий потенциал в очистке кожевенных сточных вод, проявив себя как экологически безопасный и малозатратный метод. Особенно эффективной оказалась система с разбавлением 75/25.

Ключевые слова: сточные воды, дубление, гидрохимические показатели, фиторемедиация, ХПК, БПК₅, аммоний, нитрат, нитрит

PHYTOREMEDIATION OF TANNERY WASTEWATER USING COMMON DUCKWEED (*LEMNA MINOR*)

Diop Lassana*, E. A. Stepanenko, I. V. Volkova

Astrakhan State Technical University (FSBEI HE "ASTU"), Astrakhan 414025, Russia

*E-mail: lassanakarifo@gmail.com

Abstract

Background. In the context of ongoing deterioration of aquatic ecosystems due to untreated wastewater discharges—especially from tanneries—there is an urgent need to adopt environmentally friendly treatment methods. **Relevance.** Traditional methods for treating tannery wastewater are financially and energetically expensive and often unsuitable for developing countries. Phytoremediation offers a promising, cost-effective, and eco-friendly alternative that relies on the use of aquatic plants. The **aim** of this work is to evaluate the effectiveness of the common duckweed (*Lemna minor*) in treating tannery wastewater (pre-tanning stage) using a hydroponic system. **Methods.** The study was conducted under laboratory conditions with five water samples containing different ratios of tannery wastewater diluted with distilled water. *Lemna minor* was introduced into each aquarium. Analysis of hydrochemical parameters (COD, BOD₅, NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻, suspended solids) was conducted before and after treatment. **Results.** The sample with 75 % wastewater and 25 % distilled water showed the highest effectiveness: COD reduction by 52.13 %, BOD₅ by 77.0 %, NH₄⁺ by 31.75 %, suspended solids by 80.51 %, and complete removal of nitrates and nitrites. The growth rate of *Lemna minor* was also the highest in this sample. **Conclusion.** Common duckweed (*Lemna minor*) demonstrated strong potential in treating tannery wastewater, proving to be a promising, ecologically safe and low-cost solution. The 75/25 dilution is found to be the most effective.

Keywords: wastewater, tanning, hydrochemical parameters, phytoremediation, COD, BOD₅, ammonium, nitrate, nitrite

ВВЕДЕНИЕ

Кожевенная промышленность играет важную экономическую роль во многих странах, особенно в развивающихся регионах, где она является основным источником занятости и дохода. Однако деятельность кожевенных заводов приводит к образованию сточных вод, которые могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду и здоровье живых организмов, включая людей и животных. В частности, неочищенные сточные воды кожевенных заводов могут содержать высокие уровни органических веществ, хрома (в виде Cr(III) или Cr(VI)), сульфидов, аммиачного азота и солей [1, 2]. Эти вещества, если их не устранять в процессе очистки, могут вызвать серьезные экологические проблемы.

В кожевенной промышленности в при выделке шкур животных используется большое количество химикатов и воды. Значительная часть этих химикатов попадает в сточные воды, что приводит к загрязнению окружающей среды. К числу основных экологических последствий такого загрязнения относится эвтрофикация, вы-

званная обогащением питательными веществами, в частности фосфором (P) и азотом (N), что способствует росту водорослей. Они могут загрязнять воду, оказывать влияние на водную фауну и представлять опасность для здоровья человека, особенно при использовании водного объекта в рекреационных целях или в качестве источника питьевой воды [3]. Кроме того, при дублении кожи используется большое количество хрома (Cr), который может попадать в водную среду, например, реки и лагуны, вызывая локальное загрязнение воды [4]. Сточные воды кожевенных заводов наносят вред нормальной жизнедеятельности биоценозов поверхностных водоемов и почвы [5, 6].

Для производства кожи требуемого качества из шкур животных необходим ряд последовательных процессов, включая предварительное дубление, дубление, мокрую отделку и отделку, чтобы превратить сырую шкуру в кожаные изделия. Среди этих этапов наибольший расход воды происходит на этапе предварительного дубления, а следовательно, генерируется большой объем

сточных вод [7], содержащих сверхлимитное количество органических веществ, сульфидов, хлоридов и других загрязнителей, которые составляют 60–70 % от общей загрязняющей нагрузки, генерируемой кожевенными заводами. Образующиеся сточные воды необходимо эффективно очищать ввиду их высокой токсичности.

Традиционные методы очистки сточных вод кожевенных заводов включают физико-химические (коагуляция-флокуляция, осаждение, адсорбция) и биологические (обработка активным илом, отстойник) процессы [8, 9]. Хотя эти методы эффективны для снижения нагрузки токсикантов на водные объекты, они имеют существенные недостатки: высокие эксплуатационные расходы, значительное потребление энергии и образование остаточного ила, требующего дополнительной обработки [10, 11]. Более того, в развивающихся странах, где инфраструктура очистки сточных вод зачастую неадекватна, эти методы не всегда осуществимы.

Затратность и энергоемкость традиционных методов очистки сточных вод делают их плохо подходящими для условий, где ресурсы ограничены [12]. Именно в этом контексте альтернативные решения, такие как использование гидропонных систем, связанных с водными растениями — например, ряска малой (*Lemna minor*), — становятся перспективными вариантами очистки сточных вод кожевенных заводов.

Ряска, благодаря своему быстрому росту и способности поглощать питательные и загрязняющие вещества, широко изучалась на предмет ее потенциала в фиторемедиации. Эти небольшие плавающие растения, которые часто считаются «сорняками» в водных экосистемах, обладают замечательными свойствами, превращающими их в идеальных кандидатов для очистки загрязненной воды. Их способность накапливать тяжелые металлы, разлагать органические соединения и снижать содержание питательных веществ в сточных водах была продемонстрирована в нескольких исследованиях [9]. Более того, их интеграция в гидропонные системы представляет собой инновационный и устойчивый подход к очистке промышленных сточных вод, позволяя при этом производить ценную биомассу.

Целью работы являлось изучение потенциала ряски в очистке сточных вод кожевенных заводов (этап преддубливания) в гидропонной системе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Водные растения, используемые в гидропонной системе

Ряска малая (*Lemna minor*) — многолетнее водное растение, вид рода *Lemna* подсемейства рясковых семейства ароидных. Цвет ряски малой — бледно-зеленый, непрозрачный, листья имеют от 3 до 5 жилок, которые хорошо видны в прозрачном виде. Это самые маленькие и простые плавающие однодольные растения в мире [10]. Встречается в виде колоний (свободных или соединенных тонким черешком), состоящих не менее чем из 2–4 сплюснутых, чечевицеобразных листьев малого размера (от 2 до 4 мм). У каждого есть нитевидный прозрачный корень небольшого диаметра; размер корней (от 1 мм до 5 см) тесно связан с наличием трофических элементов (азота и фосфора) в водной среде [11].

Ряска малая (*Lemna minor*) использовалась для снижения токсической нагрузки на воду; в частности, было необходимо выяснить эффективность ее работы в отношении таких показателей, как БПК₅, ХПК, аммоний (NH_4^+), нитраты, нитриты и взвешенные вещества из сточных вод кожевенных заводов. Водное растение сначала поместили на неделю в резервуары с дистиллированной водой для акклиматизации, а затем подвергли воздействию загрязняющих веществ из сточных вод кожевенного завода.

Анализ качества сточных вод

Исследования проводились на реальных сточных водах кожевенного завода после стадии преддублирования. Гидрохимические показатели (БПК₅, ХПК, NH_4^+ , NO_3^- и NO_2^-) этих вод определялись до и после проведения экспериментов по фиторемедиации в Федеральном центре оценки безопасности и качества продукции агропромышленного комплекса на базе испытательной лаборатории (г. Астрахань).

Экспериментальная модель ремедиации сточной воды в лабораторных условиях

Перед экспериментальными исследованиями все собранные в аквариуме растения были промыты и оставлены в емкости, наполненной 10 литрами дистиллированной воды, на одну неделю. Излишки воды отжимали сухой тканью.

Для оценки способности ряски очищать сточные воды были проанализированы следующие показатели: NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , ХПК и БПК₅. Были

подготовлены пять образцов воды из сточных вод кожевенного завода:

Проба № 1 состояла только из сточных вод;

Проба № 2 состояла из 75 % сточных вод и 25 % дистиллированной воды;

Проба № 3 состояла из 50 % сточных вод и 50 % дистиллированной воды;

Проба № 4 состояла из 25 % сточных вод и 75 % дистиллированной воды;

Проба № 5 — контрольная (только дистиллированная вода).

Модельные образцы (по 2,5 л каждый) были разлиты в 5 прямоугольных стеклянных аквариумов вместимостью по 8 л. Затем в каждый аквариум было добавлено 33 г свежей ряски (*Lemna minor*). В течение всего эксперимента в аквариумы не добавляли новых сточных вод, что позволило обеспечить постоянную тенденцию к снижению загрязнения [13]. Однако, в связи с процессом испарения воды в аквариумах, контактирующих с воздухом, проводили оценку уровня воды в каждом из них с целью его регулирования.

Накопительную способность ряски оценивали в течение четырнадцати суток (далее — период исследования). В течение каждого дня периода

исследования контролировался уровень испарения воды, определялась температура сточных вод и окружающей среды, а также визуально оценивался объем прироста биомассы в объеме сточных вод. Значения гидрохимических показателей в образцах очищенных сточных вод измерялись для оценки изменений качества воды и эффективности процесса фиторемедиации.

На рисунке представлена экспериментальная установка для гидропонной очистки сточных вод кожевенного завода.

Рост ряски малой (*Lemna minor*) оценивали после процесса гидропонной обработки. Для этого сразу после отбора проб определяли массу ряски, из которой была удалена влага с помощью бумажных полотенец.

Эффективность очистки определяется по следующей формуле [14]:

$$\Xi = \left(\frac{C_1 - C_2}{C_1} \right) \times 100\% ,$$

где C_1 — концентрация загрязняющего вещества в сточной воде до очистки, мг/л; C_2 — концентрация загрязняющего вещества после очистки, мг/л.



Экспериментальное устройство
Experimental setup

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Гидрохимические показатели сточных вод кожевенного завода до проведения фиторе-
медиации**

Согласно Положению об охране окружающей среды, в Российской Федерации, как и в других странах, значения исходных гидрохимических показателей сточных вод и промышленных стоков не должны превышать предельно допустимую концентрацию (ПДК). Нормирование качества воды помогает предотвратить потенциальное загрязнение водных ресурсов и окружающей среды в целом.

В табл. 1 приведен гидрохимический анализ сточных вод кожевенного завода до начала фито-ремедиации.

Из данных табл. 1 следует, что сточные воды с этапа предварительного дубления содержат большое количество органических веществ; об этом свидетельствует ХПК, которое составляло 4 ПДК, БПК₅ — 5,48 ПДК, а также NH₄⁺ — 1,6 ПДК и взвешенные вещества — 4 ПДК. Белки, жиры и другие органические вещества обычно выделяются на этапе обезжиривания и очистки шкур. Что касается взвешенных веществ, то они обусловлены наличием в воде частиц кожи, волос и других органических остатков. Высокая концентрация соединений азота в сточных водах

на этапе предварительного дубления в основном является следствием разложения органических веществ микроорганизмами.

Фиторе-медиация сточных вод кожевенных заводов

Настоящее исследование было проведено в лабораторных условиях, где сточные воды кожевенного завода очищались в экспериментальной модели (рисунок). В этой модели свежая рыбка выращивалась в гидропонной системе в присутствии сточных вод кожевенного завода в течение двух недель в условиях, аналогичных условиям окружающей среды.

Анализ был проведен в лабораторных условиях через 14 дней после внесения рыбки малой (*Lemna minor*) в несколько аквариумов, содержащих образцы сточных вод и дистиллированную воду в качестве контрольного образца. При первой визуальной и органолептической оценке было отмечено значительное улучшение свойств обработанной воды — в частности, исчезновение запаха, характерного для сточной воды, и снижение ее мутности. Экспериментальные результаты, приведенные в табл. 2, указывают на снижение содержания загрязняющих веществ в большинстве образцов.

Следует отметить, что в первом аквариуме (100 % сточных вод) произошло уменьшение ХПК

Таблица 1. Гидрохимический анализ сточных вод кожевенных заводов на этапе предварительного дубления
Table 1. Hydrochemical analysis of wastewater from tanneries at the preliminary tanning stage

Показатели Parameters	Фактическое значение до очистки сточных вод, мг/л Actual value before wastewater treatment, mg/L	Норматив допустимых концентраций загрязняющих веществ Established permissible concentrations of pollutants
pH pH	7,5±0,1	6–9 единиц 6–9 units
ХПК COD	2026±433	500 мг/дм ³ 500 mg/dm ³
БПК ₅ BOD ₅	1645±23	300 мг/дм ³ 300 mg/dm ³
Взвешенные вещества Suspended solids	1200±33	300 мг/дм ³ 300 mg/dm ³
Нитритный азот Nitrite nitrogen	0,0055	0,08 мг/дм ³ по нитрит-иону 0.08 mg/dm ³ based on the nitrite ion
Аммоний-ион Ammonium ion	40±6	25 мг/дм ³ 25 mg/dm ³
Нитрат-ион Nitrate ion	81±16	40 мг/дм ³ по нитратам 40 mg/dm ³ based on nitrates

Таблица 2. Результаты гидрохимического анализа сточных вод кожевенного завода после стадии предварительного дубления в условиях модельного эксперимента**Table 2.** Results of hydrochemical analysis of tannery wastewater after the preliminary tanning stage in a model experiment

Исследуемые пробы Investigated samples	pH	ХПК, мг/л COD, mg/L	БПК ₅ , мг/л BOD ₅ , mg/L	Взвешенные вещества, мг/л Suspended solids, mg/L	NH ₄ ⁺ , мг/л NH ₄ ⁺ , mg/L	NO ₃ ⁻ , мг/л NO ₃ ⁻ , mg/L	NO ₂ ⁻ , мг/л NO ₂ ⁻ , mg/L	Биомасса ряски (конец опыта), г Duckweed biomass (end of the experiment), g
Исходная сточная вода Initial wastewater	8,5	2026±433	1645±23	1200±33	40±6	81±16	0,005	нет / no
Проба № 1 Sample No. 1	7,4	1400±433	890±23	578,5±33	23,5±6	8±5	<0,005	52,38
Проба № 2 Sample No. 2	6,5	1057±291	377±23	233,8±33	27,3±6	<0,005	<0,005	76,89
Проба № 3 Sample No. 3	7,5	1326±249	553±23	177,4±33	40±6	29,2	<0,005	41,85
Проба № 4 Sample No. 4	7,5	1930±433	933±23	75±33	40±6	81±16	<0,005	37,72
Проба № 5 Sample No. 5	7	нет / no	нет / no	нет / no	нет / no	нет / no	нет / no	24

с 2026 до 1400 мг/л, БПК₅ — с 1645 до 890 мг/л, NH₄⁺ — с 40 до 23,5 мг/л, NO₃⁻ — с 81 до 8 мг/л и взвешенных веществ — с 1200 до 578,5 мг/л.

Можно уверенно сказать, что наиболее эффективная работа фиторемедианта наблюдалась во втором аквариуме (75 % сточных вод и 25 % дистиллированной воды): отмечалось уменьшение ХПК с 2026 до 1057 мг/л, БПК₅ — с 1645 до 377 мг/л, NH₄⁺ — с 40 до 27,3 мг/л, NO₃⁻ — с 81 до 0 мг/л и взвешенных веществ — с 1200 до 233,8 мг/л.

В третьем аквариуме (50 % сточных вод и 50 % дистиллированной воды) отмечалось незначительное изменение ХПК с 2026 до 1326 мг/л, БПК₅ — с 1645 до 1326 мг/л, NO₃⁻ — с 81 до 29,3 мг/л и взвешенных веществ — с 1200 до 177,4 мг/л, однако снижения NH₄⁺ не наблюдалось.

Наконец, в четвертом аквариуме (25 % сточных вод и 75 % дистиллированной воды) ХПК изменилось с 2026 до 1930 мг/л, БПК₅ — с 1645 до 933 мг/л, взвешенные вещества — с 1200 до 75 мг/л, в то время как аммоний и нитрат остались неизменными (без снижения).

Наилучшие результаты снижения ХПК, БПК₅ и NO₃⁻ были получены во втором аквариуме; их исходные концентрации после обработки снизились в 2, 4 и 100 раз, соответственно.

Для NH₄⁺ наилучший результат наблюдался в первом аквариуме, где его исходная концентрация снизилась в 1,7 раза. Самая эффективная очистка от взвешенных веществ наблюдалась в четвертом аквариуме (их концентрация по сравнению с первоначальной снизилась в 16 раз). Также было обнаружено: ХПК — 2,11 ПДК, БПК₅ — 1,25 ПДК, взвешенные вещества — 0,77 ПДК, NH₄⁺ — 1,09 ПДК, а NO₂⁻ и NO₃⁻ в очищенной воде находились на уровне ниже 0,005 мг/дм³ (табл. 2).

В работе оценена эффективность очистки различных образцов сточной воды с помощью ряски малой (*Letna minor*) (табл. 3).

Из результатов, приведенных в табл. 3, видно, что в первом аквариуме после добавления ряски заметно снизились концентрации исследуемых гидрохимических показателей. Произошло уменьшение содержания NO₂⁻ на 100 %, NO₃⁻ — на 90 %, взвешенных веществ — на 52 % и БПК₅ — на 46 %, а ХПК снизилось на 31 %, что могло быть связано с наличием в сточных водах высокой концентрации органических загрязнителей, которые перегружают поглощающие механизмы растения, снижая эффективность устранения этих веществ. С другой стороны, снижение содержания аммония (41 %) можно считать значительным. Этот

Таблица 3. Эффективность предложенной экспериментальной модели**Table 3.** Efficiency of the proposed experimental model

Показатели Parameters	ХПК COD	БПК ₅ BOD ₅	Взвешенные вещества Suspended solids	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
Проба № 1. Эффективность очистки (%) Sample No. 1. Purification efficiency (%)	31	46	52	1	90
Проба № 2. Эффективность очистки (%) Sample No. 2. Purification efficiency (%)	52,13	77	80,5	31,75	100
Проба № 3. Эффективность очистки (%) Sample No. 3. Purification efficiency (%)	39,89	66,38	85,52	0	0
Проба № 4. Эффективность очистки (%) Sample No. 4. Purification efficiency (%)	12,51	43,28	93,75	0	0

результат согласуется с выводом K. Zhang et al. [15], которые сообщили, что ряска малая (*Lemna minor*) хорошо растет при концентрации NH₄⁺ до 84 мг/л. После проведения фиторемедиации наблюдался значительный рост ряски, что обусловлено поглощением ею питательных веществ.

Во втором аквариуме, где сточная вода была разбавлена на 25 % (75 % сточной воды и 25 % дистиллированной воды), ряска оказалась очень эффективной в устранении загрязняющих веществ за счет более интенсивного роста (масса растения увеличилась вдвое), что могло быть связано со значительным накоплением питательных веществ, присутствующих в данной среде. Таким образом, снижение ХПК составило 52,13 %, БПК₅ — 77,0 %, NH₄⁺ — 31,75 %, взвешенных веществ — 80,51 %. Показатель pH в данном аквариуме соответствовал норме. Этот результат свидетельствует о том, что разбавление 75/25 оптимизирует эффективность растений в поглощении питательных веществ и разложении органических соединений.

В третьем аквариуме, содержащем 50 % сточной воды и 50 % дистиллированной воды, наблюдался умеренный рост ряски. Было отмечено незначительное снижение гидрохимических показателей: на 39,89 %, 66,38 %, 85,52 % и 63,95 % для ХПК, БПК₅, взвешенных веществ и NO₃⁻, соответственно. Концентрация NO₂⁻ снизилась на 100 %, однако этот процесс не оказал влияния на снижение содержания аммония (его концентрация осталась прежней). Это может быть связано с низким содержанием NH₄⁺, который трудно усваивается растениями.

В четвертом экспериментальном устройстве, содержащем 25 % сточных вод и 75 % дистиллированной воды, наблюдался слабый рост ряски

из-за недостатка питательных веществ. Результаты эксперимента указывают на снижение ХПК на 12,51 %, БПК₅ на 43,28 %, взвешенных веществ на 93,75 % и на полное отсутствие NO₃⁻. С другой стороны, снижения содержания нитратов и аммония зафиксировано не было. В случае значительно разбавленных сточных вод (75 %), эффективность работы установки снижалась, вероятно, из-за недостаточной концентрации питательных веществ. По сравнению с другими результатами, в данном аквариуме было получено существенное снижение содержания взвешенных веществ (возможно, из-за их низкого первоначального содержания). Umar et al. [16] утверждает, что нагрузки на корневые системы водных растений или макрофитов усиливают их способность улавливать и притягивать частицы, такие как взвешенные вещества.

В контрольном аквариуме содержалась только дистиллированная вода, т. е. бедная питательными веществами и минеральными солями, необходимыми для прироста биомассы. После пребывания в этой воде ряска замедлила свой рост, а затем начала отмирать, что объясняет уменьшение ее массы (24 г) после обработки по сравнению с исходной массой (33 г).

В настоящем исследовании максимальная эффективность очистки воды от веществ органической природы наблюдалась в аквариуме № 2 (снижение БПК₅ от контроля на 77,0 %), а минимальная — в аквариуме № 4 (с уменьшением показателя, характеризующего суммарное содержание в воде веществ органической природы, на 43,28 %). Аналогичные результаты были получены Ahmadi et al. [9], в работе которых иллюстрируется уменьшение БПК₅ на 75 % на очистных сооружениях с ряской (*Lemna minor*), и в работе Ahmed et al. [17], чьи исследования очищенных

сточных вод в водно-болотных угодьях с вертикальной системой подземного потока показали снижение БПК₅ на 93,26 %. Значительное изменение такого показателя, как ХПК, в результате очистки сточной воды ряской было отмечено во втором аквариуме — химическое потребление кислорода снизилось на 52,13 %. Полученные результаты наглядно иллюстрируют, что ряска (*Lemna minor*) более эффективна в снижении органической нагрузки, поскольку обеспечивает дополнительную площадь поверхности для роста бактерий и дополнительный запас кислорода [18].

В исследуемых аквариумах наибольшее снижение содержания взвешенных веществ наблюдалось в аквариуме № 4 (93,75 %), а наименьшее — в первом аквариуме (52 %). Более высокая эффективность может быть обусловлена степенью разбавления. В настоящем исследовании максимальная скорость удаления аммония (41 %) наблюдалась в аквариуме № 1 (только сточные воды), тогда как нитратов (100 %) — в аквариуме № 2. Rogers et al. [19] пришли к выводу, что доминирующим механизмом удаления азота является его поглощение растениями.

В конечном итоге наибольшее снижение исследуемых гидрохимических показателей отмечено в аквариуме № 2 (75 % сточных вод и 25 % дистиллированной воды). Это показывает, что данный образец модельной сточной воды является наиболее подходящей для роста ряски средой и, следовательно, наиболее подходящей средой для оптимизации ее эффективности в очистке воды. Таким образом, для снижения токсичности загрязненной сточной воды ряске в целом и ряске малой в частности необходимы условия, благоприятные для их роста. Факторами, ограничивающими рост ряски малой (*Lemna minor*) и, следовательно, ее способность поглощать загрязняющие вещества, присутствующие в воде, являются pH, температура, доступность питательных веществ, концентрация токсичных веществ, свет и т. д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Промышленные сточные воды содержат высокие концентрации органических и азотистых соединений, которые могут представлять серьезную экологическую угрозу, если их не устранить. Сравнивая полученные результаты, было установлено, что более высокая эффективность очистки

сточных вод кожевенного производства после стадии предварительного дубления была получена с помощью ряски малой (*Lemna minor*) во втором аквариуме (75 % сточных вод и 25 % дистиллированной воды). Эффективность очистки достигала порядка 52,13 % для ХПК, 77,0 % — для БПК₅, 31,75 % — для NH₄⁺, 80,51 % — для взвешенных веществ и 100 % — для нитратов и нитритов. Хотя значения ХПК и концентрация аммиачного азота не соответствуют нормам для сбросов в городские канализационные стоки, изложенным в Постановлении Правительства РФ от 29.07.2013 № 644 «Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации», подобная очистка является перспективной и эффективной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tadesse G.L., Guya T.K. Impacts of tannery effluent on environments and human health. *Journal of Environment and Earth Science*. 2017. Vol. 7, no. 3: 88–97.
2. Nguyen T.T.N., Némery J., Gratiot N., Strady E., Tran V.Q., Nguyen A.T., Aimé J., Peyne A. Nutrient dynamics and eutrophication assessment in the tropical river system of Saigon – Dongnai (southern Vietnam). *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 653: 370–383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.319>.
3. Vignati D.A.L., Ferrari B.J.D., Roulier J.-L., Coquery M., Szalinska E., Bobrowski A., Czaplicka A., Kownacki A., Dominik J. Chromium bioavailability in aquatic systems impacted by tannery wastewaters. Part 1: Understanding chromium accumulation by indigenous chironomids. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 653: 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.259>.
4. Treatment and recycling of wastewater from tannery. *Advances in biological treatment of industrial waste water and their recycling for a sustainable future* / R.L. Singh, R.P. Singh (eds.). Singapore: Springer Singapore, 2019: 51–90.
5. Weng Ch.-H. Water pollution prevention and state of the art treatment technologies. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27, no. 28: 34583–34585. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09994-5>.
6. Sathya K., Nagarajan K., Carlin Geor Malar G., Rajalakshmi S., Raja Lakshmi P. A comprehensive review on comparison among effluent treatment methods and modern methods of treatment of industrial wastewater effluent from different sources. *Applied Water Science*. 2022. Vol. 12, no. 4. e70. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01594-7>.

7. Polńska W., Kotowska U., Kiejza D., Karpińska J. Insights into the use of phytoremediation processes for the removal of organic micropollutants from water and wastewater; a review. *Water*. 2021. Vol. 13, no. 15. e2065. <https://doi.org/10.3390/w13152065>.
8. Crini G., Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*. 2018. Vol. 17: 145–155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>.
9. Ahmadi A.W., Dursun S. Assessing the efficiency and role of duckweed (*Lemna minor*) in the removal of pollutants from wastewater treatment plant secondary clarifier tanks: A comprehensive review. *Central Asian Journal of Water Research*. 2024. Vol. 10, no. 1: 115–125. <https://doi.org/10.29258/CAJWR/2024-R1.v10-1/115-125.eng>.
10. Hillman W.S., Culley D.D. The uses of duckweed. *American Scientist*. 1978. Vol. 66, no. 4: 442–451. <https://doi.org/10.5555/19781943893>.
11. Cauzzi N. Evaluation de l'éco-compatibilité de sédiments contaminés, traités ou non par un procédé physico-chimique, dans le cadre d'un scénario de dépôt en gravière — Étude en microcosmes aquatiques. Villeurbanne: INSA de Lyon, 2007. 341 p.
12. Mahmud Md.S., Hasan Md.M., Islam Md.B. Advances in heavy metal detection: From traditional to 3D-printed and smartphone-based methods. *Journal of Next-Gen Engineering Systems*. 2024. Vol. 1, no. 1: 11–34. <https://doi.org/10.70937/jnes.v1i01.25>.
13. Akinbile C.O., Yuso M.S. Assessing water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and lettuce (*Pistia stratiotes*) effectiveness in aquaculture wastewater treatment. *International Journal of Phytoremediation*. 2012. Vol. 14, no. 3: 201–211. <https://doi.org/10.1080/15226514.2011.587482>.
14. Кирилкин Д.Ю., Дрмеян Г.Л., Шиян С.И., Дьяченко А.С. Анализ эффективности существующей системы очистки сточных вод и обоснование необходимости ее модернизации на нефтебазе Н. Булатовские чтения : матер. V Междунар. науч.-практ. конф. (г. Краснодар, 31 марта 2021 г.). Краснодар, 2021. Т. 1: 190–200.
15. Zhang K., Chen Y.-P., Zhang T.-T., Zhao Y., Shen Y., Huang L., Gao X., Guo J.-S. The logistic growth of duckweed (*Lemna minor*) and kinetics of ammonium uptake. *Environmental Technology*. 2014. Vol. 35, no. 5–8: 562–567. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.837937>.
16. Umar K.J., Muhammad M.J., Sani N.A., Muhammad S., Umar M.T. Comparative study of antioxidant activities of the leaves and stem of *Ipomoea aquatica* Forsk (water spinach). *Nigerian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2015. Vol. 23, no. 1: 81–84. <https://doi.org/10.4314/njbas.v23i1.12>.
17. Ahmed A.M., Kareem S.L. Evaluation of the effectiveness of phytoremediation technologies utilizing *Lemna minor* in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. Vol. 15, no. 7: 10513–10525. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05887-6>.
18. Selvarani A.J., Padmavathy P., Srinivasan A., Jawahar P. Performance of duckweed (*Lemna minor*) on different types of wastewater treatment. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. 2015. Vol. 2, no. 4: 208–212.
19. Rogers K.H., Breen P.F., Chick A.J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: Evidence for the role of aquatic plants. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*. 1991. Vol. 63, no. 7: 934–941.

REFERENCES

1. Tadesse G.L., Guya T.K. Impacts of tannery effluent on environments and human health. *Journal of Environment and Earth Science*. 2017. Vol. 7, no. 3: 88–97.
2. Nguyen T.T.N., Némery J., Gratiot N., Strady E., Tran V.Q., Nguyen A.T., Aimé J., Payne A. Nutrient dynamics and eutrophication assessment in the tropical river system of Saigon – Dongnai (southern Vietnam). *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 653: 370–383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.319>.
3. Vignati D.A.L., Ferrari B.J.D., Roulier J.-L., Coquery M., Szalinska E., Bobrowski A., Czaplicka A., Kownacki A., Dominik J. Chromium bioavailability in aquatic systems impacted by tannery wastewaters. Part 1: Understanding chromium accumulation by indigenous chironomids. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 653: 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.259>.
4. Treatment and recycling of wastewater from tannery. In: *Advances in biological treatment of industrial waste water and their recycling for a sustainable future*. R.L. Singh, R.P. Singh (eds.). Singapore: Springer Singapore, 2019: 51–90.
5. Weng Ch.-H. Water pollution prevention and state of the art treatment technologies. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27, no. 28: 34583–34585. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09994-5>.
6. Sathya K., Nagarajan K., Carlin Geor Malar G., Rajalakshmi S., Raja Lakshmi P. A comprehensive review on comparison among effluent treatment methods and modern methods of treatment of industrial wastewater effluent from different sources. *Applied Water Science*. 2022. Vol. 12, no. 4. e70. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01594-7>.
7. Polńska W., Kotowska U., Kiejza D., Karpińska J. Insights into the use of phytoremediation processes for the removal of organic micropollutants from

- water and wastewater; a review. *Water*. 2021. Vol. 13, no. 15. e2065. <https://doi.org/10.3390/w13152065>.
8. Crini G., Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*. 2018. Vol. 17: 145–155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>.
 9. Ahmadi A.W., Dursun S. Assessing the efficiency and role of duckweed (*Lemna minor*) in the removal of pollutants from wastewater treatment plant secondary clarifier tanks: A comprehensive review. *Central Asian Journal of Water Research*. 2024. Vol. 10, no. 1: 115–125. <https://doi.org/10.29258/CAJWR/2024-R1.v10-1/115-125.eng>.
 10. Hillman W.S., Culley D.D. The uses of duckweed. *American Scientist*. 1978. Vol. 66, no. 4: 442–451. <https://doi.org/10.5555/19781943893>.
 11. Cauzzi N. Evaluation de l'éco-compatibilité de sédiments contaminés, traités ou non par un procédé physico-chimique, dans le cadre d'un scénario de dépôt en gravière — Étude en microcosmes aquatiques. Villeurbanne: INSA de Lyon, 2007. 341 p.
 12. Mahmud Md.S., Hasan Md.M., Islam Md.B. Advances in heavy metal detection: From traditional to 3D-printed and smartphone-based methods. *Journal of Next-Gen Engineering Systems*. 2024. Vol. 1, no. 1: 11–34. <https://doi.org/10.70937/jnes.v1i01.25>.
 13. Akinbile C.O., Yuso M.S. Assessing water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and lettuce (*Pistia stratiotes*) effectiveness in aquaculture wastewater treatment. *International Journal of Phytoremediation*. 2012. Vol. 14, no. 3: 201–211. <https://doi.org/10.1080/15226514.2011.587482>.
 14. Kirilkin D.Yu., Drmeyer G.L., Shiyani S.I., Dyakonenko A.S. Analiz effektivnosti sushchestvuyushchey sistemy ochistki stochnykh vod i obosnovanie neobkhodimosti ee modernizatsii na neftebaze N [Analysis of the efficiency of the existing waste water treatment system and justification of the necessity of its modernization at the N]. In: *Bulatovskie chteniya : materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Krasnodar, 31 marta 2021 g.) [Readings of A.I. Bulatov. Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference (Krasnodar, 31 March, 2021)]*. Krasnodar, 2021. Vol. 1: 190–200. (In Russian).
 15. Zhang K., Chen Y.-P., Zhang T.-T., Zhao Y., Shen Y., Huang L., Gao X., Guo J.-S. The logistic growth of duckweed (*Lemna minor*) and kinetics of ammonium uptake. *Environmental Technology*. 2014. Vol. 35, no. 5–8: 562–567. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.837937>.
 16. Umar K.J., Muhammad M.J., Sani N.A., Muhammad S., Umar M.T. Comparative study of antioxidant activities of the leaves and stem of *Ipomoea aquatica* Forsk (water spinach). *Nigerian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2015. Vol. 23, no. 1: 81–84. <https://doi.org/10.4314/njbas.v23i1.12>.
 17. Ahmed A.M., Kareem S.L. Evaluation of the effectiveness of phytoremediation technologies utilizing *Lemna minor* in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. Vol. 15, no. 7: 10513–10525. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05887-6>.
 18. Selvarani A.J., Padmavathy P., Srinivasan A., Jawahar P. Performance of duckweed (*Lemna minor*) on different types of wastewater treatment. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. 2015. Vol. 2, no. 4: 208–212.
 19. Rogers K.H., Breen P.F., Chick A.J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: Evidence for the role of aquatic plants. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*. 1991. Vol. 63, no. 7: 934–941.

Об авторах:

Лассана Диоп, магистрант кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (414025, г. Астрахань, ул. Татищева, 16), lassanakarifo@gmail.com

Степаненко Елизавета Александровна, аспирант кафедры экологии и природопользования, ассистент кафедры гидробиологии и общей экологии ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (414025, г. Астрахань, ул. Татищева, 16), ORCID 0000-0002-9637-5493, liza_10.03.97@mail.ru

Волкова Ирина Владимировна, доктор биологических наук, профессор кафедры гидробиологии и общей экологии, заместитель директора Института рыбного хозяйства, биологии и природопользования ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (414025, г. Астрахань, ул. Татищева, 16), ORCID 0000-0001-8945-6669, gridasova@mail.ru

Поступила в редакцию 28.03.2025

Поступила после рецензии 28.05.2025

Принята к публикации 29.05.2025

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант.

Received 28.03.2025

Revised 28.05.2025

Accepted 29.05.2025

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.