

## Использование биомассы микроводорослей для улавливания CO<sub>2</sub> из дымовых газов и получения биодизеля (обзор)

© 2026. А. Н. Чусов, к. т. н., доцент, П. С. Шинкевич, инженер, Н. А. Политаева, д. т. н., профессор, К. А. Вельможина, инженер, А. М. Опарина, ассистент, Н. В. Зибарев, к. т. н., ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: annaoparina93@gmail.com

Значительное количество промышленных предприятий, в особенности энергетической отрасли, связаны с выбросами дымовых парниковых газов, в результате чего образуется большое количество углекислого газа (CO<sub>2</sub>). Утилизация CO<sub>2</sub>, содержащегося в дымовых газах, в особенности ТЭС и ТЭЦ, возможна при культивировании микроводорослей, поскольку эффективность биофиксации у них значительно выше, чем у высших растений. В статье приводится обзор и анализ мирового опыта использования микроводорослей для поглощения CO<sub>2</sub> с перспективой использования биомассы микроводорослей для получения биодизеля. Обосновывается неоспоримый потенциал применения микроводорослей в качестве перспективной технологии, способствующей значительному сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу с дымовыми газами промышленных предприятий. Липиды микроводорослей являются перспективным сырьём для производства биодизеля, применяемого в транспортном секторе. Однако реализация данной технологии требует комплексной оценки параметров культивирования, включая состав дымовых газов, температурные режимы и селекцию подходящих штаммов. Приведена экономическая оценка получения биодизеля из биомассы микроводорослей и показано, что целесообразно получать биодизельное топливо из биомассы при её культивировании в больших масштабах.

**Ключевые слова:** биомасса, микроводоросли, углекислый газ, биотопливо, биодизель.

## Using microalgae biomass to capture CO<sub>2</sub> from flue gases and produce biodiesel: a review

© 2026. A. N. Chusov ORCID: 0000-0002-1388-8649, P. S. Shinkevich ORCID: 0009-0002-3627-281X, N. A. Politaeva ORCID: 0000-0002-5914-6210, K. A. Velmozhina ORCID: 0000-0001-9623-057X, A. M. Oparina ORCID: 0000-0002-2043-1866, N. V. Zibarev ORCID: 0000-0002-8710-6304, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, Russia, 195251, e-mail: annaoparina93@gmail.com

A significant number of industrial enterprises, particularly in the energy sector, emit greenhouse gases, resulting in the formation of large quantities of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Capturing CO<sub>2</sub> contained in flue gases, particularly from thermal and combined heat and power plants, is possible for microalgae cultivation, as their biofixation efficiency is significantly higher than that of plants. Flue gases can serve as a source of CO<sub>2</sub> and nutrients for microalgae cultivation. Thus, modern technologies make it possible to convert polluting flue emissions into valuable products. Moreover, microalgae can be used as a basis for creating a range of useful substances, including biodiesel. Vegetable and animal oils are the source of biodiesel today, but these feedstocks cannot fully replace traditional diesel fuel due to the large land resources required for growing oilseeds. Biodiesel is considered a renewable fuel because it can be produced by converting oils. Microalgae convert carbon dioxide and, in some countries, are the only source of biodiesel fuel with the potential to completely replace fossil fuels. This article reviews and analyzes global experience using microalgae to absorb CO<sub>2</sub>, with potential for using microalgae biomass to produce biodiesel. The undeniable potential of microalgae as a promising technology for significantly reducing greenhouse gas emissions from industrial flue gases is substantiated. Microalgal lipids represent a promising feedstock for biodiesel production in the transportation sector. However, successful implementation of this technology requires comprehensive evaluation of cultivation parameters, including flue gas composition, temperature regimes, and selection of appropriate microalgal strains. An economic assessment of biodiesel production from microalgae biomass is presented, demonstrating the feasibility of producing biodiesel from biomass cultivated on a large scale.

**Keywords:** biomass, microalgae, carbon dioxide, biofuel, biodiesel.

Постоянный рост спроса на энергию в мире, а также негативное воздействие традиционных ископаемых источников энергии на окружающую среду стимулируют развитие возобновляемых источников энергии. Дымовые газы выделяются при сжигании угля на электростанциях и в основном состоят из  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  и водяного пара. В меньших концентрациях присутствуют  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ , а также частицы тяжёлых металлов и твёрдые вещества.

Эксперты, участвовавшие в 27-й Конференции Рамочной конвенции Организации Объединённых Наций об изменении климата в 2022 г., согласились с тем, что ущерб от климатических изменений при росте температуры на 1,5 градуса будет существенно меньше, чем при прогнозируемых 2 градусах. Для сдерживания потепления в пределах 1,5 градусов необходимо резко уменьшить выбросы парниковых газов в атмосферу. К 2030 г. их объём должен сократиться на 43 % относительно показателей 2019 г. В итоговом документе содержится призыв к активным действиям в этом направлении. При этом подчёркивается важность учёта технологических возможностей и национальных особенностей стран в контексте устойчивого развития и борьбы с бедностью. Особое внимание в документе уделяется необходимости постепенного отказа от угольной энергетики и неэффективных субсидий на ископаемое топливо.

Основным направлением работ в сфере менеджмента электростанций, работающих на угольном ископаемом топливе, в экономически развитых странах является снижение экологического воздействия дымовых газов. Данная тенденция прослеживается во многих передовых разработках, внедрение которых происходит на электростанциях. В числе таких технологий можно выделить, например, системы десульфурации дымовых газов, селективного каталитического и некаталитического восстановления [1] и др.

Технологии по улавливанию, хранению и использованию углерода (Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS)) представляют собой современное экологичное и энергоэффективное решение проблемы выбросов дымовых газов в атмосферу. В основном данные методы подразделяются по принципу их реализации на физико-химические, мембранные, термические, криогенные и биологические. Каждый из методов имеет ряд преимуществ и недостатков, определяемых стоимостью необходимого оборудования, затратами на восстановление фильтрационной системы, а

также задействованными площадями и территориями. Однако, именно биологическая фиксация  $\text{CO}_2$  наиболее привлекательна как для исследователей, так и для предпринимателей, благодаря возможности реализации замкнутой декарбонизированной системы с получением различных продуктов с добавленной стоимостью – биодизеля, биоводорода и т. д. [2–5]. При этом получаемое биотопливо является биоразлагаемым, возобновляемым и нетоксичным ресурсом. Наиболее распространённым способом производства биодизельного топлива является переэтерификация масел спиртом в присутствии катализатора с получением метиловых эфиров жирных кислот и глицерина [6]. Микроводоросли являются возобновляемым ресурсом, поэтому их использование в качестве источника биотоплива является особенно актуальным. Микроводоросли являются сырьём для производства масел с высоким содержанием липидов [7, 8], они характеризуются быстрыми темпами роста и способны расти даже в солёных водах.

Актуальность проведённого исследования обусловлена необходимостью снижения выбросов  $\text{CO}_2$  в промышленности и поиска эффективных методов его утилизации. Биологическая фиксация  $\text{CO}_2$  с использованием микроводорослей является перспективным решением, позволяющим одновременно сокращать выбросы и получать ценные продукты, включая биодизель. В отличие от традиционных методов улавливания  $\text{CO}_2$ , данный подход сочетает экологическую эффективность с возможностью коммерческого использования биомассы микроводорослей.

Проведённая в статье экономическая оценка подтверждает рентабельность технологии при её масштабировании. Таким образом, данное исследование вносит вклад в развитие низкоуглеродной экономики и возобновляемой энергетики, предлагая инновационные решения для промышленного сектора.

Цель данного исследования заключается в обзоре и анализе мирового опыта использования микроводорослей для поглощения  $\text{CO}_2$  с перспективой использования биомассы микроводорослей для получения биодизеля.

### Объекты и методы исследования

В рамках исследования проведён анализ наиболее значимых научных исследований современных российских и зарубежных учёных за последние двадцать пять лет по использованию микроводорослей для поглощения  $\text{CO}_2$

с перспективой переработки их биомассы в биодизель.

В этой статье приведён обобщённый анализ материалов научных статей, найденных в базах данных: Scopus, Google Scholar, eLIBRARY, а также в сети ResearchGate.

Поиск произведён путём использования таких поисковых запросов: биомасса + микроводоросли, углекислый газ + микроводоросли, улавливание CO<sub>2</sub> + микроводоросли, биодизель + микроводоросли, биотопливо + микроводоросли, biomass + microalgae, carbon dioxide + microalgae, CO<sub>2</sub> capture + microalgae, biodiesel + microalgae, biofuel + microalgae.

Ключевые публикации по анализируемой теме, представленные и изученные в данной работе, опубликованы в период с 2008-го по 2024 гг. Данный временной промежуток характеризуется наиболее активными исследованиями в области использования биомассы микроводорослей для улавливания CO<sub>2</sub> из дымовых газов и получения биодизеля.

### **Выращивание микроводорослей, их культивирование и производство биомассы**

На сегодняшний день биотопливо получают в твёрдом, жидком и газообразном виде из различных органических веществ. По происхождению выделяют первичное биотопливо (древесина, щепа, топливные брикеты) и вторичное биотопливо, которое подразделяют на три поколения:

– I поколение, получаемое из пищевого сырья (крахмал, сахар): биоэтанол, биодизель из зерновых культур, сахарного тростника, сахарной свёклы;

– II поколение, производимое из непищевого сырья (целлюлоза, лигноцеллюлоза): биоэтанол и биодизель из соломы, кукурузных початков, картофельной ботвы, древесных и тростниковых отходов;

– III поколение, синтезируемое из микроводорослей и макрофитов (мангровые растения, мискантус), а также из отходов животноводства и пищевой промышленности.

Первичное биотопливо используется в натуральном виде: это древесина для каминов, готовки или генерации электричества. Вторичное биотопливо (биоэтанол и биодизель) проходит специальную обработку и подходит для машин и промышленного применения. Развиваясь, технологии производства вторичного биотоплива прошли через три этапа. Каждое из них отличалось новыми методами переработ-

ки, видом сырья и уровнем технологического развития [9]. При этом технологии I поколения имели серьёзные недостатки с точки зрения экономики и влияния на окружающую среду. Основная проблема биотоплива нового поколения заключается в том, что по мере увеличения производственных мощностей растёт и его конкуренция с сельским хозяйством за пахотные земли, используемые для производства продуктов питания. Второе поколение биотоплива производится из древесины, богатой лигноцеллюлозной биомассой. В отличие от производства топлива I поколения, оно не конкурирует с производством продуктов питания. Для его получения используют различные растительные отходы: сельскохозяйственные отходы с полей (например, солому), обрезки от лесозаготовки и деревообработки (включая листья и древесную щепу), а также несъедобные части таких культур, как кукуруза и сахарный тростник [10]. Третье поколение биотоплива, основным ресурсом для получения которого является биомасса микроводорослей, является перспективной альтернативой своим предшественникам (I и II поколения биотоплива), обходящей недостатки их производства [9]. При этом выработка сырья для производства биодизеля (масел) микроводорослями значительно (в 15–300 раз) превосходит выработку масла сельскохозяйственными растениями, что определяет энергоэффективность данного процесса.

Для успешного внедрения биодизель должен быть конкурентоспособен по цене с традиционным дизельным топливом. Ключевым фактором стоимости биодизеля (60–75 %) является цена исходного сырья [11]. Производство биодизеля из микроводорослей имеет существенные экономические преимущества. Во-первых, не требуется больших площадей сельскохозяйственных земель, во-вторых, энергетическая продуктивность на 1 га значительно выше, чем у традиционных культур [12]. В природе микроводоросли растут, используя солнечный свет, поглощая CO<sub>2</sub> из воздуха и питательные вещества из воды. При искусственном выращивании важно создать и оптимизировать именно такие условия для максимального роста. Микроводоросли могут питаться фотоавтотрофно и гетеротрофно, что возможно только кратковременно при недостаточном освещении. Однако некоторые виды способны сочетать оба процесса в миксотрофном режиме, что делает их особенно перспективными для промышленного выращивания [13].

В работе [14] представлен обзор возможных типов метаболизма микроводорослей с детальным анализом физиологической пластичности микроводорослей в ответ на изменение внешних условий. Особое внимание уделяется способности различных штаммов микроводорослей реализовывать альтернативные метаболические пути – от строго фотоавтотрофного роста с использованием световой энергии и неорганического углерода до гетеротрофного метаболизма при наличии органических субстратов. Важно отметить, что многие исследованные виды (в частности, представители родов *Chlorella*, *Scenedesmus* и *Chlamydomonas*) демонстрируют выраженную метаболическую гибкость, позволяющую им эффективно переключаться между различными типами питания в зависимости от доступности света, концентрации  $\text{CO}_2$  и наличия органических соединений в культуральной среде. Эта адаптивная способность представляет практический интерес для промышленного культивирования, так как открывает возможности для оптимизации производственных процессов в меняющихся условиях.

В исследовании [15] проведён анализ кинетических и стехиометрических закономерностей энергетического и углеродного метаболизма микроводорослей при различных режимах культивирования. Авторы систематизировали экспериментальные данные по влиянию ключевых факторов на эффективность фотосинтетических процессов: интенсивность освещения (в диапазоне 50–2000 мкмоль/м<sup>2</sup>·с), концентрация  $\text{CO}_2$  (от 0,04 до 20 %), соотношение макро- и микроэлементов в питательной среде, а также наличие органических субстратов (глюкоза, ацетат). На основе полученных результатов предложены математические модели, описывающие взаимосвязь между параметрами роста, накоплением биомассы и потреблением углерода. Особенно значимым является установление оптимальных соотношений C:N:P для различных физиологических состояний клеток, что позволяет прогнозировать эффективность биоконверсии  $\text{CO}_2$  в биомассу. Полученные в работе [15] количественные зависимости имеют фундаментальное значение для проектирования промышленных фотобиореакторов и разработки стратегий управления условиями культивирования с целью максимизации продуктивности биомассы.

Комплексный анализ работ [14, 15] демонстрирует, что понимание метаболической гибкости микроводорослей в сочетании с

количественным описанием кинетических параметров их роста создаёт научную основу для разработки энергоэффективных и экономически выгодных технологий биоутилизации углерода. Это особенно актуально для решения задач снижения антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  и создания устойчивых систем производства возобновляемых источников энергии.

Как видно из таблицы 1, производство микроводорослей в открытых водоёмах зависит от местного климата и сложно поддаётся контролю. Кроме того, важным недостатком этой системы выращивания является загрязнение водоёмов, а также постоянное испарение воды при воздействии солнечного тепла. Высокие показатели продуктивности в открытых водоёмах достигаются со штаммами водорослей, устойчивыми к суровым условиям среды культивирования (*Dunaliella* sp., *Spirulina* sp. и *Chlorella* sp.).

Закрытые системы для культивирования биомассы превосходят свои открытые аналоги благодаря более точной системе контроля условий культивирования, влияющих на продуктивность биомассы [17], компактности, сниженным показателям потери и испарения воды, а также более высокой эффективности улавливания  $\text{CO}_2$ . Тем не менее, для контроля температуры выращивания требуются системы охлаждения и обогрева [16]. На основании литературных данных [18] проведён сравнительный анализ скорости роста и способности к фиксации  $\text{CO}_2$  биомассой различных микроводорослей (табл. 2).

Таким образом, микроводоросли могут являться перспективным сырьём для получения различных форм биотоплива (биогаз, керосин, этанол, биодизель, биоводород) благодаря их быстрым темпам роста, способности фиксировать парниковые газы и высокой скорости производства липидов [16]. Основными методами получения биотоплива из биомассы микроводорослей являются анаэробное сбраживание, пиролиз, газификация, каталитический крекинг, переэтерификация [19–22]. При этом предполагается, что биотопливо, полученное из микроводорослей, будет углеродно-нейтральным, поскольку углерод, выделяющийся при его сжигании, был ранее поглощён микроводорослями из дымовых газов в процессе культивирования, что обеспечивает замкнутый углеродный цикл [23].

Согласно литературным данным, количество липидов и полиненасыщенных жирных

Таблица 1 / Table 1

Сравнительный анализ показателей производства микроводорослей в открытых и закрытых биореакторах  
Comparative analysis of microalgae production indicators in open and closed bioreactors [16]

Показатель Indicator	Открытые системы Open systems	Закрытые системы (фотобиореакторы) Closed systems (photobioreactors)
Место размещения / Location	Важно / Important	Не принципиально Not critical
Соотношение площадь/объём Surface area/volume ratio	Низкое (5–10 м <sup>-1</sup> ) Low (5–10 m <sup>-1</sup> )	Высокое (20–200 м <sup>-1</sup> ) High (20–200 m <sup>-1</sup> )
Испарение / Evaporation	Значительное / Significant	Незначительное / Negligible
Потери воды / Water losses	Очень высокое / Very high	Низкое / Low
Потери CO <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> losses	Высокое / High	Низкое / Low
Температура культивирования водорослей / Algae cultivation temperature	Высокая вариативность High variability	Необходимо охлаждение Cooling required
Метеозависимость Weather dependency	Высокая / High	Низкая / Low
Управление технологическим процессом / Process control	Сложное / Complex	Простое / Simple
Эффективность сбора биомассы Harvesting efficiency	Низкая / Low	Высокая / High
Очистка / Cleaning	Отсутствует / Absent	Требуется / Required
Виды водорослей / Algae species	Ограничены / Limited	Вариабельны / Variable
Качество биомассы / Biomass quality	Вариабельно / Variable	Воспроизводимо Reproducible
Плотность биомассы Biomass density	Низкая / Low	Высокая / High
Эффективность сбора Collection efficiency	Низкая / Low	Высокая / High
Стоимость заготовки Harvesting cost	Высокая / High	Низкая / Low
Эффективность использования света Light use efficiency	Низкая / Low	Хорошая / Good
Наиболее затратные параметры Most costly parameters	Перемешивание культуры Culture mixing	Контроль кислорода и температуры / Oxygen and temperature control
Контроль загрязнения Contamination control	Затруднён / Difficult	Простой / Easy
Капиталовложения Capital investment	Незначительные / Low	Высокие / High
Продуктивность / Productivity	Низкая / Low	В 3–5 раз продуктивнее открытых систем 3–5 times more productive than open systems
Гидродинамическая нагрузка на водоросли Hydrodynamic stress on algae	Очень низкая / Very low	От низкой до высокой From low to high
Контроль газоперекачки Gas transfer control	Низкий / Low	Высокий / High

Таблица 2 / Table 2

Сравнительный анализ скорости роста и способности к фиксации CO<sub>2</sub> биомассой различных микроводорослей  
Comparative analysis of growth rate and CO<sub>2</sub> fixation capacity of different microalgae biomass [18]

Виды микроводорослей Microalgal species	Концентрация CO <sub>2</sub> в среде (%) или источник углерода / CO <sub>2</sub> concentration in medium (%) or carbon source	Удельные темпы роста (сутки) Specific growth rates (day <sup>-1</sup> )	Продуктивность биомассы (мг/л·сутки) Biomass productivity (mg/L·day)	Норма расхода CO <sub>2</sub> (мг/л·сутки) CO <sub>2</sub> consumption rate (mg/L·day)	Режим культивирования Cultivation mode	Тип фотобиореактора Photobioreactor type
<i>Anabaena</i> sp.	Воздух Air	–	–	1450	Непрерывный Continuous	Барботажная колонна / Bubble column
<i>Aphanothece microscopica</i>	15	–	770	1440	Пакетный Batch	Трубчатый Tubular
<i>A. microscopica</i>	15	–	1250	5435	Пакетный Batch	Барботажная колонна / Bubble column
<i>Botryococcus braunii</i>	–	0,5	900	1000	Пакетный Batch	–
<i>Chlorella emersonii</i>	Воздух / Air	0,38	41	77	Пакетный Batch	Трубчатый Tubular
<i>Chlorella kessleri</i>	6	0,27	87	164	Пакетный Batch	Трубчатый Tubular
<i>C. kessleri</i>	6	0,38	65	122	Пакетный Batch	Трубчатый Tubular
<i>Chlorella</i> sp.	2	0,492	171	857	Пакетный Batch	Барботажная колонна / Bubble column
<i>Chlorella</i> sp.	5	–	335	700,2	Пакетный Batch	Трубчатый Tubular
<i>Chlorella</i> sp.	10	0,252	381,8	717,8	Пакетный Batch	Воздушный лифт Air-lift
<i>Chlorella</i> sp.	10	0,11	610	1147	Полунепрерывный Semi-continuous	Воздушный лифт Air-lift
<i>Chlorella</i> sp.	10	–	940	1767	Пакетный Batch	Барботажная колонна / Bubble column
<i>Chlorella</i> sp.	20	5,76	700	1316	Пакетный Batch	Трубчатый Tubular
<i>Chlorella vulgaris</i>	0,09	–	150	3450 (макс / max)	Пакетный Batch	Мембранный Membrane
<i>C. vulgaris</i>	0,8–1,0	–	–	6240 (макс / max)	Пакетный Batch	Мембранный Membrane
<i>C. vulgaris</i>	10	–	273	612	Пакетный Batch	Барботажная колонна / Bubble column
<i>C. vulgaris</i>	Воздух / Air	0,4	40	75	Пакетный Batch	Трубчатый Tubular
<i>Chlorococcum littorale</i>	20	1,8	530	900	Пакетный Batch	–
<i>Euglena gracilis</i>	10	0,96	153	382	Пакетный Batch	Трубчатый Tubular

Виды микроводорослей Microalgal species	Концентрация CO <sub>2</sub> в среде (%) или источник углерода / CO <sub>2</sub> concentration in medium (%) or carbon source	Удельные темпы роста (сутки) Specific growth rates (day <sup>-1</sup> )	Продуктивность биомассы (мг/л·сутки) Biomass productivity (mg/L·day)	Норма расхода CO <sub>2</sub> (мг/л·сутки) CO <sub>2</sub> consumption rate (mg/L·day)	Режим культивирования Cultivation mode	Тип фотобиореактора Photobioreactor type
<i>Microcystis aeruginosa</i>	10	–	220	520,8	Пакетный Batch	Барботажная колонна / Bubble column
<i>Microcystis ichthyoblabe</i>	10	–	232	489,6	Пакетный Batch	Барботажная колонна / Bubble column
<i>Nannochloris</i> sp.	15	–	320	601	Пакетный Batch	–
<i>Nannochloropsis</i> sp.	15	–	270	508	Пакетный Batch	–
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	15	–	150	282	Пакетный Batch	–
<i>Scenedesmus obliquus</i>	6	0,26	85	160	Пакетный Batch	Трубчатый Tubular
<i>S. obliquus</i>	6	0,22	105	198	Пакетный Batch	Трубчатый Tubular
<i>S. obliquus</i>	10	1,19	292,5	549,9	Пакетный Batch	–
<i>S. obliquus</i>	12	0,22	140	263	Непрерывный Continuous	Трубчатый Tubular
<i>Scenedesmus</i> sp.	10	–	188	460,8	Пакетный Batch	Барботажная колонна / Bubble column
<i>Scenedesmus</i> sp.	10	–	217,5	408,9	Пакетный Batch	–
<i>Spirulina</i> sp.	6	0,44	200	376	Непрерывный Continuous	Трубчатый Tubular
<i>Spirulina</i> sp.	6	0,42	210	394	Пакетный Batch	Трубчатый Tubular
<i>Synechocystis aquatilis</i>	–	5,5	590	1500	Пакетный Batch	–

Примечание (здесь и в таблице 3): прочерк – нет данных.  
Note (here and Table 3): dash – no data.

кислот обратно пропорционально интенсивности света и температуре культивирования микроводорослей. Изучение влияния концентрации CO<sub>2</sub> на рост *C. kessleri*, показало, что при культивировании с низким содержанием CO<sub>2</sub> биомасса содержит высокое значение α-линолеата [23]. У мутантного вида *Chlamydomonas reinhardtii* высокое содержание полиненасыщенных жирных кислот было обнаружено в культурах с высокой concentra-

цией CO<sub>2</sub>. Реакция среды (pH) также может влиять на липидный обмен. Низкий уровень pH вызывает стресс у *Chlamydomonas* sp. и увеличивает общее содержание липидов по сравнению с более высокими значениями pH. Однако у *Chlorella* sp. щелочные значения pH приводили к накоплению триацилглицеридов [19].

В последние годы мировые исследования сосредоточены на оценке эффективности по-

глощения CO<sub>2</sub> микроводорослями и цианобактериями [24–29], поскольку они могут расти и поглощать CO<sub>2</sub> гораздо быстрее, чем наземные растения. Микроводоросли демонстрируют впечатляющую способность к поглощению CO<sub>2</sub>, превосходя в этом высшие растения в 10–50 раз. При этом они эффективно используют солнечный свет, достигая насыщения фотосинтеза при освещённости, составляющей около 30 % от полного солнечного излучения – то есть при интенсивности 1700–2000 мкмоль/м<sup>2</sup>·с<sup>1</sup> [30]. Эти микроорганизмы относительно просты в культивировании при стандартных условиях выращивания, поскольку для их роста необходимы только свет, CO<sub>2</sub>, минеральные соли (азот, фосфор, калий) и вода. Они способны быстро производить значительные объёмы липидов.

Биомасса микроводорослей и цианобактерий находит применение в четырёх основных направлениях: производство биотоплива, повышение эффективности улавливания углерода за счёт переработки дымовых газов, экономия энергии на очистных сооружениях, снижение выбросов CO<sub>2</sub> со сточными водами [29].

Микроводоросли могут поглощать CO<sub>2</sub> из трёх источников: атмосферного воздуха, выбросов промышленных предприятий, растворимых карбонатов (солей угольной кислоты).

Основной способ поглощения углерода микроводорослями – это захват атмосферного CO<sub>2</sub>, однако этот способ ограничен тем, что в атмосфере содержится всего около 360 ppm [13, 31, 32]. Значительно эффективнее оказывается улавливание CO<sub>2</sub> из промышленных дымовых газов. Электростанции, работающие

на ископаемом топливе, выбрасывают до 20 % CO<sub>2</sub>, что существенно повышает эффективность поглощения [33]. Способность микроводорослей фиксировать CO<sub>2</sub> напрямую связана со скоростью их роста и эффективностью использования света. При этом высокая температура снижает эффективность фотосинтеза, т. к. CO<sub>2</sub> хуже растворяется в тёплой воде [30, 34]. Использование промышленных дымовых газов имеет свои сложности: низкое давление газов, необходимость дополнительных энергозатрат для их подачи в систему, риск загрязнения системы пылью и тяжёлыми металлами [29].

Промышленные дымовые газы включают 10–20 % CO<sub>2</sub> [28], а также небольшие примеси SO<sub>x</sub> и NO<sub>x</sub>. В таблице 3 проведён сравнительный анализ характеристик роста и эффективности фиксации CO<sub>2</sub> биомассой микроводорослей при различных концентрациях CO<sub>2</sub>, температуре и содержании NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> [28].

Ограничителем роста микроводорослей, как и других фотосинтетиков, прежде всего является свет, который определяет их продуктивность [28]. По этой причине требуется повышение эффективности использования света, которая обычно зависит от увеличения площади поверхности и сокращения светового пути и толщины слоя культуры микроводорослей [30]. Кроме того, виды, показывающие высокие темпы роста в естественном цикле дня и ночи, подходят для крупномасштабных систем выращивания на открытом воздухе, а штаммы, которые также могут непосредственно использовать CO<sub>2</sub> из дымовых газов электростанций, являются наиболее предпочтительными [28, 35].

Таблица 3 / Table 3

Сравнительный анализ характеристик роста и эффективности фиксации CO<sub>2</sub> биомассой микроводорослей при различных концентрациях CO<sub>2</sub>, температуре и содержании NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>  
Comparative analysis of growth characteristics and CO<sub>2</sub> fixation efficiency of microalgae biomass at different CO<sub>2</sub> concentrations, temperatures and NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> content [28]

Вид микроводорослей Microalgal Species	CO <sub>2</sub> (%)	Температура Temperature (°C)	NO <sub>x</sub> / SO <sub>x</sub> (мг/л / mg/L)	Продуктивность биомассы (мг/л·сутки) Biomass Productivity (mg/L·day)	CO <sub>2</sub> потребление (мг/л·сутки) / CO <sub>2</sub> uptake (mg/L·day)
<i>Nannochloris</i> sp.	15	25	0/50	350	658
<i>Nannochloropsis</i> sp.	15	25	0/50	300	564
<i>Chlorella</i> sp.	50	35	60/20	950	1790
<i>Chlorella</i> sp.	20	40	–	700	1316
<i>Chlorella</i> sp.	50	25	–	386	725
<i>Chlorella</i> sp.	15	25	0/60	1000	1880
<i>Chlorella</i> sp.	50	25	–	500	940
<i>Chlorogleopsis</i> sp.	5	50	–	40	20,45
<i>Chlorococcum littorale</i>	50	22	–	44	82

Одним из ключевых способов снижения ресурсо- и энергоёмкости производства биотоплива из микроводорослей является культивирование биомассы в морской воде или на сточных водах. Также в различных научных исследованиях и экспериментальной практике в области биотехнологии и производства биотоплива предлагаются следующие подходы:

1) получение этанола из углеводной (крахмалсодержащей) фракции биомассы микроводорослей после экстракции липидов;

2) использование глицерина – побочного продукта производства биодизеля, и остаточной биомассы микроводорослей;

3) рециркуляция воды после сбора биомассы;

4) предварительная обработка с применением ферментов, направленная на разрушение клеточной стенки, для повышения степени извлечения липидов;

5) корректировка pH с помощью биологических флокулянтов, например, на основе экстрактов семян проса, хлопка или других растений;

6) использование солнечного тепла для сушки биомассы в регионах с высоким уровнем солнечной радиации или как вспомогательный метод.

В работе [36] приведён экономический анализ затрат на производство микроводорослей и фиксацию CO<sub>2</sub>. В ходе анализа рассматривался пруд с каналом параметрами 0,2 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> и непрерывной работой с потребляемой мощностью на смешивание 2 Вт/м<sup>3</sup>. Также предполагалось расходовать энергию на сбор микроводорослей в размере 0,1 кВт/м<sup>3</sup>. В анализе рассматривалось шесть сценариев от пессимистичного до оптимистичного. Пессимистичный включал затраты на сырьё (CO<sub>2</sub>, воду и удобрения), а неоптимизированный процесс требовал 4 кг CO<sub>2</sub>/кг с выходом 20 г/м<sup>2</sup> биомассы в день. Оптимистичный сценарий исключал затраты на сырьё за счёт утилизации дымовых газов и сточных вод, при этом потреблял 2 кг CO<sub>2</sub>/кг биомассы и имел максимальный теоретический выход 60 г/м<sup>2</sup> в сутки. Итоговые производственные затраты составили: 0,86 евро/кг при пессимистичном сценарии, и 0,14 евро/кг – при оптимистичном. Затраты на фиксацию CO<sub>2</sub> в последнем сценарии составили половину от общей стоимости (0,07 евро/кг), при этом фиксация CO<sub>2</sub> не является самым дорогостоящим процессом в культивировании водорослей [18].

Производство биодизельного топлива из водорослей требует широкомасштабной

системы выращивания и сбора биомассы, что на данном этапе развития технологий связано с необходимостью снижения затрат на единицу площади. Однако при этом перспективы масштабирования и дальнейшего снижения себестоимости остаются высокими, особенно при совершенствовании технологий культивирования, сбора и переработки биомассы. В частности, сбор биомассы составляет 20–30 % от общей стоимости её производства, главным образом из-за высоких энергетических затрат на обезвоживание. Тем не менее, данный этап представляет собой значительный потенциал для оптимизации, и его совершенствование может существенно снизить общие затраты. Поэтому на этом направлении особенно актуальны дальнейшие научные исследования и технологические улучшения, направленные на повышение энергоэффективности и снижение себестоимости. В статье [37] представлены результаты энергетической и декарбонизационной оценки биомассы микроводорослей при производстве биодизеля. Как показано в работе [18], использование площади культивирования микроводорослей в 1000 м<sup>2</sup> при скорости роста 30 г/м<sup>2</sup>/сут, содержании липидов до 30 % и эффективности процессов сбора, экстракции и переэтерификации 90 % обеспечивает ежегодное получение 11 т биомассы, 3300 кг биодизеля и фиксацию 7 т CO<sub>2</sub>. Таким образом, средняя производительность биотоплива составляет 3,3 кг/м<sup>2</sup>/год, а соответствующая нетто-фиксация CO<sub>2</sub> – 7 кг/м<sup>2</sup>/год.

Будучи экологически чистым топливом, биодизель, получаемый из растительных масел и животных жиров, идеально вписывается в стратегию развития возобновляемой энергетики и всё чаще интегрируется в национальные энергетические стратегии. По данным BCC Research, ожидается, что мировой рынок биодизеля вырастет с \$ 43,1 млрд в 2023 г. до \$ 51,6 млрд к концу 2028 г. при совокупном годовом темпе роста 3,7 % с 2023 по 2028 гг.

В Российской Федерации компания ПАО «ЛУКОЙЛ» ведёт разработки технологий утилизации CO<sub>2</sub> с применением микроводорослей и последующей переработкой биомассы в компоненты биотоплива на территории России. При этом ПАО «ЛУКОЙЛ» рассматривает возможности масштабирования производства низкоуглеродного топлива. Сейчас проект находится на стадии научно-исследовательских работ. Чтобы не платить штрафы за выбросы парниковых газов, у компаний появляется возможность – продажа или покупка угле-

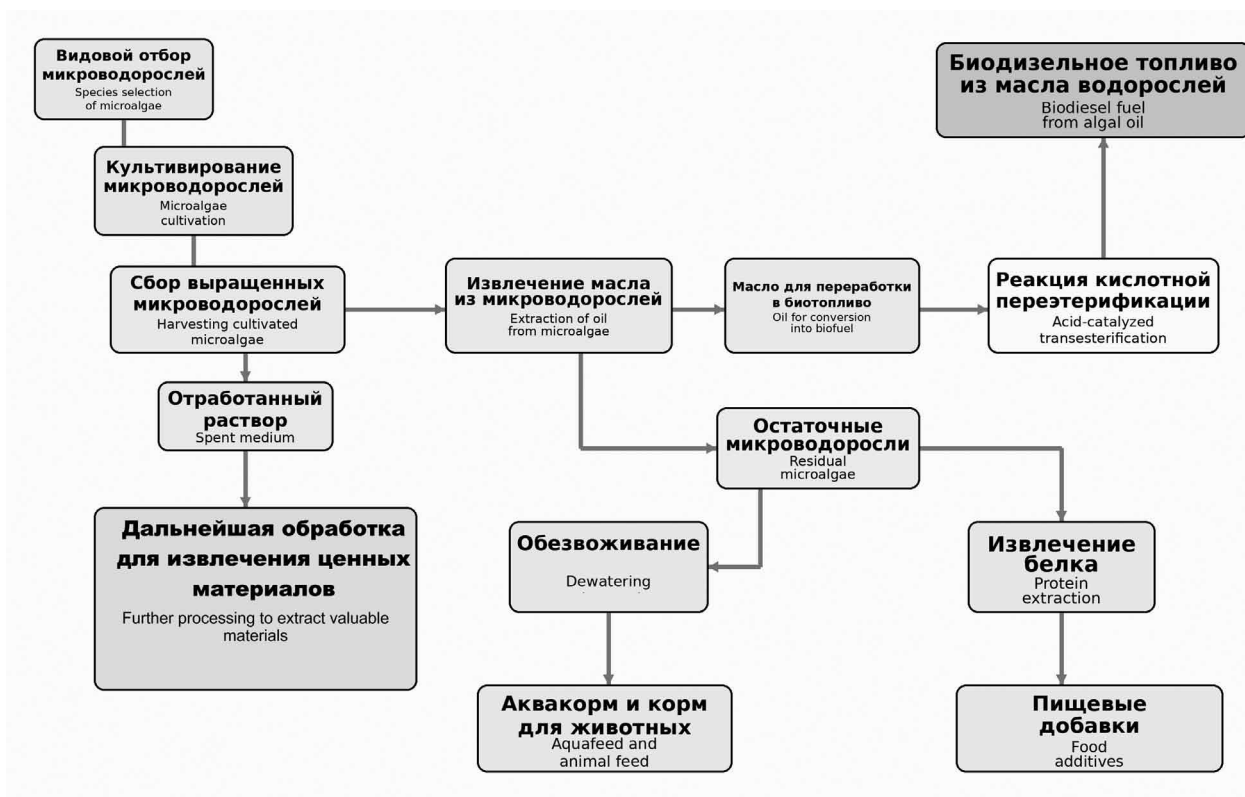


Рис. Технологическая схема производства биодизеля из *Chlorella vulgaris*  
 Fig. Technological scheme of biodiesel production from *Chlorella vulgaris*

родных кредитов [38]. Проведены и анонсированы результаты разработки технологии улавливания и переработки CO<sub>2</sub> из дымовых газов с помощью микроводоросли *Chlorella*. Выделение 1 т/час CO<sub>2</sub> (24 т/сутки) компенсируется водоёмом площадью 2,3–9,0 га в зависимости от климатической зоны, а из полученной биомассы возможно получение биодизеля. На рисунке показана технологическая схема производства биодизеля из *Chlorella vulgaris*.

В таблице 4 представлена сравнительная оценка рентабельности установки по производству биодизеля из масла *C. vulgaris* в зависимости от производительности [36].

Таким образом, результаты из таблицы 4 показывают, что проект, который производит 1 т биодизельного топлива в день, является экономически жизнеспособным (за исключением варианта 1, где возникают убытки). Если мощность завода увеличивается, прибыль в один день также будет увеличиваться, даже если цена на биодизельное топливо остаётся на низком уровне в 45 рублей/т. Плантации микроводорослей *C. vulgaris* используются в системах биологической очистки сточных вод (альгофилтрации), где они одновременно очищают воду и накапливают биомассу для производства биодизеля.

Биодизельное топливо, полученное из липидов биомассы микроводорослей р. *Chlorella*, считается экономически целесообразным при культивировании водорослей в больших масштабах. Во многих странах, где существуют плантации микроводорослей, добываемое масло из них более экономично в использовании по сравнению с биодизельным топливом. В то же время при использовании микроводорослей *C. vulgaris* для очистки дымовых газов в гидрофильтрах целесообразно использованную биомассу отправлять на дальнейшую переработку, когда производимое масло может быть получено в больших количествах.

### Заключение

Проведённый обзор публикаций (2008–2024 гг.) показывает, что использование микроводорослей для биологической фиксации CO<sub>2</sub> из дымовых газов в контексте технологий улавливания, использования и хранения углерода представляет собой перспективное направление, позволяющее одновременно снижать антропогенную нагрузку и формировать поток биомассы микроводорослей как сырья для получения биотоплива. Данные обзора подтверждают, что применение дымовых

Таблица 4 / Table 4

Оценка рентабельности установки по производству биодизеля из масла *Chlorella vulgaris*  
 Profitability assessment of a biodiesel production plant from *Chlorella vulgaris* oil [36]

Процесс / Process	Единица измерения Unit of measurement	Ориентировочная стоимость, без НДС, руб. Approximate cost, excluding VAT, rub.		
		Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2	Вариант 3 Option 3
Масло <i>C. vulgaris</i> <i>C. vulgaris</i> oil	литр / liter	100	80	60
Метанол / Methanol	литр / liter	20	22	25
Затраты на производство Production costs	неделя / week	8000	8000	35000
Аренда / Rent	месяц / month	5000	5000	5000
Страховка Insurance	год / year	100000	100000	100000
Процентная ставка Interest rate	%	12	12	12
Биодизельная установка Biodiesel plant	тонна / ton	1500000	1500000	1500000
Катализатор Catalyst	за литр / per liter	1,0	1,0	1,0
Налог на биодизель Biodiesel tax	за литр / per liter	9,18	9,18	9,18
НДС / VAT	%	20	20	20
Вода / Water	за литр / per liter	1,0	1,0	1,0
Электроэнергия Electricity	за кВт/час / per kWh	6,5	6,5	6,5
Накладные расходы Overhead costs	за год / per year	500000	500000	500000
Накладные расходы Overhead costs	за литр биодизеля per liter of biodiesel	2,5	2,5	2,5
Затраты на производство Production costs	за литр биодизеля per liter of biodiesel	2,0	1,8	5,4
Затраты на воду Water costs	за литр биодизеля per liter of biodiesel	1,5	1,5	1,0
Затраты на электроэнергию Electricity costs	за литр биодизеля per liter of biodiesel	1,5	1,5	0,9
Предполагаемая стоимость биодизеля Estimated cost of biodiesel	за литр / per liter	184	50	45

газов как источника CO<sub>2</sub> повышает потенциал поглощения данного газа по сравнению с поглощением атмосферного CO<sub>2</sub>, а быстрорастущая биомасса микроводорослей, способная накапливать липиды, может рассматриваться как ресурс для производства биодизельного топлива.

Анализ мирового опыта показывает, что результативность данного подхода опреде-

ляется параметрами культивирования (концентрация подаваемого CO<sub>2</sub>, освещённость, температурный режим и поддержание условий, предотвращающих стресс и снижение эффективности фотосинтеза), а также устойчивостью выбранных штаммов в реальных газо- и гидрохимических условиях.

Получение биодизельного топлива из микроводорослей технологически реали-

зуюмо при формировании устойчивой производственной цепочки. Однако технико-экономическая реализуемость в существенной степени лимитируется энергоёмкостью стадий сбора и обезвоживания, которые выступают ключевым резервом оптимизации при масштабировании.

Таким образом, обобщённые результаты обзора подтверждают высокий потенциал микроводорослей как элемента низкоуглеродных ресурсосберегающих технологий, переводящих CO<sub>2</sub> из состава дымовых выбросов в биомассу и продукты с добавленной стоимостью, включая биодизельное топливо. Практическая реализация таких технологий требует комплексного инженерного проектирования систем культивирования и газожидкостного контакта с акцентом на управляемость условий процесса и оптимизацию наиболее ресурсозатратных стадий. Именно масштабирование и технологическое совершенствование являются ключевыми условиями достижения экологического и экономического эффекта.

*Работы выполнялись при поддержке РНФ № 24-17-20004 от 12.04.2024 по теме: «Разработка технологий улавливания CO<sub>2</sub> из отработанных дымовых газов энергетических и промышленных установок биомассой микроводорослей».*

## References

- Zhang X. Microalgae removal of CO<sub>2</sub> from flue gas. London: IEA Clean Coal Centre, 2015. 95 p. doi: 10.13140/RG.2.2.26617.77929
- Volkova M.V., Klimov K.K., Lyubomudrov B.E., Sarapulova A.S., Velkin V.I. Development of the concept of environmentally friendly CHP and TPP with active use of photosynthetic processes // *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2020. No. 25–27. P. 184–192 (in Russian). doi: 10.15518/isjaee.2020.09.017
- Shinkevic P.S., Velmozhina K.A., Politaeva N.A., Chusov A.N. Development of a technological scheme for carbon dioxide utilization and biohydrogen production using microalgae // *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2024. No. 10. P. 154–166 (in Russian). doi: 10.15518/isjaee.2024.10.154-166
- Velmozhina K.A., Shinkevich P.S., Politaeva N.A., Mikheev P.Yu. Development of a technological scheme for the utilization of carbon dioxide and the production of biohydrogen using microalgae // *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2024. No. 5. P. 24–29 (in Russian). doi: 10.15518/isjaee.2024.05.024-029
- Shinkevich P.S., Velmozhina K.A., Zibarev N.V., Politaeva N.A., Oparina A.M. Economic justification for the use of microalgae to reduce the impact of carbon dioxide // *Aktualnaja biotehnologija*. 2024. No. 2. P. 19–22 (in Russian). doi: 10.20914/2304-4691-2024-2-19-22
- Zibarev N.V., Politaeva N.A., Molodkina L.M. Production of biodiesel from microalgae by transesterification of biomass // *Butlerov Communications*. 2023. V. 73. No. 1. P. 101–108 (in Russian). doi: 10.37952/ROI-jbc-01/23-73-1-101
- Lukyanov V.A., Gorbunova S.Yu., Gribovskaya I.V. Comparative evaluation of biochemical composition of microalgae biomass *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 1. P. 216–221 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-216-221
- Nigam P.S., Singh A. Production of liquid biofuels from renewable resources // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2011. V. 37. No. 1. P. 52–68. doi: 10.1016/j.pecs.2010.01.003
- Carels N. The challenge of bioenergies: an overview // *Biofuel's Engineering Process Technology* / Ed. M.A. dos Santos Bernardes. IntechOpen, 2011. P. 23–64. doi: 10.5772/16403
- Khan M.I., Shin J.H., Kim J.D. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products // *Microb. Cell Fact.* 2018. V. 17. No. 1. Article No. 36. doi: 10.1186/s12934-018-0879-x
- Lardon L., Hélias A., Sialve B., Steyer J.-P., Bernard O. Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae // *Environ. Sci. Technol.* 2009. V. 43. No. 17. Article No. 6475–6481. doi: 10.1021/es900705j
- Demirbas M.F. Biofuels from algae for sustainable development // *Applied Energy*. 2011. V. 88. No. 10. P. 3473–3480. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.01.059
- Brennan L., Owende P. Biofuels from microalgae – a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. V. 14. No. 2. P. 557–577. doi: 10.1016/J.RSER.2009.10.009
- Mata T.M., Martins A.A., Caetano N.S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. V. 14. No. 1. P. 217–232. doi: 10.1016/j.rser.2009.07.020
- Chojnacka K., Marquez-Rocha F.-J. Kinetic and stoichiometric relationships of the energy and carbon metabolism in the culture of microalgae // *Biotechnology*. 2004. V. 3. No. 1. P. 21–34. doi: 10.3923/biotech.2004.21.34
- Pires J.C.M., Alvim-Ferraz M.C.M., Martins F.G., Simões M. Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: engineering aspects and biorefinery concept // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. V. 16. No. 5. P. 3043–3053. doi: 10.1016/j.rser.2012.02.055
- Sajjadi B., Chen W.-Y., Raman A.A., Ibrahim S. Microalgae lipid and biomass for bio fuel production: a comprehensive review on lipid enhancement strategies and their effects on fatty acid composition // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. V. 97. P. 200–232. doi: 10.1016/j.rser.2018.07.050

18. Cuellar-Bermudez S.P., Garcia-Perez J.S., Ritmann B.E., Parra-Saldivar R. Photosynthetic bioenergy utilizing CO<sub>2</sub>: an approach on flue gases utilization for third generation biofuels // *Journal of Cleaner Production*. 2015. V. 98. P. 53–65. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.03.034
19. Lavenburg V.M., Rosentrater K.A., Jung S. Extraction methods of oils and phytochemicals from seeds and their environmental and economic impacts // *Processes*. 2021. V. 9. Article No. 1839. doi: 10.3390/pr9101839
20. Politaeva N.A., Zibarev N.V., Ilyin I.V. Method for producing of biodiesel fuel from microalgae *Chlorella kessleri* // Patent RU 2819912 C1. Application: 2023115627, 15.06.2023. Publication date: 28.05.2024 (in Russian).
21. Politaeva N.A., Maslikov V.I., Chusov A.N., Zhazhkov V.V., Velmozhina K.A., Shinkievich P.S. Method of increasing biogas potential of organics wastes // Patent RU 2826145 C1. Application: 2023115629, 15.06.2023. Date of publication: 04.09.2024 (in Russian).
22. Zibarev N.V., Politaeva N.A., Oparina A.M. Re-esterification of microalgae biomass for the production of biodiesel fuel // *Rational use of natural resources and processing of technogenic raw materials: fundamental problems of science, materials science, chemistry, and biotechnology*. Collection of reports of the International Scientific Conference, Alushta-Belgorod, June 05–09, 2023. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2023. P. 290–294 (in Russian).
23. Alam F., Date A., Rasjidin R., Mobin S., Moria H., Baqui A. Biofuel from algae – is it a viable alternative? // *Procedia Engineering*. 2012. V. 49. P. 221–227. doi: 10.1016/j.proeng.2012.10.131
24. Yang H., Xu Z., Fan M., Gupta R., Slimane R.B., Bland A.E., Wright I. Progress in carbon dioxide separation and capture: a review // *J. Environ. Sci. (China)*. 2008. V. 20. No. 1. P. 14–27. doi: 10.1016/S1001-0742(08)60002-9
25. Yang J., Xu M., Zhang X., Hu Q., Sommerfeld M., Chen Y. Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: water footprint and nutrients balance // *Bioresour. Technol.* 2011. V. 102. No. 1. P. 159–165. doi: 10.1016/j.biortech.2010.07.017
26. Patil P.D., Dandamudi K.P.R., Wang J., Deng Q., Deng S. Extraction of bio-oils from algae with super critical carbon dioxide and co-solvents // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018. V. 135. P. 60–68. doi: 10.1016/j.supflu.2017.12.019
27. Kuo C.-M., Sun Y.-L., Lin C.-H., Lin C.-H., Wu H.-T., Lin C.-S. Cultivation and biorefinery of microalgae (*Chlorella* sp.) for producing biofuels and other byproducts: a review // *Sustainability*. 2021. V. 13 (23). Article No. 13480. doi: 10.3390/su132313480
28. Ho S.-H., Chen C.-Y., Lee D.-J., Chang J.-S. Perspectives on microalgal CO<sub>2</sub> – emission mitigation systems: a review // *Biotechnol. Adv.* 2011. V. 29. No. 2. P. 189–198. doi: 10.1016/j.biotechadv.2010.11.001
29. Acién Fernández F.G., González-López C.V., Fernández Sevilla J.M., Molina Grima E. Conversion of CO<sub>2</sub> into biomass by microalgae: how realistic a contribution may it be to significant CO<sub>2</sub> removal? // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2012. V. 96. P. 577–586. doi: 10.1007/s00253-012-4362-z
30. Pulz O. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2001. V. 57. No. 3. P. 287–293. doi: 10.1007/s002530100702
31. Moe T. Carbon dioxide sequestering using microalgal systems. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2002. 32 p. doi: 10.2172/882000
32. Wang B., Li Y., Wu N., Lan C.Q. CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2008. V. 79. No. 5. P. 707–718. doi: 10.1007/s00253-008-1518-y
33. Bilanovic D., Andargatchew A., Kroeger T.J., Shellef G. Freshwater and marine microalgae sequestering of CO<sub>2</sub> at different C and N concentrations – response surface methodology analysis // *Energy Conversion and Management*. 2009. V. 50. No. 2. P. 262–267. doi: 10.1016/j.enconman.2008.09.024
34. Jin X., Gong S., Chen Z., Xia J., Xiang W. Potential microalgal strains for converting flue gas CO<sub>2</sub> into biomass // *J. Appl. Phycol.* 2021. V. 33. P. 47–55. doi: 10.1007/s10811-020-02147-8
35. Maeda K., Owada M., Kimura N., Omata K., Karube I. CO<sub>2</sub> fixation from the flue gas on coal-fired thermal power plant by microalgae // *Energy Convers. Manag.* 1995. V. 36. No. 6–9. P. 717–720. doi: 10.1016/0196-8904(95)00105-m
36. Acién F.G., Fernández J.M., Magán J.J., Molina E. Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it // *Biotechnol. Adv.* 2012. V. 30. No. 6. P. 1344–1353. doi: 10.1016/j.biotechadv.2012.02.005
37. Zeng X., Danquah M.K., Chen X.D., Lu Y. Microalgae bioengineering: from CO<sub>2</sub> fixation to biofuel production // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. V. 15. No. 6. P. 3252–3260. doi: 10.1016/j.rser.2011.04.014
38. LUKOIL is working on technologies for the utilization of carbon dioxide and the production of low-carbon fuel [Internet resource] <https://neftegaz.ru/news/ecology/813915-lukoil-rabotaet-nad-tekhnologiyami-utilizatsii-uglerodnogo-gaza-i-proizvodstva-nizkouglerodnogo-topl/?ysclid=m3fslswxic266387888> (Accessed: 13.11.2024).