

ПОГЛОЩЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА МИКРОВОДОРОСЛЯМИ: АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ¹

© 2024 г. С. В. Киселёва^{a, b, *}, Н. И. Чернова^{a, b}, М. С. Власкин^{a, c}, А. В. Григоренко^a,
Е. А. Чунжук^{a, b}, С. Я. Маланий^d, Е. А. Бакуменко^d, Т. В. Росицкая^d

^aОбъединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, 125412 Россия

^bМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия

^cРоссийский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, 117198 Россия

^d“Лукойл-Инженеринг”, Покровский бульвар, д. 3, стр. 1, Москва, 109028 Россия

*e-mail: k_sophia_v@mail.ru

Поступила в редакцию 08.05.2024 г.

После доработки 27.06.2024 г.

Принята к публикации 04.07.2024 г.

Сокращение выбросов парниковых газов остается актуальной темой фундаментальных и прикладных научных исследований, в том числе в части анализа разработанных и применяемых технологий улавливания CO₂. Основное внимание уделяется методам захоронения углекислого газа в устойчивых геологических формациях, абсорбции, фильтрации и т.п. Поглощение углекислого газа в процессе фотосинтеза обычно связывают с наземной биотой, хотя у водных организмов продуктивность фотосинтеза более высокая. Использование микроводорослей как фотосинтезирующих агентов определяется, в основном, их ценностью для получения высококачественных пищевых и кормовых добавок, фармацевтических продуктов, биотоплива, однако важно рассмотреть их эффективность и в попутном поглощении CO₂. При производстве продуктов с длительным периодом депонирования углерода этот метод может быть включен в перечень эффективных технологий улавливания углекислого газа. Для оценки удельных затрат энергии на поглощение CO₂ были рассмотрены апробированные методы культивирования: открытые плоскостные культиваторы [микроводоросли *Arthrospira platensis*, скорость роста от 20 до 40 г/м² в сутки по сухому веществу (далее обозначается с.в.)] и цилиндрические закрытые фотобиореакторы (микроводоросли *Chlorella vulgaris*, скорость роста 0,7 г/дм³ в сутки по с.в.). На основе экспериментальных результатов культивирования микроводорослей в условиях повышенных концентраций CO₂ показано, что удельные затраты энергии находятся в диапазоне от 27 до 768 ГДж/т при культивировании микроводорослей *A. platensis* и от 59 до 373 ГДж/т при выращивании микроводорослей *C. vulgaris*. Наибольшие затраты энергии требуются для отопления и освещения плантаций микроводорослей, а также для отделения биомассы от культуральной жидкости для микроводорослей с малыми размерами клеток. Удельные энергозатраты могут быть снижены при максимальном использовании естественного освещения, сбросного тепла объектов промышленности и оптимизации систем сбора биомассы.

Ключевые слова: микроводоросли, цианобактерии, культивирование, фитобиореактор, продуктивность, улавливание CO₂, затраты энергии

DOI: 10.56304/S0040363624700504

Технологии улавливания и захоронения CO₂ (carbon capture and storage – CCS) в большинстве случаев включают в себя сбор углекислого газа из мощных точечных источников, сжатие его до жидкого состояния, транспортировку и закачку в устойчивые геологические формации на суще-

или на дне океанов и морей, а при необходимости и мониторинг хранения CO₂ [1–4]. Доступные геологические структуры необходимых для захоронения углекислого газа объемов имеются практически во всех регионах земного шара. По данным работы [2], хранилища для захоронения выбросов до конца XXI в., согласно Парижскому соглашению, должны вмещать до 940 Гт газа. Авторы [5] оценивают мощность геологически устойчивых формаций, пригодных для захоронения CO₂, от 8000 до 55000 Гт. Согласно [6], геологические хранилища на истощенных ме-

¹ Исследование по теме “Устойчивая утилизация дымовых газов фотографно-гетеротрофными микробными консорциумами в сочетании с производством биоэлектрического и биотоплива” выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-49-02003). <https://rscf.ru/project/22-49-02003/>.

сторождениях нефти и газа имеют существенно меньший потенциал для захоронения CO_2 , хотя тоже значительный. В такие хранилища можно закачать 675–900 Гт CO_2 , а в глубокие засоленные пласты – от 1000 до 10000 Гт. Однако реализация этого метода улавливания газа сопряжена с большими затратами и технологическими сложностями сбора углекислого газа [3, 7]. В работах [6–8] рассматриваются экологические ограничения захоронения CO_2 , связанные с возможным повышением кислотности вод в результате растворения CO_2 при его размещении в полостях на дне океана [6–8].

В последние годы в технологию CCS был добавлен этап утилизации CO_2 (carbon capture utilization and storage – CCUS). Эта технология обращения с углекислым газом включает в себя сбор, высококачественную очистку CO_2 от примесей, хранение или промышленное его использование [3]. Согласно [9, 10], в настоящее время в мире около 0.23 Гт CO_2 /год используется в качестве сырья для химического синтеза широкого ряда продуктов (мочевины, карбонатов, полимеров, цианатов, метанола и других углеводородов, раствора для инъекций), а также в пищевой и металлургической промышленности. Таким образом, технология CCUS призвана через производство нового продукта обеспечить создание добавленной стоимости, что может частично покрыть затраты на проведение всего процесса. В то же время, с одной стороны, включение этапа переработки CO_2 влечет за собой дополнительные затраты энергии и, соответственно, добавочные выбросы углекислого газа. С другой стороны, утилизированный углекислый газ через некоторое время вновь может оказаться выброшенным в атмосферу [2]. Следовательно, разработка и всесторонний анализ иных технологий наряду с захоронением и переработкой CO_2 во вторичные продукты остаются актуальными.

В качестве фотосинтезирующих агентов, которые способны гораздо более интенсивно, нежели наземные растения, усваивать углекислый газ как из атмосферы, так и из выбросов объектов тепловой энергетики и промышленности, рассматриваются микроводоросли (МКВ). В работе [3] общая продукция пресноводных макро- и микроводорослей, накопленная в речных отложениях, оценивается в 70–72 Мт органического углерода в год, что эквивалентно ежегодному потреблению около 250 Мт CO_2 . Микроводоросли как источник ценной биомассы и эффективного метода улавливания CO_2 имеют значительные преимущества [3, 11–14], однако для их интенсивного искусственного выращивания требуются существенные затраты энергии, поэтому необходимо выявить и оценить возможности их

сокращения при различных методах культивирования МКВ.

ТЕХНОЛОГИИ ВЫВЕДЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ИЗ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ

В последние годы значительно возрос интерес к микроводорослям как источнику биомассы для получения биотоплива (в основном биодизеля и бионефти). В качестве характеристики эффективности такого процесса предлагалось использовать удельные затраты на производство топлива (K), рассчитываемые как отношение энергии, заключенной в биомассе МКВ, к затраченной на их выращивание и сбор урожая [15–20]:

$$K = \frac{E_{\text{б.д}} + E_{\text{б.м.ост}}}{E_{\text{э.з}} + E_p},$$

где $E_{\text{б.д}}$ и $E_{\text{б.м.ост}}$ – энергия, заключенная соответственно в биодизеле и остаточной биомассе после экстракции липидов; $E_{\text{э.з}}$ – расход электроэнергии на выращивание, сбор и переработку биомассы; E_p – расход тепловой и электрической энергии на производство химических веществ для культивирования микроводорослей.

На основе экспериментальных данных получения биодизеля из микроводорослей *Haematococcus pluvialis* было показано [21, 22], что K изменяется от 1.76 для открытых систем культивирования водорослей с максимальным использованием солнечной энергии для освещения и поддержания температурного режима до 1.23 для закрытых фотобиореакторов (ФБР). Во втором случае может быть достигнута более высокая продуктивность МКВ при, однако, существенно больших дополнительных энергозатратах.

Значительный научный интерес вызывает возможность создания искусственных плантаций микроводорослей для утилизации углекислого газа, особенно из точечных источников [13, 15–23].

В данном исследовании ставилась задача определить удельные затраты энергии на выведение CO_2 из глобального круговорота с использованием микроводорослей. Для этого применялись экспериментальные результаты, полученные при направленном культивировании МКВ в атмосфере с повышенной концентрацией CO_2 или в атмосфере дымовых газов. При этом вопрос о дальнейшем обращении с полученной биомассой не рассматривался, поскольку производство любых полезных продуктов (кормовые и пищевые добавки, средства косметологии и фармацевтики, жидкие биотоплива), повышая рентабельность улавливания CO_2 , влечет за собой высокие “вторичные” выбросы CO_2 . Более перспективной для длительного депонирования углекислого газа может стать технология производства из МКВ биоугля с

дальнейшим его использованием в качестве адсорбента, материала для накопителей или электрохимических источников тока, компонента удобрений для улучшения структуры и иных качеств почвы [24, 25].

При обсуждении способов выведения углекислого газа из атмосферы или из дымовых газов с помощью МКВ основное внимание уделялось выбору штаммов, методам культивирования и отделения биомассы от культуральной жидкости.

В настоящее время в мире для производства биомассы микроводорослей используются культиваторы двух типов:

открытые (обычно русловые) для выращивания небольшого числа штаммов МКВ, которые не подвергаются контаминации (загрязнению другими видами), таких как *Chlorella*, *Dunaliella salina*, *Arthrospira* (рис. 1, а);

закрытые различных типов, в которых обеспечиваются требуемый уровень освещения и температуры, благоприятный для роста МКВ, и выведение образующегося в процессе фотосинтеза кислорода; в закрытых культиваторах выращиваются в основном микроводоросли, подверженные контаминации (рис. 1, б).

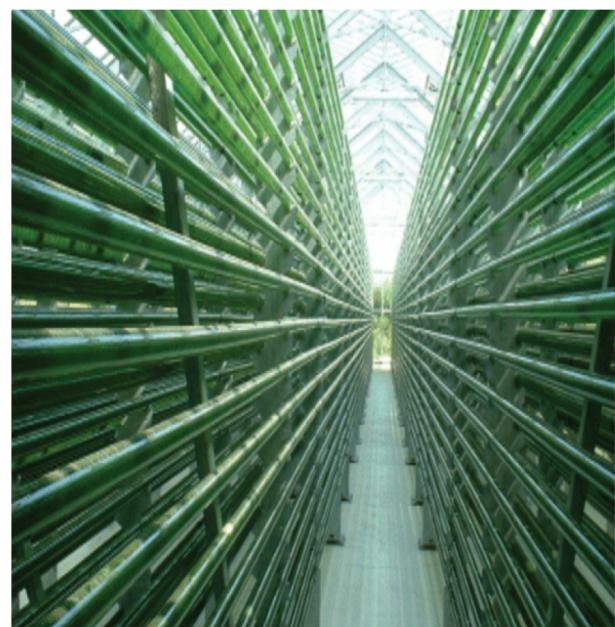
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поскольку эффективность поглощения CO_2 определяется скоростью роста биомассы, необходимо подобрать или провести селекцию штаммов микроводорослей с максимальной скоростью роста в условиях повышенных концентраций CO_2 . Для выявления наиболее продуктивных МКВ было проведено культивирование различных штаммов микроводорослей из коллекции научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии МГУ им. М.В. Ломоносова: *Chlorella vulgaris rsemsu Chv-20/11*, *Chlorella ellipsoidea rsemsu Chl-el*, *Elliptochoris subsphaerica*, *Gloetilla pulchra rsemsu Pz-6* и устойчивый консорциум на основе *Arthrospira platensis rsemsu P (Bios)* с гетеротрофными бактериями родов *Pseudomonas* и *Bacillus*. Выбор указанных штаммов, помимо наличия их в рабочей коллекции и длительного опыта культивирования, осуществляли по следующим критериям.

Штаммы *A. platensis*, *C. vulgaris* и *C. ellipsoidea* отличаются высокой скоростью роста и низкой контаминацией. Клетки МКВ *A. platensis* имеют значительные размеры, что позволяет проводить механическое отделение биомассы от культуральной жидкости на ситах, без затрат электроэнергии. Во многих научных исследованиях именно эти микроводоросли рассматриваются как объект экспериментов по улавливанию CO_2 из дымовых газов и атмосферы, что дает возможность выполнить сравнительный анализ результатов. Так, в



а)



б)

Рис. 1. Открытые русловые (а) и закрытые трубчатые (б) культиваторы для выращивания микроводорослей [26]

[27] детально описаны методика проведения и результаты экспериментальных работ по поглощению углекислого газа микроводорослями штаммов *Chlorella*, близкие по технике эксперимента к исследованиям авторов данной статьи. Следует отметить важные особенности исследований [27] – широкий спектр использованных штаммов, а также высокие уровни концентрации CO_2 в газо-воздушной смеси (39%).

Штаммы *E. subsphaerica* и *G. pulchra*, выделенные для настоящих исследований из озер Карелии, показали большие скорости роста, лабильность и устойчивость к некоторым стрессорам.

Культивирование проводили (в трехкратной повторности) в цилиндрических стеклянных фотобиореакторах с объемом питательной среды 4 дм³. Микроводоросли штаммов *Chlorella* выращивали на среде Тамия (KNO_3 – 5.0 г/дм³,

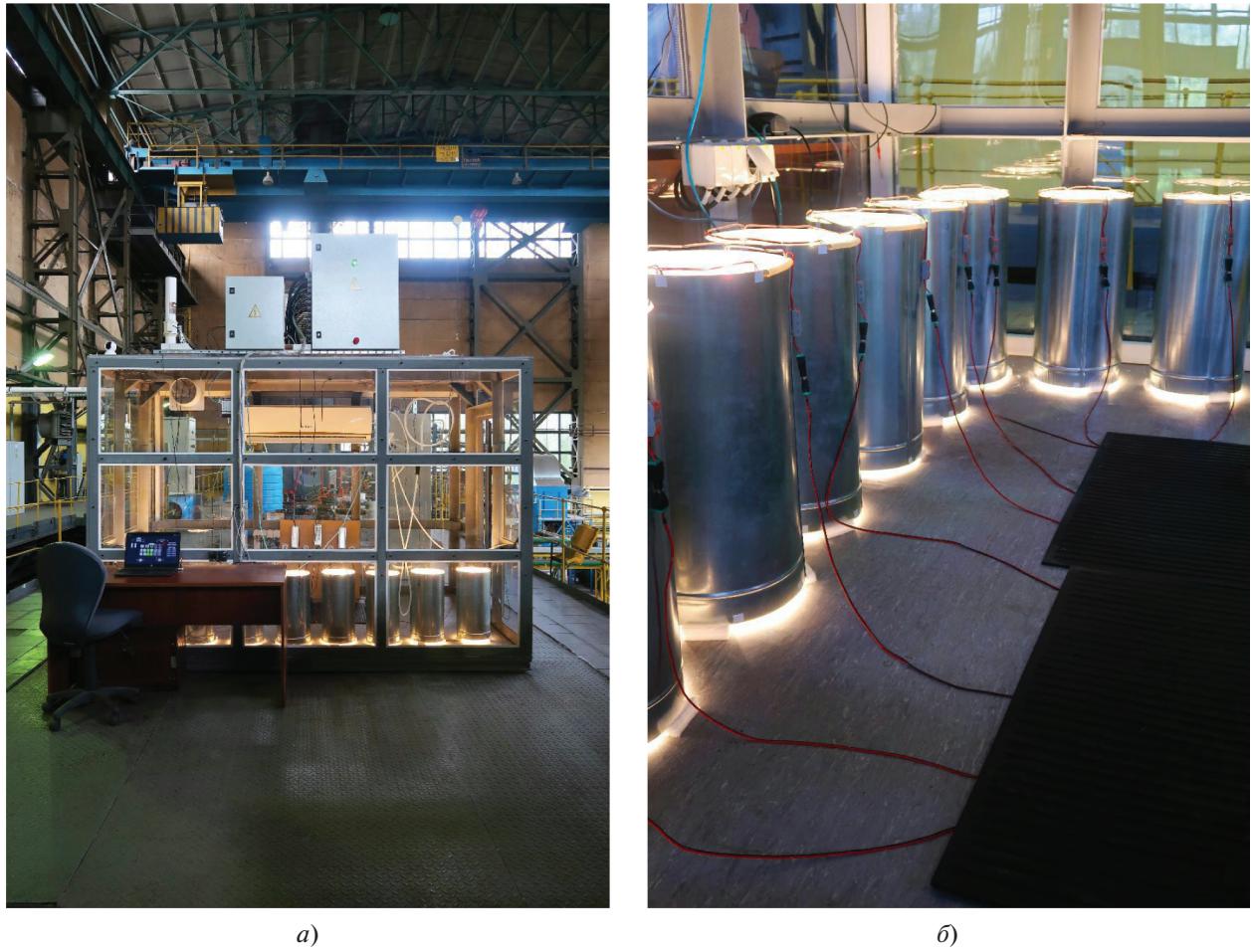


Рис. 2. Экспериментальная газовоздушная камера (а), цилиндрические фотобиореакторы с системой освещения в газовоздушной камере (б)

KH_2PO_4 – 1.25 г/дм³, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 2.5 г/дм³, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0.009 г/дм³, EDTA – 0.037 г/дм³, H_3BO_3 – 2.86 мг/дм³, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 1.81 мг/дм³, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0.22 мг/дм³, MnO_3 – 0.018 мг/дм³, NH_4VO_3 – 0.023 мг/дм³). Микроводоросли *E. sub-sphaerica* и *G. pulchra* выращивали на среде BG-11 (NaNO_3 – 1.5 г/дм³, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – 0.04 г/дм³, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0.075 г/дм³, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 0.04 г/дм³, Na_2CO_3 – 0.02 г/дм³, лимонная кислота – 0.006 г/дм³, Na_2EDTA – 0.001 г/дм³, цитрат железа (III)-аммония – 0.006 г/дм³, раствор микроэлементов – 1 мл/дм³), *A. platensis* – на среде Заррука (NaHCO_3 – 16.8 г/дм³, KNO_3 – 3.0 г/дм³, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – 0.66 г/дм³, K_2SO_4 – 0.5 г/дм³, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0.2 г/дм³, NaCl – 1.0 г/дм³, CaCl_2 – 0.04 г/дм³, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0.018 г/дм³, EDTA – 0.08 г/дм³, раствор микроэлементов 1 мл/дм³) [28]. Фотобиореакторы устанавливали в герметично закрытой камере, в которой создава-

лась атмосфера с различной концентрацией CO_2 . Для поддержания необходимого уровня освещенности [200 мкмоль/(м² · с)] использовали ленточные светодиоды, которые размещали на боковой поверхности цилиндрических ФБР (рис. 2). Поглощение CO_2 интенсифицировали путем непрерывного барботажа супензии МКВ в фотобиореакторах газовоздушной смесью с высокой концентрацией CO_2 .

Для достижения устойчивого роста микроводорослей при больших концентрациях CO_2 , не характерных для обычных условий культивирования, все штаммы подвергли предварительной процедуре адаптации. Для этих целей МКВ выращивали в нескольких последовательных сериях экспериментов, когда концентрация CO_2 в газовоздушной атмосфере камеры последовательно увеличивалась от 0.04% (соответствует содержанию CO_2 в воздухе) до 9% (характерные значения для выбросов газового генератора). При этом биомасса МКВ после окончания каждого экспе-

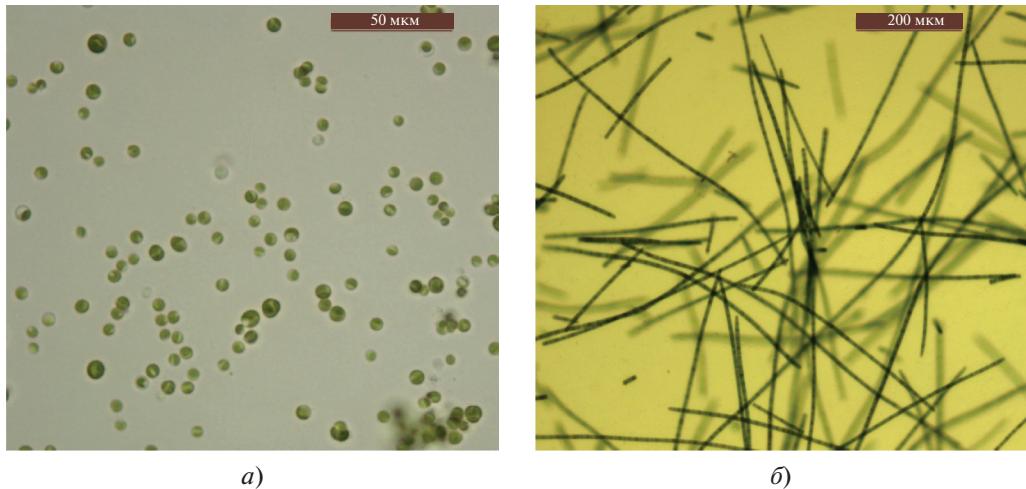


Рис. 3. Клетки микроводорослей в световом микроскопе.
а – *C. vulgaris*; б – *A. platensis*

римента использовалась для засева ФБР и культивирования при все более высоких концентрациях CO_2 . Каждый эксперимент продолжался в течение 12 сут. Для большинства штаммов (*Chlorella vulgaris*, *Chlorella ellipsoidea*, *Elliptochloris subsphaerica*) наблюдалось повышение скорости роста по мере увеличения концентрации CO_2 в газовоздушной смеси. Некоторое снижение и дальнейшая стабилизация скорости роста были отмечены для штаммов *Gloetilla pulchra* и *Arthrospira platensis*. При этом микроскопирование клеток, окрашенных прижизненным красителем метиленовым синим, не показало заметного изменения их морфологии. В дальнейшем штаммы микроводорослей, прошедшие процедуру адаптации, поддерживались (сохранялись) в атмосфере с повышенной концентрацией CO_2 . Таким образом, для целей данной работы были использованы показатели скорости роста штаммов, толерантных к высоким концентрациям CO_2 .

В процессе экспериментов регулярно проводили заборы проб биомассы, определяли плотность культуры и рассчитывали скорость ее роста, а также анализировали состав культуральной жидкости для расчета интенсивности поглощения питательных веществ. Мониторинг концентрации CO_2 в газовой камере позволил определить удельную скорость поглощения газа в течение экспериментов – 1.8 г CO_2 /г биомассы, которую использовали для дальнейших расчетов. Подробное описание методики выполнения экспериментов и контроля значимых характеристик представлено в [13, 29]. Предварительное адаптивное культивирование микроводорослей к большим концентрациям CO_2 способствовало их устойчивому росту с высокой скоростью. Так, для *C. vulgaris* (рис. 3, а)

скорость роста составила 0.79 г/дм³ в сутки по с.в., для *A. platensis* (рис. 3, б) – 0.27 г/дм³ в сутки по с.в.

Следует отметить, что в работе [30], в которой был проведен анализ скорости роста биомассы различных штаммов *Chlorella* в условиях высоких концентраций CO_2 , из 21 штамма только 7 показали скорость роста от 0.5 до 1.0 г/дм³ в сутки по с.в. У остальных штаммов *Chlorella* скорость роста не превышала 0.3 г/дм³ в сутки по с.в. Скорость роста *A. platensis* также может изменяться в широких пределах (от 0.087 [31] до 0.796–0.950 [32] г/дм³ в сутки по с.в.) в зависимости от штамма и условий культивирования, в том числе от концентрации CO_2 в газовоздушной среде.

Chlorella на практике выращивается в основном в закрытых фотобиореакторах, что приводит к значительным энергетическим затратам на освещение, поддержание температурного режима и отделение биомассы от культуральной жидкости. *A. platensis*, уступающая по скорости роста *C. vulgaris*, является более предпочтительным штаммом. Это связано с возможностью ее культивирования не только в закрытых, но и в открытых плоскостных культиваторах, в том числе в тепличных комплексах, а в южных регионах мира – на открытом воздухе с использованием солнечного света для освещения и низкопотенциального тепла для поддержания температурного режима. Отделение биомассы *C. vulgaris* от культуральной жидкости из-за малых размеров клеток (6–8 мкм) проводилось центрифугированием, *A. platensis* – на ситах с ячейками не более 200 мкм, причем практически без энергозатрат.

В связи с указанными особенностями *A. platensis*, в данной работе для расчета энергетических затрат были использованы также результаты собственных длительных экспериментов авторов по

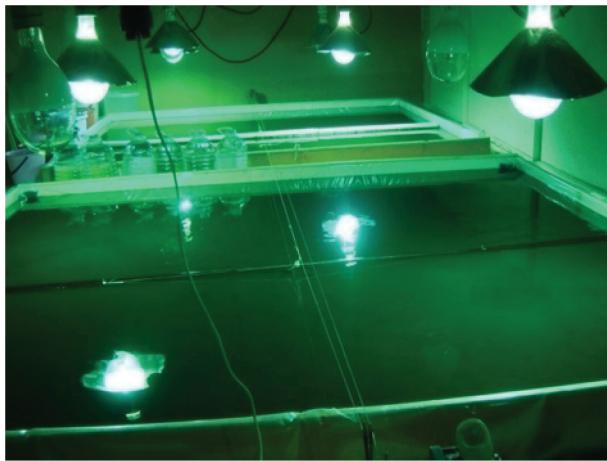


Рис. 4. Плоскостные открытые культиваторы с поверхностным перемешиванием для выращивания *A. platensis*

ее выращиванию в открытых плоскостных культиваторах. Они представляли собой квадратные каркасы, выполненные из дешевых материалов (дерево) и выстланные плотной полиэтиленовой пленкой (толщина не менее 200 мкм). Высота слоя суспензии микроводорослей в культиваторах составляла 15–20 см, площадь поверхности – 4 м² (рис. 4). Поверхностное перемешивание осуществлялось круглосуточно маломощными протяжными системами. Выращивание проводилось в условиях, приближенных к тепличным: про-

зрачное остекление культиваторных помещений, дополнительное освещение культиваторов лампами типа ДРЛФ мощностью 400 Вт. Отделение биомассы микроводорослей от культуральной жидкости выполнялось гравитационным методом путем фильтрации на ситах.

При оценке энергозатрат на производство биомассы микроводорослей (и, следовательно, поглощение углекислого газа) учитывались только этапы выращивания МКВ и выделения биомассы из суспензии (табл. 1).

Расход энергии на поглощение CO₂ микроводорослями был рассчитан по следующему алгоритму.

1. Определение диапазонов продуктивности МКВ, полученных в результате экспериментов (см. табл. 1).

2. Расчет на основе экспериментальных и литературных данных удельных (на единицу получаемой биомассы) показателей потребления питательных веществ (реактивов) и энергии (тепловой и электрической) при выращивании микроводорослей.

3. Определение удельных энергозатрат на отделение биомассы от культуральной жидкости.

4. Оценка чувствительности проведенных расчетов при следующих условиях:

различной продуктивности биомассы (в дальнейшем для МКВ *A. platensis* при открытом культивировании рассматривалась продуктивность 20

Таблица 1. Виды энергозатрат при производстве биомассы микроводорослей *Arthrosphaera platensis* и *Chlorella vulgaris* в плоскостных культиваторах и цилиндрических фотобиореакторах

Этап технологии культивирования микроводорослей	Вид энергозатрат	Культивирование МКВ		Исходные данные для оценки энергозатрат
		<i>A. platensis</i> в плоскостных открытых культиваторах	<i>C. vulgaris</i> в цилиндрических фотобиореакторах	
Культивирование	Отопление	+	+	Экспериментальные и справочные данные
	Освещение	+	+	То же
	Перемешивание	+	–	Экспериментальные данные
	Барботаж газовоздушной смесью (воздух + CO ₂)	–	+	То же
Сбор биомассы	Гравитационный сбор на ситах	+	–	Пренебрежимо малы
	Центрифugирование	–	+	Экспериментальные данные
Производство реактивов	Электрическая и тепловая энергия	+	+	Справочные данные

Примечание. +/– означают потребность в энергозатратах, указанных во втором столбце, или отсутствие таковой.

Таблица 2. Различные условия культивирования микроводоросли *A. platensis*

Режим освещения (световая/темновая фазы, ч)	Отопление	Интенсивность поглощения компонентов среды	Продуктивность (скорость роста) МКВ, г/дм ³ в сутки по с.в.
24 × 0	Круглосуточно	Все компоненты питательной среды поглощаются за 14 сут, кроме NaHCO_3 (восполняется путем поглощения CO_2)	0.13 (или 20 г/м ² в сутки по с.в.)
16 × 8			0.26 (или 40 г/м ² в сутки по с.в.)
12 × 12			
Естественное освещение			

и 40 г/м² в сутки по с.в., или в объемных единицах 0.13 и 0.26 г/дм³ в сутки по с.в.);
разной длительности искусственного освещения в течение суток: 24, 16, 12 ч;
только естественное освещение в помещении теплицы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Следует отметить следующие особенности метаболизма *A. platensis*, важные для потребления ею CO_2 . В природной среде данный штамм растет в озерах, имеющих повышенную концентрацию соды (NaHCO_3): о. Текскоко (Мексика), о. Чад (Чад) и др., т.е. основной путь потребления углерода для этой водоросли – извлечение его в форме иона HCO_3^- из водной суспензии. Поэтому среда для искусственного культивирования *A. platensis* содержит соду в значительной концентрации, а при барботаже культуральной жидкости углекислым газом, как показали эксперименты, поглощение HCO_3^- компенсируется растворением углекислого газа и последующей диссоциацией угольной кислоты (H_2CO_3). Вследствие этого после первичной заправки питательных веществ выращивание *A. platensis* практически не лимитировано по углероду. Остальные компоненты питательной среды в процессе роста биомассы исчерпываются и требуют возмещения.

Для плоскостных культиваторов авторами данного исследования использовалась система поверхностного перемешивания (см. рис. 4), которая способствует газообмену с окружающей средой. При малой толщине слоя жидкости в культиваторах (примерно 15–20 см) барботаж суспензии газовоздушной смесью является малопродуктивным в связи с коротким временем контакта газовых пузырьков с клетками микроводорослей. Поскольку основной газообмен идет через поверхность суспензии, дополнительный барботаж газовоздушными смесями не проводился.

Продуктивность биомассы *A. platensis* и интенсивность потребления компонентов питательной

среды выбраны на основе экспериментальных результатов, полученных как на лабораторных установках, так и при крупномасштабном культивировании *A. platensis* в условиях тепличных комплексов и на открытом воздухе в южных регионах России [33]. Результаты расчетов энергозатрат на поглощение CO_2 при различных возможных условиях выращивания МКВ приведены в табл. 2. В дальнейшем оценки расхода энергии выполнялись для двух значений продуктивности (скорости роста): 0.13 г/дм³ в сутки по с.в. (или 20 г/м² в сутки по с.в.) и 0.26 г/дм³ в сутки по с.в. (или 40 г/м² в сутки по с.в.). Достижение этих значений скорости роста доказано экспериментально.

Удельные затраты тепловой энергии на отопление (требуемая температура в помещении теплиц – +28°C) рассчитывали, исходя из данных, приведенных в [34], согласно которым для обогрева теплиц требуется тепловая мощность 190–200 Вт/м². Тогда на круглосуточное отопление 1 м² плоскостных культиваторов за 14 сут будет затрачено в пересчете на полученную за этот период биомассу 240 (120) кВт · ч/кг биомассы при продуктивности микроводорослей 0.13 (0.26) г/дм³ в сутки.

Затраты электроэнергии на круглосуточное освещение в течение 14 сут при мощности ламп, приходящихся на 1 м² освещаемой поверхности культиваторов, 100 Вт составят 120 (60) кВт · ч/кг биомассы при указанных значениях продуктивности МКВ соответственно. При освещении в режиме 16 × 8 ч – 80 (40) кВт · ч/кг биомассы, в режиме 12 × 12 ч – 60 (30) кВт · ч/кг биомассы.

Затраты энергии на производство реагентов, необходимых для выращивания микроводорослей, рассчитывали на основе данных [35] в предположении, что все компоненты среды потребляются микроводорослями за 14 сут. Если принять во внимание реагенты, содержание которых в культуральной жидкости максимально, то их удельные затраты при продуктивности биомассы 0.13 г/дм³ в сутки для NaHCO_3 составят 9.23 г/г биомассы, KNO_3 – 1.65 г/г биомассы, K_2SO_4 – 0.55 г/г биомассы. При продуктивности 0.26 г/дм³

Таблица 3. Энергетические затраты на производство основных компонентов питательной среды Заррука для выращивания МКВ *A. platensis*

Затраты	Компоненты питательной среды			Итого
	NaHCO ₃	KNO ₃	K ₂ SO ₄	
Питательной среды на первичный засев, г/дм ³	16.8	3.0	1.0	—
Энергии на производство реагентов, ГДж/т:				
электрической	0.22	1.55	50.3	—
тепловой	5.36	20.27	0.892	—
Реагентов, кг на 1 кг биомассы, при продуктивности 0.13 (0.26) г/дм ³ в сутки	9.23 (4.62)	1.65 (0.83)	0.55 (0.28)	—
Энергии*, кВт · ч/кг биомассы, при продуктивности 0.13 (0.26) г/дм ³ в сутки	14.40 (7.20)	10.08 (5.00)	0.18 (0.09)	24.66 (12.29)

* Принималось, что 1 МДж соответствует 0.28 кВт · ч.

Таблица 4. Суммарные затраты энергии на культивирование МКВ *A. platensis* в плоских культиваторах

Вид затрат	Удельные затраты энергии, кВт · ч/кг биомассы, при продуктивности	
	0.13 г/дм ³ в сутки	0.26 г/дм ³ в сутки
Тепловая энергия	240	120
Электрическая энергия (при круглосуточном освещении/16 × 8/12 × 12/без освещения)	120/80/60/0	60/40/30/0
Электрическая энергия на производство основных реагентов	25	12
Перемешивание	3	1
Итого	388/348/328/268	193/173/163/133

в сутки удельные затраты реагентов пропорционально сокращаются (табл. 3).

При перемешивании в плоскостных культиваторах использовались двигатели постоянного тока мощностью 17 Вт в расчете на 8 м² культиваторов. При круглосуточном перемешивании удельные затраты энергии составили 2.55 и 1.27 кВт · ч/кг биомассы при продуктивности биомассы 0.13 и 0.26 г/в сутки соответственно. Суммарные затраты энергии на производство 1 кг биомассы *A. platensis* приведены в табл. 4.

Расчет затрат энергии на выращивание штамма *C. vulgaris* был проведен на основе результатов культивирования ее в закрытых цилиндрических фотобиореакторах (рабочий объем 70 дм³, свето-диодное освещение мощностью 240 Вт), в которых эта МКВ показала максимальную скорость роста, равную 0.70–0.69 г/дм³ в сутки по с.в., при барботаже ее газовоздушной смесью с содержанием углекислого газа 5 и 10% (рис. 5). В условиях круглосуточно отапливаемого помещения удельные затраты энергии могут быть снижены по сравнению с выращиванием *A. platensis* в открытых плоскостных культиваторах в 2 раза (до 0.1 кВт/м² площади помещения) в связи с частичным нагре-

вом суспензии микроводорослей в цилиндрических ФБР системой светодиодного освещения. Для интенсивного поглощения CO₂ суспензия МКВ барботировалась газовоздушной смесью круглосуточно, для чего использовался компрессор мощностью 25 Вт. Отделение биомассы проводилось с помощью центрифуги мощностью 1.5 кВт (время работы после 14 сут выращивания МКВ – 4 ч).

Как и для *A. platensis*, предполагалось, что все компоненты питательной среды поглощаются *C. vulgaris* в течение 14 сут. Если проанализировать расходы энергии на производство реагентов для среды Заррука (см. табл. 3), будет ясно, что максимальные затраты энергии приходились на производство соды, поскольку ее расход был весьма высоким. Доля остальных компонентов среды по энергозатратам составляла не более 10%, и, в целом, реагенты внесли минимальный вклад в удельное энергопотребление при культивировании МКВ.

Проведенные расчеты для среды Тамия (используется при выращивании *C. vulgaris*) подтвердили эти выводы. Так, удельные затраты на производство основного компонента среды – KNO₃ – составляют, согласно [35]: электроэнер-

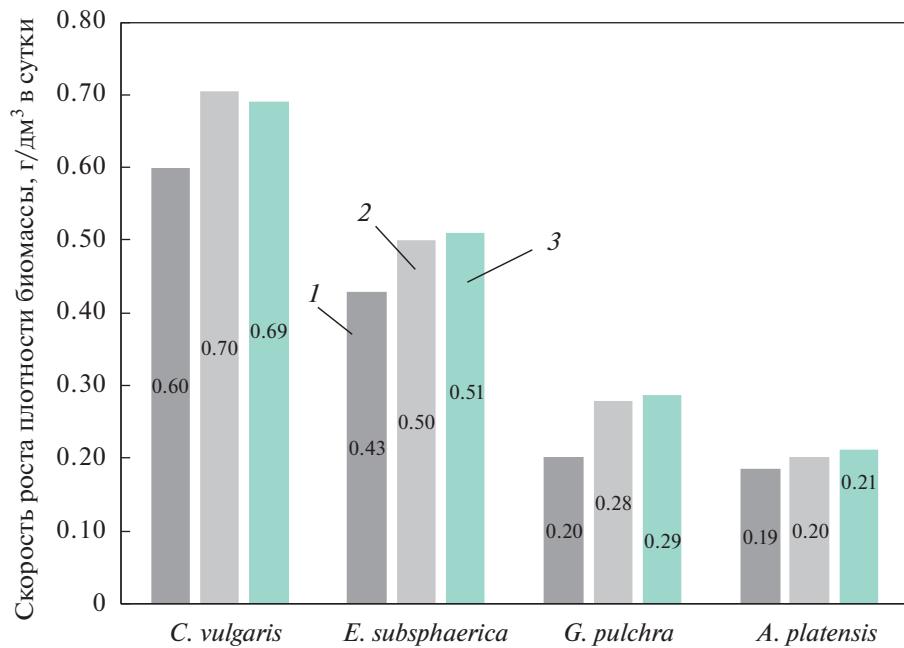


Рис. 5. Скорость роста штаммов микроводорослей в закрытых фотобиореакторах при барботаже газовоздушной смесью.

Концентрация CO₂, %: 1 – 2; 2 – 5; 3 – 10

гии 1.6 ГДж/т, тепла 20.2 ГДж/т, что с учетом скорости роста микроводорослей (0.7 г/дм³ в сутки) дает удельные энергозатраты на данный компонент среды 2.86 кВт · ч/кг биомассы. Это позволяет пренебречь в расчетах энергопотреблением на компоненты питательных сред для выращивания *C. vulgaris*. Суммарные затраты энергии на производство 1 кг биомассы микроводорослей приведены в табл. 5. Там же для сравнения указан расход энергии на выращивание в цилиндрических фотобиореакторах *A. platensis*.

Таким образом, при выращивании штамма микроводорослей *A. platensis* в плоскостных культиваторах с поверхностным перемешиванием и отделением биомассы на ситах основная доля затрат энергии (тепловой и электрической) (93%) приходится на отопление и освещение плантаций МКВ. Максимальные затраты при круглосуточном освещении и отоплении в режиме теплицы составляют около 387 (193) кВт · ч/кг биомассы по с.в. [или 1400 (700) ГДж/т биомассы] при продуктивности 0.13 (0.26) г/дм³ в сутки по с.в. соот-

Таблица 5. Суммарные затраты энергии на культивирование микроводорослей *C. vulgaris* и *A. platensis* в цилиндрических фотобиореакторах

Вид затрат	Удельные затраты энергии на 1 ФБР, кВт · ч/сут	Удельные затраты энергии, кВт · ч/кг биомассы по с.в. при продуктивности	
		<i>C. vulgaris</i> , 0.70 г/дм ³ в сутки по с.в.	<i>A. platensis</i> , 0.21 г/дм ³ в сутки по с.в.
Тепловая энергия	2.4	49	163
Электрическая энергия (при круглосуточном освещении/16 × 8/12 × 12/без освещения)	5.8/3.8/2.9/0	118/78/59/0	392/261/196/0
Энергия на производство основных реагентов	*	0	10
Барботаж (работа компрессоров)	0.6	12	40
Энергия на центрифугирование	0.4	9	0
Итого	9.2/7.2/6.3/3.4	188/148/129/70	605/474/409/213

* Определяется штаммом микроводорослей.

ветственно. Отказавшись от искусственного освещения, возможно снизить потребление энергии до 267 (133) кВт · ч/кг биомассы при указанных скоростях роста микроводорослей. При выращивании без затрат энергии не только на освещение, но и на отопление плантаций, что реально в условиях России в теплый период года (от 3 до 6 мес в году в зависимости от климатической зоны), энергоемкость процесса культивирования можно снизить до 28 (13) кВт · ч/кг биомассы [или 100 (46) ГДж/т биомассы].

Затраты энергии на культивирование МКВ определяются скоростью их роста, которая при открытом культивировании обычно существенно ниже, чем для закрытых ФБР. Если провести анализ с учетом максимальной скорости роста, достигнутой при выращивании *A. platensis* в цилиндрических ФБР, то удельный расход энергии на производство биомассы, именно в связи с более низкой скоростью ее роста (0.21 г/дм³ против 0.70 г/дм³ в сутки, полученной для штамма *C. vulgaris*), даже при отсутствии затрат на центрифугирование будет значительным – от 213 до 605 кВт · ч/кг биомассы в зависимости от режима освещенности (см. табл. 5).

Таким образом, для весьма технологичного, однако имеющего более низкую скорость роста штамма *A. platensis* минимальных затрат энергии можно добиться при выращивании его в плоскостных культиваторах в условиях теплицы без отопления и дополнительного освещения (в теплый период года), когда энергия потребляется только на производство реагентов и перемешивание. В этом случае расход энергии составит примерно 28 (13) кВт · ч/кг биомассы по с.в. [или 100 (46) ГДж/т биомассы] при скорости роста микроводорослей 0.13 (0.26) г/дм³ в сутки по с.в. В литературе приводятся и более высокие показатели роста этого штамма, однако для их достижения требуются оптимальные по освещенности и температуре условия. Эти показатели обычно являются пиковыми и не могут поддерживаться устойчиво в течение длительного периода времени.

При выращивании более продуктивного штамма *C. vulgaris* (0.7 г/дм³ в сутки по с.в.), клетки которой имеют размеры 3–5 мкм, в цилиндрических фотобиореакторах основные затраты энергии приходятся не только на освещение и отопление, но и на центрифугирование при отборе биомассы (см. табл. 5). При использовании только естественного освещения и выращивании *C. vulgaris* лишь в теплый период года (без отопления) в условиях тепличных комплексов энергопотребление может снизиться до 20 кВт · ч/кг биомассы (71 ГДж/т биомассы). Однако при плотном расположении цилиндрических ФБР естественное освещение может быть непродуктивным в связи с затенением биореакторами

один другого. Это, в свою очередь, приводит к необходимости применять световоды и искать другие решения в целях более эффективного использования солнечного света для роста микроводорослей.

С учетом того что в 1 кг биомассы МКВ может быть аккумулировано до 1.83–1.88 кг СО₂ [13, 36, 37], энергозатраты на поглощение СО₂ микроводорослями *A. platensis* при использовании плоских культиваторов и механического сбора биомассы на ситах составляют максимально 215 кВт · ч/кг СО₂ (768 ГДж/т) и минимально (условия рассмотрены ранее) – 7.2 кВт · ч/кг СО₂ (25.7 ГДж/т). Более продуктивные микроводоросли (*C. vulgaris*) при культивировании их в цилиндрических ФБР с отделением биомассы центрифугированием приводят к максимальной энергоемкости поглощения углекислого газа – 104 кВт · ч/кг СО₂ (373 ГДж/т) при росте 0.70 г/дм³ в сутки по с.в. и круглосуточном освещении. При сокращении затрат путем отказа от искусственного освещения и отопления можно достичь значения этого показателя 11.7 кВт · ч/кг СО₂ (42 ГДж/т). Следовательно, необходимо включить в технологию выращивания биомассы МКВ узлы, обеспечивающие обогрев помещений низкопотенциальным теплом. В качестве такового можно использовать отходящее тепло энергостанций и станций на ископаемом топливе.

Сравнение с удельным расходом энергии на улавливание СО₂ показывает, что в настоящее время затраты на него составляют 3.34–9.79 ГДж/т при использовании химических абсорбентов, 4.34 – при мембранный очистке и 5.22 – при осаждении СО₂ в ультразвуковом потоке [10]. В [38] сообщается, что при комбинировании мембранных и криогенных технологий возможно сократить удельные энергозатраты до 1.4 ГДж/т СО₂ при суммарной степени улавливания СО₂ около 89%. Таким образом, необходима дальнейшая оптимизация технологии улавливания диоксида углерода из дымовых газов и окружающего воздуха микроводорослями путем применения сбросного тепла, естественного солнечного освещения, а также энергии от возобновляемых источников, в том числе энергии самих МКВ.

ВЫВОДЫ

- Современный уровень исследований в области технологий культивирования микроводорослей позволяет реализовать многие из них для улавливания углекислого газа с попутным производством ценных энергетических и неэнергетических продуктов из биомассы (биотопливо, биологически активные кормовые и пищевые добавки и др.).

2. Эффективность улавливания CO_2 микроводорослями определяется комплексом факторов: продуктивностью (скоростью роста) микроводорослей, способами выращивания (открытые культиваторы, закрытые фотобиореакторы), методом сбора урожая (гравитационный сбор на си-тах, центрифугирование и др.).

3. Диапазон удельных затрат энергии на улавливание CO_2 микроводорослями довольно широк: от 26 до 770 ГДж/т при культивировании микроводорослей *A. platensis* в плоских открытых культиваторах с различной степенью использования дополнительной энергии, от 42 до 373 ГДж/т при выращивании микроводорослей *C. vulgaris* в закрытых фотобиореакторах.

4. Сократить удельные затраты энергии на поглощение CO_2 микроводорослями можно путем повышения и поддержания высокой скорости их роста в процессе культивирования, максимального использования солнечного света и сбросного тепла объектов теплоэнергетики или иных отраслей промышленности, применения минимально энергозатратных методов отделения биомассы от культуральной жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Carbon** capture and storage as a strategic reserve against China's CO_2 emissions / C. Xu, J. Yang, L. He, W. Wei, Y. Yang, X. Yin, W. Yang, A. Lin // Environ. Dev. 2021. V. 37. P. 100608.
<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100608>
2. **Филиппов С.П., Жданеев О.В.** Возможности использования технологий улавливания и захоронения диоксида углерода при декарбонизации мировой экономики (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 9. С. 5–21.
<https://doi.org/10.56304/S0040363622090016>
3. **Carbon** footprint reduction and climate change mitigation: A review of the approaches, technologies, and implementation challenges / N.V. Lobsu, M.A. Knyazeva, A.F. Popova, M.S. Kulikovskiy // J. Carbon Res. 2023. V. 9. P. 120.
<https://doi.org/10.3390/c9040120>
4. **Carbon** capture, utilization, and storage (CCUS). Technology innovation to accelerate broad deployment in Alberta / J. Zhou, D. Van Den Assem, R. Chalaturnyk, G. Meikle, M. Gray, S. Dar, B. Wagg, B. Drozdowski, H. Campbell // Alberta Innovates. 2022.
https://albertainnovates.ca/wp-content/uploads/2022/06/AI-CCUS-WHITE-PAPER_2022_WEB.pdf
5. **Developing** a consistent database for regional geologic CO_2 storage capacity worldwide / J. Kearns, G. Teletzke G., J. Palmer, H. Thomann, H. Kheshgi, Y.-H.H. Chen, S. Paltsev, H. Herzog // Energy Procedia. 2017. V. 114. P. 4697–4709.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1603>
6. **Michaelides E.E.** Thermodynamic analysis and power requirements of CO_2 capture, transportation, and storage in the ocean // Energy. 2021. V. 230. P. 120804.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120804>
7. **Gas-water-rock** interactions in Frio Formation following CO_2 injection: Implications for the storage of greenhouse gases in sedimentary basins / Y.K. Kharaka, D.R. Cole, S.D. Hovorka, W.D. Gunter, K.G. Knauss, B.M. Freifeld // Geology. 2006. V. 34. P. 577–580.
<https://doi.org/10.1130/G22357.1>
8. **Assuring** the integrity of offshore carbon dioxide storage / D.P. Connolly, J.M. Bull, A. Flohr, A. Schaap, D. Koopmans, J.C. Blackford, P.R. White, R.H. James, C. Pearce, A. Lichtschlag, E.P. Achterberg, D. de Beer, B. Roche, J. Li, K. Saw et al. // Renewable Sustainable Energy Rev. 2022. V. 166. P. 112670.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112670>
9. **A review** of optimization and decision-making models for the planning of CO_2 capture, utilization and storage (CCUS) systems / J.F.D. Tapia, J.-Y. Lee, R.E.H. Ooi, D.C.Y. Foo, R.R. Tan // Sustainable Prod. Consumption. 2018. V. 13. P. 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.10.001>
10. **Филиппов С.П.** Экономические характеристики технологий улавливания и захоронения диоксида углерода (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 10. С. 17–31.
<https://doi.org/10.56304/S0040363622100022>
11. **Чернова Н.И., Киселева С.В., Попель О.С.** Эффективность производства биодизеля из микроводорослей // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 14–21.
<https://doi.org/10.56304/S0040363622100022>
12. **Биомасса** как энергетический ресурс / Н.И. Чернова, Т.П. Коробкова, С.В. Киселева, С.И. Зайцев // Труды Кубан. гос. аграр. ун-та. 2009. Т. 4. № 19. С. 203–208.
13. **Эффективность** поглощения CO_2 микроводорослями *Arthospira platensis* из смеси, моделирующей дымовые газы / М.С. Власкин, С.В. Киселева, Н.И. Чернова, А.В. Григоренко, К.Г. Рындина, О.С. Попель, С. Я. Маланий, О.В. Славкина, Ф. де Фариас Навес, В. Кумар // Теплоэнергетика. 2023. № 5. С. 57–72.
<https://doi.org/10.56304/S0040363623050077>
14. **Hsueh H.T., Chu H., Yu S.T.** A batch study on the bio-fixation of carbon dioxide in the absorbed solution from a chemical wet scrubber by hot springs and marine algae // J. Chemosp. 2007. V. 66. P. 878–886.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.06.022>
15. **Barlow J., Sims R.C., Quinn J.C.** Techno-economic and life-cycle assessment of an attached growth algal biorefinery // Bioresour. Technol. 2016. V. 220. P. 360–368.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.091>
16. **Extraction** and conversion pathways for microalgae to biodiesel: A review focused on energy consumption / K. de Boer, N.R. Moheimani, M.A. Borowitzka,

- P.A. Bahri // *J. Appl. Phycol.* 2012. V. 24. P. 1681–1698. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9835-z>
17. **Production** of sustainable biofuels from microalgae with CO₂ bio-sequestration and life cycle assessment / S. Li, H. Chang, S. Zhang, S.-H. Ho // *Environ. Res.* 2023. V. 227. P. 115730. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115730>
18. **Чернова Н.И., Киселева С.В.** Ресурсный потенциал территории Узбекистана для культивирования микроводорослей энергетического назначения // Гелиотехника. 2022. Т. 58. № 2. С. 412–420.
19. **Чернова Н.И., Киселева С.В.** Современные технологии конверсии биомассы микроводорослей в различные виды биотоплива // Вестник МЭИ. 2022. № 4. С. 68–74. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-4-68-74>
20. **Integration** of microalgae cultivation with industrial waste remediation for biofuel and bioenergy production: opportunities and limitations / P.J. McGinn, K.E. Dickinson, S. Bhatti, J.C. Frigon, S.R. Guiot, S.J. O’Leary // *Photosynth. Res.* 2011. V. 109. Is. 1–3. P. 231–247. <https://doi.org/10.1007/s11120-011-9638-0>
21. **Alabi A.O., Tampier M., Bibeau E.** Microalgae technologies for biofuels/bioenergy production in British Columbia: current technology and barriers to implementation: Final Report to the British Columbia Innovation Council // *Seed Science*. 2009. Jan. 14.
22. **Moreira D., Pires J.C.** Atmospheric CO₂ capture by algae: negative carbon dioxide emission path // *Biore sour. Technol.* 2016. V. 215. P. 371–379. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.060>
23. **Laboratory** system for intensive cultivation of microalgae and cyanobacteria / D.A. Gabrielyan, M.A. Sinetova, A.K. Gabrielyan, L.A. Bobrovnikova, V.S. Bedbenov, A.Yu. Starikov, A.A. Zorina, B.V. Gabel, D.A. Los // *Russ. J. Plant Physiol.* 2023. V. 70. No. 2. P. 202–213. <https://doi.org/10.1134/S1021443722602737>
24. **Biochar-based** adsorbents for carbon dioxide capture: A critical review / P.D. Dissanayake, S. You, A.D. Igavithana, Y. Xia, A. Bhatnagar, S. Gupta, H.W. Kua, S. Kim, J.-H. Kwon, D.C.W. Tsang, Y.S. Ok // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2020. V. 119. P. 109582. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109582>
25. **Highly** efficient adsorption of dyes by biochar derived from pigments-extracted macroalgae pyrolyzed at different temperature / Yi-di Chen, Y.-C. Lin, S.-H. Ho, Y. Zhou, N.-Q. Ren // *Bioresource Technol.* 2018. V. 259. P. 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.094>
26. **Benemann J.** Open ponds and closed photobioreactors – comparative economics // 5th Annual World Congress on Industrial Biotechnology. Chicago, 30 Apr. 2008.
27. **Carbon** dioxide utilization using chlorella microalgae / N. Politaeva, I. Ilin, K. Velmozhina, P. Shinkevich // *Environ.* 2023. V. 10. Is. 7. P. 109. <https://doi.org/10.3390/environments10070109>
28. **Каталог** культур микроводорослей в коллекциях СССР. М.: ИФР РАН, 1991.
29. **The influence** of elevated CO₂ concentrations on the growth of various microalgae strains / E.A. Chunzhuk, A.V. Grigorenko, S.V. Kiseleva, N.I. Chernova, K.G. Ryndin, V. Kumar, M.S. Vlaskin // *Plants*. 2023. V. 12 Is. 13. P. 2470. <https://doi.org/10.3390/plants12132470>
30. **Утилизация** углекислого газа с учетом климатических особенностей региона / О.Р. Латыпов, А.Б. Лаптев, Ф.Б. Шевляков, И.А. Голубев, Н.О. Шапошников // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. № 2. С. 174–194. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2023-2-174-194>
31. **Spirulina platensis** culture with flue gas feeding as a cyanobacteria-based carbon sequestration option / S. Arata, C. Strazza, A. Lodi, A. Del Borghi // *Chem. Eng. Technol.* 2013. V. 36. No. 1. P. 91–97. <https://doi.org/10.1002/ceat.201100722>
32. **Impact** of CO₂ concentration and ambient conditions on microalgal growth and nutrient removal from wastewater by a photobioreactor / F. Almomani, A. Al Ketife, S. Judd, M. Shurair, R.R. Bhosale, H. Znad, M. Tawalbeh // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 662. P. 662–671. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.144>
33. **Микроводоросли** в качестве сырья для получения биотоплива / Н.И. Чернова, С.В. Киселева, Т.П. Коробкова, С.И. Зайцев // Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 9 (65). С. 68–74.
34. **Гнездова О.Е., Чугункова Е.С.** Энергообеспечение тепличных хозяйств с генерацией тепловой и электроэнергии и выработкой CO₂ // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019. Т. 2. Вып. 3. С. 141–151. <https://doi.org/10.32464/2618-8716-2019-2-3-141-151>
35. **Справочник** НДТ 2-2015. Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот. М.: Бюро НДТ, 2015.
36. **Biosequestration** of atmospheric CO₂ and flue gas-containing CO₂ by microalgae / W.Y. Cheah, P.L. Show, J. Chang-S., T.C. Ling, J.C. Juan // *Bioresour. Technol.* 2014. V. 184. P. 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.026>
37. **Zhao B., Su Y.** Process effect of microalgal-carbon dioxide fixation and biomass production: A review // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2014. V. 31. Is. 1. P. 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.054>
38. **Multi-objective** optimization of a hybrid vacuum swing adsorption and low-temperature post-combustion CO₂ capture / L.Y. Fong, C.J. Anderson, G. Xiao, P.A. Webley, A.F.A. Hoadley // *J. Cleaner Production*. 2016. V. 111. Part A. P. 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.033>

Carbon Dioxide Absorption by Microalgae: Analysis of Technologies and Energy Costs

S. V. Kiseleva^{a, b, *}, N. I. Chernova^{a, b}, M. S. Vlaskin^{a, c}, A. V. Grigorenko^a,
E. A. Chunzhuk^{a, b}, S. Ya. Malaniy^d, E. A. Bakumenko^d, and T. V. Rositskaya^d

^aJoint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

^bMoscow State University, Moscow, 119991 Russia

^cPeoples' Friendship University of Russia, Moscow, 117198 Russia

^dLukoil-Engineering, Moscow, 109028 Russia

*e-mail: k_sophia_v@mail.ru

Abstract—Reducing greenhouse gas emissions remains a topical issue in fundamental and applied scientific research, including in terms of analyzing developed and applied CO₂ capture technologies. The main focus is on methods of carbon dioxide burial in stable geological formations, absorption, filtration, etc. The absorption of carbon dioxide during photosynthesis is usually associated with terrestrial biota, although aquatic organisms have a higher productivity of photosynthesis. The use of microalgae as photosynthetic agents is determined mainly by their value for obtaining high-quality food and feed additives, pharmaceutical products, and biofuels, but it is important to consider their effectiveness in the associated absorption of CO₂. When producing products with a long carbon sequestration period, this method can be included in the list of effective carbon capture technologies. To estimate the specific energy costs for CO₂ absorption, proven cultivation methods were considered: open-plane cultivators (microalgae *Arthrospira platensis*, growth rate from 20 to 40 g/m² per day on dry matter) and cylindrical closed photobioreactors (microalgae *Chlorella vulgaris*, growth rate 0.7 g/dm³ per day in dry matter). Based on experimental results of microalgae cultivation under conditions of elevated CO₂ concentrations, it is shown that specific energy consumption is in the range from 27 to 768 GJ/t when cultivating *A. platensis* microalgae and from 59 to 373 GJ/t in microalgae cultivation of *C. vulgaris*. The greatest energy costs are required for heating and lighting microalgae plantations as well as for separating biomass from the culture liquid for microalgae with small cell sizes. Specific energy consumption can be reduced by maximizing the use of natural light and waste heat from industrial facilities and optimizing biomass collection systems.

Keywords: microalgae, cyanobacteria, cultivation, phytobioreactor, productivity, CO₂ capture, energy costs