

УДК 628.58:582.263

DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-4-97-107

БИОФИЛЬТРАЦИЯ ВЫБРОСОВ ТЭЦ МИКРОВОДОРОСЛЯМИ

П.С. Шинкевич, К.А. Вельможина, Н.А. Политаева

Аннотация. Представлен аналитический обзор современных исследований, посвященных биофиксации выбросов ТЭЦ микроводорослями. Микроводоросли рассмотрены как перспективные микроорганизмы для улавливания диоксида углерода, охарактеризована специфика дымовых газов ТЭЦ как среды культивирования, а также проанализировано влияние основных условий процесса, включая концентрацию CO_2 , освещенность, температуру, pH среды, обеспеченность элементами питания и режим подачи газа. Обобщены данные о применении различных типов фотобиореакторов и технологических схем подачи дымовых газов. Показано, что эффективность биофиксации CO_2 существенно зависит как от биологических особенностей используемых микроводорослей, так и от состава газа, глубины его предварительной подготовки, конструкции фотобиореактора и выбранного способа оценки результата. На основании сопоставления литературных данных установлено, что наиболее перспективными микроводорослями для биофиксации выбросов ТЭЦ являются представители родов *Chlorella*, *Scenedesmus* и *Desmodesmus*. Отдельное внимание уделено направлениям переработки образующейся биомассы, прежде всего получению сырья для биоэнергетики и биоудобрений. Сделан вывод о том, что дальнейшее развитие технологии связано с отбором устойчивых штаммов, совершенствованием фотобиореакторов, оптимизацией режимов культивирования и переходом к длительным испытаниям на реальных дымовых газах энергетических объектов.

Ключевые слова: биофильтрация; микроводоросли; ТЭЦ; дымовые газы; диоксид углерода; фотобиореактор.

ЖЫЛУУЛУК ЭЛЕКТР БОРБОРЛОРУНУН БӨЛҮП

ЧЫГАРУУЛАРЫН МИКРОБАЛЫРЛАР МЕНЕН БИОФИЛЬТРАЦИЯЛОО

П.С. Шинкевич, К.А. Вельможина, Н.А. Политаева

Аннотация. Макалада ЖЭБдин бөлүп чыгарууларын микробалырлар менен биофиксациялоого арналган заманбап изилдөөлөргө аналитикалык сереп берилди. Микробалырлар көмүр кычкыл газын сиңирип алуучу келечектүү микроорганизмдер катары каралды, ЖЭБдин түтүн газдарынын өстүрүү чөйрөсү катары өзгөчөлүктөрү мүнөздөлдү, ошондой эле процесстин негизги шарттарынын, анын ичинде CO_2 концентрациясынын, жарыктандыруунун, температуранын, чөйрөнүн pH деңгээлинин, азык элементтери менен камсыздоонун жана газ берүү режиминин таасири талданды. Фотобиореакторлордун ар кандай түрлөрүн жана түтүн газдарын берүүнүн технологиялык схемаларын колдонуу боюнча маалыматтар жалпыланды. CO_2 биофиксациясынын натыйжалуулугу колдонулган микробалырлардын биологиялык өзгөчөлүктөрүнө, ошондой эле газдын курамына, аны алдын ала даярдоонун тереңдигине, фотобиореактордун конструкциясына жана жыйынтыкты баалоонун тандалган ыкмасына олуттуу көз каранды экени көрсөтүлдү. Адабий маалыматтарды салыштыруунун негизинде ЖЭБдин бөлүп чыгарууларын биофиксациялоо үчүн эң келечектүү микробалырлар *Chlorella*, *Scenedesmus* жана *Desmodesmus* урууларынын өкүлдөрү экендиги аныкталды. Пайда болгон биомассаны кайра иштетүү багыттарына, биринчи кезекте биоэнергетика жана биоэнергетика үчүн чийки зат алууга өзгөчө көңүл бурулду. Технологиянын андан аркы өнүгүүсү туруктуу штаммдарды тандоо, фотобиореакторлорду өркүндөтүү, өстүрүү режимдерин оптималдаштыруу жана энергетикалык объектердин реалдуу түтүн газдарында узак мөөнөттүү сыноолорго өтүү менен байланыштуу деген жыйынтык чыгарылды.

Түйүндүү сөздөр: биофильтрация; микробалырлар; ЖЭБ; түтүн газдары; көмүр кычкыл газы; фотобиореактор.

BIOFILTRATION OF TPP EMISSIONS WITH MICROALGAE

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

Abstract. This article presents an analytical review of current research on the biofixation of TPP emissions with microalgae. Microalgae are considered as promising microorganisms for carbon dioxide capture, the specific properties of CHP flue gases as a culture medium are characterized, and the influence of key process conditions, including CO₂ concentration, illumination, temperature, pH, nutrient availability, and gas feed mode, is analyzed. Data on the use of various types of photobioreactors and flue gas feed schemes are summarized. It is shown that the efficiency of CO₂biofixation depends significantly on the biological properties of the cultures used, as well as on the gas composition, the depth of its pretreatment, the design of the photobioreactor, and the chosen method for evaluating the results. Based on a comparison of literature data, it was established that the most promising candidates for biofixation of TPP emissions are members of the genera *Chlorella*, *Scenedesmus*, and *Desmodesmus*. Particular attention is given to the processing of the resulting biomass, primarily the production of feedstock for bioenergy and biofertilizers. It is concluded that further development of the technology involves selecting resistant strains, improving photobioreactors, optimizing cultivation modes, and transitioning to long-term pilot testing on real flue gases from power plants.

Keywords: biofiltration; microalgae; TPP; flue gases; carbon dioxide; photobioreactor.

Введение. Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) относятся к числу крупных стационарных источников выбросов парниковых и загрязняющих веществ, формирующих одновременно климатическую и санитарно-гигиеническую нагрузку на атмосферный воздух. Выбросы ТЭЦ представляют собой сложную многокомпонентную среду, в которой наряду с диоксидом углерода (CO₂) присутствуют кислород, оксиды азота и серы, монооксид углерода, водяной пар и твердые частицы, а также сохраняется повышенная температура потока до стадии предварительного охлаждения [1, 2].

В условиях ужесточения экологических требований, поиска технологических решений по снижению углеродного следа и внедрения принципов экономики замкнутого цикла в энергетике возрастает интерес к методам, способным не только уменьшать концентрацию CO₂ в выбросах, но и обеспечивать получение полезных продуктов [3]. В этом контексте особое внимание привлекают биологические подходы, в частности биофиксация CO₂ микроорганизмами. При таком подходе микроорганизмы в процессе фотосинтеза фиксируют неорганический углерод и преобразуют его в биомассу, пригодную для дальнейшей переработки [4, 5].

В качестве перспективных микроорганизмов для биофиксации CO₂ в настоящее время рассматриваются микроводоросли. Их перспективность обусловлена сочетанием нескольких свойств. Прежде всего у микроводорослей отмечается высокая скорость фотосинтетического связывания углерода, способность поддерживать рост при повышенном содержании CO₂ в газовой фазе, а также возможность дальнейшего использования образующейся биомассы в биоэнергетических направлениях [6, 7]. Вместе с тем литературные данные демонстрируют значительный разброс показателей эффективности биофиксации CO₂. Это свидетельствует о выраженной зависимости результатов от биологических особенностей штамма, состава газовой смеси, параметров культивирования, конструкции фотобиореактора и применяемого способа расчета эффективности [8–10]. Такая неоднородность затрудняет корректное сопоставление опубликованных данных, особенно при переходе от модельных газовых смесей к реальным выбросам ТЭЦ, и обуславливает необходимость их систематизации и критического анализа. В связи с этим целью настоящего исследования является аналитический обзор публикаций, посвященных биофиксации выбросов ТЭЦ микроводорослями, для выявления наиболее перспективных видов микроводорослей и технологических решений, а также определения ключевых факторов, влияющих на эффективность удаления CO₂.

Материалы и методы исследования. Обзор научных исследований, посвящённых биофиксации выбросов ТЭЦ микроводорослями, выполнен на основе анализа публикаций за 2015–2026 гг. В работе использованы материалы рецензируемых статей и обзоров, проиндексированных в международной базе данных Scopus. Поиск литературы проводился по ключевым словам и их сочетаниям: «microalgae», «CO₂ fixation», «CO₂ biofixation», «carbon capture», «flue gas», «thermal power plant»,

«power plant emissions», «photobioreactor», «Chlorella», «Scenedesmus», а также по поисковым комбинациям «microalgae AND flue gas», «CO₂ biofixation AND photobioreactor», «thermal power plant emissions AND microalgae».

В анализ включались публикации, содержащие данные о составе газовой смеси, условиях культивирования микроводорослей, типе фотобиореактора и количественных показателях эффективности удаления CO₂.

Выбранный временной интервал характеризуется наиболее активным развитием исследований, посвящённых использованию микроводорослей для улавливания диоксида углерода из дымовых газов энергетических объектов и последующей утилизации образующейся биомассы.

Результаты и обсуждение.

Микроводоросли как объект биофиксации CO₂. В обзорах последних лет в качестве наиболее изученных и перспективных микроводорослей для биофиксации CO₂ из дымовых газов выделяются представители родов *Chlorella*, *Scenedesmus* и *Desmodesmus*.

Наиболее часто в исследованиях по биофиксации CO₂ фигурируют представители рода *Chlorella*. Это связано с их хорошей приспособляемостью к культивированию, сравнительно высокой скоростью деления и способностью переносить повышенное содержание CO₂ в газовой фазе. Так, Cheng et al. (2019) показали, что после адаптации к условиям имитированного дымового газа, содержащего 10 об.% CO₂, 200 ppm NO_x и 100 ppm SO_x, микроводоросли *Chlorella sp.* сохраняли устойчивый рост. При этом максимальная скорость фиксации CO₂ составила 1,20 г CO₂/(л·сут) [11]. Работа подтверждает адаптируемость *Chlorella* к комбинированному действию CO₂ и газовых примесей. Близкие выводы получены и в более позднем исследовании Li et al. (2024), где высокоустойчивый штамм *Chlorella* LAMB 31 культивировали уже на реальном дымовом газе угольной электростанции [12]. В результате исследования максимальная скорость фиксации CO₂ составила 0,24 г CO₂/(л·сут), при этом у культуры возрастало содержание хлорофиллов и липидов. Эти данные позволяют рассматривать *Chlorella* не просто как удобный лабораторный объект, а как один из наиболее перспективных родов микроводорослей для технологий, ориентированных на устойчивый рост в условиях газового стресса.

Наряду с *Chlorella*, значительный интерес вызывают представители родов *Scenedesmus* и *Desmodesmus*. Эти микроводоросли представляют интерес прежде всего благодаря их устойчивости к повышенным концентрациям CO₂ и способности сохранять продуктивность в присутствии некоторых компонентов дымового газа. В работе Ma et al. (2019) штамм *Scenedesmus obliquus* PF3 сохранял рост при воздействии смеси, содержащей 15 об.% CO₂, 500 ppm NO и 50 ppm SO₂ [13]. Скорость удаления CO₂ составила 1,48 г CO₂/(л·сут), а 87,7 % удалённого углерода было ассимилировано в биомассу. Для *Scenedesmus* отмечается не только устойчивость к повышенному CO₂, но и способность использовать растворившиеся соединения азота как дополнительный питательный ресурс. Близкие по смыслу данные получены и для рода *Desmodesmus*. В пилотном исследовании Anand et al. (2021) при культивировании *Desmodesmus sp.* в замкнутом фотобиореакторе при 10 об.% CO₂ скорость фиксации составляла 0,333 г CO₂/(л·сут) [14]. В другой работе на имитированном дымовом газе цементного производства с 15,5 об.% CO₂ средняя скорость фиксации для *Desmodesmus sp.* составила 0,21 ± 0,02 г CO₂/(л·сут). При этом ограничение по азоту сопровождалось накоплением липидов и углеводов [15].

В совокупности эти результаты показывают, что *Scenedesmus* и *Desmodesmus* представляют особый интерес для технологических схем, в которых биофиксация CO₂ сочетается с получением биомассы заданного состава.

Характеристика дымовых газов ТЭЦ как среды для культивирования микроводорослей. Результаты опубликованных исследований показывают, что дымовые газы ТЭЦ существенно отличаются от модельных смесей CO₂ с воздухом и создают для микроводорослей более сложные условия культивирования. Это связано с тем, что наряду с CO₂ в таких газах присутствуют оксиды азота и серы, монооксид углерода, кислород, водяной пар и твердые частицы, способные влиять как на химические параметры среды, так и на физиологическое состояние культуры. Так, в пилотной работе Park

et al. [16] был зафиксирован состав выброса ТЭЦ, включавший около 14,9 об.% CO_2 , а также примеси NO_x , SO_x и CO , что подтверждает необходимость учитывать не только концентрацию углекислого газа, но и весь комплекс сопутствующих компонентов.

Особое значение имеют серосодержащие соединения. В исследовании [17] показано, что увеличение содержания SO_2 от 0 до 400 ppm сопровождалось снижением pH культуральной среды с 7 до 2, накоплением сульфатов до 1,0 г/л и уменьшением скорости растворения CO_2 на 18,1 %. Это свидетельствует о том, что SO_2 оказывает ингибирующее действие не только непосредственно на клетки, но и опосредованно – через изменение кислотно-щелочного состояния среды и газожидкостного массообмена.

Практическая роль предварительной подготовки газа подтверждена в работе Zieliński et al. [18], где при наличии SO_x культура *Chlorella vulgaris* теряла устойчивость уже к 8-м суткам культивирования, тогда как при полном удалении SO_x эффективность использования CO_2 возрастала с 24,1 до 41,4 %, а рост биомассы становился более стабильным. Дополнительные данные, представленные в статье [19], показали, что при длительной эксплуатации системы устойчивость культивирования определяется не только видом микроводорослей, но и стабилизацией pH, режимом подачи газа и степенью очистки дымового газа.

Таким образом, результаты исследований позволяют заключить, что дымовые газы ТЭЦ следует рассматривать не просто как источник CO_2 , а как сложную газовую среду, в которой состав примесей и глубина предварительной подготовки во многом определяют успешность культивирования микроводорослей и эффективность биофиксации CO_2 .

Влияние условий культивирования на биофиксацию CO_2 микроводорослями. Результаты исследований показывают, что эффективность биофиксации CO_2 микроводорослями определяется совокупностью условий культивирования, прежде всего концентрацией CO_2 , освещённостью, температурой, pH среды, обеспеченностью элементами питания и режимом газоподачи. В обзоре Chen et al. [20] отмечено, что именно сочетание этих параметров определяет рост культуры и скорость фиксации углерода, а для промышленных газов характерен диапазон 5–15 об.% CO_2 , который для многих штаммов уже является стрессовым.

Концентрация CO_2 оказывает нелинейное влияние на процесс: её увеличение повышает доступность неорганического углерода, однако после достижения оптимума может приводить к угнетению роста. Так, Beigbeder и Lavoie в работе [21] показали, что для *Parachlorella kessleri* наилучшие результаты достигались при 5 об.% CO_2 и фотопериоде 20 ч свет / 4 ч темнота: удельная скорость роста составила $0,58 \text{ сут}^{-1}$, продуктивность биомассы – $0,104 \text{ г}/(\text{л} \cdot \text{сут})$, а скорость фиксации CO_2 – $0,211 \text{ г } \text{CO}_2/(\text{л} \cdot \text{сут})$.

Существенное значение имеют также освещённость, pH среды и режим подачи газа. В исследовании Aditya et al. [22] показано, что избыточная подача CO_2 подкисляет среду, тогда как увеличение освещённости действует в противоположном направлении. При оптимальном сочетании этих факторов для *Scenedesmus sp.* суммарная фиксация углерода достигала 4,2 г/л за цикл эксперимента. Тем самым подтверждено, что эффективность процесса зависит не только от количества подаваемого CO_2 , но и от согласованности газоподачи со световым режимом и буферными свойствами среды.

Температура и минеральное питание также существенно влияют на результативность процесса. Как показано в ряде работ, отклонение температуры от оптимума снижает скорость роста и фиксации CO_2 даже при достаточном содержании неорганического углерода. Ограничение по азоту, напротив, нередко уменьшает общую продуктивность, но изменяет состав биомассы. Так, в исследовании [15] при культивировании *Desmodesmus sp.* на газе с 15,5 об.% CO_2 средняя скорость фиксации составляла $0,21 \pm 0,02 \text{ г } \text{CO}_2/(\text{л} \cdot \text{сут})$, при этом содержание углеводов достигало 32,44 %, а липидов – 41,54 % сухой биомассы.

Таким образом, данные литературы свидетельствуют, что максимальная эффективность биофиксации CO_2 достигается при сбалансированном сочетании концентрации газа, освещённости,

температуры, pH, режима подачи CO₂ и обеспеченности культуры питательными веществами. Для большинства микроводорослей повышение концентрации CO₂ эффективно лишь до определённого предела, а дальнейшее увеличение без корректировки остальных параметров приводит к снижению устойчивости культуры и падению эффективности процесса.

Фотобиореакторы и технологические схемы подачи дымовых газов. Эффективность биофиксации CO₂ определяется не только составом дымового газа и свойствами культуры, но и конструкцией фотобиореактора, а также схемой подачи газовой смеси. В пилотной каскадной системе Park et al. [16] при работе с реальным выбросом ТЭЦ концентрация CO₂ снижалась с 14,90 до 3,11 об.%, что подтвердило эффективность многостадийного контакта газа с культуральной средой. В петлевом фотобиореакторе Anand et al. [14] при 10 об.% CO₂ получили продуктивность биомассы 0,185 г/(л·сут) и скорость фиксации 0,333 г CO₂/(л·сут). Для трубчатых систем также показана практическая пригодность. В работе [23] при подаче предварительно очищенного дымового газа скорость накопления биомассы составила 0,13 г/(л·сут). В мембранном фотобиореакторе Guo et al. [24] применение газопроницаемой мембраны обеспечило увеличение поверхностной плотности биомассы на 28,27 %, а эффективность удаления CO₂ достигала 65,05 %.

Систематизация основных типов фотобиореакторов представлена в обзоре Benner et al. [25], где рассмотрены колонные, плоскопанельные, трубчатые, мешочные и каскадные тонкослойные системы. Авторы отмечают, что при масштабировании ключевыми ограничениями становятся неоднородность освещения и массообменные ограничения по CO₂ и O₂. В связи с этим для интеграции с ТЭЦ чаще рассматриваются закрытые трубчатые и плоскопанельные системы, обеспечивающие лучший контроль параметров среды и меньший риск контаминации, либо открытые системы с более низкими капитальными затратами, но более высокой зависимостью от климатических условий и большей вероятностью загрязнения культуры. В целом опубликованные данные показывают, что наиболее перспективны те схемы, которые обеспечивают стабильный газожидкостный контакт, контроль pH и возможность адаптации режима подачи дымовых газов к физиологическим требованиям микроводорослей.

Показатели эффективности биофиксации CO₂. Эффективность биофиксации CO₂ микроводорослями оценивается по нескольким показателям, которые отражают разные стороны процесса биофиксации CO₂ и потому не всегда поддаются прямому сопоставлению. Наиболее часто используются степень удаления CO₂ из газовой фазы, эффективность использования CO₂, рассчитываемая по углеродному балансу, скорость фиксации CO₂, а также продуктивность биомассы. Именно различие применяемых метрик во многом объясняет широкий разброс литературных данных и требует осторожности при сравнении результатов разных исследований.

Критический обзор Lim et al. подчеркивает, что прямые и косвенные методы количественной оценки дают неэквивалентные результаты [26]. Ошибки особенно возрастают, когда фиксацию CO₂ оценивают не по фактическому углеродному балансу, а по приближенным коэффициентам пересчета. Поэтому сопоставление литературных данных возможно только с учетом того, какая именно метрика использована в каждом исследовании (таблица 1).

Наиболее простой и часто применяемый показатель – снижение концентрации CO₂ между входом и выходом из фотобиореактора. В пилотной каскадной системе Park et al. [16] при работе на реальном выхлопе ТЭС концентрация CO₂ уменьшалась с 14,90 до 3,11 об.%, что соответствует расчетному снижению примерно на 79,1 % при сопоставимых расходах газа. Близкий подход использован Estrada-Graf et al. для *Scenedesmus obtusiusculus* AT-UAM [27]. При обработке реального выброса удаление CO₂ достигало 77 %, а для модельного дымового газа – 100 %. Эти результаты удобны для инженерной оценки газоочистки, но сами по себе не показывают, какая доля углерода действительно была включена в биомассу.

Широко используемой метрикой остается и скорость фиксации CO₂, обычно выражаемая в г CO₂/(л·сут). Этот показатель удобен для сравнения штаммов и режимов культивирования. Так, Cheng et al. для адаптированного штамма *Chlorella* sp. при имитированном дымовом газе, содержавшем

Таблица 1 – Сопоставление ключевых публикаций
по показателям эффективности биофиксации CO₂ микроводорослями

Источ-ник	Биологический объект	Газ	Аппарат / условия	Основной показатель	Результат	Значение для анализа
16	<i>Nephroselmis</i> sp.; <i>Acutodesmus obliquus</i>	Реальный выброс ТЭС	Каскадная пилотная система, 5 × 2000 л	Снижение концентрации CO ₂	14,90 → 3,11 об.%	Концентрационная оценка газоочистки
27	<i>Scenedesmus obtusiusculus</i> AT-UAM	Модельный и реальный выброс	Гибридный ФБР	Удаление CO ₂ ; ассимиляция в биомассу	77 % для реального газа; 61% CO ₂ ассимилировано в биомассу	Сопоставление концентрационной и балансовой оценки
28	<i>Chlorella vulgaris</i> (иммобилизованная биомасса)	Модельный газ, 25 об.% CO ₂	Trickle-bed IMC- CO ₂ PBR	Эффективность удаления CO ₂	40% при 25 дм ³ /ч; 5,9% при 200 дм ³ /ч	Важность времени контакта и расхода газа
14	<i>Desmodesmus</i> sp.	Модельный газ, 10 об.% CO ₂	Петлевой пилотный ФБР	Скорость фиксации; продуктивность биомассы	0,333 г CO ₂ / (л·сут); 0,185 г/ (л·сут)	Удобное сочетание двух метрик
23	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Модельный дымовой газ WtE	Вертикальный трубчатый ФБР	Скорость фиксации; продуктивность	0,95 г CO ₂ / (л·сут) и 0,51 г/ (л·сут) в лаборатории; 0,25 г CO ₂ / (л·сут) и 0,13 г/ (л·сут) в пилоте	Показателен для сравнения масштабов
19	Микроводорослевая ассамблея	Реальный флю-газ электростанции	Пилотный ФБР, 12 месяцев	Продуктивность биомассы	0,43 ± 0,14 г/ (л·сут)	Важен для оценки длительной устойчивости
18	<i>Chlorella vulgaris</i>	Реальный выхлоп тепловой станции	Вертикальный трубчатый ФБР	CO ₂ utilization efficiency	24,1 % при наличии SOx; 41,4% после обезсеривания	Показателен для балансовой оценки и роли газоподготовки
29	<i>Scenedesmus</i> sp. FSP3	Модельный CO ₂ , 5–30 об.%	Двухстадийное культивирование	Скорость фиксации; продуктивность	0,77 г CO ₂ / (л·сут) и 0,41 г/ (л·сут) при 5% CO ₂ ; в оптимизированной схеме до 1,09 г CO ₂ / (л·сут) и 0,58 г/ (л·сут)	Верхний диапазон показателей для устойчивого штамма

10 об.% CO₂, 200 ppm NO_x и 100 ppm SO_x, получили максимальную скорость фиксации 1,20 г CO₂/ (л·сут) [11]. Для *Scenedesmus obliquus* PF3 Ma et al. показали еще более высокий показатель – 1,48 г CO₂/ (л·сут) при смеси с 15 об.% CO₂, 500 ppm NO и 50 ppm SO₂ [13]. В пилотном петлевом фотобиореакторе Anand et al. для *Desmodesmus sp.* при 10 об.% CO₂ скорость фиксации составляла 0,333 г CO₂/ (л·сут), а в исследовании по *Desmodesmus sp.* на имитированном цементном дымовом газе с 15,5 об.% CO₂ – 0,21 ± 0,02 г CO₂/ (л·сут) [14, 15]. Для вертикального трубчатого фотобиореактора Nad' et al. при культивировании *Chlorella* на модельном дымовом газе мусоросжигательной установки были получены 0,95 г CO₂/ (л·сут) в лабораторном масштабе и 0,25 г CO₂/ (л·сут) в пилотном, что демонстрирует снижение удельных показателей при масштабировании процесса [23, 28]. В то же время для *Scenedesmus sp.* FSP3 в двухстадийной схеме Li et al. максимальная скорость фиксации составляла 0,77 г CO₂/ (л·сут) при 5 об.% CO₂, а в оптимизированном режиме всей схемы достигала 1,09 г CO₂/ (л·сут) [29]. Таким образом, даже в пределах близкой группы объектов разброс скоростей фиксации может быть многократным.

Не менее важной характеристикой является продуктивность биомассы, поскольку именно она определяет, насколько биофиксация CO₂ сопровождается образованием практически ценной продукции. В работе [15] продуктивность *Desmodesmus sp.* составляла 0,185 г/(л·сут), в [23] для пилотного трубчатого фотобиореактора – 0,13 г/(л·сут), а в длительном пилотном исследовании Cutshaw et al. [19] на дымовом газе электростанции средняя продуктивность достигала 0,43 ± 0,14 г/(л·сут). Примечательно, что высокая стабильность процесса в длительном режиме не всегда сопровождалась максимальными скоростями фиксации CO₂, но имела самостоятельное технологическое значение, поскольку отражала пригодность системы к продолжительной эксплуатации.

Таким образом, максимальные значения обычно демонстрируют концентрационные показатели удаления CO₂, однако они не всегда отражают реальное включение углерода в биомассу. Показатели скорости фиксации лучше характеризуют биотехнологическую результативность процесса, тогда как продуктивность биомассы необходима для оценки прикладной ценности системы. Поэтому при анализе публикаций по биофиксации выбросов ТЭЦ микроводорослями целесообразно использовать сразу несколько взаимодополняющих метрик, а их сопоставление проводить только с учетом состава газа, типа фотобиореактора, режима культивирования и способа расчета.

Направления переработки и практического использования биомассы микроводорослей. Результаты опубликованных исследований показывают, что практическая значимость биофиксации CO₂ микроводорослями определяется не только степенью очистки газа, но и возможностью последующей переработки образующейся биомассы. В современных обзорах этот подход рассматривается как основа комплексного использования биомассы, при котором улавливание CO₂ сочетается с получением продуктов биоэнергетического, агротехнологического и иного назначения.

Scarpini et al. в обзоре [30] подчеркивают, что именно извлечение нескольких целевых продуктов из биомассы способно повысить экономическую устойчивость технологий биофиксации дымовых газов. Аналогичную общую оценку применительно к *Chlorella vulgaris* дают Новокшенова и соавт. в работе [31], где показано, что практическая ценность этой культуры связана не только с быстрым накоплением биомассы, но и с широким спектром возможных направлений ее использования.

Одним из наиболее разработанных направлений остается получение биотопливных компонентов. В исследовании Yadav et al. [32] совместное использование промышленных сточных вод и дымового газа угольной электростанции с 5 об.% CO₂ обеспечило для *Chlorella sp.* максимальный рост биомассы 1,52 г/л и фиксацию CO₂ 0,188 г/(л·сут). После истощения азота в биомассе накапливались липиды в пределах 17–34 % и углеводы 21,5–23,1 %, что делает ее пригодной как сырье для последующей топливной переработки. Сходная логика прослеживается и в исследованиях по *Desmodesmus sp.*, где ограничение по азоту при культивировании на газовых смесях с высоким содержанием CO₂ сопровождалось ростом доли липидов и углеводов, то есть целенаправленным изменением состава биомассы под задачи биотопливного использования.

Не менее важным направлением является агротехнологическое использование биомассы, полученной при утилизации CO_2 дымовых газов. В работе Соловьевой и соавт. [33] исследованы два варианта биоудобрений на основе *Chlorella sp.*, выращенной в присутствии дымового газа. Показано, что при разбавлении суспензии в соотношении 1:9 и содержании биомассы 2,4–2,8 г/дм³ длина и масса надземной части проростков рапса увеличивались на 13 %, энергия прорастания семян возрастала на 6 %, а элементный анализ выявил увеличение содержания магния и фосфора в удобрении. Эти результаты подтверждают, что биомасса, образующаяся в процессе биофиксации CO_2 , может рассматриваться не только как отход или промежуточный продукт, а как самостоятельный агрономически ценный ресурс.

Для практического внедрения принципиально важен вопрос стабильности качества такой биомассы и безопасности ее дальнейшего использования. В пятилетнем исследовании [34] показано, что при длительном культивировании местных поликультур на дымовом газе цементного производства эффективность удаления CO_2 достигала 20–60 %, а качество биомассы сохранялось стабильным в течение сезонов.

Таким образом, данные литературы показывают, что направления использования биомассы микроводорослей должны рассматриваться как неотъемлемая часть технологий биофиксации CO_2 . Наиболее обоснованными по опубликованным результатам являются два вектора: получение сырья для биоэнергетики за счет накопления липидов и углеводов и применение биомассы в качестве биоудобрения. При этом именно состав биомассы, ее стабильность и безопасность для последующего использования становятся ключевыми критериями оценки технологической состоятельности такого подхода.

Ограничения практического внедрения и перспективы развития технологии. Несмотря на высокий потенциал биофиксации CO_2 микроводорослями, практическое внедрение технологии на объектах теплоэнергетики пока ограничено необходимостью предварительной подготовки дымовых газов, чувствительностью культур к колебаниям состава газа и условий культивирования, а также значительными затратами на освещение, перемешивание и поддержание стабильной работы фотобиореакторов. Существенными ограничениями остаются также трудности масштабирования, риск контаминации и необходимость экономически оправданной переработки получаемой биомассы.

В то же время перспективы развития технологии связаны с несколькими направлениями. Наибольший интерес представляют поиск и селекция штаммов микроводорослей, устойчивых к высоким концентрациям CO_2 и примесям дымовых газов, а также способных сохранять высокую продуктивность в нестабильных условиях. Важным направлением является совершенствование конструкций фотобиореакторов и схем подачи газа, обеспечивающих более эффективный массообмен и снижение энергетических затрат. Существенно повысить прикладную значимость биофиксации может ее интеграция с процессами комплексного использования биомассы – получения биотоплива, биоудобрений и других ценных продуктов после фиксации CO_2 .

В целом, дальнейшее развитие технологии связано с переходом от отдельных экспериментальных исследований к комплексным, технологически и экономически обоснованным схемам декарбонизации энергетических объектов.

Заключение. Проведенный обзор показал, что биофиксация выбросов ТЭЦ микроводорослями представляет собой перспективное направление снижения углеродной нагрузки энергетических объектов. Такое направление сочетает в себе улавливание CO_2 с получением биомассы, пригодной для дальнейшего использования. Наиболее перспективными микроорганизмами для таких технологий являются представители родов *Chlorella*, *Scenedesmus* и *Desmodesmus*. В рассмотренных исследованиях для данных микроводорослей продемонстрированы сравнительно высокая устойчивость к повышенным концентрациям CO_2 и способность сохранять продуктивность в условиях, приближенных к составу дымовых газов.

Вместе с тем анализ научных работ показал, что эффективность процесса биофиксации CO_2 в значительной степени определяется не только биологическими свойствами микроорганизмов, но и составом дымового газа, глубиной его предварительной подготовки, параметрами культивирования и конструкцией фотобиореактора. Особое значение имеют содержание SO_x и NO_x , температурный режим, pH среды, освещенность и способ подачи газа, поскольку именно совокупность этих факторов определяет устойчивость роста микроводорослей и результативность биофиксации CO_2 .

Установлено также, что сопоставление литературных данных затруднено из-за использования разных показателей эффективности, включая снижение концентрации CO_2 в газовой фазе, скорость фиксации, эффективность использования CO_2 и продуктивность биомассы.

Практическая состоятельность технологии определяется не только степенью удаления CO_2 , но и возможностью комплексного использования образующейся биомассы, прежде всего в биоэнергетических и агротехнологических целях. В целом дальнейшее развитие данного направления связано с отбором устойчивых штаммов микроводорослей, совершенствованием фотобиореакторов и схем газоподдачи, а также с переходом от краткосрочных лабораторных экспериментов к длительным пилотным испытаниям на реальных дымовых газах ТЭЦ.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Соглашение № 24–17–20004 от 12.04.2024): <https://rscf.ru/project/24-17-20004/>

Поступила: 03.04.2026; рецензирована: 17.04.2026; принята: 20.04.2026.

Литература

1. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al. Global Carbon Budget 2024 // *Earth System Science Data*. 2025. Vol. 17. № 3. P. 965–1039.
2. Wang R., Wang X., Zhu T. Research progress and application of carbon sequestration in industrial flue gas by microalgae: A review // *Journal of Environmental Sciences*. 2025. Vol. 152. P. 14–28.
3. Ye Q., Shen Y., Zhang Q. et al. Life-cycle assessment of flue gas CO_2 fixation from coal-fired power plant and coal chemical plant by microalgae // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 848. Art. 157728.
4. Ighalo J.O., Dulta K., Kurniawan S.B. et al. Progress in Microalgae Application for CO_2 Sequestration // *Cleaner Chemical Engineering*. 2022. Vol. 3. Art. 100044.
5. Mohapatra R.K., Padhi D., Sen R., Nayak M. Bio-inspired CO_2 capture and utilization by microalgae for bioenergy feedstock production: A greener approach for environmental protection // *Bioresource Technology Reports*. 2022. Vol. 19. Art. 101116.
6. Priyadharsini P., Nirmala N., Dawn S.S. et al. Genetic improvement of microalgae for enhanced carbon dioxide sequestration and enriched biomass productivity: Review on CO_2 bio-fixation pathways modifications // *Algal Research*. 2022. Vol. 66. Art. 102810.
7. Sharmila V.G., Banu J.R., Kumar M.D. et al. Algal biorefinery towards decarbonization: Economic and environmental consideration // *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 364. Art. 128103.
8. Wang B., Xu Y.-F., Sun Z.-L. Mass transfer characteristics and effect of flue gas used in microalgae culture // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2022. Vol. 106. No. 21. P. 7013–7025.
9. Cho J.M., Oh Y.-K., Lee J., Chang Y.K., Park W.-K. Development of dual strain microalgae cultivation system for the direct carbon dioxide utilization of power plant flue gas // *Bioresource Technology*. 2024. Vol. 393. Art. 130051.
10. Mohapatra R.K., Padhi D., Sen R., Nayak M. Bio-inspired CO_2 capture and utilization by microalgae for bioenergy feedstock production: A greener approach for environmental protection // *Bioresource Technology Reports*. 2022. Vol. 19. Art. 101116.
11. Cheng D., Li X., Yuan Y., Yang C., Tang T., Zhao Q., Sun Y. Adaptive evolution and carbon dioxide fixation of *Chlorella* sp. in simulated flue gas // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 650, Pt. 2. P. 2931–2938. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.070.
12. Li J., Tang X., Pan K., Zhu B., Wang Z., Zhao Y. Application study for the high CO_2 tolerant *Chlorella* strain by flue gas culture: Evaluation of growth performance and adaptive mechanisms // *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 479. Art. 147700. DOI: 10.1016/j.cej.2023.147700.

13. Ma S., Li D., Yu Y., Li D., Yadav R.S., Feng Y. Application of a microalga, *Scenedesmus obliquus* PF3, for the biological removal of nitric oxide (NO) and carbon dioxide // *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 252, Pt. A. P. 344–351. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.05.084.
14. Anand A., Tripathi K., Kumar A. et al. Bio-Mitigation of Carbon Dioxide Using *Desmodesmus* sp. in the Custom-Designed Pilot-Scale Loop Photobioreactor // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 17. Art. 9882. DOI: 10.3390/su13179882.
15. Premaratne M., Liyanaarachchi V.C., Nishshanka G.K.S.H., Nimarshana P.H.V., Ariyadasa T.U. Nitrogen-limited cultivation of locally isolated *Desmodesmus* sp. for sequestration of CO₂ from simulated cement flue gas and generation of feedstock for biofuel production // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9, Issue 4. Art. 105765.
16. Park S., Ahn Y., Pandi K., Ji M.-K., Yun H.-S., Choi J.-Y. Microalgae Cultivation in Pilot Scale for Biomass Production Using Exhaust Gas from Thermal Power Plants // *Energies*. 2019. Vol. 12, No. 18. Art. 3497. DOI: 10.3390/en12183497.
17. Fu J., Huang Y., Xia A., Zhu X., Zhu X., Chang J.-S., Liao Q. How the sulfur dioxide in the flue gas influence microalgal carbon dioxide fixation: From gas dissolution to cells growth // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 198. P. 114–122. DOI: 10.1016/j.renene.2022.08.057.
18. Zieliński M., Barczak Ł., Kisielewska M., Vdovychenko A., Kazimierowicz J., Dębowski M. Carbon Dioxide Bio-Sequestration and Biomass Production for Energy Purposes During *C. vulgaris* Cultivation Powered by Real Exhaust Gases from a Municipal Thermal Power Plant // *Energies*. 2025. Vol. 18. No. 23. Art. 6086. DOI: 10.3390/en18236086.
19. Cutshaw A., Daiek C., Zheng Y., Frost H., Marks A., Clements D., Uludag-Demirer S., Verhanovitz N., Pavlik D., Clary W., Liu Y., Liao W. A long-term pilot-scale algal cultivation on power plant flue gas – Cultivation stability and biomass accumulation // *Algal Research*. 2020. Vol. 52. Art. 102115. DOI: 10.1016/j.algal.2020.102115.
20. Chen H., Jiang Y., Zhu K., Yang J., Fu Y., Wang S. A Review on Industrial CO₂ Capture through Microalgae Regulated by Phytohormones and Cultivation Processes // *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 2. Art. 897. DOI: 10.3390/en16020897.
21. Beigbeder J.-B., Lavoie J.-M. Effect of photoperiods and CO₂ concentrations on the cultivation of carbohydrate-rich *P. kessleri* microalgae for the sustainable production of bioethanol // *Journal of CO₂ Utilization*. 2022. Vol. 58. Art. 101934. DOI: 10.1016/j.jcou.2022.101934.
22. Aditya L., Vu H.P., Johir M.A.H., Mahlia T.M.I., Silitonga A.S., Zhang X., Liu Q., Tra V.-T., Ngo H.H., Nghiem L.D. Role of culture solution pH in balancing CO₂ input and light intensity for maximising microalgae growth rate // *Chemosphere*. 2023. Vol. 343. Art. 140255. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140255.
23. Nad' M., Brummer V., Lošák P., Máša V., Sukačová K., Tatarová D., Voloshin R., Zittelli G.C., Pruvost J., Spolaore P. Waste-to-energy plants flue gas CO₂ mitigation using a novel tubular photobioreactor while producing *Chlorella* algae // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 385. Art. 135721. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135721.
24. Guo C., Duan D., Sun Y., Han Y., Zhao S. Enhancing *Scenedesmus obliquus* biofilm growth and CO₂ fixation in a gas-permeable membrane photobioreactor integrated with additional rough surface // *Algal Research*. 2019. Vol. 43. Art. 101620. DOI: 10.1016/j.algal.2019.101620.
25. Benner P., Meier L., Pfeffer A., Krüger K., Oropeza Vargas J.E., Weuster-Botz D. Lab-scale photobioreactor systems: principles, applications, and scalability // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 45. No. 5. P. 791–813. DOI: 10.1007/s00449-022-02711-1.
26. Lim Y.A., Chong M.N., Foo S.C., Ilankoon I.M.S.K. Analysis of direct and indirect quantification methods of CO₂ fixation via microalgae cultivation in photobioreactors: A critical review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 137. Art. 110579. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110579.
27. Estrada-Graf A., Hernández S., Morales M. Biomitigation of CO₂ from flue gas by *Scenedesmus obtusiusculus* AT-UAM using a hybrid photobioreactor coupled to a biomass recovery stage by electro-coagulation-flotation // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. No. 23. P. 28561–28574. DOI: 10.1007/s11356-020-08240-2.
28. Dębowski M., Krzemieniewski M., Zieliński M., Kazimierowicz J. Immobilized Microalgae-Based Photobioreactor for CO₂ Capture (IMC-CO₂PBR): Efficiency Estimation, Technological Parameters, and Prototype Concept // *Atmosphere*. 2021. Vol. 12. No. 8. Art. 1031. DOI: 10.3390/atmos12081031.

29. Li J., Zhao X., Chang J.-S., Miao X. A Two-Stage Culture Strategy for *Scenedesmus* sp. FSP3 for CO₂ Fixation and the Simultaneous Production of Lutein under Light and Salt Stress // *Molecules*. 2022. Vol. 27. No. 21. Art. 7497. DOI: 10.3390/molecules27217497.
30. Scapini T., Woiciechowski A.L., Manzoki M.C., Molina-Aulestia D.T., Martinez-Burgos W.J., Fanka L.S., Duda L.J., Vale A.S., de Carvalho J.C., Soccol C.R. Microalgae-mediated biofixation as an innovative technology for flue gases towards carbon neutrality: A comprehensive review // *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 363. Art. 121329. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121329.
31. Новокшионова А.Д. Применение культур хлореллы обыкновенной в биотехнологии и пищевой промышленности / А.Д. Новокшионова, П.В. Храмцов, М.Б. Раев // *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*. 2023. № 1. С. 32–42. DOI: 10.7242/2658-705X/2023.1.4.
32. Yadav G., Dash S.K., Sen R. A biorefinery for valorization of industrial waste-water and flue gas by microalgae for waste mitigation, carbon-dioxide sequestration and algal biomass production // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 688. P. 129–135. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.024.
33. Solovyova A.S., Belik E.S., Rudakova L.V., Noskova E.I., Belykh A.V. Possibility of using biomass of microscopic algae cultivated under flue gas conditions as an organic fertilizer // *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025. Vol. 33. No. 4. P. 525–538. DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-525-538.
34. Lindehoff E., Mattsson L., Olofsson M., Svensson F., Farnelid H., Legrand C. Biomass performance and stability of 5-year outdoor microalgal cultivation for CO₂ removal from cement flue gas // *Bioresource Technology Reports*. 2024. Vol. 25. Art. 101730. DOI: 10.1016/j.biteb.2023.101730.