

Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2025. № 2. С. 91–99.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628

DOI: 10.22227/2311-1518.2025.2.91-99

БИОРЕМЕДИАЦИЯ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХЛОРЕЛЛЫ: ДИНАМИКА РОСТА И СНИЖЕНИЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ

Елена Сергеевна Гогина¹, Игорь Алексеевич Гульшин², Елена Васильевна Спасибо¹

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН) Минстроя России; г. Москва, Российская Федерация;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Российская Федерация

В работе исследовано применение микроводоросли *Chlorella vulgaris* для постмембранной биоремедиации сточных вод нефтеперерабатывающего завода (НПЗ). Целью исследования являлась количественная оценка способности культуры удалять тяжелые металлы и биогенные элементы из концентрата и пермеата без дополнительного введения CO₂ и искусственного освещения. В лабораторных экспериментах отслеживали динамику изменений концентраций ключевых загрязнителей (K⁺, Fe, Cu и др.) и прирост сухой биомассы. За время культивирования концентрация калия снизилась с 24,3 до 10,8 мг · л⁻¹ (–56 %), одновременно зарегистрировано статистически достоверное снижение уровней железа и меди. Полученные результаты подтверждают высокую сорбционно-метаболическую активность *C. vulgaris* и демонстрируют ее пригодность для интеграции в технологию очистки сложных промышленных стоков. Кинетические данные послужат основой для разработки математической модели процесса и оптимизации параметров фотобиореактора. Научная новизна работы заключается в комплексной оценке адаптационного потенциала *C. vulgaris* к сточным водам с повышенным солесодержанием и в идентификации факторов, ограничивающих эффективность биоремедиации. Практическая значимость выражается в создании предпосылок для внедрения экологически безопасной технологии, обеспечивающей одновременную очистку воды и получение ценного вторичного ресурса — микроводорослевой биомассы, пригодной для дальнейшей переработки.

Ключевые слова: *Chlorella vulgaris*, биоремедиация, сточные воды НПЗ, тяжелые металлы, микроводоросли, мембранная фильтрация, фотобиореактор, микроводорослевая биомасса, устойчивые технологии очистки

Для цитирования: Гогина Е.С., Гульшин И.А., Спасибо Е.В. Биоремедиация металлосодержащих сточных вод нефтеперерабатывающего завода с использованием хлореллы: динамика роста и снижение загрязнителей // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2025. № 2. С. 91–99. DOI: 10.22227/2311-1518.2025.2.91-99

BIOREMEDIATION OF METAL-LADEN PETROLEUM-REFINERY WASTEWATER USING CHLORELLA: GROWTH DYNAMICS AND POLLUTANT ABATEMENT

Elena S. Gogina¹, Igor A. Gulshin², Elena V. Spasibo¹

¹ Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN) Ministry of Construction of Russia; Moscow, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

This study investigates the use of the microalga *Chlorella vulgaris* for post-membrane bioremediation of petroleum-refinery wastewater. The objective was to quantitatively evaluate the culture's ability to remove heavy metals and macronutrients from both concentrate and permeate without supplemental CO₂ or artificial illumination. Laboratory experiments tracked the temporal evolution of key pollutants (K⁺, Fe, Cu, etc.) and the accumulation of dry algal biomass. During cultivation, the potassium concentration decreased from 24.3 to 10.8 mg l⁻¹ (–56 %), accompanied by statistically significant reductions in iron and copper. These findings confirm the high sorption-metabolic activity of *C. vulgaris* and demonstrate its suitability for integration into treatment schemes for complex industrial effluents. The resulting kinetic data will support the development of a mathematical model and subsequent optimisation of photobioreactor parameters. The study's novelty lies in its comprehensive assessment of *C. vulgaris* adaptation to saline refinery wastewaters and in identifying the factors limiting bioremediation efficiency. Practically, the work establishes a scientific foundation for implementing an environmentally benign technology that simultaneously purifies water and yields a valuable secondary resource — microalgal biomass suitable for downstream processing.

Keywords: *Chlorella vulgaris, bioremediation, refinery wastewater, heavy metals, microalgae, membrane filtration, photobioreactor, microalgal biomass, environmentally sustainable treatment technologies*

For citation: Gogina E.S., Gulshin I.A., Spasibo E.V. Bioremediation of metal-laden petroleum-refinery wastewater using chlorella: growth dynamics and pollutant abatement. *Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology*. 2025; 2:91-99. DOI: 10.22227/2311-1518.2025.2.91-99 (rus.).

Развитие нефтеперерабатывающей промышленности играет важную роль в экономике многих стран, однако эта отрасль неизбежно сопряжена с образованием значительных объемов сточных вод. Сточные воды нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) характеризуются повышенным содержанием разнообразных загрязняющих веществ, включая тяжелые металлы (такие как железо, марганец, медь, свинец, никель), нефтепродукты и избыточное количество биогенных элементов — азота и фосфора. Загрязненные сточные воды, поступающие в окружающую среду без надлежащей обработки, приводят к нарушению экосистем водных объектов, ухудшению качества питьевой воды и накоплению токсичных соединений в цепях питания. Кроме того, насыщенность тяжелыми металлами представляет особую угрозу для живых организмов, поскольку такие элементы, попадая в ткани, могут вызывать мутагенное и канцерогенное действие [1].

Традиционно для очистки сточных вод НПЗ применяются физико-химические методы, включающие химическую коагуляцию, флотацию, сорбцию на активированном угле и различные мембранные технологии [2–5]. Хотя эти технологии обеспечивают значительное снижение концентрации основных загрязняющих веществ, их использование часто связано с высокими энергетическими затратами и образованием вторичных отходов, требующих дополнительной утилизации. Это приводит к необходимости поиска новых подходов и технологий очистки подобных сточных вод, эффективное использование которых сопряжено с пониженным антропогенным воздействием на окружающую среду [6].

В связи с этим все большее внимание уделяется новым биологическим методам очистки сточных вод, в частности применению микроводорослей [7]. Хлорелла, как одна из наиболее изученных и широко распространенных микроводорослей, обладает уникальными свойствами, позволяющими эффективно связывать тяжелые металлы и поглощать избыточные концентрации азота и фосфора из водной среды. Механизм биоремедиации с участием хлореллы основан на ее способности использовать питательные элементы для собственного роста и развития, одновременно аккумулируя металлы в клеточных структурах [8]. Данная микроводоросль не только способствует биологической очистке воды, но и при благоприятных условиях культивирования формирует биомассу, которая может быть использована

в ряде отраслей промышленности: от производства кормовых добавок до получения биотоплива [9].

Значимость применения хлореллы в очистке сточных вод от нефтеперерабатывающих предприятий определяется несколькими факторами. Во-первых, эта микроводоросль не требует сложных питательных сред и способна расти в условиях повышенной минерализации, что характерно для промышленных стоков [10]. Во-вторых, биоремедиация с помощью хлореллы ведет к одновременному снижению разных групп загрязнителей: тяжелых металлов и биогенных элементов. В-третьих, внедрение микроводорослей в систему очистки сточных вод дополнительно способствует обогащению воды кислородом и снижению содержания растворенного углекислого газа, что положительно влияет на последующее возможное восстановление экосистемы [11]. Наконец, использование хлореллы в интегрированных схемах очистки сточных вод может сэкономить ресурсы и уменьшить объем вредных выбросов по сравнению с более энергоемкими физико-химическими методами.

В России вопросами биоремедиации промышленных сточных вод занимаются различные группы исследователей [12–16]. Так, например, в работе [17] проведено комплексное исследование методов биоремедиации замаслуженных сточных вод, однако в качестве основной микрофлоры использовались *Oscillatoria amphibia*, *Oscillatoria Woronichinii* и *Sinechocystis salina*. В большинстве исследований микрофлора используется в качестве экспериментального препарата для очистки загрязненных природных объектов, а не в качестве технологии очистки сточных вод [18, 19]. Несмотря на то, что биоремедиация сточных вод НПЗ в России исследуется уже достаточно давно, внедрение новых решений в практику носит единичный характер, что обусловлено, в том числе, отсутствием достаточного количества подтвержденных характеристик и параметров технологии для подготовки соответствующих методических рекомендаций по ее расчету и применению.

Таким образом, актуальность исследования, посвященного применению хлореллы для биоремедиации сточных вод НПЗ, обусловлена необходимостью разработки эффективных и экологически безопасных технологий. Их внедрение позволит решить не только задачу очистки промышленных сточных вод от токсичных элементов, но и обеспечить формирование дополнительного устойчивого ресурса

Концентрации загрязняющих веществ в исследуемых образцах

Наименование показателя	Пермеат	Концентрат
pH (водородный показатель)	5,47	6,92
ХПК, мгО/л	50,0	52,0
БПК ₅ , мгО ₂ /л	34,1	35,2
Аммоний-ион, мг/л	0,17	0,15
Нитрит-ион, мг/л	0,021	0,034
Нитрат-ион, мг/л	2,2	1,1
Фосфаты, мг/л	0,02	2,77
Марганец, мг/л	НПО	0,075
Железо, мг/л	0,01	0,081
Медь, мг/л	0,003	0,022
Магний, мг/л	Менее 0,1	62,4
Калий, мг/л	1,14	24,6
Нефтепродукты, мг/л	0,0276	0,1345

в виде биомассы, которая может быть переработана во вторичное сырье. Изучение влияния микроводорослей на динамику содержания тяжелых металлов и биогенных элементов в сточных водах необходимо для совершенствования существующих подходов к технологиям очистки и дальнейшей интеграции биотехнологических решений в промышленную практику. Кроме того, расширение исследований в области применения хлореллы и других микроводорослей способствует углубленному пониманию биохимических механизмов сорбции и аккумуляции металлов, что открывает новые перспективы для развития экологически ориентированных технологий очистки сточных вод. Сочетание экономической эффективности, экологической безопасности и высокого потенциала по снижению токсических соединений делает биоремедиацию с участием хлореллы особенно актуальной в контексте современных природоохранных задач и стратегий. В рамках данного исследования получены предварительные результаты эксперимента на смешанных сточных водах нефтеперерабатывающего завода. Результаты характеризуют динамику роста микрофлоры с учетом снижения концентраций основных наблюдаемых загрязнений исследуемой сточной воды и необходимы для разработки и реализации программы дальнейших исследований.

Исследование проводилось на сточных водах действующего нефтеперерабатывающего предприятия. На предприятии сточные воды подвергаются очистке в мембранном биореакторе, на исследование биоремедиации поступали образцы концентрата и пермеата. В пробах анализировались основные физико-химические показатели, в том числе интегральные (химическое потребление кислорода, ХПК и биологическое потребление кислорода, БПК₅), а также биогенные элементы и отдельные металлы. Усредненные концентрации загрязняющих веществ в исследуемых образцах представлены в таблице.

Отбор, транспортировка и хранение проб перед исследованием выполнялись в соответствии с общепринятыми рекомендациями. Аналитические исследования проводились по аттестованным методикам с применением следующего измерительного оборудования: спектрофотометр Nach Lange DR 3900 (азот аммонийный, азот нитратный, азот нитритный, фосфор фосфатов, железо общее), анализатор жидкости «Флюорат-02-5М» (нефтепродукты, ХПК), анализатор БПК OxiTop (БПК₅), pH-метр SEVEN COMPACT S220-KIT (pH), атомно-абсорбционный спектрометр «КВАНТ.З» (марганец, медь, магний, калий). Оценка биомассы осуществлялась при помощи измерения оптической плотности среды при помощи спектрофотометра UNICO 2800, а также по определению динамики значения сухой массы после выпаривания, что в данном случае не учитывало процессы биосорбции.

Исследование биоремедиации выполнялось в лабораторных реакционных сосудах объемом 2 л. В рамках данного этапа исследования условия процесса были приближены к естественным без обеспечения дополнительного излучения света и подачи углекислого газа (температура 21 ± 1 °C, освещенность 520 лк). Общая продолжительность исследования составила 250 дней, в течение которых рассматривалась динамика прироста биомассы и снижения концентраций загрязняющих веществ. Отбор проб осуществлялся еженедельно. Для предотвращения контаминации культуры хлореллы при проведении лабораторных экспериментов поддерживался комплекс мер, используемых при проектировании фотобиореакторов [20]. Исследование выполнялось в целях подготовки к конструированию и запуску пилотной установки, поэтому важно было подобрать методы для последующего построения математической модели.

Понятно, что высокая динамика роста микроводорослей и значительная выходная биомасса

в фотобиореакторах (ФБ) являются базовыми и фундаментальными показателями, которых стремятся достичь многие исследователи. Согласно выводам исследования [21], существует широкий спектр подходов к математическому моделированию процесса культивирования микроводорослей, в том числе методов, основанных на кинетике, физико-химических параметрах и различных эмпирических уравнениях. Результаты таких исследований позволяют не только описать механизмы роста культуры, но и оптимизировать технологические параметры для повышения эффективности фотобиореакторов. Один из классических методов, применяемых при оценке роста микроорганизмов, включая микроводоросли, — модель Моно. Для анализа влияния концентрации питательных веществ на выход биомассы *Chlorellavulgaris* исследователями [22] предлагается использовать модифицированную модель Моно. В работах [23, 24] предложены модели Друпа и Людекинга-Пирета, которые позволяют учитывать также параметры биореактора (температуру, освещенность). На основе положений этих моделей была подготовлена модифицированная модель Друпа [25], которая учитывает не только свойства и количество субстрата и параметры установки, но и позволяет проводить моделирование для прикрепленной биомассы, что является одним из ключевых элементов современных фотобиореакторов. Данная модель (1) будет использоваться в ходе дальнейших исследований:

$$X_i \frac{dP_i}{dt} = X_i (\rho(S_i, P_i) - (P_i + P_{\min}) \mu_X(P_i, I_i)) + \frac{QX_{i-1}}{V_i} (P_{i-1} - P_i),$$

где X — концентрация биомассы (по сухому веществу), кг/м³; P — внутренняя квота субстрата в клетках; S — концентрация растворенного субстрата, кг/м³; μ — скорость роста 1/с; Q — расход сточных вод, м³/с; V — объем фотобиореактора, м³.

В настоящее время по результатам проведенных предварительных исследований на целевой сточной воде удалось получить данные по снижению концентрации загрязняющих веществ и приросту биомассы. В первую очередь эти данные необходимы для выявления возможности культивации фитобиомассы на данной воде с учетом содержания необходимых солей и отсутствия сильного ингибирующего воздействия. Важным условием эффективной биоремедиации с участием хлореллы является оптимальное содержание в среде ряда неорганических солей, играющих роль питательных компонентов для микроводорослей. Как показывают результаты исследований, наибольшее положительное влияние на рост и развитие хлореллы оказывают такие элементы, как азот (N), фосфор (P), сера (S), маг-

ний (Mg) и железо (Fe). При этом для успешного культивирования требуется обеспечить присутствие целого комплекса из 10–20 элементов, в том числе N, P, Mg, K, S, Fe, Cu, Ca, Mn и Mo. В ряде случаев калий (K) и кальций (Ca) могут быть частично или полностью заменены натрием (Na) и магнием (Mg) соответственно. Помимо индивидуальных концентраций вышеперечисленных веществ важным показателем является и общее солесодержание воды, поскольку избыточная минерализация может оказывать ингибирующее воздействие на микроводоросли.

В ходе лабораторных экспериментов, проводимых в рамках данной научно-исследовательской работы, помимо основных показателей (ХПК, БПК₅, нефтепродукты, pH и др.) дополнительно анализировалось наличие в пробах необходимых микро- и макроэлементов. В частности, оценивалось содержание азота (в форме аммоний-, нитрит- и нитрат-ионов), фосфора (фосфаты), магния, калия, железа, меди, а также ряда других металлов. При этом, чтобы уточнить, насколько эффективно хлорелла может использовать исследуемые сточные воды в качестве питательной среды без дополнительного обогащения, определялось и общее солесодержание. Для подтверждения факта роста микроводорослей измеряли оптическую плотность среды (спектрофотометрия) и массу сухого вещества (после выпаривания), что позволяло судить о динамике накопления биомассы. На рис. 1 представлен график снижения калия и прироста фитобиомассы по дням эксперимента.

В ходе эксперимента удалось достичь снижения концентрации калия в концентрате с 24,3 до 10,8 мг/л с приростом биомассы более чем на 60 мг/л (до концентрации 0,085 г/л с пиковым значением на уровне 0,110 г/л на 30-й неделе эксперимента).

В ходе текущего этапа исследования, помимо снижения концентрации ионов калия, было зафиксировано также заметное уменьшение содержания других металлов в сточной воде, в частности железа и меди. Так, концентрация железа в концентрате за время эксперимента снизилась с исходных 0,083–0,087 (средняя величина) до 0,025 мг/л, а меди — с 0,022 до менее 0,010 мг/л в конце исследовательского периода. Аналогичный эффект отмечался и по марганцу: содержание Mn в отдельных контрольных точках анализа уменьшилось с 0,075 до 0,038–0,042 мг/л. Во всех случаях параллельно с уменьшением концентрации металлов происходил прирост биомассы микроводорослей, что подтверждает гипотезу о том, что хлорелла при благоприятном соотношении питательных элементов способна эффективно сорбировать не только калий, но и широкий спектр тяжелых металлов. Достиг-

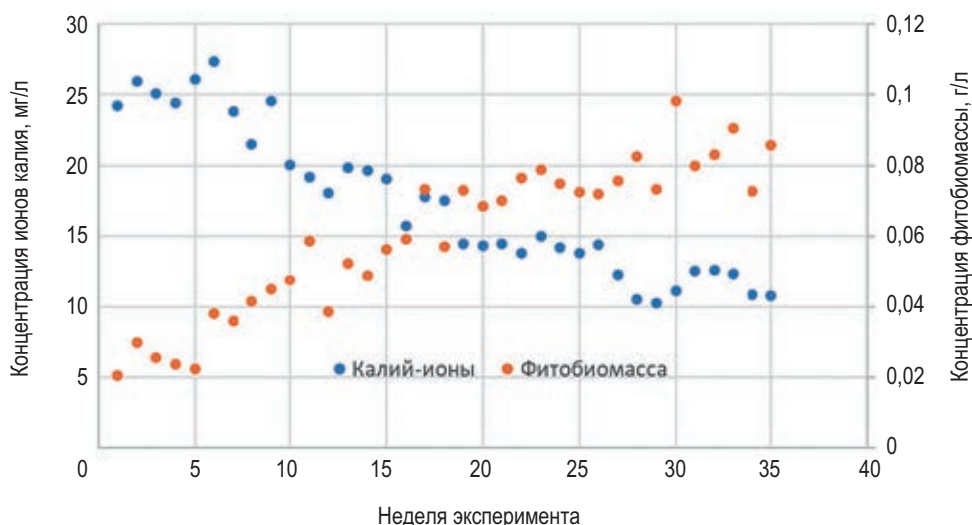


Рис. 1. График снижения концентрации ионов калия и прироста фитобиомассы по неделям эксперимента

нутые результаты важны для понимания комплексного механизма биоремедиации, где в ходе роста водорослей одновременно происходит поглощение избыточных биогенных компонентов и связывание токсичных металлов.

При этом динамика роста хлореллы в условиях лабораторных экспериментов оказалась неоднородной: вначале наблюдалась активная фаза размножения, которая постепенно сменялась стабилизацией показателей биомассы. Наиболее заметное накопление сухого вещества было отмечено к 20–25-й неделе, когда биомасса достигала примерно 0,080–0,090 г/л, а максимальные пиковые значения до 0,110 г/л фиксировались ближе к 30-й неделе эксперимента. В то же время эффективность снижения концентраций металлов и биогенных веществ оставалась высокой вплоть до завершения исследования. Сопоставление данных по изменению оптической плотности и показателей сухого вещества свидетельствует, что в условиях данного опыта хлорелла хорошо адаптировалась к отсутствию дополнительной подачи углекислого газа и освещению в диапазоне 500–550 лк. Анализ солесодержания показал, что первоначально высокая минерализация сточных вод не оказала значимого ингибирующего воздействия на микроводоросли, поскольку концентрации ключевых элементов (азота, фосфора, магния и т.д.) были достаточны для обеспечения их роста.

Таким образом, в рамках экспериментальных серий учитывались как количественные показатели загрязняющих веществ (прежде всего тяжелых металлов и биогенных элементов), так и концентрации ключевых солей, необходимых для роста культуры. Это позволило комплексно оценить возможность культивирования хлореллы в конкретных условиях по двум критериям: отсутствию ингибирующих факто-

ров и наличию достаточного количества питательных компонентов. Полученные результаты не только подтверждают перспективность использования хлореллы для очистки сточных вод НПЗ, но и дают основание для дальнейшего совершенствования биотехнологического процесса с учетом оптимизации минерального состава среды, а также разработки специализированных фотобиореакторов и моделей, способных учесть особенности роста культуры на воде со сложным и переменным составом.

Для углубленного изучения процессов биоремедиации в дальнейшем планируется расширить исследования сразу по нескольким направлениям. Во-первых, будет проведена серия опытов на более крупных стендах, имитирующих условия промышленных фотобиореакторов, в том числе с внедрением контролируемой подачи CO_2 и регулированием температуры. Во-вторых, помимо калия, железа, меди и марганца, в новом цикле экспериментов предполагается анализировать динамику свинца, никеля и цинка, которые также часто встречаются в промышленных сточных водах. Для этих целей будут использованы как традиционные методы атомно-абсорбционной спектроскопии, так и высокочувствительные методы спектрального анализа с более детальным контролем концентраций металлов в диапазоне от долей до единиц миллиграммов на литр. В-третьих, особое внимание будет уделено составлению материального баланса микро- и макроэлементов, что позволит оценить, насколько полноценно хлорелла усваивает элементы, и не происходит ли накопление каких-либо соединений в биомассе до токсичных для самой культуры уровней. Результаты текущего исследования подтверждают, что использование хлореллы в качестве биосорбента для очистки сточных вод от тяжелых металлов может быть эффективным и при

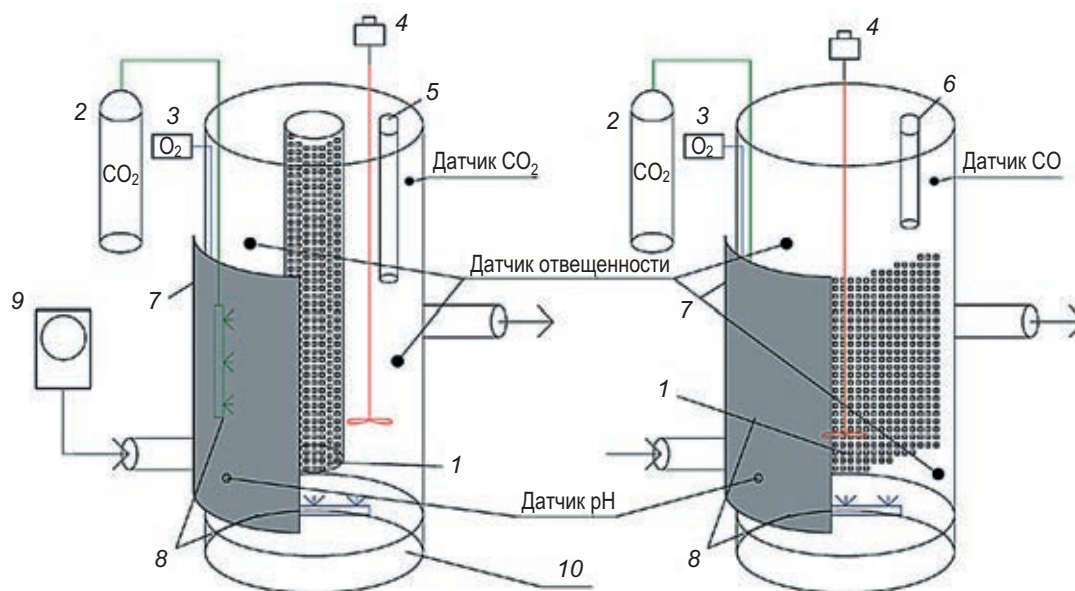


Рис. 2. Схематическое изображение лабораторного фотобиореактора: 1 — источник света; 2 — баллон CO₂; 3 — воздушная подушка; 4 — мешалка; 5, 6 — распылитель воздуха; 7 — защитный экран; 8 — аэраторы; 9 — насос-дозатор; 10 — место для БУ

относительно высокой минерализации среды. Вместе с тем остается открытым вопрос оптимизации условий культивирования в промышленных масштабах, поскольку лабораторный формат зачастую не отражает всей совокупности факторов, влияющих на процесс (изменения температуры, колебания состава сточных вод, необходимость постоянного освещения и аэрации и т.д.). Система, представленная на рис. 2, станет базовой основой для дальнейших опытов, где будет обеспечена возможность управления освещенностью, аэрацией и температурой, а также добавления различных субстратов для уточнения критических параметров роста. Полученные экспериментальные данные послужат входными значениями для разрабатываемой математической модели, основанной на модифицированной модели Друпа. С помощью этой модели предполагается количественно описать влияние ключевых параметров на скорость роста и сорбцию тяжелых металлов, а также прогнозировать эффективность процесса биоремедиации при варьировании состава сточной воды, температуры и интенсивности освещения.

Перспективы внедрения разработанной технологии в промышленную практику напрямую связаны с возможностью интеграции фотобиореактора в существующие схемы очистки на предприятиях нефтепереработки. Первичные результаты позволяют рассчитывать на снижение затрат при удалении не только традиционных загрязнителей (нефтепродуктов, соединений азота и фосфора), но и опасных металлов, требующих по существующим методам высокоэнергетических процедур осаждения или сорбции на специальных материалах. Использо-

вание хлореллы способствует также формированию дополнительного биоресурса в виде фитобиомассы, которую можно перерабатывать в корма для животных, биотопливо или другие продукты. С одной стороны, это повышает экономическую выгоду предприятия, с другой — снижает экологические риски, связанные с накоплением токсичных отходов. Дальнейшее совершенствование технологии будет включать поиск оптимального баланса между параметрами роста водорослей (скоростью размножения, скоростью поглощения металлов, устойчивостью к флуктуациям в составе сточных вод) и реальными показателями экономической эффективности. Не менее важен и вопрос о безопасности получаемой биомассы: для некоторых направлений ее использования требуется подтверждение полного отсутствия в клетках избыточных концентраций опасных металлов.

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют возможность снижения концентрации ряда опасных металлов (K, Fe, Cu, Mn и др.) в сточных водах нефтепереработки при одновременном росте микроводорослей рода *Chlorella*. Достигнутая степень очистки и накопление биомассы позволяют утверждать, что биоремедиация может успешно дополнять существующие на предприятии методы очистки, снижая нагрузку на физико-химические системы и уменьшая общее антропогенное воздействие на окружающую среду. Предварительные данные служат основой для разработки более сложных и универсальных биотехнологических решений с возможностью масштабирования. В перспективе данная технология будет дополнена систе-

мой непрерывного мониторинга, позволяющей оперативно регулировать параметры фотобиореактора и обеспечивать оптимальный режим роста водорослей. В конечном итоге подобные исследования вносят вклад в формирование экологически устойчивых подходов к утилизации промышленных сточных вод и открывают новые горизонты для ресурсосбережения и охраны окружающей среды.

Выводы, сформулированные на основании анализа полученных данных, указывают на эффективность и перспективность применения хлореллы для комплексной очистки сточных вод НПЗ от тяжелых

металлов и биогенных элементов. Осуществленный прирост фитобиомассы в достаточно жесткой по минерализации среде доказывает адаптивный потенциал культуры, а снижение концентрации металлов подтверждает значимость биосорбционных механизмов. Продолжение исследований в направлении масштабирования и оптимизации процесса представляется логичным и необходимым шагом для внедрения данной биотехнологии в промышленную практику и для обеспечения более глубокого контроля качества очищенной воды, а также рационального использования образуемой биомассы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zaynab M., Al-Yahyai R., Ameen A., Sharif Y., Ali L., Fatima M. et al. Health and environmental effects of heavy metals // *Journal of King Saud University-Science*. 2022. Vol. 34. No. 1. P. 101653. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101653
2. Sathish T., Saravanan R., Vijayan V. Investigations on influences of MWCNT composite membranes in oil refineries waste water treatment with Taguchi route // *Chemosphere*. 2022. Vol. 298. P. 134265. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134265
3. Elmobarak W.F., Hameed B.H., Almomani F., Abdullah A.Z. A review on the treatment of petroleum refinery wastewater using advanced oxidation processes // *Catalysts*. 2021. Vol. 11. No. 7. P. 782. DOI: 10.3390/catal11070782
4. Thorat B.N., Sonwani R.K. Current technologies and future perspectives for the treatment of complex petroleum refinery wastewater : a review // *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 355. P. 127263. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127263
5. Mokif L.A., Jasim H.K., Abdulhusain N.A. Petroleum and oily wastewater treatment methods : a mini review // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 49. Pp. 2671–2674. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.08.340
6. Wang C., Chen Z., Li Y., Feng K., Peng Z., Zhu Y. et al. Refinery wastewater treatment via a multistage enhanced biochemical process // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. No. 1. P. 10282. DOI: 10.1038/s41598-021-89665-8
7. Kadri M.S., Nayana K., Firhi R.F., Abdi G., Sukumar C., Kulanthaiyesu A. Greening the oil industry: Microalgae biorefinery for sustainable oil-produced water treatment and resource recovery // *Journal of Water Process Engineering*. 2024. Vol. 60. P. 105259. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105259
8. Manzoor F., Karbassi A., Golzary A. Removal of heavy metal contaminants from wastewater by using *Chlorella vulgaris* Beijerinck : a review // *Current Environmental Management (Formerly: Current Environmental Engineering)*. 2019. Vol. 6. No. 3. Pp. 174–187. DOI: 10.2174/2212717806666190716160536
9. Ubando A.T., Africa A.D.M., Maniquiz-Redillas M.C., Culaba A.B., Chen W.H., Chang J.S. Microalgal biosorption of heavy metals : a comprehensive bibliometric review // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 402. P. 123431. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123431
10. Mahlangu D., Mphahlele K., De Paola F., Mthombeni N.H. Microalgae-mediated biosorption for effective heavy metals removal from wastewater : a review // *Water*. 2024. Vol. 16. No. 5. P. 718. DOI: 10.3390/w16050718
11. Keyvan Hosseini M., Keyvan Hosseini P., Helchi S., Pajoum Shariati F. The comparison between two methods of membrane cleaning to control membrane fouling in a hybrid membrane photobioreactor (HMPBR) // *Preparative Biochemistry & Biotechnology*. 2023. Vol. 53. No. 4. Pp. 394–400. DOI: 10.1080/10826068.2022.2095574
12. Аникина С.А., Чеснокова М.Г., Краус Ю.А. Биоремедиация сточных вод нефтехимической промышленности // *Наука и молодежь в XXI веке : мат. Всеросс. студен. науч. конф.* 2015. С. 85–87. EDN UWVSLH.
13. Гальперина А.Р. Разработка приемов биоремедиации сточных вод с остаточной замазученностью // *Юг России: экология, развитие*. 2010. Т. 5. № 4. С. 109–111.
14. Гальперина А.Р. Влияние цианобактерий на процесс очистки нефтезагрязненных стоков // *Вода Magazine*. 2018. № 3 (127). С. 38–40.
15. Шахова Д.А., Головачева Н.А. Биотехнология очистки сточных вод нефтеперерабатывающих заводов // *Пищевые технологии : сб. тезисов III Междунар. симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения Л.А. Остроумова*. Кемерово, 2024. С. 553–557.
16. Акмуханова Н.Р., Заядан Б.К., Садвакасова А.К., Тореханова М.М., Тимофеев Н.П., Бауенова М.О. и др. Подбор перспективного штамма микроводорослей для биоремедиации сточных вод аквакультуры // *Микробиология*. 2022. Т. 91. № 5. С. 576–585. DOI: 10.31857/S0026365622100123. EDN EAESOA.

17. Гальперина А.Р. Разработка приемов биоремедиации замазученных сточных вод : дис. ... канд. биол. наук. Уфа, Институт биологии Уфимского научного центра Российской академии наук, 2012.
18. Шарапова И.Э. Разработка комплексных форм биопрепарата для биоремедиации загрязненных нефтяными углеводородами почв и водных сред : дис. ... канд. техн. наук. Сыктывкар, Санкт-Петербургский государственный технологический институт, 2012.
19. Стравинскене Е.С. Проблема биодоступности тяжелых металлов в экологическом мониторинге природных вод : дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, Красноярский государственный аграрный университет, 2012.
20. Vo H.N.P., Ngo H.H., Guo W., Nguyen T.M.H., Liu Y., Liu Y. et al. A critical review on designs and applications of microalgae-based photobioreactors for pollutants treatment // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 651. Pp. 1549–1568. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.282
21. Pires J.C., Alvim-Ferraz M.C., Martins F.G. Photobioreactor design for microalgae production through computational fluid dynamics : a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 79. Pp. 248–254. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.064
22. Al Ketife A.M., Judd S., Znad H. A mathematical model for carbon fixation and nutrient removal by an algal photobioreactor // *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 153. Pp. 354–362. DOI: 10.1016/j.ces.2016.07.042
23. Zhang W., Zhao Y., Cui B., Wang H., Liu T. Evaluation of filamentous green algae as feedstocks for biofuel production // *Bioresource technology*. 2016. Vol. 220. Pp. 407–413. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.08.106
24. Das A., Basu S., Ghosh S., Dairkee U.K., Chowdhury R. Mathematical modelling of flat plate biofilm photobioreactors with circular and rectangular configurations // *Biosystems Engineering*. 2018. Vol. 174. Pp. 66–79. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.06.004
25. Diehl S., Zambrano J., Carlsson B. Analysis of photobioreactors in series // *Mathematical Biosciences*. 2018. Vol. 306. Pp. 107–118. DOI: 10.1016/j.mbs.2018.07.005

Об авторах: Елена Сергеевна Гогина — канд. техн. наук, доцент, главный научный сотрудник; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН) Минстроя России; 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21; e-mail: gogina-es@yandex.ru;

Игорь Алексеевич Гульшин — канд. техн. наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; e-mail: GulshinIA@mgsu.ru;

Елена Васильевна Спасибо — ведущий инженер; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН) Минстроя России; 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21; e-mail: spasibo.elena@mail.ru.

REFERENCES

1. Zaynab M., Al-Yahyai R., Ameen A., Sharif Y., Ali L., Fatima M. et al. Health and environmental effects of heavy metals. *Journal of King Saud University-Science*. 2022; 34(1):101653. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101653
2. Sathish T., Saravanan R., Vijayan V. Investigations on influences of MWCNT composite membranes in oil-refinery wastewater treatment with Taguchi route. *Chemosphere*. 2022; 298:134265. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134265
3. Elmobarak W.F., Hameed B.H., Almomani F., Abdullah A.Z. A review on the treatment of petroleumrefinery wastewater using advanced oxidation processes. *Catalysts*. 2021; 11(7):782. DOI: 10.3390/catal11070782
4. Thorat B.N., Sonwani R.K. Current technologies and future perspectives for the treatment of complex petroleum-refinery wastewater : a review. *Bioresource Technology*. 2022; 355:127263. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127263
5. Mokif L.A., Jasim H.K., Abdulhusain N.A. Petroleum and oily wastewater treatment methods : a mini review. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 49:2671-2674. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.08.340
6. Wang C., Chen Z., Li Y., Feng K., Peng Z., Zhu Y. et al. Refinery wastewater treatment via a multistage enhanced biochemical process. *Scientific Reports*. 2021; 11(1):10282. DOI: 10.1038/s41598-021-89665-8
7. Kadri M.S., Nayana K., Firhi R.F., Abdi G., Sukumar C., Kulanthaiyesu A. Greening the oil industry: Microalgae biorefinery for sustainable oil-produced water treatment and resource recovery. *Journal of Water Process Engineering*. 2024; 60:105259. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105259
8. Manzoor F., Karbassi A., Golzary A. Removal of heavymetal contaminants from wastewater by using *Chlorella vulgaris* Beijerinck : a review. *Current Environmental Management*. 2019; 6(3):174-187. DOI: 10.2174/2212717806666190716160536

9. Ubando A.T., Africa A.D.M., Maniquiz-Redillas M.C., Culaba A.B., Chen W.H., Chang J.S. Microalgalbiosorption of heavy metals : a comprehensive bibliometric review. *Journal of Hazardous Materials*. 2021; 402:123431. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123431
10. Mahlangu D., Mphahlele K., De Paola F., Mthombeni N.H. Microalgae-mediated biosorption for effective heavy metals removal from wastewater : a review. *Water*. 2024; 16(5):718. DOI: 10.3390/w16050718
11. Keyvan Hosseini M., Keyvan Hosseini P., Helchi S., PajoumShariati F. Comparison between two methods of membrane cleaning to control membrane fouling in a hybrid membrane photobioreactor (HMPBR). *Preparative Biochemistry & Biotechnology*. 2023; 53(4):394-400. DOI: 10.1080/10826068.2022.2095574
12. Anikina S.A., Chesnokova M.G., Kraus Yu.A. Bioremediation of petrochemical industry wastewater. *Nauka i Molodyozh v XXI Veke : Proceedings of the All Russian Student Scientific Conference*. 2015; 85-87. EDN UWVSLH. (rus.).
13. Galperina A.R. Development of methods for bioremediation of wastewater with residual oil contamination. *Yug Rossii: Ekologiya, Razvitie (South of Russia: Ecology, Development)*. 2010; 5(4):109-111. (rus.).
14. Galperina A.R. Influence of cyanobacteria on the treatment of oil-polluted effluents. *Water Magazine*. 2018; 3(127):38-40. (rus.).
15. Shakhova D.A., Golovacheva N.A. Biotechnology of petroleumrefinery wastewater treatment. *Food Technologies: Proceedings of the III International Symposium Dedicated to the 90th Anniversary of Prof. L.A. Ostroumov*. Kemerovo, 2024; 553-557. (rus.).
16. Akmukhanova N.R., Zayadan B.K., Sadvakasova A.K., Torekhanova M.M., Timofeev N.P., Bauyenova M.O. et al. Selection of a promising microalgal strain for aquaculture wastewater bioremediation. *Mikrobiologiya (Microbiology)*. 2022; 91(5):576-585. DOI: 10.31857/S0026365622100123. EDN EAESOA. (rus.).
17. Galperina A.R. *Development of Methods for Bioremediation of Oily Wastewater : dissertation of candidate of biological sciences*. Ufa, Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 2012. (rus.).
18. Sharapova I.E. *Development of Complex Biological Preparations for Bioremediation of Soils and Aquatic Environments Contaminated with Petroleum Hydrocarbons : dissertation of candidate of technical sciences*. Syktyvkar, Saint Petersburg State Technological Institute, 2012. (rus.).
19. Stravinskene E.S. *The Problem of HeavyMetal Bioavailability in Environmental Monitoring of Natural Waters : dissertation of candidate of biological sciences*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University, 2012. (rus.).
20. Vo H.N.P., Ngo H.H., Guo W., Nguyen T.M.H., Liu Y., Liu Y. et al. A critical review on designs and applications of microalgae-based photobioreactors for pollutant treatment. *Science of the Total Environment*. 2019; 651:1549-1568. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.282
21. Pires J.C., Alvim-Ferraz M.C., Martins F.G. Photobioreactor design for microalgae production through computational fluid dynamics : a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 79:248-254. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.064
22. Al Ketife A.M., Judd S., Znad H. A mathematical model for carbon fixation and nutrient removal by an algal photobioreactor. *Chemical Engineering Science*. 2016; 153:354-362. DOI: 10.1016/j.ces.2016.07.042
23. Zhang W., Zhao Y., Cui B., Wang H., Liu T. Evaluation of filamentous green algae as feedstocks for biofuel production. *Bioresource Technology*. 2016; 220:407-413. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.08.106
24. Das A., Basu S., Ghosh S., Dairkee U.K., Chowdhury R. Mathematical modelling of flatplate biofilm photobioreactors with circular and rectangular configurations. *Biosystems Engineering*. 2018; 174:66-79. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.06.004
25. Diehl S., Zambrano J., Carlsson B. Analysis of photobioreactors in series. *Mathematical Biosciences*. 2018; 306: 107-118. DOI: 10.1016/j.mbs.2018.07.005

About the authors: **Elena S. Gogina** — PhD (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher; **Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN) Ministry of Construction of Russia**; 21 Lokomotivny pr., Moscow, 127238, Russian Federation; e-mail: gogina-es@yandex.ru;

Igor A. Gulshin — PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Water Supply and Wastewater Disposal; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoyeshosse, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: GulshinIA@mgsu.ru;

Elena V. Spasibo — Leading Engineer; **Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN) Ministry of Construction of Russia**; 21 Lokomotivny pr., Moscow, 127238, Russian Federation; e-mail: spasibo.elena@mail.ru.