

ЭКОЛОГИЯ / ECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/BIO.2024.4.1>РАЗРАБОТКА ФОТОБИОРЕАКТОРА ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ *CHLORELLA VULGARIS*

Научная статья

Ксенофонов Б.С.¹, Тюменцева М.В.^{2,*}, Козодаев А.С.³, Таранов Р.А.⁴, Виноградов М.С.⁵¹ORCID : 0000-0002-6769-2406;²ORCID : 0009-0005-2791-2848;^{1, 2, 3, 4, 5}Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (tyumencevam2001[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассмотрены основные факторы, благоприятно влияющие на культивирование микроводоросли *Chlorella*. На основании этих данных спроектирован фотобиореактор, отвечающий условиям эффективного выращивания микроводоросли. Описан принцип работы фотобиореактора для культивирования микроводоросли *Chlorella*. Данная статья представляет собой обзор основ культивирования водоросли *Chlorella vulgaris* с целью очистки сточных вод, рассматриваются основные характеристики и преимущества микроводорослей *Chlorella* в контексте очистки загрязненных водных ресурсов. Также обсуждаются возможности применения *Chlorella vulgaris* для улучшения качества сточных вод и снижения содержания загрязняющих веществ. В итоге данная статья предоставляет информацию о потенциале использования *Chlorella vulgaris* в качестве биотехнологического решения для экологически чистой очистки воды.

Ключевые слова: микроводоросли, культивирование, *Chlorella*, фотобиореактор, очистка воды.DEVELOPMENT OF A PHOTOBIOREACTOR FOR CULTIVATION OF *CHLORELLA VULGARIS*

Research article

Ksenofontov B.S.¹, Tyumentseva M.V.^{2,*}, Kozodaev A.S.³, Taranov R.A.⁴, Vinogradov M.S.⁵¹ORCID : 0000-0002-6769-2406;²ORCID : 0009-0005-2791-2848;^{1, 2, 3, 4, 5}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (tyumencevam2001[at]mail.ru)

Abstract

The article examines the main factors that favourably affect the cultivation of *Chlorella* microalgae. On the basis of these data, a photobioreactor, which meets the conditions of effective cultivation of microalgae, is designed. The working principle of the photobioreactor for cultivation of *Chlorella* microalgae is described. This paper is an overview of the basics of cultivation of *Chlorella vulgaris* algae for wastewater treatment, the main characteristics and advantages of *Chlorella* microalgae in the context of treatment of polluted water resources are discussed. The potential applications of *Chlorella vulgaris* to improve wastewater quality and reduce pollutants are also discussed. As a result, this article provides information on the potential of using *Chlorella vulgaris* as a biotechnological solution for environmentally friendly water treatment.

Keywords: microalgae, cultivation, *Chlorella*, photobioreactor, water purification.**Введение**

Микроводоросли – это одноклеточные организмы, которые имеют большое значение для очистки воды. Они активно используются в процессе биологической очистки сточных вод и водоемов, так как обладают способностью к быстрому размножению и высокой скорости поглощения загрязняющих веществ.

Актуальность исследования определяется способностью микроводорослей удалять остаточные концентрации компонентов, содержащихся в сточных водах, а также биогенных элементов, таких как азот и фосфор, предотвращая эвтрофикацию водоемов.

Применение микроводорослей в водоочистке включает следующие аспекты [1]:

1) биофильтрация: очистка воды происходит за счет способности микроводорослей прикрепляться к различным поверхностям, таким как биологические фильтры, и задерживать загрязнения, например, тяжелые металлы, нефтепродукты и биогенные элементы;

2) фитоэкстракция: накопление в клетках микроводорослей загрязняющих веществ;

3) биологическая очистка;

4) удаление биогенных элементов.

Объектом исследования является род микроводоросли *Chlorella*. *Chlorella*, обладающая большим запасом хлорофилла и комплексом редчайших питательных веществ, участвующая в процессе фотосинтеза, поглощая углекислый газ, насыщая воздух кислородом.

Кроме того, микроводоросль *Chlorella* имеет ряд преимуществ перед другими микроводорослями для использования в очистке воды [1]:

1. *Chlorella* обладает высокой эффективностью в удалении тяжелых металлов, пестицидов и нефтепродуктов из воды. Ее способность к биологическому разложению делает ее перспективной для очистки воды от этих загрязнителей.

2. *Chlorella* также может использоваться для удаления фосфора и азота из воды, предотвращая эвтрофикацию водоемов. Это важно для сохранения водных экосистем и обеспечения качества воды для человека.

3. *Chlorella* является более устойчивой к изменениям условий окружающей среды, таким как температура и pH, по сравнению с другими микроводорослями. Это делает ее более стабильной и надежной для использования в процессах очистки воды.

После добавления суспензии *Chlorella* в воду, происходит активное размножение водоросли, что препятствует росту сине-зелёных водорослей. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению возможности возникновения цветения воды, устранению неприятного запаха и предотвращению замора рыбы из-за дефицита кислорода. Принцип очистки заключается в том, что *Chlorella* обогащает воду кислородом, потребляя при этом углекислый газ. Кроме того, хлорелла является важным звеном в пищевой цепи водоёма и может служить источником ценных микроэлементов [2].

В настоящее время изучены рост, развитие и очистительная эффективность отдельных штаммов микроводоросли *Chlorella* при культивировании её на отходах (куриный помет) и сточных водах птицефабрик, на стоках свиноводческих комплексов, а также на коммунально-бытовых и промышленных стоках городов. В результате роста водоросли, выделяя большое количество кислорода, содействуют бактериальному окислению органических веществ, усваивают биогенные элементы и тем самым интенсифицируют процесс очистки сточных вод от различных загрязнений.

Полученные результаты в исследовании [3] дают основание полагать, что взаимоотношения между бактериями и водорослями в водоемах складываются следующим образом: отмирание водорослей ведет к массовому развитию бактерий, живые же водоросли являются их антагонистами, так как выделяют антибиотические вещества. Тем не менее взаимоотношения между водорослями и сапрофитной микрофлорой в водоемах носят ассоциативный характер, так как вода служит естественной средой для их отмирания. Взаимоотношение же водорослей и аллохтонной патогенной микрофлоры, складываются в направлении одностороннего антагонизма. Обосновывая теоретическую сторону вопроса применения культур альгологического комплекса (АК) микроводорослей для очистки сточных вод в биологических прудах, мы считаем возможным рассматривать биологические пруды как гетеротрофноавтотрофную систему. Очистительный эффект здесь достигается за счет симбиотического взаимоотношения между бактериями, минерализующими органическое вещество загрязнений, и водорослями, которые в процессе фотосинтеза из продуктов минерализации ресинтезируют органическое вещество. При этом потребляемый бактериями кислород они получают за счет фотосинтетической аэрации, а углекислоту – за счет обмена веществ бактерий.

Следует отметить, что при использовании микроводорослей для очистки сточных вод часто возникает проблема создания высокой концентрации клеток микроводорослей в стоках. Кроме того, в настоящее время существует проблема отсутствия эффективных промышленных аппаратов культивирования микроводорослей. В связи с этим целью исследования является разработка фотобиореактора, предназначенного для культивирования микроводоросли *Chlorella*, с целью повышения эффективности производства биомассы и очистки сточных вод.

Проектирование фотобиореактора для культивирования микроводорослей *Chlorella*

В ходе литературного обзора [6], [7], [8], [9], [10] сделан вывод о целесообразности применения цилиндрического фотобиореактора, поскольку он обладает следующими преимуществами:

1) эффективность в использовании пространства. Цилиндрическая форма позволяет максимально увеличить объем реактора при минимальных затратах на материалы и оборудование. Это снижает стоимость установки и упрощает ее обслуживание;

2) обеспечивается более равномерное освещение культуры микроводорослей, что способствует более эффективному использованию света и лучшему росту микроорганизмов;

3) простое интегрирование в реактор различных систем перемешивания и контроля, что также повышает его эффективность. Большинство физико-химических параметров и внешних факторов в значительной степени могут повлиять на успешное культивирование микроводоросли *Chlorella* и прирост клеточной биомассы [4], [5]. Определяющими параметрами культивирования являются температура в диапазоне от 15 °С до 30 °С, наличие освещения, преимущественно светодиодных ламп при интенсивности света в диапазоне от 2000 Лк до 15000 Лк, pH, преимущественно нейтральная. Состав питательной среды, подбирающийся индивидуально в зависимости от условий культивирования.

На рис. 1 представлен общий вид фотобиореактора. Проектирование фотобиореактора осуществляется с помощью программного комплекса САПР «Solidworks». Габариты аппарата подбирались исходя из условий лабораторной эксплуатации, а также типоразмера светодиодной лампы необходимой мощности. Оценочная стоимость фотобиореактора составляет около 1 млн руб. при производительности 5 мл/ч (0,12 л/сут). Рабочий объем составляет 1,68 л.

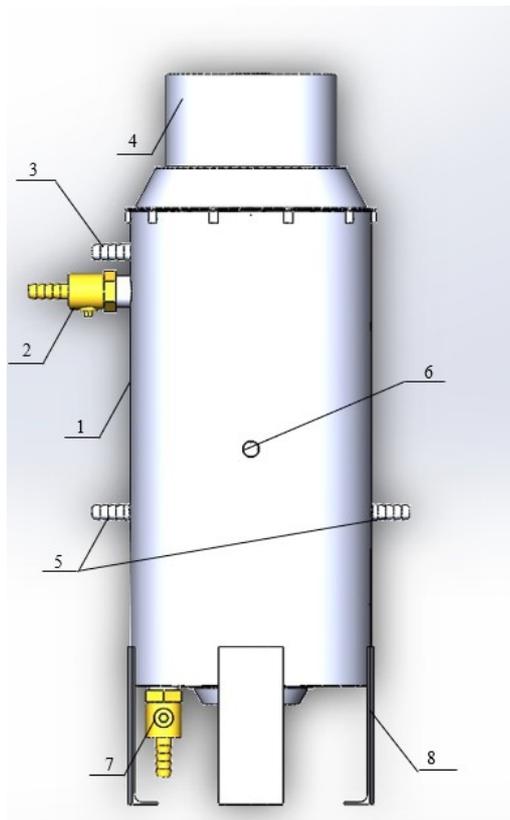


Рисунок 1 - Общий вид фотобиореактора
DOI: <https://doi.org/10.60797/BIO.2024.4.1.1>

Примечание: 1 – цилиндрическая обечайка (внутренний диаметр – 150 мм, высота – 170 мм), 2 – входной патрубок с краном для биомассы, 3 – входной патрубок для 4 – вентилятора, 5 – патрубки для подключения циркулирующего насоса, 6 – термодатчик, 7 – выходной патрубок с краном для биомассы, 8 – ножки

По данным [5], [6], [7], [8], [9] световой поток в фотобиореакторах должен поддерживаться на уровне от 2000 до 15000 Лк. С целью увеличения энергоэффективности была выбрана светодиодная лампа FLL T8 1200GL 18w 4000K G13 230V/50Hz со световым потоком 3500 Лм (5000 Лк).

Для подвода и отвода биомассы, а также подачи углекислого газа, необходимого для жизнедеятельности микроводорослей, предусмотрены патрубки. Подведение и отведение биомассы осуществляется в периодическом режиме: 1 раз в 7 дней – время культивирования микроводоросли хлореллы [5], [6], [7], [8], [9]. Общее время культивирования – 14 дней. Входные и выходные патрубки имеют диаметр 34 мм. Для регулирования подачи компонентов предусмотрены краны с подключением шланга.

Для подачи углекислого газа объемом 0,05 л/мин [7] предусмотрен шланговый патрубок.

Для регулирования температуры внутри фотобиореактора предусмотрены вентилятор и термодатчик. При достижении температуры плюс 30 °С и выше включается вентилятор для поддержания оптимальных условий жизнедеятельности хлореллы – от плюс 15 °С до плюс 30 °С. (тип вентилятора) [5], [6], [7], [8], [9]. Для контроля уноса биомассы предусмотрена металлическая сетка (см. рис. 2). Следует учесть, что использование вентилятора не является обязательным условием эксплуатации при проведении экспериментов в лабораторных условиях. В рассматриваемом исследовании эксперименты проводятся с использованием естественного охлаждения.

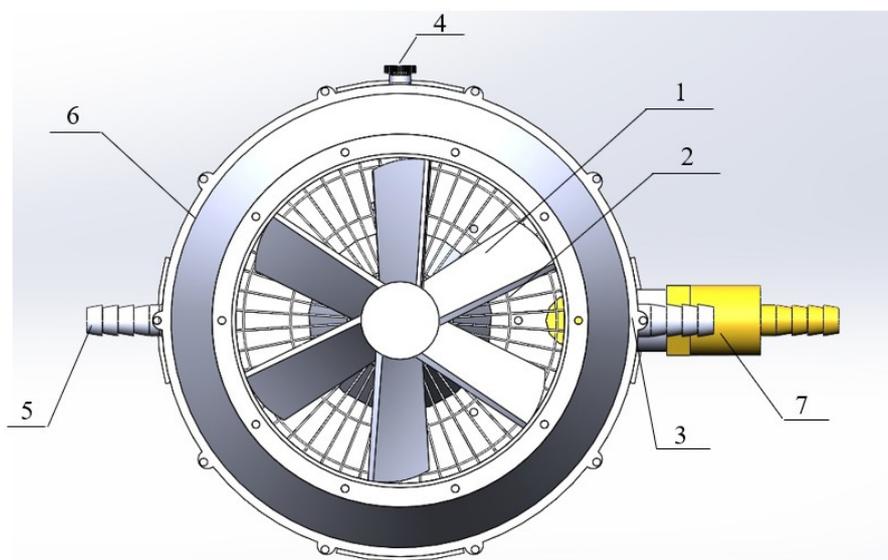


Рисунок 2 - Вид фотобиореактора сверху
DOI: <https://doi.org/10.60797/BIO.2024.4.1.2>

Примечание: 1 – вентилятор, 2 – металлическая сетка, 3 – входной патрубок, 4 – термодатчик, 5 – патрубок для подключения циркулирующего насоса, 6 – крышка, 7 – входной патрубок с краном для биомассы

Заключение

Разработка фотобиореактора новой конструкции для культивирования микроводоросли *Chlorella* позволит осуществлять этот процесс в современном компактном оборудовании. Это важно использовать на малых производственных площадях в условиях плотного размещения технологического оборудования. Данное исследование представляет значимый вклад в развитие методов и технологий культивирования водорослей в контролируемых условиях, а также открывает новые перспективы для промышленного и научного применения *Chlorella vulgaris*. Дальнейшие исследования в этом направлении могут способствовать развитию устойчивых и экологически чистых методов производства биотехнологических продуктов на основе водорослей.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Аужанова Н.Б. Морфологическая и систематическая характеристика хлореллы. Ее производство и применение / Н.Б. Аужанова // Научный вестник. — 2014. — № 1. — С. 113–126.
2. Юницкий А.Э. Биологическое восстановление баланса пресноводных водоёмов с помощью хлореллы (*Chlorella vulgaris* IBCE C-19) / А.Э. Юницкий, С.В. Артюшевский, Н.С. Зыль [и др.] // Материалы докладов 56-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. — 2023. — Т. 1. — С. 505–507.
3. Субботина Ю.М. Механизм антибактериального действия фитопланктона и высшей водной растительности на процессы самоочищения сточных вод / Ю.М. Субботина, М.И. Шопинская // Отходы, причины их образования и перспективы использования : Сборник научных трудов по материалам Международной научной экологической конференции, Краснодар, 26–27 марта 2019 года. — Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2019. — С. 441–445.
4. Макаров М.В. Влияние освещения и температуры на макроводоросли Баренцева моря / М.В. Макаров, Г.В. Воскобойников // Труды Кольского научного центра РАН. — 2013. — № 1(14). — С. 95–111.
5. Зухрабова Л.М. Оптимизация биотехнологии выращивания хлореллы в лабораторных условиях / Л.М. Зухрабова, А.М. Галиева // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. — 2014. — Т. 217. — № 1. — С. 99–102.
6. Пат. 2769152 Российская Федерация, МПК2021114100 A01G33/00. Способ культивирования микроводоросли *Chlorella vulgaris* / Свазлян Г. А. — № 2021114100; заявл. 2021-05-18; опубл. 2022-03-28. — 11 с.

7. Пат. 2644261 Российская Федерация, МПК2016121588 C12N 1/12. Способ культивирования микроводоросли *Chlorella* / Жемухова О. А. — № 2016121588; заявл. 2016-05-31; опубл. 2024-06-25. — 7 с.
8. Пат. 2176667 Российская Федерация, МПК200011042513 C12N 1/12. Способ культивирования микроводорослей на основе штамма "*Chlorella vulgaris* ИФР № С-111" / Богданов Н. И.; заявитель и патентообладатель Богданов Н. И., Куницын М. В. — № 200011042513; заявл. 2000-04-21; опубл. 2001-12-10. — 5 с.
9. Мещерякова Ю.В. Накопительное культивирование микроводоросли хлорелла в закрытом фотобиореакторе / Ю.В. Мещерякова, С.А. Нагорнов, И.В. Ерохин // Наука в центральной России. — 2015. — № 2(14). — С. 92–100.
10. Нагорнов С.А. Исследование условий культивирования микроводоросли хлорелла в трубчатом фотобиореакторе / С.А. Нагорнов, Ю.В. Мещерякова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2015. — № 4. — С. 653–659.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Auzhanova N.B. Morfologicheskaja i sistematicheskaja harakteristika hlorelly. Ee proizvodstvo i primenenie [Morphological and systematic characteristics of chlorella. Its production and application] / N.B. Auzhanova // Scientific Bulletin. — 2014. — № 1. — P. 113–126. [in Russian]
2. Junitskij A.E. Biologicheskoe vosstanovlenie balansa presnovodnyh vodoemov s pomosh'ju hlorelly (*Chlorella vulgaris* IBCE C-19) [Biological restoration of the balance of freshwater reservoirs using chlorella (*Chlorella vulgaris* IBCE C-19)] / A.E. Junitskij, S.V. Artjushevskij, N.S. Zyl' [et al.] // Materials of the reports of the 56th International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students. — 2023. — Vol. 1. — P. 505–507. [in Russian]
3. Subbotina Ju.M. Mehanizm antibakterial'nogo dejstvija fitoplanktona i vysshej vodnoj rastitel'nosti na protsessy samoochischenija stochnyh vod [The mechanism of antibacterial action of phytoplankton and higher aquatic vegetation on the processes of wastewater self-purification] / Ju.M. Subbotina, M.I. Shopinskaja // Waste, the causes of its formation and prospects for use : A collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific Environmental Conference, Krasnodar, March 26-27, 2019. — Krasnodar : Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet imeni I.T. Trubilina, 2019. — P. 441–445. [in Russian]
4. Makarov M.V. Vlijanie osveschenija i temperatury na makrovodorosli Barentseva morja [The effect of lighting and temperature on macroalgae of the Barents Sea] / M.V. Makarov, G.V. Voskobochnikov // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. — 2013. — № 1(14). — P. 95–111. [in Russian]
5. Zuhrabova L.M. Optimizatsija biotehnologii vyraschivaniya hlorelly v laboratornyh uslovijah [Optimization of the biotechnology of chlorella cultivation in the laboratory] / L.M. Zuhrabova, A.M. Galieva // Scientific notes of the Kazan State Academy of Veterinary Medicine named after N.E. Bauman. — 2014. — Vol. 217. — № 1. — P. 99–102. [in Russian]
6. Пат. 2769152 Russian Federation, МПК2021114100 A01G33/00. Способ культивирования микроводоросли *Chlorella vulgaris* [Method of cultivation of microalgae *Chlorella vulgaris*] / Svazljan G. A. — № 2021114100; appl. 2021-05-18; publ. 2022-03-28. — 11 p. [in Russian]
7. Пат. 2644261 Russian Federation, МПК2016121588 C12N 1/12. Способ культивирования микроводоросли *Chlorella* [Method of cultivation of *Chlorella* microalgae] / Zhemuhova O. A. — № 2016121588; appl. 2016-05-31; publ. 2024-06-25. — 7 p. [in Russian]
8. Пат. 2176667 Russian Federation, МПК200011042513 C12N 1/12. Способ культивирования микроводорослей на основе штамма "*Chlorella vulgaris* ИФР № С-111" [Method of cultivation of microalgae based on the strain "*Chlorella vulgaris* IGF No. C-111"] / Bogdanov N. I.; the applicant and the patentee Bogdanov N. I., Kunitsyn M. V. — № 200011042513; appl. 2000-04-21; publ. 2001-12-10. — 5 p. [in Russian]
9. Mescherjakova Ju.V. Nakopitel'noe kul'tivirovanie mikhrovodorosli hlorelly v zakrytom fotobioreaktore [Cumulative cultivation of chlorella microalgae in a closed photobioreactor] / Ju.V. Mescherjakova, S.A. Nagornov, I.V. Erohin // Science in Central Russia. — 2015. — № 2(14). — P. 92–100. [in Russian]
10. Nagornov S.A. Issledovanie uslovij kul'tivirovanija mikhrovodorosli hlorelly v trubchatom fotobioreaktore [Investigation of the conditions of cultivation of chlorella microalgae in a tubular photobioreactor] / S.A. Nagornov, Ju.V. Mescherjakova // Bulletin of the Tambov State Technical University. — 2015. — № 4. — P. 653–659. [in Russian]