Поступила в редакцию 15.10.2026 г. *Принята к публикации 09.11.2026 г.*

EDN: JRXQNJ УДК 546.264-31:581.526.325:622.3

Шинкевич П.С., Вельможина К.А., Политаева Н.А., Масалова М.А., Меткин Д.М., Медведева Л.В.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (ВШГиЭС ИСИ), Санкт-Петербург, Россия, ps.shinkevich@gmail, anizhomlev@mail.ru, politaevana1971@gmail.com, mer.masalova@gmail.com, metkin_dm@spbstu.ru, medvedeva_lv@spbstu.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ СНИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ВЫБРОСОВ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ НА ОСНОВЕ БИОФИКСАЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ МИКРОВОДОРОСЛЯМИ

Рассмотрена возможность использования микроводорослей Chlorella kessleri для биофиксации диоксида углерода из дымовых газов с последующей интеграцией технологии в инфраструктуру объектов нефтегазовой отрасли. Исследовано влияние условий культивирования и источника неорганического углерода на поглощение диоксида углерода и формирование биомассы микроводорослей. Определены возможные направления ресурсного использования получаемой биомассы. Предложена модульная схема интеграции фотобиореактора с регулируемым отбором части дымового потока от локальных энергетических установок нефтегазового предприятия, подготовкой газа и возвратом обработанного потока в основной газоход. Расчетная экономическая оценка показала возможность снижения себестоимости жидкой суспензии в лабораторном варианте при увеличении масштаба производства. Определены основные направления снижения производственных затрат и повышения конкурентоспособности конечной продукции, включая снижение стоимости культивирования за счет выбора наиболее экономичного способа (открытые фотобиореакторы), использования доступных компонентов для создания питательное среды, механизация и автоматизация определенных процессов, увеличение объемов производства, использования более эффективных сушильных установок.

***Ключевые слова**: углеродные выбросы в нефтегазовой отрасли, биофиксация диоксида углерода из дымовых газов, фотобиореактор, микроводоросли Chlorella kessleri, ресурсное использование биомассы микроводорослей.*

Для цитирования: Шинкевич П.С., Вельможина К.А., Политаева Н.А., Масалова М.А., Меткин Д.М., Медведева Л.В. Перспективы снижения углеродных выбросов в нефтегазовой отрасли на основе биофиксации дымовых газов микроводорослями // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2026. - Т.21. - №4. - https://www.ngtp.ru/rub/2026/27_2026.html EDN: JRXQNJ

Введение

Экологическая модернизация нефтегазовой отрасли требует одновременного решения нескольких важных задач, а именно уменьшать воздействие производственных процессов на атмосферу и рационально использовать образующиеся материальные и энергетические потоки. Одним из таких направлений является культивирование микроводорослей с подачей углеродсодержащих газовых смесей [Faruque et al., 2021]. В отличие от обычного производства биомассы на покупном углекислом газе, промышленная интеграция предполагает использование CO_2, который в ином случае поступил бы в атмосферу с дымовыми газами. Однако для определения результативности процесса биофиксации CO_2 из

дымовых газов микроводорослями необходим учет энергии, воды, питательных веществ и прочих составляющих каждого из этапов одновременного культивирования биомассы и поглощения углекислого газа [Киселева и др., 2024].

Для нефтегазового комплекса практический интерес представляет подключение фотобиореакторов к установкам сжигания газа и к собственной энергетической инфраструктуре предприятий. Это могут быть котельные и энергетические установки производственных площадок. Возможность использования технологии на конкретном объекте зависит от состава и стабильности дымовых газов, режима работы оборудования, наличия свободных площадей и необходимых ресурсов [Власкин и др., 2023]. Для каждого объекта требуется подтверждение способности микроводорослей сохранять рост при воздействии конкретного газового потока, а также устойчивость технологической цепочки в условиях, приближенных к промышленным [Чернова, Киселева, 2025].

Биофиксация углекислого газа микроводорослями объединяет газовую, жидкую и твердую фазы. Диоксид углерода поступает в культуральную среду, где часть его растворяется в жидкой фазе и используется клетками для наращивания биомассы, которую затем отделяют от среды и направляют на переработку [Li et al., 2023]. С позиций прикладной экологии необходимо разграничивать три различных показателя:

1) количество CO_2, удаленного из подаваемого объема газа за заданный интервал времени;

2) количество углерода, накопленного в биомассе, определяемое на основе ее сухой массы и элементного состава;

3) сокращение выбросов парниковых газов относительно выбранного базового сценария, учитывающее энергоснабжение процесса и последующее использование полученной продукции.

Указанные показатели взаимосвязаны, однако не являются тождественными. Например, производство биотоплива из биомассы микроводорослей может сопровождаться последующим возвратом биогенного углерода в атмосферу при его сжигании. В этом случае итоговый экологический эффект должен определяться не только объемом зафиксированного CO_2, но и масштабом замещения ископаемого топлива, а также энергетическими и материальными затратами на всех стадиях производственной цепочки. Результаты оценки жизненного цикла технологий фиксации CO_2 дымовых газов микроводорослями показывают, что энергозатраты на культивирование, подачу газа и последующую обработку биомассы способны существенно влиять на результирующий баланс выбросов парниковых газов [Ye et al., 2022].

Повышение экологической и ресурсной эффективности биофиксации CO_2 микроводорослями связано с интеграцией процесса в существующие материальные и энергетические потоки промышленной площадки. Дымовые газы в этом случае используются как источник неорганического углерода, вторичное тепло – для поддержания температурного режима культивирования, а культуральная жидкость после отделения биомассы может частично возвращаться в технологический цикл. Дополнительный ресурсный эффект достигается в водных средах, содержащих соединения азота и фосфора, необходимых для роста микроводорослей. При культивировании *Chlorella vulgaris* в модельной сточной воде степень удаления соединений азота и фосфора достигала 96,12–99,61%, а скорость фиксации CO_2 составляла 56,26–85,72 мг $CO_2 \cdot л^{-1} \cdot сут^{-1}$ [Kong et al., 2021]. Сходный подход реализован для реальных сточных вод производства, где культивирование *Chlorella vulgaris* обеспечивало удаление 90% аммонийного азота, 53% общего азота, 95% фосфатов и 55% неорганического углерода, а полученная биомасса рассматривалась как потенциальное сырье для производства биодизеля [Zibarev et al., 2024]. Совмещение процессов биофиксации углекислого газа, высокоэффективного культивирования микроводорослей на смешанных водных средах и последующего ресурсного использования биомассы формирует основу для создания интегрированных ресурсосберегающих схем на промышленных объектах.

Получаемая в процессе биофиксации CO_2 биомасса микроводорослей представляет собой дополнительный ресурсный результат технологии. Состав биомассы определяет возможные направления ее дальнейшего использования и во многом зависит от условий культивирования, состава газовой среды и обеспеченности культуры питательными веществами. Биомасса представителей рода *Chlorella* может содержать значительные количества белков, углеводов и липидов, что определяет возможности ее применения в качестве сырья для получения биотоплива, кормовых и пищевых компонентов, удобрений и другой продукции. При этом выбор конкретного направления переработки должен основываться на результатах анализа состава полученной биомассы и требований к конечному продукту. Различия в биохимических характеристиках биомасс *Chlorella* и *Auxenochlorella* в зависимости от условий выращивания подтверждают необходимость такой оценки [Canelli et al., 2020]. Таким образом, использование биомассы позволяет дополнить природоохранную функцию удаления CO_2 из газового потока ресурсной составляющей и сформировать дополнительный продукт технологического процесса.

Оценка перспектив промышленного применения биофиксации CO_2 требует рассмотрения технологии одновременно на нескольких уровнях. Экспериментальные исследования позволяют определить способность выбранной культуры поглощать CO_2 из

газовой смеси и накапливать биомассу, технологическая схема – сформировать вариант интеграции фотобиореактора в инфраструктуру предприятия, а экономическая оценка – определить влияние масштаба производства и основных расходных составляющих на себестоимость получаемой продукции. Совместное рассмотрение этих параметров позволяет оценивать биофиксацию CO_2 не только как отдельный биологический процесс, но и как элемент комплексной технологии использования углеродсодержащих выбросов с получением биомассы, пригодной для последующей переработки.

Цель исследования состоит в оценке перспектив снижения выбросов объектов нефтегазовой отрасли на основе биофиксации CO_2 из дымовых газов микроводорослями *Chlorella kessleri* с учетом характеристик образующейся биомассы и возможностей ее ресурсного использования. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1) оценена способность *Chlorella kessleri* к биофиксации CO_2 при различных условиях культивирования и при контакте с реальными дымовыми газами;

2) исследовано влияние источника неорганического углерода на накопление биомассы *Chlorella kessleri*;

3) проанализированы выход и компонентный состав биомассы *Chlorella kessleri*, полученной при различных режимах культивирования;

4) определены возможные направления использования полученной в процессе биофиксации биомассы;

5) сформирован вариант интеграции технологии биофиксации дымовых газов в производственную и энергетическую инфраструктуру объектов нефтегазовой отрасли;

6) выполнена оценка себестоимости культивирования биомассы микроводорослей *Chlorella kessleri* при разных объемах производства.

Материалы и методы

В качестве основного объекта изучения использован российский штамм *Chlorella kessleri.* Исследование включает ранее полученные результаты биоабсорбции CO_2 при различных условиях культивирования и новые данные по выходу и компонентному составу биомассы *Chlorella kessleri*, сформированной из разных источников неорганического углерода. Методической основой культивирования являются работы, посвященные культивированию и использованию микроводорослей *Chlorella* [Политаева и др., 2017; Politaeva et al., 2023].

Исследование влияний условий культивирования на поглощение CO_2 проводилось в

герметичных цилиндрических установках (фотобиореакторах) объемом 5,8 л, объем суспензии микроводорослей – 2,5 л. Установка включала распылитель, нагреватель, газовые линии, аэратор, источник CO_2, газоанализатор GEOTECH ga200plus (Geotechnical Instruments (UK) Ltd, Великобритания) и светодиодное освещение. Газовая смесь циркулировала между свободным пространством и суспензией микроводорослей через аэратор, что позволяло поддерживать газообмен между средами без дополнительного поступления наружного воздуха. Содержание CO_2 в газовоздушной среде составляло 23±5%. В экспериментальных вариантах изменялись температура, режим аэрации и обеспеченность питательной среды соединениями азота. Результаты данной серии ранее опубликованы [Shinkevich et al., 2026] и в настоящей работе применяются для характеристики условий биофиксации CO_2.

Прирост биомассы микроводорослей оценивали по оптической плотности суспензии при длине волны 750 нм с помощью спектрофотометра. Оптическая плотность рассматривалась как косвенный показатель изменения концентрации клеток в суспензии. Кислотность суспензии контролировали pH-метром. В начале серии опытов значение pH составляло 6,9.

Среднюю скорость поглощения CO_2 определяли как отношение объема поглощенного газа к объему суспензии и продолжительности эксперимента. Для пересчета объемных показателей в массовые применяли уравнение состояния идеального газа.

Для исследования возможности культивирования *Chlorella kessleri* при контакте с реальными промышленными газами использовали дымовые газы Северо-Западной ТЭЦ имени А.Г. Бориса (г. Санкт-Петербург). Смесь дымовых газов отбирали непосредственно из газохода после прохождения системы очистки выбросов и закачивали в специальные баллоны. По данным системы технологического контроля ТЭЦ состав газового потока в точке отбора: CO_2 – 2,5%, O_2 – 16,45%, NO_x – 0,02%, N_2 – 67,02%, H_2O – 14%, CO – 0,01%. Температура дымового газа непосредственно в точке отбора не регистрировалась. Культивирование проводили в фотобиореакторе объемом 110 л. В течение семи суток в установку подавали смесь воздуха и CO_2 с общим расходом 8 л/мин. На первые и третьи сутки чистый CO_2 в течение 1 ч заменяли дымовыми газами, расход которых составлял 2 л/мин.

Для отдельной оценки изменения содержания CO_2 в газовой фазе использовался фотобиореактор объемом 5,8 л. В течение двух суток культивирование проходило без подачи смеси дымовых газов для получения стабильной культуры микроводорослей. На третьи сутки дымовые газы подавали в суспензию микроводорослей с расходом 1,5 л/мин в течение 20 мин. Режим подачи смеси дымовых газов был определен с учетом имеющихся объемов смеси для устойчивого прироста биомассы микроводорослей. После достижения содержания CO_2 на выходе из установки около 2,7% подачу газа прекращали и переводили систему в режим

замкнутой циркуляции с последующим контролем содержания CO_2 в свободном газовом объеме.

Для оценки влияния источника неорганического углерода на выход и состав биомассы исследованы 3 варианта культивирования *Chlorella kessleri*. В контрольном варианте дополнительная подача CO_2 не осуществлялась, культура аэрировалась воздухом. Во втором варианте содержание CO_2 в газовой фазе периодически доводилось до 20 об. %, после чего газовая смесь циркулировала через суспензию микроводорослей. Продолжительность культивирования составляла 14 сут. В третьем варианте применялся смешанный режим с периодической подачей реальных дымовых газов. Продолжительность культивирования составляла 7 сут. Основные условия получения исследуемых образцов биомассы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Условия получения биомассы *Chlorella kessleri*

Показатель	Без дополнительной подачи CO_2	CO_2 до 20 об. %	Смешанный режим с дымовыми газами
Объем фотобиореактора, л	100	100	110
Объем суспензии, л	65	65	100
Начальная оптическая плотность D_{750}	0,489	0,457	0,700
Конечная оптическая плотность D_{750}	2,840	3,530	1,658
Продолжительность культивирования, сут	14	14	7
Скорость прироста биомассы, $сут^{-1}$	0,126	0,146	0,123
Газовый режим	аэрация воздухом	периодическая подача CO_2 до 20 об. %	периодическая подача дымовых газов

После завершения культивирования микроводорослей проводили сгущение биомассы при помощи центрифуги. При центрифугировании использовали режим 5000 об/мин в течение 30 мин. При фильтрации применяли нейлоновую мембрану с размером пор 0,45 мкм [Pahl et al., 2013; Uduman et al., 2010].

Для получения сухой биомассы микроводорослей использовались воздушная, инфракрасная и лиофильная сушки. Биомасса после центрифугирования содержала порядка 80-85% влаги. Влияние способа сушки оценивалось по остаточной влажности образцов и выходу экстрагируемой липидной фракции. Возможность использования вторичного тепла энергетического объекта для снижения энергозатрат на сушку биомассы рассматривается в работе [Hosseinizand et al., 2017].

Содержание белка определялось методом Брэдфорда после щелочной экстракции с фотометрированием при 595 нм [Kielkopf et al., 2020], углеводов – фенол-сернокислотным методом с калибровкой по глюкозе [Dubois et al., 1956]. Липидную фракцию выделяли экстракцией в аппарате Сокслета. Массовые доли компонентов и их выход на литр культуры анализировались раздельно.

Для обсуждения промышленной интеграции принята граница системы от отбора части дымового потока до получения биопродукта и обращения с побочными потоками. В нее включаются подготовка газа, культивирование, освещение, перемешивание, поддержание температуры, отделение биомассы, возврат воды и при необходимости сушка. При анализе технологических решений применялся принцип сопоставимых функциональных единиц.

Результаты экспериментального исследования

Результаты ранее проведенной серии экспериментов по оценке влияния условий культивирования на биоабсорбцию CO_2 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели биоабсорбции CO_2 при различных условиях культивирования *Chlorella kessleri*

Показатель	№ 1*	№ 2*	№ 3*	№ 4*
Начальная оптическая плотность D_{750}	0,642	0,650	0,626	0,654
Конечная оптическая плотность D_{750}	0,950	1,080	1,549	1,102
Объем поглощенного CO_2, л	0,638	0,380	0,610	0,260
Время поглощения, сут	2,4	4,5	2,5	4,5
Объем CO_2, поглощенный за 1 сутки 1 л суспензии микроводорослей, л	0,106	0,034	0,098	0,023
Скорость поглощения CO_2, $г \cdot л^{-1} \cdot сут^{-1}$	0,187	0,062	0,173	0,042

Условия культивирования: вариант № 1 - 30°C, освещенность 3000 лк, аэрация, наличие азота в питательной среде; вариант № 2 - 20°C, освещенность 3000 лк, без аэрации, наличие азота; вариант № 3 - 30°C, освещенность 3000 лк, аэрация, дефицит азота; вариант № 4 - 20°C, освещенность 3000 лк, без аэрации, дефицит азота.

Наибольшая удельная скорость поглощения CO_2 составила 0,187 $г \cdot л^{-1} \cdot сут^{-1}$ и достигнута при температуре 30°C, освещенности 3000 лк, аэрации и наличии азота в питательной среде. Минимальная скорость (0,042 $г \cdot л^{-1} \cdot сут^{-1}$) зарегистрирована при температуре 20°C, отсутствии аэрации и дефиците азота. Полученные ранее результаты показали существенное влияние условий культивирования на интенсивность удаления CO_2 из газовой фазы.

При температуре 30°C снижение обеспеченности культуры азотом сопровождалось уменьшением скорости поглощения CO_2 с 0,187 до 0,173 $г \cdot л^{-1} \cdot сут^{-1}$. При температуре 20°C соответствующее снижение наблюдалось с 0,062 до 0,042 $г \cdot л^{-1} \cdot сут^{-1}$. Максимальная скорость биоабсорбции использована как ориентир при выборе условий последующих экспериментов

по получению биомассы.

График изменения содержания CO_2 в свободном пространстве установки после перевода на замкнутый режим представлен на рис. 1. По результатам эксперимента удельная скорость поглощения CO_2 составила 0,24 г·л$^{-1}$·сут$^{-1}$.

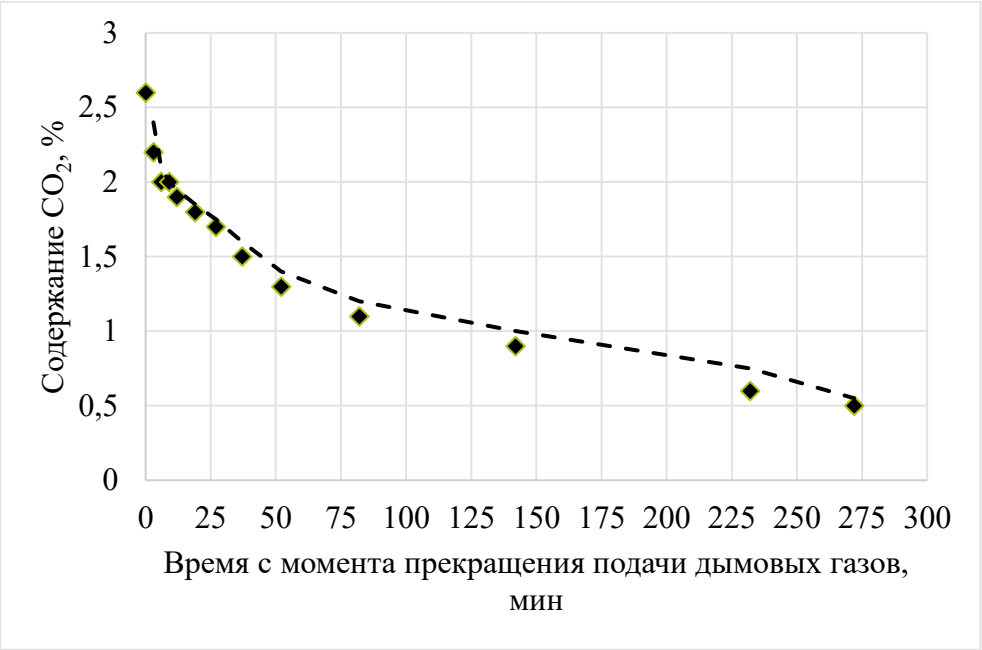


Рис. 1. Динамика снижения содержания CO_2 в свободной части фотобиореактора после подачи дымовых газов

Одновременно сохранялся рост культуры *Chlorella kessleri*. За 7 сут культивирования в фотобиореакторе объемом 110 л оптическая плотность суспензии увеличилась с 0,700 до 1,658, то есть в 2,37 раза. В фотобиореакторе объемом 5 л рост оптической плотности составил примерно 1,5 раза. Полученные результаты подтверждают сохранение способности культуры к росту при периодическом контакте с реальными дымовыми газами.

Сравнение выхода и компонентного состава биомассы *Chlorella kessleri*, полученной при различных режимах культивирования, представлено в табл. 3. Максимальный выход сухой биомассы, равный 0,54 г/л, установлен при культивировании с периодическим повышением содержания CO_2 до 20 об. %. При использовании дымовых газов выход сухой биомассы достигал 0,30 г/л, что в 1,67 раза превышало значение контрольного варианта без дополнительной подачи CO_2, равное 0,18 г/л.

При одинаковой методике пробоподготовки концентрация белка в полученных экстрактах составляла 18,26 мкг/мл в контрольном варианте, 17,06 мкг/мл – при культивировании с повышенным содержанием CO_2 и 14,02 мкг/мл при использовании дымовых газов. Для углеводов соответствующие значения равны 40,0, 32,5 и 25,0 мкг/мл.

Содержание экстрагируемых липидов в сухой биомассе составляло 13, 12 и 10% соответственно. Увеличение выхода биомассы при дополнительной подаче углеродсодержащего газа сопровождалось снижением концентрации отдельных компонентов в аналитических экстрактах, что обосновывает необходимость дополнительного сопоставления их расчетного выхода на единицу объема культуральной суспензии.

Таблица 3

Состав и выход биомассы при различных режимах

Режим культивирования	Белок в экстракте, мкг/мл	Углеводы в экстракте, мкг/мл	Липиды, % сухой биомассы	Биомасса, г/л
Культивирование без CO_2	18,26	40	13	0,18
Культивирование с CO_2 до 20 об. %	17,06	32,5	12	0,54
Культивирование с дымовыми газами	14,02	25	10	0,3

Однако оценка только массовой доли компонентов не отражает фактический выход из единицы объема культуры, поскольку режимы различались по количеству полученной биомассы, поэтому дополнительно рассчитан выход белков, углеводов и липидов на 1 л культуральной суспензии (табл. 4).

Таблица 4

Выход компонентов на объем культуры

Режим культивирования	Белок, мг/л	Углеводы, мг/л	Липиды, мг/л	Выход сухой биомассы, г/л
Культивирование без CO_2	3,29	36	23,4	0,18
Культивирование с CO_2 до 20 об. %	9,23	87,75	64,8	0,54
Культивирование с дымовыми газами	4,2	37,5	30	0,30

При культивировании с повышенным содержанием CO_2 выход белка составил 9,23 мг/л, углеводов – 87,75 мг/л, липидов – 64,8 мг/л. Это максимальные значения среди исследованных вариантов. В режиме периодической подачи дымовых газов выход белка составил 4,2 мг/л, углеводов – 37,5 мг/л, липидов – 30 мг/л. Для контрольного варианта соответствующие значения равны 3,29, 36 и 23,4 мг/л. Таким образом, применение дымовых газов сопровождалось увеличением общего выхода биомассы и выхода отдельных компонентов на единицу объема культуры по сравнению с контрольным вариантом. Наиболее выраженный рост наблюдался для липидной фракции, выход которой повысился с 23,4 до 30 мг/л.

Результаты сравнения способов сушки биомассы представлены в табл. 5. Во всех исследованных вариантах остаточная влажность высушенной биомассы не превышала 2,5%. Наибольший выход экстрагируемой липидной фракции получен после лиофильной сушки

(19,30 ± 0,70%). При инфракрасной сушке данный показатель составлял 16,65 ± 0,55%, при воздушной сушке – 14,95 ± 0,60%.

Таблица 5

Остаточная влажность и выход липидов после различных способов сушки

Способ сушки	Остаточная влажность, %	Выход липидов, %
Воздушная сушка	2,45 ± 0,06	14,95 ± 0,60
ИК-сушка	2,03 ± 0,04	16,65 ± 0,55
Лиофильная сушка	2,20 ± 0,05	19,30 ± 0,70

Полученные результаты показывают, что способ подготовки биомассы влияет на последующее извлечение липидной фракции. При выборе способа сушки для промышленного применения необходимо учитывать не только выход извлекаемых компонентов, но и энергетические затраты процесса. Для объектов нефтегазовой отрасли дополнительный интерес представляет возможность реализации доступных потоков вторичного тепла для обезвоживания и сушки биомассы, что может снизить энергозатраты данного этапа.

Для определения возможных направлений использования биомассы *Chlorella kessleri* дополнительно сопоставлялся расчетный выход отдельных компонентов на единицу объема культуральной суспензии. При культивировании с периодической подачей дымовых газов выход белка составил 4,2 мг/л, углеводов – 37,5 мг/л, липидов – 30,0 мг/л. По сравнению с контрольным вариантом без дополнительной подачи CO_2 выход белка увеличился на 27,7%, липидов – на 28,2%, углеводов – на 4,2%. При этом общий выход сухой биомассы вырос на 66,7%.

Полученные результаты показывают, что использование дымовых газов в исследованных условиях не приводило к преимущественному накоплению одной из рассмотренных фракций. Основной эффект связан с увеличением общего количества образующейся биомассы. В связи с этим для ее дальнейшего использования целесообразно рассматривать прежде всего направления, не требующие обязательного глубокого разделения биомассы на отдельные компоненты.

Наиболее простым вариантом является реализация получаемой суспензии или сгущенной биомассы в качестве технического биологического продукта. Данный вариант предусматривает минимальное число стадий последующей обработки и позволяет исключить энергоемкую сушку в тех случаях, когда требования к конечному продукту допускают применение влажной биомассы.

Для энергетического использования перспективным направлением является анаэробное сбраживание с получением биогаза. При таком способе переработки в процесс вовлекается значительная часть органического вещества биомассы, включая углеводную, белковую и

липидную фракции. Современные схемы переработки микроводорослей рассматривают анаэробное сбраживание как один из основных способов комплексной энергетической утилизации биомассы, а образующийся после процесса дигестат может дополнительно применяться как удобрение [Geng et al., 2025].

Липидная фракция может использоваться как сырье для получения жидкого биотоплива. При культивировании с дымовыми газами содержание экстрагируемых липидов составляло 10% сухой биомассы, а их расчетный выход достигал 30,0 мг/л культуральной суспензии. Переработка липидов *Chlorella* в биодизель и другие топливные продукты остается одним из распространенных направлений их ресурсного использования [Liu et al., 2024]. При полученных в настоящей работе значениях липидное направление целесообразно рассматривать как один из вариантов комплексной переработки биомассы, а не как единственную продуктовую цепочку.

Дополнительным направлением является получение удобрений и биостимулирующих продуктов. Такой вариант также позволяет использовать значительную часть биомассы без предварительного выделения отдельных фракций. В современных концепциях микроводорослевых биорефайнерий остаточная биомасса и продукты ее анаэробной переработки рассматриваются как потенциальное сырье для почвенных добавок и биоудобрений [Geng et al., 2025].

Таким образом, для биомассы *Chlorella kessleri*, формируемой при периодической подаче дымовых газов, наиболее обоснованными направлениями дальнейшего использования являются техническая суспензия или сгущенная биомасса, анаэробное сбраживание с получением биогаза, липидная фракция для получения биотоплива и производство технических удобрений или биостимулирующих продуктов.

Интеграция технологии в инфраструктуру нефтегазовых объектов

Для нефтегазовых предприятий наиболее реалистичным источником CO_2 для культивирования микроводорослей являются локальные энергетические установки, работающие на газообразном топливе, включая котельные, газопоршневые и газотурбинные установки. В проведенных экспериментах использовались реальные дымовые газы с содержанием CO_2 2,7 об. %. При их периодической подаче *Chlorella kessleri* сохраняла способность к росту, а удельная скорость поглощения CO_2 достигала 0,24 $г \cdot л^{-1} \cdot сут^{-1}$. Полученные значения позволяют рассматривать прямое использование дымовых газов без предварительного выделения из них чистого CO_2.

В качестве варианта промышленной интеграции предлагается регулируемый отбор части дымового потока с последующей подачей газа в фотобиореактор. Такой подход соответствует

пилотным решениям, исследуемым другими авторами, в публикации которых фотобиореактор объемом 500 л интегрирован с газовой котельной мощностью 3 МВт и работал непосредственно на дымовом газе с содержанием CO_2 3–5% [Singh et al., 2025]. Авторы рассматривают прямую подачу дымового газа как способ исключить отдельные стадии выделения и компримирования CO_2.

Принципиальная схема предлагаемой интеграции представлена на рис. 2. Дымовые газы от энергетической установки после существующей системы газоочистки разделяются на основной и отбираемый потоки. Отбираемая часть направляется через блок подготовки газа, включающий охлаждение и регулирование расхода, после чего подается в фотобиореактор с суспензией *Chlorella kessleri*. Обработанный газ отводится в общий газоход. Из фотобиореактора периодически выводится часть культуральной суспензии, которая направляется на отделение биомассы, а часть жидкой фазы возвращается в цикл культивирования.

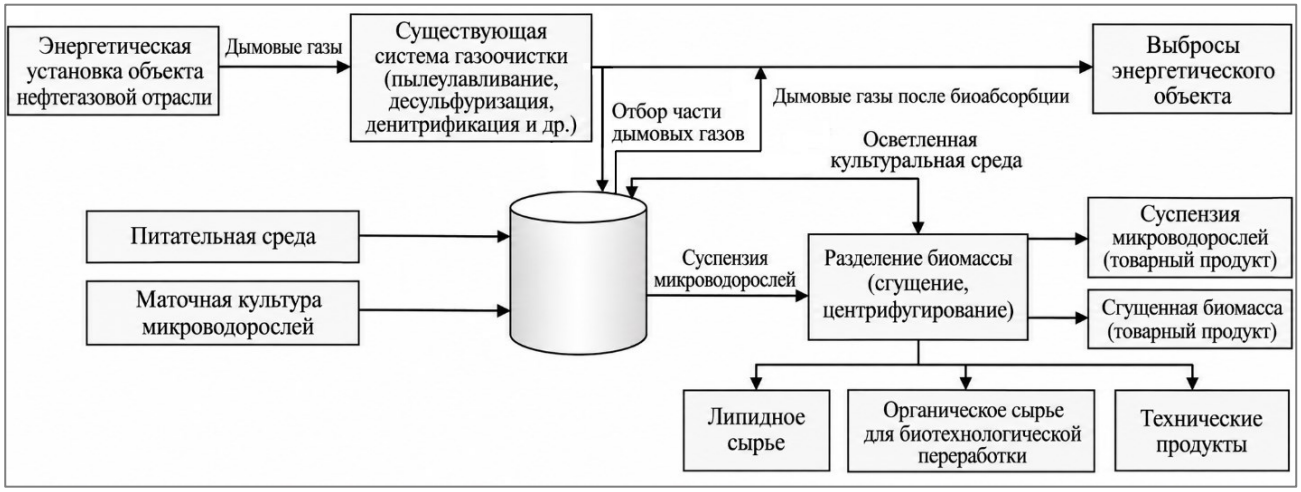


Рис. 2. Принципиальная схема интеграции биоабсорбции дымовых газов микроводорослями в инфраструктуру энергетического объекта

Для выбранного штамма технологическими ориентирами могут служить экспериментально установленные условия, при которых достигались максимальные значения биофиксации CO_2: температура около 30°C, освещенность – 3000 лк, аэрация и достаточная обеспеченность культуры соединениями азота.

Необходимость блока подготовки определяется составом и температурой конкретного дымового потока. Современные исследования промышленного применения микроводорослей также выделяют предварительную обработку дымового газа как важную стадию, поскольку температура и сопутствующие компоненты способны влиять на рост культуры [Li et al., 2025; Wang, Wang, Zhu, 2025], поэтому состав и последовательность операций подготовки газа

должны определяться характеристиками конкретного источника выбросов.

Предлагаемая схема ориентирована на модульное включение фотобиореактора в существующую инфраструктуру без изменения режима работы основного энергетического оборудования. Производительность системы может увеличиваться за счет параллельного подключения нескольких модулей фотобиореакторов и изменения доли отбираемого дымового потока. Такая организация позволяет рассматривать биофиксацию CO_2 как дополнительную стадию обработки выбросов локальных энергетических установок нефтегазовых предприятий.

Ресурсные и экономические условия внедрения технологии

В исследовании сопоставлены два варианта выпуска продукции: жидкая суспензия микроводорослей и сухой порошок. С экологической точки зрения они различаются главным образом наличием стадий интенсивного обезвоживания и сушки. Производство суспензии позволяет сократить количество технологических операций, однако увеличивает объем транспортируемой воды и предъявляет более жесткие требования к срокам хранения продукции. Сухой порошок удобнее с точки зрения транспортных затрат и концентрации полезных компонентов, но его получение требует дополнительных энергетических и материальных ресурсов. Поэтому выбор формы продукта определяется расстоянием до потребителя, концентрацией культуры и требованиями к конечной продукции.

Для реализации пилотного проекта на нефтегазовой площадке целесообразно рассматривать несколько локальных направлений использования биомассы, не ориентируя всю экономику проекта на один высокомаржинальный рынок. Жидкая суспензия и технические биопродукты могут выступать как варианты сокращения числа производственных стадий. Однако доступность таких рынков требует отдельного подтверждения: необходимы испытания продукции по назначению, оценка стабильности и безопасности, а также подтверждение спроса на продукт с заданными характеристиками. Широкий перечень потенциальных потребителей микроводорослей *Chlorella* не означает, что каждый из них готов использовать сырье, полученное с применением промышленных дымовых газов.

Липидное направление в рассмотренном режиме ограничено выходом липидов около 30 мг на 1 л культуры. Для производства биодизеля необходимо оценить не только долю липидов в биомассе, но и эффективность их извлечения, состав полученных липидов, условия их дальнейшей конверсии, а также расход растворителей. Переработка углеводной фракции также предполагает дополнительные технологические операции, выходы которых не определены в представленной серии экспериментов.

Расчетная экономическая модель построена на данных о стоимости оборудования, тарифах на ресурсы, продолжительности производственного цикла, необходимости резервирования инокулянта и выходе продукции. Для лабораторного сценария принят расчетный объем 100 л. При проведении трех циклов по десять суток ежемесячный товарный выход после резервирования части культуры составляет 210 л в месяц жидкой суспензии.

В результате проведенных расчетов себестоимость жидкой формы составляет порядка 170 руб./л, порошка – 86,5 тыс. руб./кг. Следует учитывать, что при лабораторной производительности сухая форма требует существенно бóльших затрат на единицу товарной массы, по сравнению с производственными условиями.

Далее рассмотрены различные сценарии масштабирования производства продукции – рост количества фотобиореакторов с одного ФБР-250 л до пяти ФБР-1000 при выходе продукции от 5250 л/мес. до 52500 л/мес. При изменении параметров мощностей себестоимость производства суспензии уменьшается до 44 руб./л для ФБР-250 и до 25 руб./л для 5ФБР-1000. Себестоимость же производства сухого порошка при этом сокращается до 7,7 тыс. руб./кг (рис. 3).

Анализ показал, что для обеспечения конкурентоспособности продукции из микроводорослей *Chlorella* на российском рынке целесообразно ориентироваться на целевой уровень себестоимости в пределах 50–250 руб. за 1 л продукции и 1200–1800 руб. за 1 кг сухой биомассы микроводорослей *Chlorella*. Достижение указанного диапазона должно сопровождаться сохранением качественных характеристик, соблюдением технологических параметров и системным контролем производственных затрат.

Снижение себестоимости порошка из микроводорослей *Chlorella* требует комплексного подхода, включающего совершенствование технологии, рациональное использование ресурсов и оптимизацию организации производства. Основными направлениями могут быть следующие:

1) подбор наиболее экономичного способа культивирования биомассы, включая применение открытых, закрытых или гибридных систем выращивания, что позволит уменьшить расход энергии, питательных компонентов и сократить потери биомассы;

2) использование доступных местных компонентов для приготовления питательных сред, а также внедрение систем частичного возврата воды и отдельных элементов питания в технологический процесс, что позволит снизить расход материалов и объем потребления свежей воды;

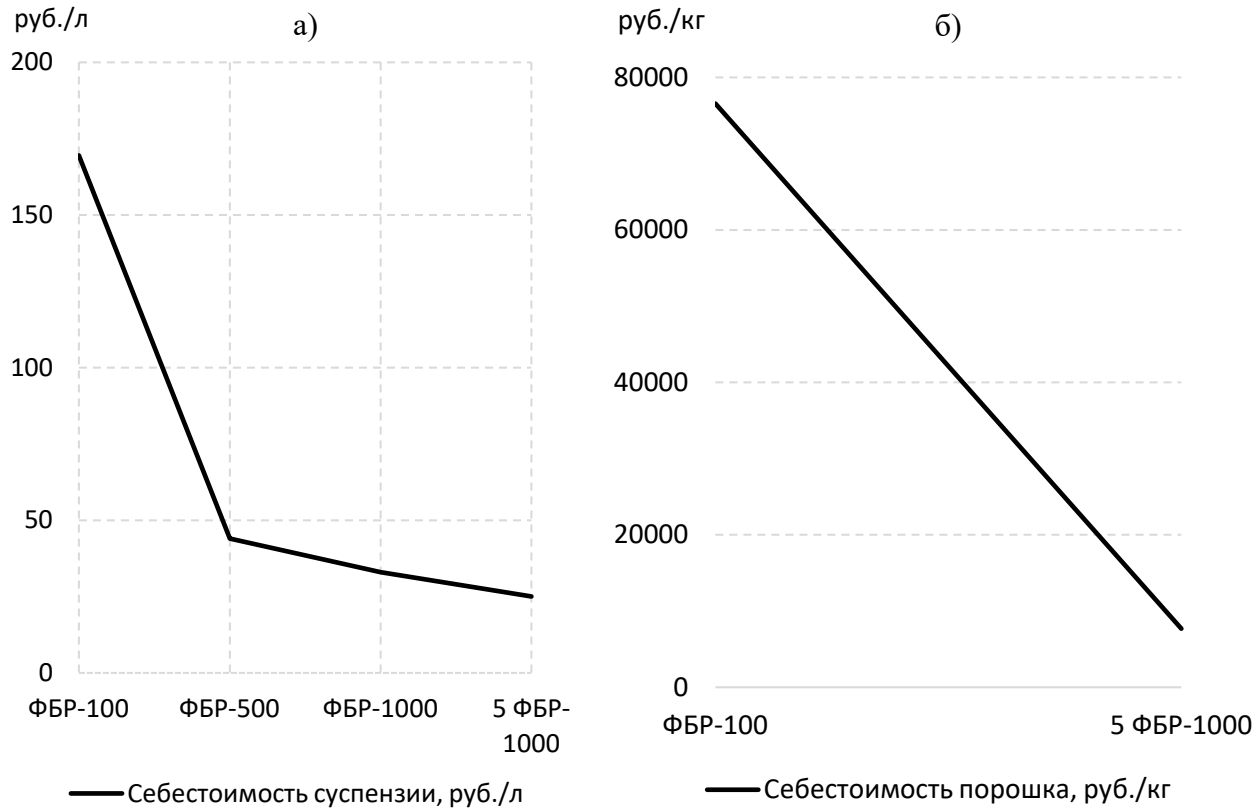


Рис. 3. Изменение себестоимости производства суспензии и порошка микроводорослей *Chlorella* при увеличении мощности реакторов

а) себестоимость суспензии микроводорослей Chlorella, руб./л, б) себестоимость сухой формы (порошка) микроводорослей Chlorella, руб./кг.

3) механизация и автоматизация основных операций, включая контроль параметров культивирования, сбор биомассы, обезвоживание, сушку и фасовку. Автоматизация будет способствовать снижению трудозатрат, повышению производительности и обеспечению стабильности качества продукции;

4) увеличение объема производства для использования эффекта масштаба, что приведет к сокращению постоянных затрат на оборудование, производственные площади, управление и контроль качеств, так как при этом они распределяются на большее количество продукции;

5) совершенствование процессов обезвоживания и сушки как наиболее энергоемких стадий производства. Для этого могут применяться более эффективные сушильные установки, системы рекуперации тепла, а при наличии соответствующих условий – возобновляемые источники энергии;

6) оптимизация расходов на упаковку, хранение и транспортировку за счет выбора нужной тары, сокращения расстояний доставки и оптимизации загрузки транспортных средств;

7) объединение производства микроводорослей *Chlorella* с действующими

производственными и перерабатывающими объектами с целью совместного использования энергетической, водной и инфраструктурной базы.

Реализация данных мер позволит снизить как прямые производственные затраты, так и сопутствующие расходы для сокращения себестоимости порошка из микроводорослей *Chlorella* и повышения конкурентоспособность ее производства. Оценку эффективности проекта целесообразно проводить в двух направлениях: производственно-экономическом и экологическом. При этом экономический и экологический результаты проекта могут не совпадать – производство дорогостоящей продукции может быть рентабельным, но не приводить к реальному сокращению выбросов парниковых газов и наоборот.

Заключение

Проведенное исследование показало возможность применения *Chlorella kessleri* для биофиксации CO_2 из газовых потоков, включая реальные дымовые газы энергетического объекта. При периодической подаче дымовых газов с содержанием CO_2 2,7 об. % культура сохраняла способность к росту, а удельная скорость поглощения CO_2 составила 0,24 $г \cdot л^{-1} \cdot сут^{-1}$. Полученные результаты подтверждают возможность использования дымовых газов непосредственно как источника неорганического углерода без предварительного выделения чистого CO_2.

Сравнение режимов культивирования показало, что подача углеродсодержащего газа влияет не только на интенсивность поглощения CO_2, но и на характеристики формируемой биомассы. Полученная биомасса может рассматриваться как дополнительный ресурсный продукт процесса. Для условий работы с дымовыми газами наиболее целесообразны направления, не требующие обязательного глубокого фракционирования, включая использование технической суспензии, сгущенной биомассы и ее дальнейшую переработку в зависимости от требований к конечному продукту.

Для объектов нефтегазовой отрасли предложена модульная схема интеграции технологии, основанная на регулируемом отборе части дымового потока от локальных энергетических установок, его подготовке и подаче в фотобиореактор с последующим возвратом обработанного газа в основной газоход. Такая организация позволяет включать биофиксацию CO_2 в существующую инфраструктуру предприятия и увеличивать производительность путем параллельного подключения дополнительных фотобиореакторных модулей.

Расчетная экономическая оценка показала выраженный эффект масштаба. Себестоимость жидкой суспензии в лабораторном варианте составляла около 170 руб./л и

снижалась до 25–44 руб./л в рассмотренных сценариях увеличения производительности. Наиболее затратными для получения сухой продукции остаются стадии обезвоживания и сушки, поэтому для промышленного применения приоритет представляет сокращение числа операций обработки и использование доступных инфраструктурных ресурсов предприятия.

Таким образом, биофиксация CO_2 микроводорослями *Chlorella kessleri* может рассматриваться как дополнительный элемент экологической модернизации нефтегазовых объектов, сочетающий обработку части углеродсодержащего газового потока с получением биомассы, пригодной для последующего ресурсного использования.

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

Литература

Власкин М.С., Киселёва С.В., Чернова Н.И., Григоренко А.В., Рындин К.Г., Попель О.С., Маланий С.Я., Славкина О.В., де Фариас Навес Ф., Кумар В. Эффективность поглощения CO_2 микроводорослями *Arthrospira platensis* из смеси, моделирующей дымовые газы // Теплоэнергетика. - 2023. - № 5. - С. 57-72. DOI: 10.56304/S0040363623050077

Киселёва С.В., Чернова Н.И., Власкин М.С., Григоренко А.В., Чунжук Е.А., Маланий С.Я., Бакуменко Е.А., Росицкая Т.В. Поглощение углекислого газа микроводорослями: анализ технологий и энергетических затрат // Теплоэнергетика. - 2024. - № 12. - С. 17-29. DOI: 10.56304/S0040363624700504

Политаева Н.А., Смятская Ю.А., Кузнецова Т.А., Ольшанская Л.Н., Валиев Р.Ш. Культивирование и использование микроводорослей *Chlorella* и высших водных растений ряска *Lemna*: монография. - Саратов: Наука, 2017. - 124 с. EDN: FSMTGT

Чернова Н.И., Киселёва С.В. Улавливание CO_2 микроводорослями: от лабораторных исследований к пилотным проектам // Экология и промышленность России. - 2025. - Т. 29. - №11. - С. 36-41. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-11-36-41

Canelli G., Tarnutzer C., Carpine R., Neutsch L., Bolten C.J., Dionisi F., Mathys A. Biochemical and Nutritional Evaluation of *Chlorella* and *Auxenochlorella* Biomasses Relevant for Food Application // Frontiers in Nutrition. - 2020. - Vol. 7. - 565996. DOI: 10.3389/fnut.2020.565996

DuBois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A., Smith F. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances // Analytical Chemistry. - 1956. - Vol. 28. - No. 3. - P. 350-356. DOI: 10.1021/ac60111a017

Faruque M.O., Mohammed K.A., Hossain M.M., Razzak S.A. Influence of elevated CO_2 concentrations on growth, nutrient removal, and CO_2 biofixation using *Chlorella kessleri* cultivation // International Journal of Environmental Science and Technology. - 2021. - Vol. 18. - P. 913-926. DOI: 10.1007/s13762-020-02909-4

Geng Y., Shaukat A., Azhar W., Raza Q.-U.-A., Tahir A., Abideen M.Z.U., Zia M.A.B., Bashir M.A., Rehim A. Microalgal biorefineries: a systematic review of technological trade-offs and innovation pathways // Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. - 2025. - Vol. 18(93). DOI: 10.1186/s13068-025-02694-7

Hosseinizand H., Lim C.J., Webb E., Sokhansanj S. Economic analysis of drying microalgae *Chlorella* in a conveyor belt dryer with recycled heat from a power plant // Applied Thermal Engineering. - 2017. - Vol. 124. - P. 525-532. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.047

Kielkopf C.L., Bauer W., Urbatsch I.L. Bradford Assay for Determining Protein Concentration // Cold Spring Harbor Protocols. - 2020. - Vol. 2020. - No. 4. - pdb.prot102269. DOI: 10.1101/pdb.prot102269

Kong W., Kong J., Ma J., Lyu H., Feng S., Wang Z., Yuan P., Shen B. Chlorella vulgaris cultivation in simulated wastewater for the biomass production, nutrients removal and CO_2 fixation simultaneously // Journal of Environmental Management. - 2021. - Vol. 284. - 112070. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112070

Li K.-Y., Zhou J.-L., Guo S.-Y., Dou X.-X., Gu J.-J., Gao F. Advances of microalgae-based enhancement strategies in industrial flue gas treatment: From carbon sequestration to lipid production // Bioresource Technology. - 2025. - Vol. 423. - 132250. DOI: 10.1016/j.biortech.2025.132250

Li S., Chang H., Zhang S., Ho S.-H. Production of sustainable biofuels from microalgae with CO_2 bio-sequestration and life cycle assessment // Environmental Research. - 2023. - Vol. 227. - 115730. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115730

Liu H., Liu T.-J., Guo H.-W., Wang Y.-J., Ji R., Kang L.-L., Wang Y.-T., Guo X., Li J.-G., Jiang L.-Q., Fang Z. A review of the strategy to promote microalgae value in CO_2 conversion-lipid enrichment-biodiesel production // Journal of Cleaner Production. - 2024. - Vol. 436. - 140538. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140538

Pahl S.L., Lee A.K., Kalaitzidis T., Ashman P.J., Sathe S., Lewis D.M. Harvesting, Thickening and Dewatering Microalgae Biomass // Algae for Biofuels and Energy. Eds. M.A. Borowitzka, N.R. Moheimani. Dordrecht: Springer, 2013. - Vol. 5. - P. 165-185. DOI: 10.1007/978-94-007-5479-9_10

Politaeva N., Ilin I., Velmozhina K., Shinkevich P. Carbon Dioxide Utilization Using *Chlorella* Microalgae // Environments. 2023. Vol. 10. - No. 7. - 109. DOI: 10.3390/environments10070109

Shinkevich P.S., Velmozhina K.A., Politaeva N.A., Chusov A.N. Assessment of the ability of microalgae to absorb carbon dioxide in various conditions using *Chlorella kessleri* and other species // International Journal of Hydrogen Energy. - 2026. - Vol. 200. - 153073. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.153073

Singh U., Naaz F., Hawkins T.R., Weinberg E., Banerjee S., Mroz R., Ohri N., Zhang J., Lee Y.-Y., Chen F., Hill R., Li Y. Direct flue gas capture for algae cultivation and subsequent valorization: evaluating life cycle emissions and costs // Sustainable Energy & Fuels. - 2025. - Vol. 9. - P. 4392-4403. DOI: 10.1039/D5SE00329F

Uduman N., Qi Y., Danquah M.K., Forde G.M., Hoadley A.F.A. Dewatering of microalgal cultures: A major bottleneck to algae-based fuels // Journal of Renewable and Sustainable Energy. - 2010. - Vol. 2. - No. 1. - 012701. DOI: 10.1063/1.3294480

Wang R., Wang X., Zhu T. Research progress and application of carbon sequestration in industrial flue gas by microalgae: A review // Journal of Environmental Sciences. - 2025. - Vol. 152. - P. 14-28. DOI: 10.1016/j.jes.2024.04.018

Ye Q., Shen Y., Zhang Q., Wu X., Guo W. Life-cycle assessment of flue gas CO_2 fixation from coal-fired power plant and coal chemical plant by microalgae // Science of the Total Environment. - 2022. - Vol. 848. - 157728. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157728

Zibarev N., Toumi A., Politaeva N., Iljin I. Nutrients recovery from dairy wastewater by *Chlorella vulgaris* and comparison of the lipid's composition with various chlorella strains for biodiesel production // PLOS ONE. - 2024. - Vol. 19. - No. 4. - e0297464. DOI: 10.1371/journal.pone.0297464

© Шинкевич П.С., Вельможина К.А., Политаева Н.А., Масалова М.А., Меткин Д.М., Медведева Л.В., 2026

This is an open access article under the CC BY 4.0 license

Received 15.10.2026 *Published 09.11.2026*

Shinkevich P.S., Velmozhina K.A., Politaeva N.A., Masalova M.A., Metkin D.M., Medvedeva L.V.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, ps.shinkevich@gmail.com, anizhomlev@mail.ru, politaevana1971@gmail.com, mer.masalova@gmail.com, metkin_dm@spbstu.ru, medvedeva_lv@spbstu.ru

PROSPECTS FOR REDUCING CARBON EMISSIONS IN THE PETROLEUM INDUSTRY BASED ON BIOFIXATION OF FLUE GASES WITH MICROALGAE

The possibility of using Chlorella kessleri microalgae for biofixation of carbon dioxide from flue gases with subsequent integration of the technology into the infrastructure of petroleum industry facilities is considered. The influence of cultivation conditions and the source of inorganic carbon on the absorption of carbon dioxide and the formation of microalgae biomass has been studied. Possible directions of resource use of the received biomass are defined. A modular scheme for integrating a photobioreactor with controlled extraction of part of the flue stream from local power plants of an petroleum enterprise, gas treatment and return of the treated stream to the main flue is proposed. The estimated economic assessment showed the possibility of reducing the cost of liquid suspension in the laboratory version with an increase in production scale. The main directions of reducing production costs and increasing the competitiveness of final products have been identified, including reducing the cost of cultivation by choosing the most economical method (open photobioreactors), using available components to create a nutrient medium, mechanization and automation of certain processes, increasing production volumes, and using more efficient drying plants.

***Keywords**: carbon emissions in the petroleum industry, biofixation of carbon dioxide from flue gases, photobioreactor, Chlorella kessleri microalgae, resource use of microalgae biomass.*

For citation: Shinkevich P.S., Velmozhina K.A., Politaeva N.A., Masalova M.A., Metkin D.M., Medvedeva L.V. Prospects for reducing carbon emissions in the petroleum industry based on biofixation of flue gases with microalgae. Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika, 2026, vol. 21, no. 4, available at: https://www.ngtp.ru/rub/2026/27_2026.html EDN: JRXQNJ

References

Canelli G., Tarnutzer C., Carpine R., Neutsch L., Bolten C.J., Dionisi F., Mathys A. Biochemical and Nutritional Evaluation of Chlorella and Auxenochlorella Biomasses Relevant for Food Application. *Frontiers in Nutrition*, 2020, vol. 7, 565996. DOI: 10.3389/fnut.2020.565996

Chernova N.I., Kiseleva S.V. CO2 capture by microalgae: from laboratory research to pilot projects. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2025, vol. 29, no. 11, pp. 36-41. (In Russ.). DOI: 10.18412/1816-0395-2025-11-36-41

DuBois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A., Smith F. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, 1956, vol. 28, no. 3, pp. 350-356. DOI: 10.1021/ac60111a017

Faruque M.O., Mohammed K.A., Hossain M.M., Razzak S.A. Influence of elevated CO_2 concentrations on growth, nutrient removal, and CO_2 biofixation using Chlorella kessleri cultivation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, vol. 18, pp. 913-926. DOI: 10.1007/s13762-020-02909-4

Geng Y., Shaukat A., Azhar W., Raza Q.-U.-A., Tahir A., Abideen M.Z.U., Zia M.A.B., Bashir M.A., Rehim A. Microalgal biorefineries: a systematic review of technological trade-offs and innovation pathways. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 2025, vol. 18(93). DOI: 10.1186/s13068-025-02694-7

Hosseinizand H., Lim C.J., Webb E., Sokhansanj S. Economic analysis of drying microalgae Chlorella in a conveyor belt dryer with recycled heat from a power plant. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 124, pp. 525-532. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.047

Kielkopf C.L., Bauer W., Urbatsch I.L. Bradford Assay for Determining Protein Concentration. *Cold Spring Harbor Protocols*, 2020, vol. 2020, no. 4, pdb.prot102269. DOI: 10.1101/pdb.prot102269

Kiseleva S.V., Chernova N.I., Vlaskin M.S., Grigorenko A.V., Chunzhuk E.A., Malaniy S.Ya., Bakumenko E.A., Rositskaya T.V. Carbon dioxide absorption by microalgae: analysis of technologies and energy costs. *Teploenergetika*, 2024, no. 12, pp. 17-29. (In Russ.). DOI: 10.56304/S0040363624700504

Kong W., Kong J., Ma J., Lyu H., Feng S., Wang Z., Yuan P., Shen B. Chlorella vulgaris cultivation in simulated wastewater for the biomass production, nutrients removal and CO_2 fixation simultaneously. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 284, 112070. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112070

Li K.-Y., Zhou J.-L., Guo S.-Y., Dou X.-X., Gu J.-J., Gao F. Advances of microalgae-based enhancement strategies in industrial flue gas treatment: From carbon sequestration to lipid production. *Bioresource Technology*, 2025, vol. 423, 132250. DOI: 10.1016/j.biortech.2025.132250

Li S., Chang H., Zhang S., Ho S.-H. Production of sustainable biofuels from microalgae with CO_2 bio-sequestration and life cycle assessment. *Environmental Research*, 2023, vol. 227, 115730. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115730

Liu H., Liu T.-J., Guo H.-W., Wang Y.-J., Ji R., Kang L.-L., Wang Y.-T., Guo X., Li J.-G., Jiang L.-Q., Fang Z. A review of the strategy to promote microalgae value in CO_2 conversion-lipid enrichment-biodiesel production. *Journal of Cleaner Production*, 2024, vol. 436, 140538. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140538

Pahl S.L., Lee A.K., Kalaitzidis T., Ashman P.J., Sathe S., Lewis D.M. Harvesting, Thickening and Dewatering Microalgae Biomass. *Algae for Biofuels and Energy*. Eds. M.A. Borowitzka, N.R. Moheimani. Dordrecht: Springer, 2013, vol. 5, pp. 165-185. DOI: 10.1007/978-94-007-5479-9_10

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

Politaeva N.A., Smyatskaya Yu.A., Kuznetsova T.A., Ol'shanskaya L.N., Valiev R.Sh. *Cultivation and use of Chlorella microalgae and higher aquatic plants Lemna*. Saratov: Nauka, 2017, 124 p. (In Russ.). EDN: FSMTGT

Shinkevich P.S., Velmozhina K.A., Politaeva N.A., Chusov A.N. Assessment of the ability of microalgae to absorb carbon dioxide in various conditions using *Chlorella* kessleri and other species. International *Journal of Hydrogen Energy*, 2026, vol. 200, 153073. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.153073

Singh U., Naaz F., Hawkins T.R., Weinberg E., Banerjee S., Mroz R., Ohri N., Zhang J., Lee Y.-Y., Chen F., Hill R., Li Y. Direct flue gas capture for algae cultivation and subsequent valorization: evaluating life cycle emissions and costs. *Sustainable Energy & Fuels*, 2025, vol. 9, pp. 4392-4403. DOI: 10.1039/D5SE00329F

Uduman N., Qi Y., Danquah M.K., Forde G.M., Hoadley A.F.A. Dewatering of microalgal cultures: A major bottleneck to algae-based fuels. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2010, vol. 2, no. 1, 012701. DOI: 10.1063/1.3294480

Vlaskin M.S., Kiseleva S.V., Chernova N.I., Grigorenko A.V., Ryndin K.G., Popel′ O.S., Malaniy S.Ya., Slavkina O.V., de Farias Naves F., Kumar V. Efficiency of CO2 absorption by Arthrospira platensis microalgae from a mixture simulating flue gases. *Teploenergetika*, 2023, no. 5, pp. 57-72. (In Russ.). DOI: 10.56304/S0040363623050077

Wang R., Wang X., Zhu T. Research progress and application of carbon sequestration in industrial flue gas by microalgae: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, vol. 152, pp. 14-28. DOI: 10.1016/j.jes.2024.04.018

Ye Q., Shen Y., Zhang Q., Wu X., Guo W. Life-cycle assessment of flue gas CO_2 fixation from coal-fired power plant and coal chemical plant by microalgae. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 848, 157728. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157728

Zibarev N., Toumi A., Politaeva N., Iljin I. Nutrients recovery from dairy wastewater by Chlorella vulgaris and comparison of the lipid's composition with various chlorella strains for biodiesel production. *PLOS ONE*, 2024, vol. 19, no. 4, e0297464. DOI: 10.1371/journal.pone.0297464