DOI: 10.24892/RIJIE/20250313

К вопросу об использовании микроводорослей *Chlorella kessleri* для достижения целей в области устойчивого развития

Вельможина К.А., Шинкевич П.С., Политаева Н.А., Чусов А.Н.
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
ps.shinkevich@gmail.com

Аннотация. **Данная работа посвящена исследованию потенциала микроводорослей *Chlorella kessleri* для поглощения углекислого газа (CO_2) с целью решения глобальных экологических проблем, связанных с увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере. В условиях современного ускоренного темпа индустриализации и глобализации повышение концентрации CO_2 представляет собой серьезный экологический вызов, что требует внедрения устойчивых технологий. Одним из таких решений является использование биомассы микроводорослей для улавливания CO_2, что поддерживает цели устойчивого развития, направленные на снижение выбросов парниковых газов и формирование устойчивых моделей производства и потребления. Работа оценивает способность *Chlorella kessleri* эффективно поглощать CO_2, а также исследует динамику этого процесса в различных условиях культивирования. Особое внимание уделяется влиянию факторов среды, таких как температура, концентрация CO_2 и интенсивность освещения, на скорость поглощения углекислого газа. Результаты работы могут быть использованы для разработки более эффективных методов биоремедиации и устойчивых технологий для очистки дымовых газов в промышленности, что способствует достижению экологических целей в рамках глобальной стратегии устойчивого развития.**

***Ключевые слова*: микроводоросли, поглощение CO_2, устойчивое развитие, дымовые газы, промышленные процессы.**

Введение

Развитие современного общества неразрывно связано с быстрыми темпами индустриализации и глобализации. С одной стороны, данные особенности способствуют расширению мировой экономики и повышению качества жизни населения. Однако, с другой стороны, они порождают серьезные экологические вызовы, решение которых представляется возможным лишь при установлении точек соприкосновения между экологической безопасностью, техногенными и промышленными запросами экономики с учетом социальных потребностей общества.

Для решения глобальных экологических проблем в мире была принята стратегия устойчивого развития, предполагающая сохранение высоких темпов экономического роста при установлении социальной справедливости с учетом минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду. Концепция устойчивого развития была разработана при содействии Международного союза охраны природы, Программы ООН по окружающей среде и Всемирного фонда дикой природы и впервые представлена в 1980 году во «Всемирной стратегии охраны природы». На данном этапе концепция представляла собой некие научные подходы к бережному использованию природных ресурсов. Дальнейшее развитие этой области привело к формированию конкретных целей, установленные рамочной программой, подписанной всеми государствами-членами ООН в сентябре 2015 года [12]. Так, спустя 35 лет от начала формирования научных подходов в рамках концепции устойчивого развития были сформированы 17 Целей устойчивого развития, установленные в «Повестке дня в области устойчивого развития на период до 2030 года». В рамках стратегии рассматривается внедрение инновационных технологий, рациональное использование природных ресурсов, сокращение выбросов парниковых газов и т.д. Особое внимание уделяется интеграции принципов сохранения экологического баланса в ключевые отрасли мировой экономики, а также формированию устойчивых моделей потребления и производства.

Одна из наиболее сложных глобальных проблем, требующей комплексного решения, является проблема увеличения концентрации углекислого газа в воздухе. Значительными источниками загрязнений атмосферного воздуха являются предприятия, генерирующие загрязненные промышленные выбросы. Решение данной проблемы является неотъемлемой частью реализации стратегии устойчивого развития. В этом контексте приоритетными являются следующие цели: №7 – обеспечение доступа к возобновляемым источникам энергии, №12 – формирование устойчивых моделей производства и потребления, №13 – меры по смягчению последствий изменения климата.

Одним из перспективных направлений решения проблемы избыточного содержания углекислого газа является использование биомассы микроводорослей. Микроводоросли – одноклеточные/колониальные водоросли, широко распространенные в водоемах как с пресной, так и морской водой. Фотосинтез микроводорослей характеризуется высокой скоростью и продуктивность, определяется как способность поглощать CO_2 и выделять кислород [1, 2]. Хлорелла (*Chlorella*) – род зеленых микроводорослей, широко распространенных в пресных водоемах по всему миру. Хлорелла относится к классу *Chlorophyceae* [10]. Многие

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-17-20004). Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Строительство, архитектура и техносферная безопасность", https://iccats.org

ученые отмечают исключительную способность хлореллы поглощать углекислый газ [3, 4], что делает ее потенциально полезной в решении глобальных экологических проблем. *Chlorella kessleri* – один из видов хлореллы, также встречающихся во многих странах [5, 6], включая Россию, где наблюдается рост популярности к виду, обусловленный большим числом научных исследований в области биотехнологий с использованием *Chlorella kessleri* [7-9].

Микроводоросли *Chlorella kessleri* обладают рядом характеристик, которые обусловливают их популярность в технологиях очистки дымовых газов. Ключевые свойства включают высокую эффективность улавливания углекислого газа, способность синтезировать биомассу для коммерческого использования, адаптивность к экстремальным условиям, устойчивость к высоким концентрациям CO_2 и значительную биологическую продуктивность [11]. Вновь обращаясь к вопросу достижения целей устойчивого развития, можно отметить, что использование биомассы микроводорослей как агента биоремедиации способствует одновременному достижению сразу нескольких целей, а именно сокращению антропогенных выбросов CO_2, созданию замкнутых циклов утилизации отходов и получению продуктов с добавленной стоимостью.

Однако эффективность этих процессов во многом зависит от условий роста микроводорослей. Экспериментальные данные подтверждают, что такие факторы, как аэрация, наличие питательных веществ, температура и освещённость, существенно влияют на скорость поглощения CO_2. Поэтому изучение влияния этих факторов на процесс поглощения углекислого газа микроводорослями становится одним из ключевых направлений для разработки оптимальных условий протекания данного процесса, повышения эффективности биотехнологии и её дальнейшего масштабирования.

Целью данной работы является исследование динамики процесса поглощения CO_2 микроводорослями *Chlorella kessleri* в различных условиях.

Методика эксперимента

Объектом исследования являлся вид одноклеточной зеленой микроводоросли *Chlorella kessleri*, предмет исследования – способность биомассы *Chlorella kessleri* улавливать углекислый газ из дымовых газов в условиях, приближенных к реальным промышленным процессам. Дымовыми газами будут считаться продукты горения, выделяющиеся в процессе сожжения органического топлива, с содержанием CO_2 не менее 20%.

Для качественного исследования динамики поглощения углекислого газа микроводорослями был разработан герметичный фотобиореактор, позволяющий осуществлять подачу CO_2, проводить измерения качественного состава газовоздушной смеси и отслеживать прирост биомассы. Для поддержания стабильной температуры были использованы системы теплового регулирования. Светодиодная система обеспечивала равномерное освещение фотобиореактора. Подача газовой смеси осуществлялась через распылители, расположенные на дне фотобиореактора. Для поддержания герметичности конструкции была разработана система газовых линий, обеспечивающей подконтрольную подачу газовоздушной смеси, а также создающей условия для ее измерения. Мониторинг состава газовоздушной смеси внутри фотобиореактора осуществлялся при помощи газоанализатора GEOTECH GA200plus. Схематичное изображение разработанной системы представлено на рис. 1.

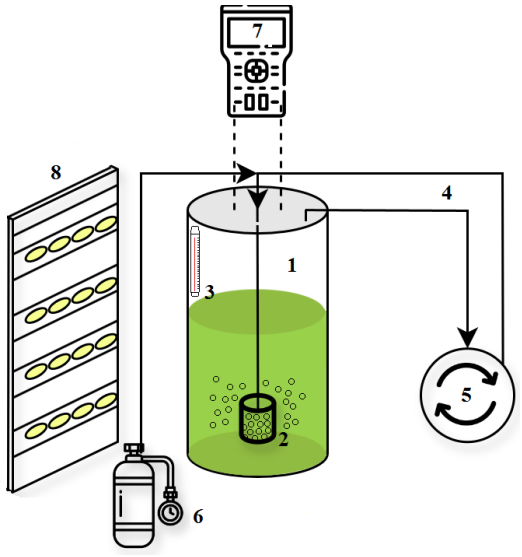

Рис. 1. Схема установки для изучения процесса поглощения углекислого газа микроводорослями:
1 – фотобиореактор, 2 – распылитель, 3 – теплонагреватель, 4 – трубки, 5 – аэратор, 6 – система подачи CO_2, 7 – газоанализатор, 8 – система освещения

Были установлены различные условия культивирования *Chlorella kessleri* для разных фотобиореакторов (табл. 1).

Таблица 1

Условия культивирования *Chlorella kessleri*

№	Температура, ºС	Освещенность, Лк	Аэрация	Наличие соединений азота в питательной среде
1	30	3000	+	+
2	20	3000	-	+
3	30	3000	+	-
4	20	3000	-	-

Культивирование биомассы микроводорослей осуществлялось с использованием питательной среды (табл. 2) [13].

Таблица 2

Состав питательной среды

Вещество	Концентрация, мг/л
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	100
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	10
$CoSO_4 \cdot 7H_2O$	100
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	500
$H_3BO_3 \cdot WF$	50
$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	100
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	4000
$Na_2EDTA \cdot 2H_2O$	6000
KNO_3	0,2
KH_2PO_4	0,32
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	2,4

Для создания стрессовых условий в виде дефицита азота («азотного голодания») в фотобиореакторах №3, №4 содержание KNO_3 в питательной среде было снижено с начального 0,2 мг/л до 0,02 мг/л. Установлено, что при дефиците азота биомасса растет медленнее, но содержит большое количество липидов.

Начальная оптическая плотность суспензии микроводорослей *Chlorella kessleri* составила 0,635 ± 0,009, pH суспензии 6,9.

Масса поглощенного углекислого газа определялась по формуле:

$$m = \frac{P \cdot V \cdot M}{R \cdot T}, \qquad (1)$$

где P – давление газа, V – объем газа, M – молярная масса вещества, R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

Результаты

На рис. 2 представлена динамика поглощения углекислого газа микроводорослями в фотобиореакторе №1.

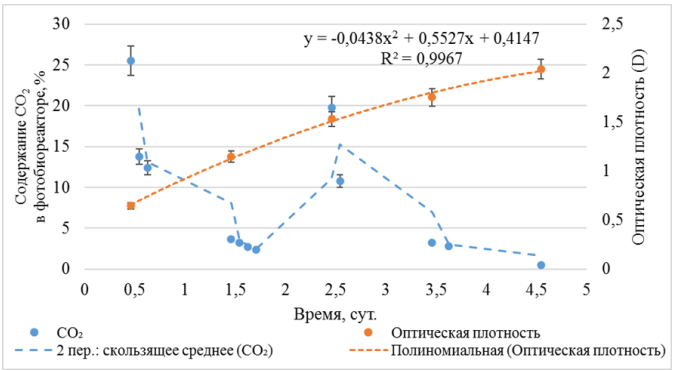

Рис. 2. Зависимость содержания CO_2 и оптической плотности суспензии микроводорослей в фотобиореакторе № 1 от времени культивирования (5 суток)

Поглощение CO_2 в фотобиореакторе №1 активно происходит в первые часы после его поступления в реактор, при повторном добавлении газа его поглощение замедляется. Оптическая плотность суспензии увеличивалась на протяжении всего эксперимента.

В начале эксперимента в фотобиореактор поступило 0,638 л CO_2, полностью поглощён данный объем за 2,4 суток. Средняя скорость поглощения CO_2 составила 0,106 л CO_2 на литр суспензии в день, а масса поглощённого газа на литр суспензии по формуле (1) составила 0,187 г.

На рис. 3 представлена динамика поглощения углекислого газа микроводорослями в фотобиореакторе №2.

Поглощение углекислого газа в фотобиореакторе №2 происходит крайне медленно. В течение 5 суток эксперимента начальная концентрация CO_2 не была полностью поглощена. При этом оптическая плотность суспензии микроводорослей продолжала увеличиваться, что свидетельствует о росте биомассы.

Общий объем поглощённого углекислого газа за 4,5 суток составил 0,38 л. Средняя скорость поглощения CO_2 составила 0,034 л CO_2 на литр суспензии в день, а масса поглощённого газа на литр суспензии по формуле (1) составила 0,062 г.

На рис. 4 представлена динамика поглощения углекислого газа микроводорослями в фотобиореакторе №3.

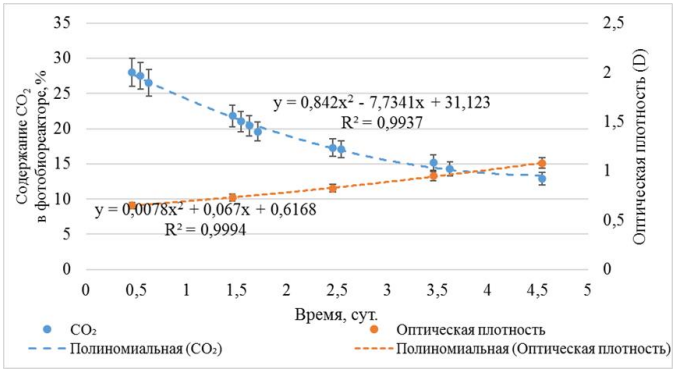

Рис. 3. Зависимость содержания CO_2 и оптической плотности суспензии микроводорослей в фотобиореакторе № 2 от времени культивирования (5 суток)

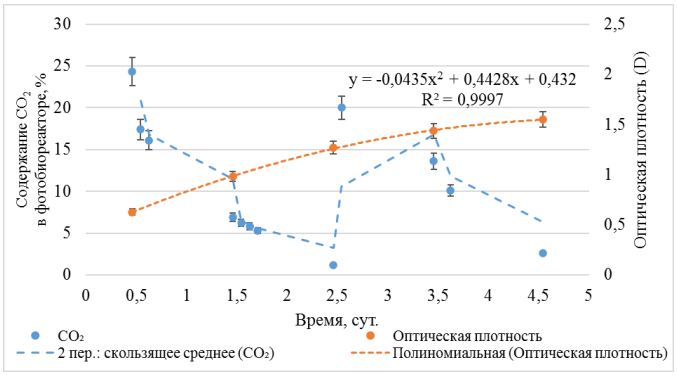

Рис. 4. Зависимость содержания CO_2 и оптической плотности суспензии микроводорослей в фотобиореакторе № 3 от времени культивирования (5 суток)

Поглощение CO_2 в фотобиореакторе №3 происходит активно в первые часы после его добавления. При повторном введении газа скорость улавливания снижается. Оптическая плотность суспензии увеличивается на протяжении всего эксперимента.

Общий объем поглощённого CO_2 составил 0,61 л за 2,5 суток. Средняя скорость поглощения составила 0,098 л CO_2 на литр суспензии в день. Масса поглощённого углекислого газа на литр суспензии по формуле (1) составила 0,173 г.

На рис. 5 представлена динамика поглощения углекислого газа микроводорослями в фотобиореакторе №4.

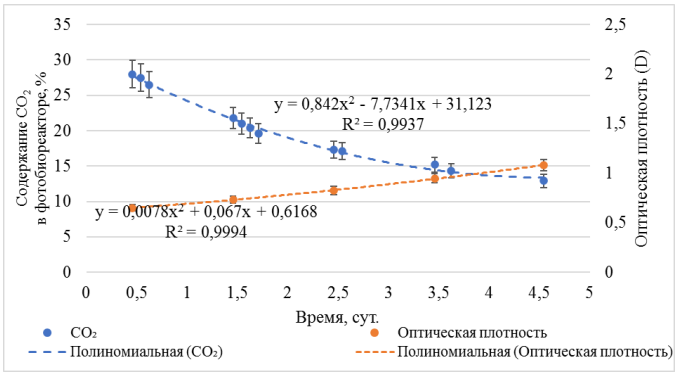

Рис. 5. Зависимость содержания CO_2 и оптической плотности суспензии микроводорослей в фотобиореакторе № 4 от времени культивирования (5 суток)

Поглощение CO_2 в фотобиореакторе №4 происходит крайне медленно. Начальная концентрация CO_2 не была полностью поглощена суспензией микроводорослей за 5 суток. При этом оптическая плотность суспензии увеличивался.

Общий объем поглощённого CO_2 составил 0,26 л за 4,5 суток. Средняя скорость улавливания составила 0,023 л CO_2 на литр суспензии в день. Масса поглощённого углекислого газа на литр суспензии по формуле (1) составила 0,042 г.

Обсуждение

Наибольший прирост оптической плотности наблюдался в фотобиореакторе №3 (от 0,626 до 1,549), что указывает на максимальный рост микроводорослей. Наименьший - в фотобиоректоре №1 (от 0,642 до 0,950).

Условия, созданные в фотобиореакторах №1 и №3 характеризуются более коротким временем поглощения CO2 2,4 и 2,5 суток соответственно. Напротив, условия в фотобиореакторах №2 и №4 требуют больше времени (более 4,5 суток). Более короткое время поглощения CO2 в фотобиореакторах №1 и №3 (2,4 и 2,5 суток) указывает на оптимальные условия для активного фотосинтеза. Напротив, замедленное поглощение в реакторах №2 и №4 (более 4,5 суток) может быть обусловлено недостатком кислородного массопереноса и снижением метаболической активности водорослей при неблагоприятных условиях (пониженная температура, отсутствие аэрации) [14].

Максимальная скорость поглощения CO_2 микроводорослями была достигнута в фотобиореакторе №1 и составляет 0,187 г·л$^{-1}$·день$^{-1}$. Максимальная скорость поглощения CO2 подтверждает выводы о высокой эффективности *Chlorella kessleri* при достаточной аэрации, отсутствии дефицита азота и повышенной температуре [15].

Отсутствие аэрации, дефицит азота и пониженная температура негативно сказываются на процессе поглощения CO_2 и снижают скорость его поглощения вплоть до 0,042 г·л$^{-1}$·день$^{-1}$. Такое снижение скорости поглощения углекислого газа суспензией микроводорослей демонстрирует критическую роль этих факторов в процессе утилизации CO_2 [6].

Заключение

Таким образом, в результате исследования было установлено, что максимальная скорость поглощения газовой смеси, приближенной к дымовым газам, биомассой микроводорослей *Chlorella kessleri* составила 0,187 г CO_2· л$^{-1}$·д$^{-1}$ при следующих условиях:

- температура: 30 °C;
- освещенность: 3000 лк;
- аэрация: присутствует;
- наличие соединений азота: присутствуют.

Исследование показало, что микроводоросли *Chlorella kessleri* обладают значительным потенциалом для поглощения углекислого газа. Это открывает перспективы их применения в технологиях, направленных на сокращение выбросов парниковых газов и улучшение экологической ситуации.

Условия, в которых протекает процесс поглощения CO_2, такие как температура, наличие аэрации и питательных веществ оказывают существенное влияние на скорость поглощения углекислого газа. В условиях аэрации и достаточного содержания питательных веществ, *Chlorella kessleri* продемонстрировала высокую эффективность улавливания CO_2, что подтверждает её пригодность для использования в процессах доочистки промышленных выбросов.

Результаты исследования имеют значительное прикладное значение для реализации ряда целей устойчивого развития. Прежде всего, полученные данные могут быть использованы для разработки эффективных биотехнологий, направленных на очистку выбросов от углекислого газа, тем самым способствуя достижению глобальных следующих климатических целей: сокращение выбросов парниковых газов и смягчение последствий изменения климата.

Кроме того, результаты исследования могут быть использованы для реализации технологий по получению биотоплива из микроводорослей, что также способствует продвижению принципов углеродной нейтральности и снижает зависимость от ископаемых видов топлива. Выводы, полученные в работе, могут стать основой для разработки новых технологий устойчивого производства и потребления, способствуя интеграции науки и технологий в решение глобальных экологических и социальных проблем современности.

Литература

1. Mata T.M. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review / T.M. Mata, A.A. Martins, N.S. Caetano // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – 14(1). – P. 217-232.

2. Sialve B. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable / B. Sialve, O. Bernard, N. Bernet // Biotechnology Advances. – 2009. – 27(4). – P. 409-416.

3. Becker E.W. Micro-algae as a source of protein // Biotechnology Advances. – 2007. – 25(2). – P. 207-210.

4. Huo C. Chlorella-based biorefinery: Optimization and large-scale production/ C. Huo, X. Gu, X. Tang // Bioresource Technology. – 2018. – 265. – P. 453-464.

5. Zhou W. Study on Chlorella kessleri's response to environmental factors and potential applications in biotechnology / W. Zhou, M. Xu // Algal Research. – 2011. – 1(1). – P. 20-26.

6. Tanchotikul R. Cultivation of Chlorella kessleri for biodiesel production: Growth and lipid accumulation / R. Tanchotikul, W. Kiatkittipong // Bioresource Technology. – 2018. – 263. P. 374-380.

7. Вельможина К.А. Применение микроводорослей Chlorella kessleri для интенсификации анаэробного сбраживания пищевых отходов / К.А. Вельможина, П.С. Шинкевич // Технологии переработки отходов с получением новой продукции: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Киров, 30 ноября 2022 года. – Киров: Вятский государственный университет, 2022. – С. 183-184.

8. Политаева Н.А., Жажков В.В., Зибарев Н.В. [и др.] Способ утилизации углекислого газа с применением микроводоросли рода Chlorella // Патент № 2797838 C1 Российская Федерация. 2023.

9. Опарина А.М. Исследования отработанного биосорбента (биомассы микроводоросли Chlorella kessleri после очистки модельного раствора сточной воды) методом тер-

моравиметрического анализа / А.М. Опарина, А.С. Донецкова // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения : Сборник научных трудов IV Всероссийской научно-практической конференции, в рамках IV Всероссийского научно-общественного форума «Экологический форсайт», Саратов, 26-28 октября 2022 года. – Саратов: Общество с ограниченной ответственностью "Амирит", 2022. – С. 243-247.

10. Политаева Н.А. Влияние стрессовых условий на поглощающую способность микроводорослей при декарбонизации выбросов / Н.А. Политаева, А.Н. Чусов, К.А. Вельможина, П.С. Шинкевич // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология: Сборник докладов международной научной конференции, Алушта, 05-09 июня 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 109-114.

11. Politaeva N. Carbon Dioxide Utilization Using Chlorella Microalgae / N. Politaeva, I. Ilin, K. Velmozhina, P. Shinkevich // Environments. – 2023. – vol. 10, no. 7. – P. 109. DOI: 10.3390/environments10070109.

12. Balukja I. Sustainable development goals and corporate strategy: Bridging the gap. Academic Journal of Business, Administration // Law and Social Sciences. – 2024. – 10. – P. 12-20. DOI: 10.2478/ajbals-2024-0011.

13. Политаева Н.А. Культивирование и использование микроводорослей Chlorella и высших водных растений ряска Lemna: монография / Н.А. Политаева, Ю.А. Смятская, Т.А. Кузнецова и др. – Саратов: Наука, 2017. – 124 с.

14. Li G. Optimization and Process Effect for Microalgae Carbon Dioxide Fixation Technology Applications Based on Carbon Capture: A Comprehensive Review / G. Li, W. Xiao, T. Yang, T. Lyu // C. – 2023. – 9(1). – 35. DOI: 10.3390/c9010035.

15. Kasiri S. Optimization of CO2 fixation by Chlorella kessleri cultivated in a closed raceway photo-bioreactor / S. Kasiri, A. Ulrich, V. Prasad // Bioresour Technol. – 2015. – 194:144. – 55. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.07.017.

16. Su C.M. Effects of Nutrient Availability on the Biomass Production and CO2 Fixation in a Flat Plate Photobioreactor / C.M. Su, H.T. Hsueh, C.M. Tseng, et al. // Aerosol Air Qual. – 2017. – Res.17. – P. 1887–1897. DOI: 10.4209/aaqr.2016.09.0386

DOI: 10.24892/RIJIE/20250313

On the Use of *Chlorella Kessleri* Microalgae to Achieve Sustainable Development Goals

Velmozhina K.A., Shinkevich P.S., Politaeva N.A., Chusov A.N.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University»
St. Petersburg, Russian Federation
ps.shinkevich@gmail.com

Abstract. **This paper is dedicated to investigating the potential of *Chlorella kessleri* microalgae for carbon dioxide (CO_2) absorption to address global environmental issues related to the increasing concentration of greenhouse gases in the atmosphere. In the context of rapid industrialization and globalization, rising CO_2 levels pose a significant ecological challenge, necessitating the implementation of sustainable technologies. One such solution is the use of microalgae biomass for CO_2 capture, which supports the sustainable development goals aimed at reducing greenhouse gas emissions and fostering sustainable production and consumption models. The study evaluates the ability of *Chlorella kessleri* to effectively absorb CO_2 and investigates the dynamics of this process under various cultivation conditions. Special attention is given to the influence of environmental factors such as temperature, CO_2 concentration, and light intensity on the rate of CO_2 absorption. The results of the study can be applied to the development of more efficient bioremediation methods and sustainable technologies for flue gas treatment in industry, contributing to the achievement of environmental goals within the framework of the global sustainable development strategy.**

Keywords: **microalgae, CO_2 absorption, sustainable development, flue gases, industrial processes.**

Библиографическое описание статьи

Вельможина К.А. К вопросу об использовании микроводорослей Chlorella kessleri для достижения целей в области устойчивого развития / К.А. Вельможина, П.С. Шинкевич, Н.А. Политаева, А.Н. Чусов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2025. – Т.12, №3. – С. 81-85. DOI: 10.24892/RIJIE/20250313

Reference to article

Velmozhina K.A., Shinkevich P.S., Politaeva N.A., Chusov A.N. On the use of Chlorella Kessleri microalgae to achieve sustainable development goals, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2025, vol.12, no.3, pp. 81-85. DOI: 10.24892/RIJIE/20250313
