

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

П.С. Шинкевич, К.А. Вельможина, Н.В. Зибарев, Н.А. Политаева, А.М. Опарина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Достижение целей углеродной нейтральности является приоритетом развития большинства развитых стран мира. Многочисленные прогнозы, представленные учеными из разных стран, указывают на необходимость сокращения углеродных выбросов [1–3]. Например, в одном исследовании предсказывается, что повышение уровня углекислого газа в атмосфере приведет к повышению средней температуры воздуха на планете до 6 °C [4]. Различают химические, физические и биологические методы улавливания углекислого газа из промышленных выбросов [5–8]. Один из подходов к контролю уровня CO₂ включает технологии улавливания и хранения углерода (CCS – carbon capture and storage) и технологии улавливания и утилизации углерода (CCU – carbon capture utilization). Хотя у этих технологий много общего, их основное различие заключается в подходе к углекислому газу [9, 10]. Технологии CCS рассматривают CO₂ как отходы, подлежащие утилизации, в то время как технологии CCU рассматривают CO₂ как ресурс для производства новых продуктов. В этом контексте технологии CCU являются более экологичной и энергоэффективной альтернативой. Эффективность и осуществимость этих технологий подтверждаются различными исследованиями. Согласно Данешвару Э. и соавторам (2022), наиболее актуальные технологии CCU на сегодняшний день включают преобразование CO₂ в химические вещества и топливо, а также биологическое преобразование CO₂ микроводорослями [11]. С экологической точки зрения биологические методы улавливания углекислого газа являются наиболее целесообразным направлением развития этих технологий. Методы биологической фиксации предполагают улавливание CO₂ в процессе метаболизма живых организмов [12, 13]. По мнению Глазуновой Д.М. и соавт. (2024), высокая эффективность этих методов достигается за счет отсутствия реагентов, которые могли бы вызвать вторичное загрязнение окружающей среды [12]. Научное сообщество считает биологическую фиксацию CO₂ микроводорослями перспективной технологией из-за ее высокой эффективности. Среднее содержание углерода в биомассе микроводорослей составляет 50 % по массе [14]. По разным данным, 100 тонн биомассы микроводорослей способны улавливать около 183 тонн CO₂ [15–18]. Основываясь на этих данных и учитывая, что мировое производство микроводорослей составляет около 20 000 тонн в год, можно получить около 36 000 тонн CO₂ [18].

Изучению микроводорослей как современного метода биологического улавливания углекислого газа посвящены многочисленные научные статьи, как в российских библиотеках научного цитирования, так и в мировых научно-исследовательских базах данных. Во многих из этих статей подчеркивается ряд преимуществ микроводорослей, включая отсутствие конкуренции за ценные сельскохозяйственные угодья и независимость от сезонных колебаний. Однако научное сообщество по-прежнему сомневается в целесообразности внедрения этих технологий. Опасения ученых связаны со значительными первоначальными капитальными затратами, необходимыми для реализации таких проектов. Поэтому существует необходимость в экономической оценке затрат и выгод, связанных с внедрением технологий улавливания углерода с использованием микроводорослей.

Очистку воздуха от CO₂ и культивирование биомассы проводят при непрерывной продувке воздухом с помощью барботирующего устройства при поверхностной освещенности в диапазоне от 2500 до 3000 Лк в лабораторных герметичных фотобиореакторах-биофильтрах вместимостью 100 л, оснащенных системой аэрирования, освещения, температурными датчиками, подачи углекислого газа, системой удаления суспензии биомассы микроводорослей. По сравнению с естественными источниками света искусственные источники могут создавать большую облученность, что способствует увеличению прироста биомассы.

Температура раствора суспензии поддерживается в диапазоне от 25 до 30 °C за счет терморегуляторов. Интенсивное барботирование газами с высоким содержанием CO₂ (15–39 %) суспензии микроводоросли *Chlorella* позволяет интенсифицировать процессы поглощения CO₂ биомассой микроводорослей. CO₂ из газовых выбросов является источником неорганического углерода, который микроводоросли трансформируют в органический углерод биомассы, что способствует размножению клеток микроводоросли *Chlorella* и поддерживает необходимую pH раствора в пределах от 6,0 до 9,0.

Суспензия микроводорослей представляет собой раствор микроводоросли в питательной среде (в качестве источника дополнительных питательных веществ рекомендуется добавлять сточные воды пищевой промышленности). Реализация этого метода проиллюстрирована на рисунке 1 [19].

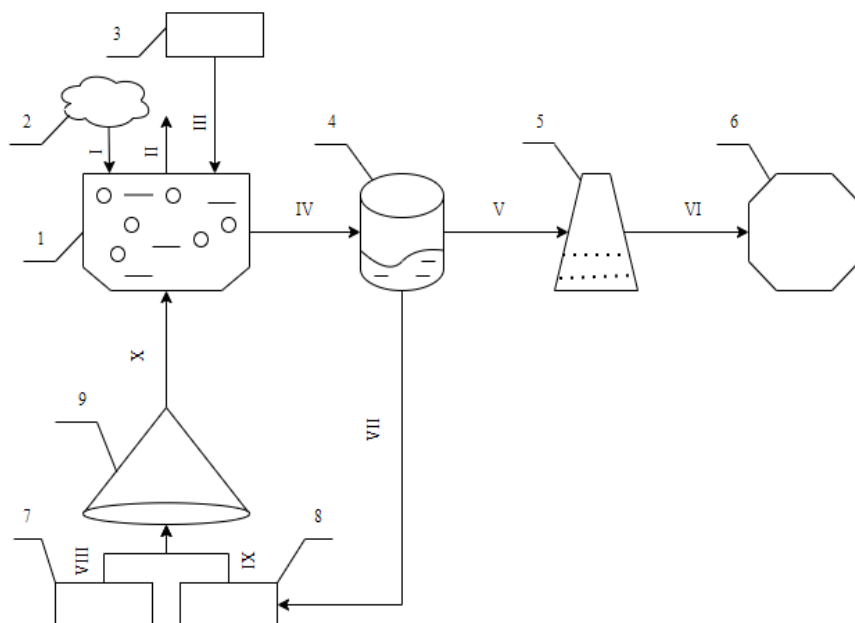


Рис. 1. Блок-схема способа очистки выбросов от углекислого газа микроводорослями *Chlorella*: где 1 – фотобиореактор-биофильтр, источник газов с повышенным содержанием CO_2 , 2 – источник газов с повышенным содержанием CO_2 , 3 – блок подачи маточной культуры, 4 – центрифугирование образовавшейся биомассы, 5 – гидрофильная сушка, 6 – сырье для получения биотоплива, 7 – блок подачи сточных вод, 8 – блок подачи питательной среды, 9 – блок смешивания питательной среды, сточных вод и остаточной культуры после центрифугирования, I – CO_2 , II – O_2 , III – маточная культура, IV – биомасса, V – биомасса после центрифугирования, VI – биомасса после сушки, VII – остаточная культура после центрифугирования, VIII – сточные воды, IX – питательная среда, X – смесь питательной среды, сточных вод и остаточной культуры после центрифугирования

Процесс утилизации CO_2 проводят в герметичных фотобиореакторах-биофильтрах объемом по 100 л каждый, в которых суспензию микроводоросли аэрируют на протяжении 648 часов (27 суток). Подача углекислого газа в фотобиореактор-биофильтр осуществлялся с помощью баллона CO_2 (имитация газовых выбросов энергоустановок) через аэрационную трубу, расположенную на дне фотобиореактора-биофильтра с отверстиями. Подача маточной культуры осуществляется вместе с питательной средой (в дальнейшем предполагается использование сточных вод предприятий пищевой промышленности в качестве источника дополнительных питательных компонентов).

По истечению 648 часов (27 суток) слив биомассы проводится с помощью крана. Для отделения осадка от раствора и сгущения биомассы применяется механическая обработка (центрифугирование). Полученная биомасса может быть использована в качестве сырья для получения продуктов с добавленной стоимостью, таких как биодизель, удобрения, корм и др., а надосадочная жидкость возвращается в фотобиореактор-биофильтр и может использоваться как одна из составляющих частей для новой питательной среды в усреднителе.

Для применения разработанного способа ($U_{\text{утил}} = 0,255$ г/л/день) на мини-ТЭЦ с мощностью 10 кВт и эмиссией углекислого газа $V = 73$ т/год (200 кг/день) при поглощении диоксида углерода 80 % потребуется объем суспензии микроводорослей ($V_{\text{мв}}$) (1):

$$V_{\text{мв}} = V \frac{0,8}{U_{\text{мв}}} = 200000 \frac{0,8}{0,255} = 627451 \text{ л} \quad (1)$$

Из данного объема за 1 цикл культивирования и очистки (27 суток) при центрифугировании можно получить сгущенную биомассу ($m_{\text{мв}}$), весом (при выходе биомассы = 3 г/л) (2):

$$m_{\text{мв}} = V_{\text{мв}} / 0,003 = 627451 / 0,003 = 1882,4 \text{ кг} \quad (2)$$

После обезвоживания масса сухой биомассы ($m_{\text{смв}}$) составит (3):

$$m_{\text{смв}} = m_{\text{мв}} \cdot 0,2 = 1882,4 \cdot 0,2 = 377 \text{ кг} \quad (3)$$

Сухая биомасса микроводорослей может быть использована для продажи или получения биодизеля. В среднем цена 100 гр сухой биомассы микроводорослей составляет около 400 руб. Тогда доход (Y) от продажи сухой биомассы микроводорослей составит (4):

$$Y = 377 \cdot 4000 = 1,51 \text{ млн руб} \quad (4)$$

Оценка величины предотвращенного экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха стационарными источниками выбросов проводится на основе показателей удельного ущерба для экономического района, представляющих собой удельные стоимостные оценки ущерба от выброса единицы (1 условной тонны) приведенной массы загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух (5):

$$Y_{\text{пр}}^a = Y_{\text{уд}}^a \cdot \sum_{K=1}^K M_{\text{нк}}^a \cdot K_{\text{э}}^a \quad (5)$$

где: $Y_{\text{пр}}^a$ – предотвращенный экологический ущерб от загрязнения атмосферного воздуха выбросами от стационарных источников в г-м регионе в течение отчетного периода времени в результате осуществления n-го направления природоохранной деятельности, руб.; $Y_{\text{уд}}^a$ – показатель удельного ущерба атмосферному воздуху, наносимого выбросом единицы приведенной массы загрязняющих веществ на конец отчетного периода времени для г-го экономического района РФ, руб./усл. т (для Северо-Западного региона = 667,5 руб./усл. т); $M_{\text{нк}}^a$ – приведенная масса выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников выбросов, не поступивших в атмосферный воздух с k-го объекта (в т. ч. уловленных на ПГОУ) в результате осуществления г-го направления природоохранной деятельности в-том регионе в течение отчетного периода времени, усл. тонн; K – количество объектов (предприятий, производств, имеющих ГОУ) либо количество установок для улавливания и обезвреживания вредных веществ из отходящих газов, а также других природоохранных мероприятий, приведших к недопущению (ликвидации, снижению) попадания загрязняющих веществ в атмосферный воздух; $K_{\text{э}}^a$ – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха территорий в составе экономических районов России (для Северо-Западного региона = 1,5).

Приведенная масса загрязняющих веществ рассчитывается (6):

$$M_{\text{нк}}^a = \sum_{i=1}^N m_i^a \cdot K_{\text{э}i}^a \quad (6)$$

где m_i^a – фактическая масса – го загрязняющего вещества или группы веществ с одинаковым коэффициентом относительной эколого-экономической опасности, не поступивших в атмосферный воздух от стационарных источников выбросов в результате осуществления n-го направления природоохранной деятельности (в т. ч. уловленных на ПГОУ) в течение отчетного периода, тонн; $K_{\text{э}i}^a$ – коэффициент относительной эколого-экономической опасности i-го загрязняющего вещества или группы веществ (0,4); i – индекс загрязняющего вещества или группы загрязняющих веществ; N – количество учитываемых групп загрязняющих веществ.

Приведенная масса диоксида углерода по формуле (6):

$$M_{\text{нк}}^a = (73 \cdot 0,8) \cdot 0,4 = 23,36 \text{ усл. тонн}$$

Величина предотвращенного экологического ущерба по формуле (5):

$$Y_{np}^a = 667,5 \cdot 23,36 \cdot 1,5 = 23389 \text{ руб.}$$

На основании результатов исследования был разработан способ утилизации углекислого газа с использованием микроводорослей рода *Chlorella*. Этот метод позволит компаниям топливно-энергетического комплекса не только сократить выбросы углекислого газа в атмосферу, но и получать ценные компоненты из остаточной биомассы микроводорослей, например, для производства биотоплива. Разработанный метод соответствует принципам экономики замкнутого цикла и позволяет использовать отходы – углекислый газ – в качестве сырья для производства коммерчески выгодных продуктов с добавленной стоимостью. С биомассой микроводорослей в производстве биотоплива связаны большие коммерческие ожидания из-за ее значительного экономического эффекта. Биотопливо третьего поколения (биодизель и биоэтанол) производится из микроводорослей. Экономически и экологически наиболее эффективно выращивать микроводоросли в фотобиореакторах и открытых прудах, если они расположены вблизи тепловых электростанций – бесплатного источника углекислого газа и низкопотенциального отходящего тепла, необходимого для выращивания. Кроме того, для снижения стоимости питательной среды для микроводорослей можно добавлять сточные воды пищевой промышленности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24–17–20004).

Литература

- [1] Iea (2019) co2 emissions from fuel combustion 2019. Oecd, paris
- [2] Dlugokencky e, tans p (2022) recent global co2–noaa/esrl. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/.
- [3] IPCC (2022) Mitigation of climate change 2022 – summary for policymakers (SPM).
- [4] Chia SR, Chew KW, Leong HY, Ho SH, Munawaroh HSH, Show PL (2021) CO2 mitigation and phycoremediation of industrial flue gas and wastewater via microalgae-bacteria consortium: possibilities and challenges. *Chem Eng J* 425:131436. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131436>
- [5] Salih H.A., Pokhrel J., Reinalda D., AlNashf I., Khaleel M., Vega L.F., Karanikolos G.N., Zahra M.A. Hybrid–Slurry/Nanofluid systems as alternative to conventional chemical absorption for carbon dioxide capture: A review. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 2021, vol. 110, art. 103415. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103415>.
- [6] Mukherjee A., Okolie J.A., Abdelrasoul A., Niu C., Dalai A.K. Review of post-combustion carbon dioxide capture technologies using activated carbon. *J. Environ. Sci.*, 2019, vol. 83, pp. 46–63. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.014>.
- [7] Gür T.M. Carbon dioxide emissions, capture, storage and utilization: Review of materials, processes and technologies. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2022, vol. 89, art. 100965. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100965>
- [8] Bhatia S.K., et al. Carbon dioxide capture and bioenergy production using biological system – a review. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2019, vol. 110, pp. 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.070>.
- [9] Markewitz P, et al. (2012) Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO2. *Energy Environ Sci* 5:7281–7305. <https://doi.org/10.1039/c2ee03403d>.
- [10] Li L, Zhao N, Wei W, Sun Y (2013) A review of research progress on CO2 capture, storage, and utilization in Chinese academy of sciences. *Fuel* 108:112–130. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.08.022>.
- [11] Daneshvar E, et al. (2022) Biologically-mediated carbon capture and utilization by microalgae towards sustainable CO2 biofixation and biomass valorization – a review. *Chem Eng J* 427:130884. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130884>.
- [12] Глазунова Д.М., Галицкая П.Ю., Селивановская С.Ю. Секвестрация углерода атмосферы с использованием микроводорослей // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2024. Т. 166, кн. 1. С. 82–125. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.1.82-125>
- [13] Kumar M., et al. Carbon dioxide capture, storage and production of biofuel and biomaterials by bacteria: A review. *Bioresour. Technol.*, 2018, vol. 247, pp. 1059–1068. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.050>.
- [14] Rosa GM, Moraes L, Cardias BB, Souza MRAZ, Costa JAV (2015) Chemical absorption and CO2 biofixation via the cultivation of Spirulina in semicontinuous mode with nutrient recycle. *Bioresour Technol* 192:321–327. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.020>
- [15] Bhatt N.C., Panwar A., Bisht T.S., Tamta S. Coupling of algal biofuel production with wastewater // *Sci. World J.* 2014. V. 2014. Art. 210504. <https://doi.org/10.1155/2014/210504>.
- [16] Jiang L., Luo S., Fan X., Yang Z., Guo R. Biomass and lipid production of marine microalgae using municipal wastewater and high concentration of CO2 // *Appl. Energy*. 2011. V. 88, No 10. P. 3336–3341. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.043>.
- [17] Saini R., Kapoor R., Kumar R., Siddiqi T.O., Kumar A. CO2 utilizing microbes a comprehensive review // *Biotechnol. Adv.* 2011. V. 29, No 6. P. 949–960. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.08.009>
- [18] Morais, Michele et al. (2023). Microalgae Biotechnology and Chemical Absorption as Merged Techniques to Decrease Carbon Dioxide in the Atmosphere. 10.1007/978-981-99-2890-3_4.
- [19] Politaeva, N.; Ilin, I.; Velmozhdina, K.; Shinkevich, P. Carbon Dioxide Utilization Using *Chlorella* Microalgae. *Environments* 2023, 10, 109. <https://doi.org/10.3390/environments10070109>.