

Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 2 (142). С. 174-194. ISSN 1998-8443 (print)

Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2023. Issue 2 (142). P. 174-194. ISSN 1998-8443 (print)

Научная статья

УДК 579.222.2

doi: 10.17122/ntj-oil-2023-2-174-194

EDN: FG YVCV

УТИЛИЗАЦИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕГИОНА

Олег Ренатович Латыпов¹, Анатолий Борисович Лаптев²,
Федор Борисович Шевляков^{3,4}, Иван Андреевич Голубев⁵,
Никита Олегович Шапошников⁶

^{1,3}Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт» - «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», Москва, Россия

⁴ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия

^{5,6}Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

¹o.r.latypov@mail.ru

²laptev@bk.ru

³sfb1980@mail.ru

⁵golubev2m@gmail.com

⁶shaposhnikovno@gmail.com

Автор, ответственный за переписку: Олег Ренатович Латыпов, o.r.latypov@mail.ru

Аннотация. На основании обзора литературы показано, что в стране имеется большое количество квалифицированных специалистов по выращиванию микроводорослей для поглощения углекислого газа, несмотря на кажущуюся сложность этого метода в сравнении с методом закачивания его в пласт. Поскольку поглощение микроводорослью рода хлорелла происходит с использованием энергии солнечного света, то при его достаточном количестве обходятся без выбросов дополнительного количества углекислого газа. Эта технология, как никакая другая, зависит от климатических усло-

вий: в климате со среднегодовой температурой ниже 0 °С культивирование водоросли нецелесообразно, здесь единственно приемлемая технология - это сжижение углекислого газа и закачивание его в пласт. В умеренном климате, в котором расположено наибольшее количество предприятий и городов Европы и России, необходимо чередовать технологии, то есть в летнее время культивировать большие площади хлореллы по предложенной в статье технологии, а в зимний - уменьшать площадь и часть углекислого газа закачивать в хранилище.

© Латыпов О. Р., Лаптев А. Б., Шевляков Ф. Б., Голубев И. А., Шапошников Н. О., 2023

Ключевые слова: декарбонизация, углекислый газ, климат, парниковый эффект, микроорганизмы

Для цитирования: Латыпов О. Р., Лаптев А. Б., Шевляков Ф. Б., Голубев И. А., Шапошников Н. О. Утилизация углекислого газа с учетом климатических особенностей региона // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 2 (142). С. 174-194. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-2-174-194>.

Original article

UTILIZATION OF CARBON DIOXIDE TAKING INTO ACCOUNT THE CLIMATIC CHARACTERISTICS OF THE REGION

Oleg R. Latypov¹, Anatoly B. Laptev², Fedor B. Shevlyakov^{3,4},
Ivan A. Golubev⁵, Nikita O. Shaposhnikov⁶

^{1,3}Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

²NRC «Kurchatov Institute» - «All-Russian Research Institute of Aviation Materials»,
Moscow, Russia

⁴RN-BashNIPIneft LLC (Company of Rosneft Group), Ufa, Russia

^{5,6}Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

¹o.r.latypov@mail.ru

²laptev@bk.ru

³sfb1980@mail.ru

⁵golubev2m@gmail.com

⁶shaposhnikovno@gmail.com

Corresponding author: **Oleg R. Latypov**, o.r.latypov@mail.ru

Abstract. Based on a review of the literature, it is shown that there are a large number of qualified specialists in the cultivation of microalgae to absorb carbon dioxide in the country, despite the apparent complexity of this method in comparison with the method of injecting it into the layer. Since the absorption by microalgae of

the genus *Chlorella* occurs using the energy of sunlight, then with a sufficient amount of it, emissions of additional carbon dioxide are dispensed with. This technology, like no other, depends on climatic conditions: in a climate with an average annual temperature below 0 °C, algae cultivation is impractical, here the only ac-

ceptable technology is carbon dioxide liquefaction and its injection into the layer. In a temperate climate, where the largest number of enterprises and cities in Europe and Russia are located, it is necessary to alternate technologies,

that is, in summer, cultivate large areas of chlorella according to the technology proposed in the article, and in winter, reduce the area and pump some of carbon dioxide into storage.

Keywords: decarbonization, carbon dioxide, climate, greenhouse effect, microorganisms

For citation: Latypov O. R., Laptev A. B., Shevlyakov F. B., Golubev I. A., Shaposhnikov N. O. Utilizatsiya uglekislogo gaza s uchetom klimaticheskikh osobennostey regiona [Utilization of Carbon Dioxide Taking into Account the Climatic Characteristics of the Region]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2023, Issue 2 (142), pp. 174-194. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-2-174-194>.

Введение

Снижение выбросов CO_2 и других парниковых газов является комплексной задачей. Это, прежде всего, рациональное потребление ресурсов, повышение коэффициента полезного действия энергогенерирующих установок, снижение потерь энергии, переход на более экологичные источники энергии. При этом необходимо учитывать не только коэффициент полезного действия (КПД) и эмиссию CO_2 генерирующих установок, но и затраты на их изготовление, на стоимость расходуемых ресурсов, на экологические последствия при авариях и катастрофах. Например, гидроэлектростанции имеют самый высокий КПД, нулевую эмиссию CO_2 , но затраты на сооружение плотин, экологические последствия затопления больших площадей земли, нарушение водного баланса территорий практически нивелируют эффект низких выбросов парниковых газов.

Анализ, проведенный исследователями [1], показал, что наиболее эффективным направлением снижения выбросов парниковых

газов является отказ от электростанций, использующих в качестве топлива каменный, бурый уголь, торф, древесину, нефть и продукты нефтепереработки с преимущественным переходом на возобновляемые источники энергии - ветер, солнечную радиацию, геотермальное тепло.

Необходимо отказаться от низкоэффективных способов получения энергии сжиганием продуктов переработки нефти в локальных установках малой мощности, таких как местные котельные и транспортные средства. При этом быстрый переход на новую безэмиссионную энергетику невозможен, поэтому еще долго в качестве основного источника энергии будут использоваться газовые и атомные электростанции. Газовые электростанции имеют минимальные выбросы CO_2 в сравнении с аналогичными генераторами при минимальной стоимости добычи и транспортировки сжигаемого топлива. Эмиссия, по данным English Energy Returned on Energy Invested (ERoEI), - средний эквивалент углекислого газа на киловатт-час для производства электроэнергии: электростанция на камен-

ном угле - 820 г(CO_2 -экв.)/кВт·ч газовая электростанция с комбинированным циклом - 490 г(CO_2 -экв.)/кВт·ч, электростанция на биомассе - 230 г(CO_2 -экв.)/кВт·ч, фотоэлектрическая система - 41-48 г(CO_2 -экв.)/кВт·ч, атомная электростанция 12 г(CO_2 -экв.)/кВт·ч, ветряная турбина - 11-12 г(CO_2 -экв.)/кВт·ч [2].

В статье [3] приведены результаты анализа технологий утилизации CO_2 и показано, что в зависимости от климатических условий оптимальным в настоящее время является способ утилизации с применением фотосинтеза микроводорослей. Микроводоросли имеют максимальный среди растений потенциал поглощения CO_2 , максимальный прирост биомассы и их эффективность поглощения CO_2 превышает эффективность деревьев [4, 5].

Просто высаживание лесов и культивирование растений не позволит в значительной степени утилизировать CO_2 . Для эффективной декарбонизации необходимо специально выращивать микроводоросли, которые эффективнее поглощают углекислоту не через корневую систему, а всей мембраной клетки. Только при искусственном выращивании можно соблюдать оптимальные режимы для максимального поглощения CO_2 и увеличения биомассы самой водоросли.

Вторым способом по эффективности улавливания и фиксации CO_2 является сжижение газа и закачка в пласт. В статье принята попытка обосновать целесообразность использования той или иной технологии с учетом климатических особенностей региона.

Климат оказывает значительное энергетическое влияние на технологические процессы, на эффективность нагрева и охлаждения, на сохраняемость свойств материалов и ресурс эксплуатации сложных технических систем [6-10].

Климатические особенности процесса утилизации углекислого газа

Общеизвестен факт, что температура на Земле изменяется от среднегодовой $-10^\circ C$

на полюсах, до $+25^\circ C$ на экваторе. Если рассматривать два наиболее эффективных на сегодняшний день процесса утилизации CO_2 из атмосферы: сжижение и закачка в пласт и накопление в виде биомассы микроводорослей, то, учитывая термодинамику процесса, необходимо выбирать то или иное решение в зависимости от климатических особенностей региона.

При утилизации дымовых газов, содержащих до 30 % CO_2 , в Арктике экономически целесообразно сжижать и закачивать в пласт углекислоту, процесс культивирования микроводорослей при таких температурах невозможен. В экваториальной зоне при среднегодовой температуре выше $+20^\circ C$ сжижение при температуре $-70^\circ C$ экономически нецелесообразно, так как при охлаждении объема CO_2 будет выброшено в атмосферу большее его количество. Здесь наиболее эффективно применение технологии наращивания биомассы микроводорослей.

Если рассмотреть эмиссию углекислого газа для процесса получения жидкого CO_2 , то расчеты для промышленно выпускаемой установки [11], позволяющей получать 100 кг жидкого CO_2 в час, затраты электроэнергии (без учета охлаждающей воды) составляют 10 кВт·ч электроэнергии.

Необходимое количество теплоты для охлаждения 100 кг углекислого газа при теплостойкости 0,24 ккал/кг·град составляет 1008 Дж/кг·град, при начальной температуре $+20^\circ C$ $Q = 9,1$ МДж, при $-20^\circ C$ - 5,0 МДж. Энергозатраты установки в первом случае составят 36 и 17 МДж.

Учитывая, что средние выбросы, по данным Международного энергетического агентства, составляют 400 г CO_2 /кВтч, в процессе получения жидкого CO_2 в атмосферу, в зависимости от температуры окружающей среды, будет выброшено 4 кг CO_2 . Если учесть энергозатраты на транспортировку и закачку в пласт, на диффузию CO_2 из пласта, то эмиссия еще увеличится.

В соответствии с данными [12] (таблица 1) можно подсчитать энергозатраты на транспортировку.

Таблица 1. Энергозатраты доставки грузов автотранспортом

Table 1. Energy consumption of cargo delivery by automobile transportation

Транспортные средства	Удельный расход энергии, МДж/100 т·км
Автомобили большой грузоподъемности	108,8
Автомобили средней грузоподъемности	242,8
Автомобили малой грузоподъемности	711,7

По расчетам [13], удельные энергозатраты на трубопроводный транспорт нефти составляют от 4,89 до 5,86 кВт ч/т·км в зависимости от объема подачи. Среднее значение 5,5 кВт ч/т·км = 19,8 МДж/т·км. С учетом данных таблиц 1 и 2, затраты на транспорт 1 т на расстояние 100 км в зависимости от его типа составляют от 108,8 (автомобили большой грузоподъемности) до 507,7 МДж/т (трубопроводный транспорт). Пересчет в эмиссию углекислого газа дает значения 12,8 и 56,2 кг CO_2 /т соответственно. Пересчет в соответствии с [14] дает результат 56 кг CO_2 при доставке на расстояние 100 км 1 т сжиженного CO_2 автомобиле с расходом топлива 25 л/100 км.

Суммарная эмиссия CO_2 при сжижении и транспорте газа к месту закачки без учета потерь и других затрат составляет приблизительно 45 кг CO_2 на 1 т сжиженного CO_2 .

Однако, чем ниже температура окружающей среды, тем ниже затраты на сжижение и транспорт углекислого газа. При высоких температурах окружающей среды непосредственно перед закачкой в скважину, необходимо поставить еще одну холодильную установку, чтобы компенсировать разогрев при транспортировке. Также необходимо учи-

тывать, что улавливание дымовых газов сопряжено с необходимостью очистки газов от твердых примесей (сажи и золы), оксидов серы и азота, воды, что сопряжено с затратами не меньше, чем сам процесс сжижения CO_2 . При сжижении, транспорте и закачке CO_2 образуется большое количество теплоты и влаги, выбрасываемых в атмосферу, что усиливает парниковый эффект.

Установка по утилизации промышленного углекислого газа с помощью жизнедеятельности хлореллы

Хлорелла - одноклеточная зеленая водоросль, широко распространенная в природе в пресной и соленой воде, а также в почве. Скорость размножения при оптимальных условиях: за сутки биомасса этих водорослей увеличивается в 5-10 раз.

Во всем мире сейчас проводится большое количество экспериментов по выращиванию хлореллы именно с целью поглощения углекислого газа из дымовых труб. Так, в статьях [15, 16] исследована зависимость между парциальным давлением растворенного диоксида углерода (P_{CO_2}) и поглощающей способностью суспензии микроводоросли Хлорелла Кесслери.

На основании данных исследований построены зависимости, представленные на рисунках 1-4.

Штаммы микроводорослей

Многие исследования показали высокоэффективные способы получения устойчивых к CO_2 , устойчивых к щелочам и/или термотолерантных микроводорослей с высокой эффективностью фиксации CO_2 . Штаммы микроводорослей могут быть получены путем скрининга окружающей среды, путем случайного мутагенеза или путем генетической модификации.

По данным исследований [17-27] построен график (рисунок 1), на котором приведена эффективность различных штаммов микроводоросли рода Хлорелла.

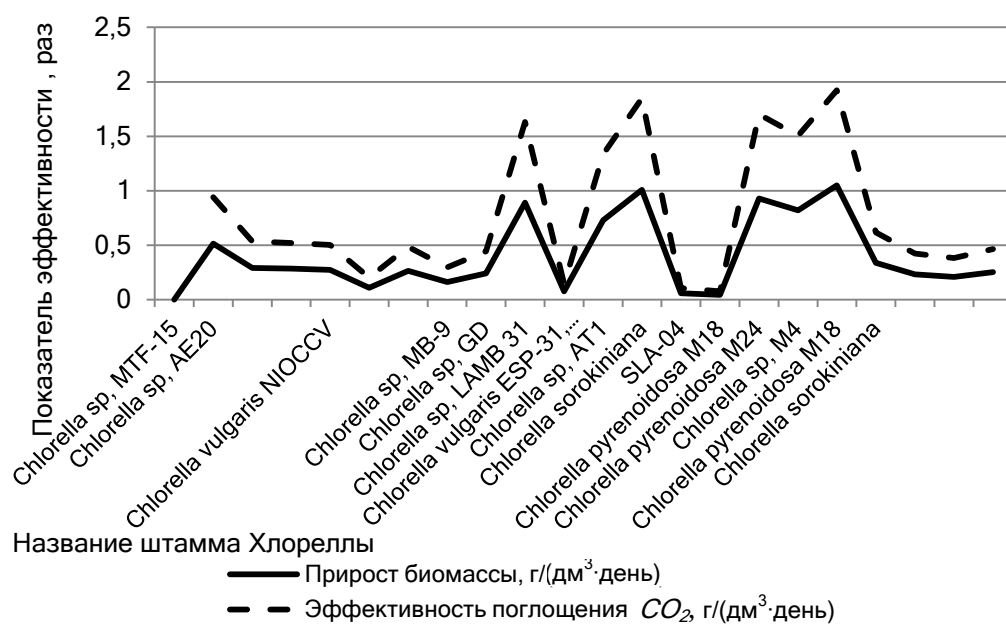


Рисунок 1. Эффективность поглощения CO₂ различными штаммами хлореллы

Figure 1. CO₂ absorption efficiency of different strains of chlorella



Рисунок 2. Эффективность поглощения CO₂ от его содержания в дымовых газах

Figure 2. CO₂ absorption efficiency from its content in flue gases

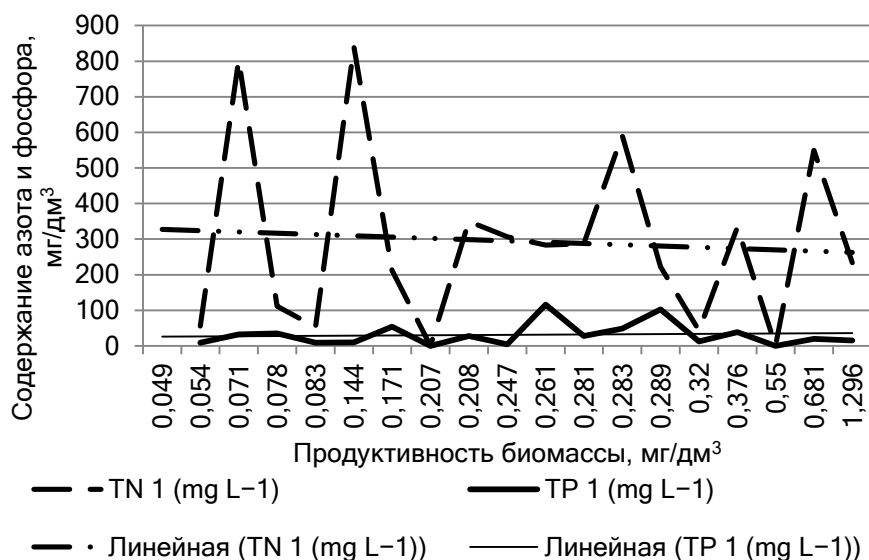


Рисунок 3. Зависимость продуктивности биомассы (улавливания CO_2) от общего содержания азота и фосфора

Figure 3. Dependence of biomass productivity (CO_2 capture) on the total content of nitrogen and phosphorus

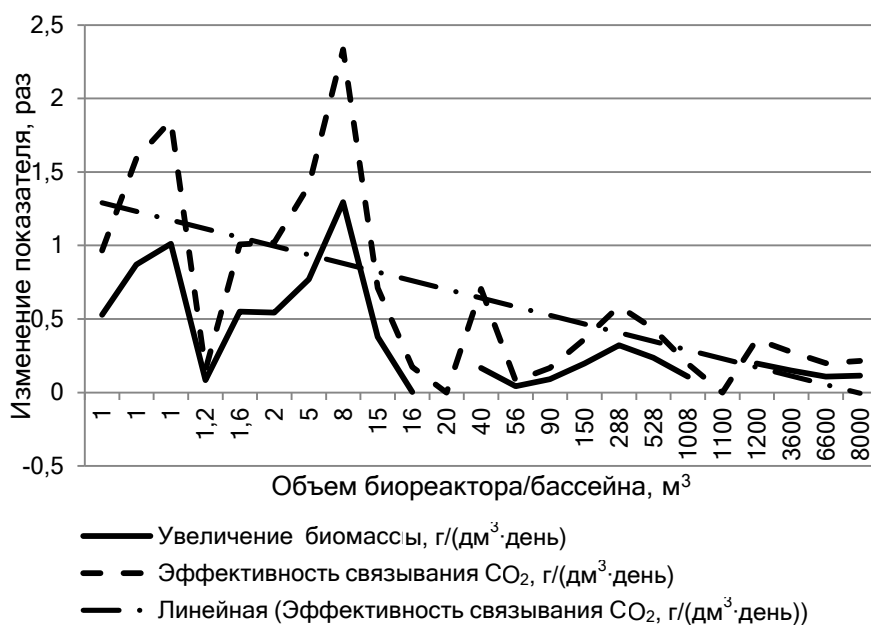


Рисунок 4. Зависимость эффективности связывания CO_2 различными штаммами Хлореллы от объема биореактора и/или пруда

Figure 4. Dependence of CO_2 binding efficiency by various strains of Chlorella on the bioreactor and/or pond volume

Из рисунка 1 видно, что максимальный рост биомассы и поглощение углекислого газа проявляют штаммы *Chlorella sorokiniana*, *Chlorella pyrenoidosa* M18, *Chlorella* sp, M4.

Дымовые газы являются основным источником выбросов CO_2 на Земле. CO_2 в дымовых газах использовался в качестве источника углерода для выращивания микроводорослей в большинстве исследований [28-37]. Однако фиксация CO_2 из дымовых газов микроводорослями имеет ряд вопросов, которые необходимо решить, например, изменение pH культурального бульона [38], перегрев до температур выше 36 °C, попадание твердых частиц и ионов тяжелых металлов, когда микроводоросли не могут адаптироваться к экстремальным условиям культивирования. Поэтому необходимо проводить скрининг микроводорослей на устойчивость к вредным факторам. Видно, что максимальную эффективность проявляют штаммы *Chlorella sorokiniana*, *Chlorella pyrenoidosa* M18, *Chlorella* sp, M4, специально выведенные для данных условий культивирования. На рисунке 2 приведена эффективность различных штаммов хлореллы при поглощении углекислого газа из дымовых газов.

Из анализа рисунка 2 видно, что эффективность поглощения CO_2 имеет максимум - 8 % и оптимальная концентрация находится в пределах 12-15 %.

В 2015 г. в Докладе Организации Объединенных Наций о мировом развитии водных ресурсов отмечалось, что имеющиеся ресурсы пресной воды во всем мире сократятся на 40 % к 2030 г. Однако более 80 % сточных вод в мире сбрасывается в окружающую среду без очистки. Модель управления сточными водами должна быть изменена с «очистки и удаления» на «повторное использование, рециркуляцию и рекуперацию ресурсов». Поэтому использование сточных вод для выращивания микроводорослей является тенденцией технологического развития [39-41]. Источники сточных вод можно в основном разделить на три категории: сельскохозяйственные, муниципальные сточные воды и промышленные сточные воды. Как

показано в таблице 2, показатели роста и продуктивности биомассы микроводорослей, культивируемых в разных типах сточных вод, были разными, поскольку химическое потребление кислорода (ХПК), содержание общего азота (TN), общего фосфора (TP) и специфических неорганических веществ в сточных водах явно различалось [42-44].

Из рисунка 3 видно, что для нормальной жизнедеятельности водорослей достаточно минимального содержания азота и фосфора, превышение их содержания не приводит к гибели водорослей.

Влияние освещенности на рост микроводорослей

Из-за фотосинтеза для роста микроводорослей свет является наиболее важным параметром. Двумя основными факторами освещения при выращивании микроводорослей являются интенсивность света и длина волны света. Поскольку микроводоросли сами по себе блокируют прохождение света, интенсивность света резко уменьшается с расстоянием через поверхность, что приводит к снижению скорости роста микроводорослей [45]. При удельной интенсивности света 400 мкмоль $m^{-2} s^{-1}$ продуктивность биомассы микроводорослей штамма *Chlorella* sp. в фотобиореакторах (PBRs) была примерно в 2 раза выше при 0,518 г Л-1 сут⁻¹, чем у растений, выращенных в открытых прудах с естественным освещением (в тропическом климате) [46]. Рост микроводорослей хлореллы увеличивался при непрерывном освещении с использованием светодиода (LED) при оптимальной интенсивности света без недостатка световой энергии [47, 48]. Был исследован источник света для автотрофного культивирования *Chlorella vulgaris*, и результаты показали, что красный светодиодный свет (630-665 нм) приводил к появлению небольших клеток с активными делениями, в то время как светодиодное освещение синим светом (430-465 нм) приводило к значительному увеличению размера клеток [49]. Смешанная длина волны светодиодного света с красным

и синим светодиодным светом (например, соотношение красный : синий составляет 5 : 5, также влияет и усиливает рост микроводорослей, включая *Scenedesmus obliquus*, *Neochloris oleoabundans* и *Chlorella vulgaris* [50].

Влияние pH

pH культурального бульона влияет на активность ферментов, связанных с метаболизмом микроводорослей, и эффективность поглощения ионов микроводорослями, что, в свою очередь, влияет на рост микроводорослей и эффективность фиксации ими углерода [51, 52]. Оптимальный pH для роста варьируется у разных видов микроводорослей, и в целом оптимальный pH нейтрален для большинства микроводорослей [53]. Дымовые газы обычно содержат высокие концентрации CO_2 , NO_x и SO_2 [54]. Когда микроводоросли непосредственно аэрировали дымовым газом, содержащим 10-30 % CO_2 , pH культурального бульона мог быть снижен до 5,5 [55]. Когда микроводоросли аэрировали дымовым газом, содержащим SO_2 при 100-250 ppm, pH культурального бульона снижался до 2,5-3,5 с образованием бисульфита (HSO_3^-), сульфита (SO_3^{2-}) и сульфата (SO_4^{2-}). Если дымовой газ непосредственно аэрируется в культуральный бульон микроводорослей без разбавления, избыток CO_2 дымового газа будет выброшен обратно в атмосферу. Чтобы уменьшить выброс CO_2 обратно в атмосферу, CO_2 , улавливаемый из дымовых газов, аэрируемых в щелочную среду, легко преобразуется в HCO_3^- , который растворяется в воде и используется для роста микроводорослей. Растворимость CO_2 в воде низкая, но содержание CO_2 в культуральном бульоне может быть увеличено в щелочных условиях для дальнейшего повышения эффективности использования CO_2 микроводорослями [56]. Кроме того, постепенное повышение pH в культуре микроводорослей желательно для уменьшения микробного разнообразия и хорошо подходит для выращивания микроводорослей на открытом воздухе [57].

Влияние температуры

Оптимальный температурный диапазон для роста микроводорослей обычно составляет 15-26 °C [58]. В соответствии с исследованиями [59], штамм *Chlorella vulgaris* ИФР № C-111 растет при температуре в пределах 26-36 °C.

Активность рибулозо-1,5-бисфосфат-карбоксилазы/оксигеназы (Rubisco) может быть основным местом повреждения при повышенной температуре, вызывающей снижение эффективности фотосинтеза [60]. Напротив, наблюдалось не только снижение скорости метаболизма микроводорослей, но и снижение растворимости CO_2 в культуральном бульоне. Поэтому оптимальная температура для роста варьируется у разных видов микроводорослей. Температура дымовых газов, как правило выше 120 °C. В условиях тропического и теплого климата дымовые газы нуждаются в охлаждении, в то время как в холодном и умеренном климате газы позволяют поддерживать температуру воды в оптимальном режиме [61]. Солнечный свет дополнительно разогревает культуральный бульон. Беше и др. указали, что для поддержания температуры бульона в колонне PBRs на уровне или ниже 25 °C необходимо отводить 18 000 ГДж тепловой энергии в год на 1 га [62].

Система культивирования микроводорослей

Обычно используются открытые пруды с перемешиванием и транспортировкой и биореакторы систем культивирования микроводорослей. Обобщенная информация из источников [62-73] приведена на рисунке 4.

Исследования по фиксации CO_2 микроводорослями, используемыми в открытых прудах и PBR, представлены на рисунке 4. Производство биомассы микроводорослей, получаемой из открытых прудов, является более эффективным, чем 90 % мирового производства биомассы [74]. Наиболее характерными особенностями открытых прудов являются простота конструкции, низкая стои-

мость и простота эксплуатации [75, 76]. Однако недостатки открытых прудов также очевидны, такие как большая площадь, трудности в управлении эксплуатацией, нестабильные условия выращивания, высокие потери на испарение, легкое загрязнение и снижение интенсивности света со средней глубиной.

*Предлагаемое решение по удалению
 CO_2 из дымовых газов*

Известно, что в течение 5 сут увеличение биомассы происходит в 11 раз, через 15 сут достигает максимума и увеличивается в 30 раз. Иными словами, при содержании в воде 5 г хлореллы через 5 сут будет 55 г, через 15 сут - 150 г [77].

При эмиссии среднестатистической ТЭЦ 500 г CO_2 на 1 кВт·ч электроэнергии, ТЭЦ мощностью 1 ГВт выбрасывает в атмосферу 500 кг/ч углекислого газа. Эффективность фотосинтеза *Chlorella vulgaris* составляет 5 %, то есть утилизация 500 кг углекислого газа должна осуществляться 10000 кг микроводоросли. Учитывая динамику роста, необходимо, чтобы количество хлореллы всегда превышало содержание CO_2 . Если при утилизации 1 кг углекислого газа образуется 2 кг хлореллы, то в 1 ч должно образовываться до 1000 кг микроводоросли [78-80].

Для создания нормальной освещенности слоя воды, содержащей водоросль, его толщина не должен превышать 10 см. Следовательно, слой водоросли в лотке 0,1 м при объеме водоросли (5 г/л·10000 кг) 200 м³ должен составлять 2000 м² - 0,2 гектара - площадь поверхности лотков с хлореллой. В лотках необходимо постоянное перемешивание суспензии и организация ее постоянного движения к точке сбора избытка биомассы, что может быть осуществлено направлением потока углекислого газа под углом 45° в направлении сбора, а также дополнительными скребками.

На темное время суток суспензия хлореллы требует дополнительного освещения УФ-лампами с потоком света не менее 10 клк, т.е. на каждый квадратный метр необ-

ходимо установить светодиодную лампу мощностью 100 Вт, суммарная мощность должна составить 200 кВт. Дымосос и компрессор для закачивания дымовых газов в лотки имеют суммарную мощность 10 кВт, блок осушки и очистки имеет мощность 20 кВт.

Таким образом, суммарная мощность установки по утилизации CO_2 составит максимум 230 кВт, или эмиссия CO_2 составит 115 кг CO_2 при поглощении 1000 кг CO_2 - эффективность 85 %.

На рисунке 5 представлены основные узлы установки по биоутилизации CO_2 хлореллой.

В соответствии с предлагаемой технологией, дымовые газы из дымовой трубы Т-1 через трубы с задвижками 11 и датчиками температуры 5, дымососом Д-1 подаются в блок очистки газов от пыли и сажи, окислов азота и серы О-1, после чего через систему капилляров очищенный газ подается в систему лотков Л-1. В лотках под действием ультрафиолета избыток углекислого газа за счет реакций фотосинтеза превращается в биомассу хлореллы. Избыток хлореллы посредством скребков транспортируется в блок отжима и осушки хлореллы Б-1, а избыток углекислого газа нейтрализуется кальциевым молоком СаОН.

При использовании данной схемы можно утилизировать весь выделяемый в атмосферу углекислый газ без его дополнительной эмиссии при выработке энергии на работу блоков О-1, Б-1. Утилизация углекислого газа происходит за счет фотосинтеза, и в дополнение получается товарный продукт для животноводства *суспензия хлореллы* - высококалорийный, содержащий до 60 % белка субстрат. Избыток воды, полученный после отделения хлореллы в Б-1, представляет собой слабоминерализованную воду, насыщенную естественным биоцидным ферментом хлореллы, и может быть использована для подпитки водооборотных систем предприятия [81].

Избыток тепла дымовых газов будет использован на нагрев воды в лотках Л-1.

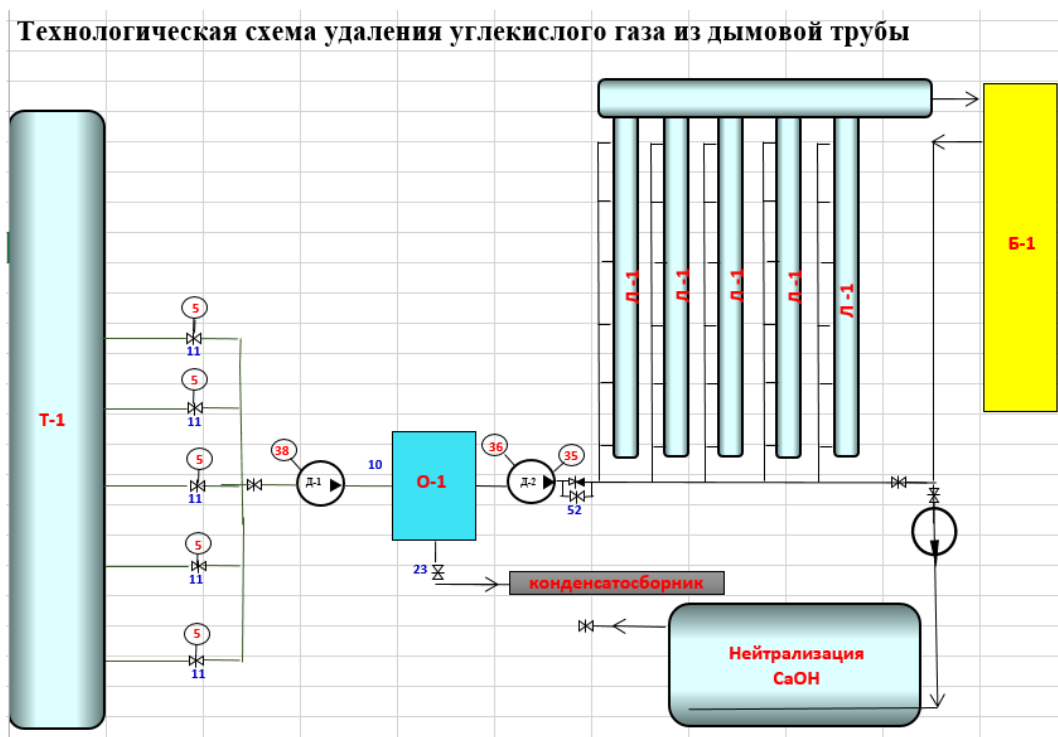


Рисунок 5. Схема утилизации CO_2

Figure 5. Scheme of CO_2 utilization

Выводы

В стране имеется большое количество квалифицированных специалистов по выращиванию микроводорослей для поглощения CO_2 , несмотря на кажущуюся сложность этого метода в сравнении с методом закачивания его в пласт. Поскольку поглощение микроводорослью рода хлорелла происходит с использованием энергии солнечного света, то при его достаточном количестве обходятся без выбросов дополнительного количества CO_2 . Эта технология, как никакая другая, за-

висит от климатических условий: в климате со среднегодовой температурой ниже $0^\circ C$ культивирование водоросли нецелесообразно, здесь единственно приемлемая технология - это сжижение и закачка в пласт CO_2 .

В умеренном климате, в котором расположено наибольшее количество предприятий и городов Европы и России, необходимо чередовать технологии, то есть в летнее время культивировать большие площади хлореллы, а в зимний - уменьшать площадь и часть CO_2 закачивать в хранилище.

Список источников

1. Icha P. Climate Change 45/2021. Entwicklung der Spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des Deutschen Strommix in den Jahren 1990-2020. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2021. 29 p. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/>

References

1. Icha P. Climate Change 45/2021. Entwicklung der Spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des Deutschen Strommix in den Jahren 1990-2020. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt, 2021. 29 p. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/>

medien/5750/publikationen/2021-05-26_cc-45-2021_strommix_2021_0.pdf (дата обращения: 07.10.2022).

2. Energy Returned on Energy Invested // Deru.Abcdef.Wiki. URL: https://deru.abcdef.wiki/wiki/Spezifische_Kohlendioxid-Emission (дата обращения: 07.10.2022).

3. Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (дата обращения: 07.10.2022).

4. Рубин Е.Л. Физиология растений: В 2 т. М.: Сов. наука, 1954. Т. 1. 356 с.

5. Telegram-канал президента НАНГС // Telegram. URL: <https://t.me/VBKhaikov> (дата обращения: 07.10.2022).

6. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (Обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47-58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.

7. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 47-58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.

8. Лаптев А.Б., Голубев А.В., Киреев Д.М., Николаев Е.В. К вопросу биодеструкции полимерных материалов в природных средах (Обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 9 (81). С. 100-107. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1466 (дата обращения: 07.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-100-107.

9. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным воздействием статической нагрузки и климата (Обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). С. 70-80. DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.

10. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Куршев Е.В., Горяшник Ю.С. Особенности биодеструкции термопластов на основе полиэфигов в различных климатических зонах // Труды ВИАМ. 2019. № 7. С. 84-91. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1441 (дата обращения: 07.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-84-91.

11. Tourova T.P., Sokolova D.S., Nazina T.N., Grouzdev D.S., Laptev A.B. Phylogenetic Diversity of Microbial Communities from the Surface of Polyethylene Terephthalate Materials Exposed to Different Water Environments // Microbiology. 2020. Vol. 89. P. 96-106. DOI: 10.1134/S0026261720010154.

12. Энергетические показатели различных видов транспорта // Lokomo. URL: <https://lokomoto.ru/info/energeticheskie-pokazateli-razlichnyh-vidov-transporta.html> (дата обращения: 07.10.2022).

medien/5750/publikationen/2021-05-26_cc-45-2021_strommix_2021_0.pdf (accessed 07.10.2022).

2. Energy Returned on Energy Invested. Deru.Abcdef.Wiki. Available at: https://deru.abcdef.wiki/wiki/Spezifische_Kohlendioxid-Emission (accessed 07.10.2022).

3. Federal'nyi zakon ot 02.07.2021 № 296-FZ «Ob ogranichenii vybrosov parnikovyykh gazov» [Federal Law No. 296-FZ of 02.07.2021 «On Limiting Greenhouse Gas Emissions»]. Ofitsial'nyi internet-portal pravovoi informatsii. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (accessed 07.10.2022). [in Russian].

4. Rubin E.L. *Fiziologiya rastenii: V 2 T* [Plant Physiology: in 2 Volumes]. Moscow, Sov. Nauka Publ., 1954. Vol. 1. 356 p. [in Russian].

5. Telegram-kanal prezidenta NANGS [President's Telegram Channel NANGS]. Telegram. Available at: <https://t.me/VBKhaikov> (accessed 07.10.2022). [in Russian].

6. Kablov E.N., Startsev V.O. Sistemnyi analiz vliyaniya klimata na mekhanicheskie svoystva polimernykh kompozitsionnykh materialov po dannym otechestvennykh i zarubezhnykh istochnikov (Obzor) [Systematical Analysis of the Climatic Influence on Mechanical Properties of the Polymer Composite Materials Based on Domestic and Foreign Sources (Review)]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii - Aviacionnye Materialy and Tehnologii*, 2018, No. 2 (51), pp. 47-58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58. [in Russian].

7. Kablov E.N., Startsev V.O. Izmerenie i prognozirovaniye temperatury obraztsov materialov pri eksponirovani v razlichnykh klimaticheskikh zonakh [Measurement and Forecasting of Materials Samples' Temperature During Weathering in Different Climatic Zones]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii - Aviacionnye Materialy and Tehnologii*, 2020, No. 4 (61), pp. 47-58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58. [in Russian].

8. Laptev A.B., Golubev A.V., Kireev D.M., Nikolaev E.V. K voprosu biodestruktsii polimernykh materialov v prirodnykh sredakh (Obzor) [To the Question of Biodegradation of Polymeric Materials in Natural Environments (Review)]. *Trudy VIAM - Proceedings of VIAM*, 2019, No. 9 (81), pp. 100-107. Available at: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1466 (accessed 07.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-100-107. [in Russian].

9. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaksatsiya polimernykh kompozitsionnykh materialov pod dlitel'nym vozdeistviem staticheskoi nagruzki i klimata (Obzor). Chast' 1. Svyazuyushchie [Relaxation of Polymer Composite Materials Under the Prolonged Action of Static Load and Climate (Review) Part 1. Binders]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii - Aviacionnye Materialy and Tehnologii*, 2021, No. 4 (65), pp. 70-80. DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80. [in Russian].

10. Laptev A.B., Nikolaev E.V., Kurshev E.V., Goryashnik Yu.S. Osobennosti biodestruktsii

13. Методика оценки эффективности использования электроэнергии на перекачку нефти в условиях снижения объемов перекачки нефти. Уфа.: Институт механики УНЦ РАН, 1999. 35 с.

14. Распоряжение Минприроды России от 16.04.2015 № 15-р «Об утверждении методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации» // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420278225> (дата обращения: 07.10.2022).

15. Livansky K., Doucha J. Utilization of Carbon Dioxide by *Chlorella Kessleri* in Outdoor Open Thin-Layer Culture Units // *Algological Studies*. 2005. No. 116 (1). P. 201-212. DOI: 10.1127/1864-1318/2005/0116-0201.

16. El-Sayed A.B., Battah M.G., El-Sayed E.W. Utilization Efficiency of Artificial Carbon Dioxide and Corn Steam Liquor by *Chlorella Vulgaris* // *Biolife*. 2015. Vol. 3, Issue 2. P. 391-403.

17. Chen H., Wang J., Zheng Y., Zhan J., He C., Wang Q. Algal Biofuel Production Coupled Bioremediation Of Biomass Power Plant Wastes Based on *Chlorella* sp. C2 Cultivation // *Applied Energy*. 2018. Vol. 211. P. 296-305. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.11.058.

18. Yadav G., Karemore A., Dash S.K., Sen R. Performance Evaluation of A Green Process for Microalgal CO₂ Sequestration in Closed Photobioreactor Using Flue Gas Generated In-Situ // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 191. P. 399-406. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.04.040.

19. Kandimalla P., Desi S., Vurimindi H. Mixotrophic Cultivation of Microalgae Using Industrial Flue Gases for Biodiesel Production // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23. P. 9345-9354. DOI: 10.1007/s11356-015-5264-2.

20. Kuo C.M., Jian J.F., Lin T.H., Chang Y.B., Wan X.H., Lai J.T., Chang J.S., Lin C.S. Simultaneous Microalgal Biomass Production and CO₂ Fixation by Cultivating *Chlorella* sp. GD with Aquaculture Wastewater and Boiler Flue Gas // *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 221. P. 241-250. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.09.014.

21. Duarte J.H., Fanka L.S., Costa J.A.V. Utilization of Simulated Flue Gas Containing CO₂, SO₂, NO and Ash for *Chlorella Fusca* Cultivation // *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 214. P. 159-165. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.04.078.

22. Garcia-Cubero R., Moreno-Fernandez J., Garcia-Gonzalez M. Potential of *Chlorella vulgaris* to Abate Flue Gas // *Waste Biomass Valorization*. 2017. Vol. 9, Issue 8. P. 2015-2019. DOI: 10.1007/s12649-017-9987-9

23. Kao C.Y., Chen T.Y., Chang Y.B., Chiu T.W., Lin H.Y., Chen C.D., Chang J.S., Lin C.S. Utilization of Carbon Dioxide in Industrial Flue Gases for the Cultivation of Microalga *Chlorella* sp. // *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 166. P. 485-493. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.05.094.

termoplastov na osnove poliefirov v razlichnykh klimaticheskikh zonakh [Features of Biodegradation of Thermoplastics Based on Polyesters in Different Climatic Zones]. *Trudy VIAM - Proceedings of VIAM*, 2019, No. 7, pp. 84-91. Available at: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1441 (accessed 07.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-84-91. [in Russian].

11. Tourova T.P., Sokolova D.S., Nazina T.N., Grouzdev D.S., Laptev A.B. Phylogenetic Diversity of Microbial Communities from the Surface of Polyethylene Terephthalate Materials Exposed to Different Water Environments. *Microbiology*, 2020, Vol. 89, pp. 96-106. DOI: 10.1134/S0026261720010154.

12. Energeticheskie pokazateli razlichnykh vidov transporta [Energy Performance of Various Modes of Transport]. *Lokomo*. Available at: <https://lokom.ru/info/energeticheskie-pokazateli-razlichnyh-vidov-transporta.html> (accessed 07.10.2022). [in Russian].

13. *Metodika otsenki effektivnosti ispol'zovaniya elektroenergii na perekachku nefi v usloviyakh snizheniya ob'emov perekachki nefi* [Methodology for Evaluating the Efficiency of Using Electricity for Oil Pumping in the Conditions of Decreasing Oil Pumping Volumes]. Ufa, Institut mekhaniki UNTs RAN Publ., 1999. 35 p. [in Russian].

14. *Rasporyazhenie Minprirody Rossii ot 16.04.2015 № 15-r «Ob utverzhdenii metodicheskikh rekomendatsii po provedeniyu dobrovol'noi inventarizatsii ob'ema vybrosov parnikovyykh gazov v sub"ektakh Rossiiskoi Federatsii»* [Decree of the Ministry of Natural Resources of Russia of 16.04.2015 No. 15-r «On Approval of Guidelines for Conducting a Voluntary Inventory of Greenhouse Gas Emissions in the Constituent Entities of the Russian Federation»]. Elektronnyi fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/420278225> (accessed 07.10.2022). [in Russian].

15. Livansky K., Doucha J. Utilization of Carbon Dioxide by *Chlorella Kessleri* in Outdoor Open Thin-Layer Culture Units. *Algological Studies*, 2005, No. 116 (1), pp. 201-212. DOI: 10.1127/1864-1318/2005/0116-0201.

16. El-Sayed A.B., Battah M.G., El-Sayed E.W. Utilization Efficiency of Artificial Carbon Dioxide and Corn Steam Liquor by *Chlorella Vulgaris*. *Biolife*, 2015, Vol. 3, Issue 2, pp. 391-403.

17. Chen H., Wang J., Zheng Y., Zhan J., He C., Wang Q. Algal Biofuel Production Coupled Bioremediation Of Biomass Power Plant Wastes Based on *Chlorella* sp. C2 Cultivation. *Applied Energy*, 2018, Vol. 211, pp. 296-305. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.11.058.

18. Yadav G., Karemore A., Dash S.K., Sen R. Performance Evaluation of A Green Process for Microalgal CO₂ Sequestration in Closed Photobioreactor Using Flue Gas Generated In-Situ. *Bioresource Technology*, 2015, Vol. 191, pp. 399-406. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.04.040.

19. Kandimalla P., Desi S., Vurimindi H.

24. Ахияров Р.Ж., Латыпов О.Р. Расчет устройств для подавления жизнедеятельности сульфатовосстанавливающих бактерий // Нефтегазовое дело. 2008. Т. 6, № 1. С. 234-238.
25. Praveenkumar R., Kim B., Choi E., Lee K., Park J.Y., Lee J.S., Lee Y.C., Oh Y.K. Improved Biomass and Lipid Production in a Mixotrophic Culture of *Chlorella* sp. KR-1 with Addition of Coal-Fired Flue-Gas // *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 171. P. 500-505. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.08.112.
26. Cheng D., Li X., Yuan Y., Zhao Q. Kinetic Model for Effects of Simulated flue Gas Onto Growth Profiles of *Chlorella* sp. AE10 and *Chlorella* sp. Cv // *Biotechnology and Applied Biochemistry*. 2020. Vol. 67. P. 783-789. DOI: 10.1002/bab.1829.
27. Kumar K., Banerjee D., Das D. Carbon Dioxide Sequestration from Industrial Flue Gas by *Chlorella Sorokiniana* // *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 152. P. 225-233. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.10.098.
28. Bhola V., Swalaha F.M., Nasr M., Bux F. Fuzzy Intelligence for Investigating the Correlation Between Growth Performance and Metabolic Yields of a *Chlorella* sp. Exposed to Various Flue Gas Schemes // *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 243. P. 1078-1086. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.07.031.
29. Li D., Wang L., Zhao Q., Wei W., Sun Y. Improving High Carbon Dioxide Tolerance and Carbon Dioxide Fixation Capability of *Chlorella* sp. by Adaptive Laboratory Evolution // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 185. P. 269-275. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.03.011.
30. Jain D., Ghonse S.S., Trivedi T., Fernandes G.L., Menezes L.D., Damare S.R., Mamatha S., Kumar S., Gupta V. CO₂ Fixation and Production of Biodiesel by *Chlorella Vulgaris* NIOCCV Under Mixotrophic Cultivation // *Bioresource Technology*. 2019. Vol. 273. P. 672-676. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.09.148.
31. Kao C.Y., Chiu S.Y., Huang T.T., Dai L., Hsu L.K., Lin C.S. Ability of a Mutant Strain of the Microalga *Chlorella* sp. to Capture Carbon Dioxide for Biogas Upgrading // *Applied Energy*. 2012. Vol. 93. P. 176-183. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.12.082.
32. Li J., Tang X., Pan K., Zhu B., Li Y., Ma X., Zhao Y. The Regulating Mechanisms of CO₂ Fixation and Carbon Allocations of Two *Chlorella* sp. Strains in Response to High CO₂ Levels // *Chemosphere*. 2020. Vol. 247. Article No. 125814. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.125814.
33. Chou H.H., Su H.Y., Song X.D., Chow T.J., Chen C.Y., Chang J.S., Lee T.M. Isolation and Characterization of *Chlorella* sp. Mutants with Enhanced Thermo- and CO₂ Tolerances for CO₂ Sequestration and Utilization of Flue Gases // *Biotechnology for Biofuels*. 2019. Vol. 12. Article No. 251.
34. Vadlamani A., Viamajala S., Pendyala B., Varanasi S. Cultivation of Microalgae at Extreme Alkaline pH Conditions: A Novel Approach for Biofuel Production // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2017. Vol. 5. P. 7284-7294. DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b01534.
- Mixotrophic Cultivation of Microalgae Using Industrial Flue Gases for Biodiesel Production. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, Vol. 23, pp. 9345-9354. DOI: 10.1007/s11356-015-5264-2.
20. Kuo C.M., Jian J.F., Lin T.H., Chang Y.B., Wan X.H., Lai J.T., Chang J.S., Lin C.S. Simultaneous Microalgal Biomass Production and CO₂ Fixation by Cultivating *Chlorella* sp. GD with Aquaculture Wastewater and Boiler Flue Gas. *Bioresource Technology*, 2016, Vol. 221, pp. 241-250. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.09.014.
21. Duarte J.H., Fanka L.S., Costa J.A.V. Utilization of Simulated Flue Gas Containing CO₂, SO₂, NO and Ash for *Chlorella Fusca* Cultivation. *Bioresource Technology*, 2016, Vol. 214, pp. 159-165. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.04.078.
22. Garcia-Cubero R., Moreno-Fernandez J., Garcia-Gonzalez M. Potential of *Chlorella vulgaris* to Abate Flue Gas. *Waste Biomass Valorization*, 2017, Vol. 9, Issue 8, pp. 2015-2019. DOI: 10.1007/s12649-017-9987-9
23. Kao C.Y., Chen T.Y., Chang Y.B., Chiu T.W., Lin H.Y., Chen C.D., Chang J.S., Lin C.S. Utilization of Carbon Dioxide in Industrial Flue Gases for the Cultivation of Microalga *Chlorella* sp. *Bioresource Technology*, 2014, Vol. 166, pp. 485-493. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.05.094.
24. Akhiyarov R.Zh., Latypov O.R. Raschet ustroystv dlya podavleniya zhiznedeyatel'nosti sulfatvosstanavlivayushchikh bakterii [Calculation of Devices for Suppressing the Vital Activity of Sulfate-Reducing Bacteria]. *Neftgazovoe delo - Petroleum Engineering*, 2008, Vol. 6, No. 1, pp. 234-238. [in Russian].
25. Praveenkumar R., Kim B., Choi E., Lee K., Park J.Y., Lee J.S., Lee Y.C., Oh Y.K. Improved Biomass and Lipid Production in a Mixotrophic Culture of *Chlorella* sp. KR-1 with Addition of Coal-Fired Flue-Gas. *Bioresource Technology*, 2014, Vol. 171, pp. 500-505. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.08.112.
26. Cheng D., Li X., Yuan Y., Zhao Q. Kinetic Model for Effects of Simulated flue Gas Onto Growth Profiles of *Chlorella* sp. AE10 and *Chlorella* sp. Cv. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 2020, Vol. 67, pp. 783-789. DOI: 10.1002/bab.1829.
27. Kumar K., Banerjee D., Das D. Carbon Dioxide Sequestration from Industrial Flue Gas by *Chlorella Sorokiniana*. *Bioresource Technology*, 2014, Vol. 152, pp. 225-233. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.10.098.
28. Bhola V., Swalaha F.M., Nasr M., Bux F. Fuzzy Intelligence for Investigating the Correlation Between Growth Performance and Metabolic Yields of a *Chlorella* sp. Exposed to Various Flue Gas Schemes. *Bioresource Technology*, 2017, Vol. 243, pp. 1078-1086. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.07.031.
29. Li D., Wang L., Zhao Q., Wei W., Sun Y. Improving High Carbon Dioxide Tolerance and Carbon Dioxide Fixation Capability of *Chlorella* sp. by Adaptive Laboratory Evolution. *Bioresource Technology*, 2015, Vol. 185, pp. 269-275. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.03.011.

35. Vadlamani A., Pendyala B., Viamajala S., Varanasi S. High Productivity Cultivation of Microalgae without Concentrated CO₂ Input // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2019. Vol. 7. P. 1933-1943. DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b04094.
36. Sachdeva N., Gupta R.P., Mathur A.S., Tuli D.K. Enhanced Lipid Production in Thermo-Tolerant Mutants of *Chlorella Pyrenoidosa* NCIM 2738 // *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 221. P. 576-587. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.09.049.
37. Lee T.M., Tseng Y.F., Cheng C.L., Chen Y.C., Lin C.S., Su H.Y., Chow T.J., Chen C.Y., Chang J.S. Characterization of a Heat-Tolerant *Chlorella* sp. GD Mutant with Enhanced Photosynthetic CO₂ Fixation Efficiency and its Implication as Lactic Acid Fermentation Feedstock // *Biotechnology for Biofuels*. 2017. Vol. 10. Article No. 214. DOI: 10.1186/s13068-017-0905-y.
38. Mehta P., Rani R., Gupta R., Mathur A.S., Puri S.K. Biomass and Lipid Production of a Novel Freshwater Thermo-Tolerant Mutant Strain of *Chlorella Pyrenoidosa* NCIM 2738 in Seawater Salinity Recycled Medium // *Algal Research*. 2018. Vol. 36. P. 88-95. DOI: 10.1016/j.algal.2018.10.015.
39. Varshney P., Beardall J., Bhattacharya S., Wangikar P.P. Isolation and Biochemical Characterisation of Two Thermophilic Green Algal Species - *Asterarcys Quadricellulare* and *Chlorella Sorokiniana*, Which are Tolerant to High Levels of Carbon Dioxide and Nitric Oxide // *Algal Research*. 2018. Vol. 30. P. 28-37. DOI: 10.1016/j.algal.2017.12.006.
40. Chiu S.Y., Kao C.Y., Huang T.T., Lin C.J., Ong S.C., Chen C.D., Chang J.S., Lin C.S. Microalgal Biomass Production and On-Site Bioremediation of Carbon Dioxide, Nitrogen Oxide and Sulfur Dioxide from Flue Gas Using *Chlorella* sp. Cultures // *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102. P. 9135-9142. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.06.091.
41. Shahid A., Malik S., Zhu H., Xu J., Nawaz M.Z., Nawaz S., Alam A., Mehmood M.A. Cultivating Microalgae in Wastewater for Biomass Production, Pollutant Removal, and Atmospheric Carbon Mitigation; a Review // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 704. Article No. 135303. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135303.
42. Moreno-Garcia L., Garipey Y., Bourdeau N., Barnabe S., Raghavan G. Optimization of the Proportions of Four Wastewaters in a Blend for the Cultivation of Microalgae Using a Mixture Design // *Bioresource Technology*. 2019. Vol. 283. P. 168-173. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.03.067.
43. Hussain F., Shah S.Z., Ahmad H., Abubshait S.A., Abubshait H.A., Laref A., Manikandan A., Kusuma H.S., Iqbal M. Microalgae an Ecofriendly and Sustainable Wastewater Treatment Option: Biomass Application in Biofuel and Bio-Fertilizer Production // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 137. Article No. 110603. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110603.
44. Kuo C.M., Chen T.Y., Lin T.H., Kao C.Y., Lai J.T., Chang J.S., Lin C.S. Cultivation of *Chlorella*
30. Jain D., Ghonse S.S., Trivedi T., Fernandes G.L., Menezes L.D., Damare S.R., Mamatha S., Kumar S., Gupta V. CO₂ Fixation and Production of Biodiesel by *Chlorella Vulgaris* NIOCCV Under Mixotrophic Cultivation. *Bioresource Technology*, 2019, Vol. 273, pp. 672-676. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.09.148.
31. Kao C.Y., Chiu S.Y., Huang T.T., Dai L., Hsu L.K., Lin C.S. Ability of a Mutant Strain of the Microalga *Chlorella* sp. to Capture Carbon Dioxide for Biogas Upgrading. *Applied Energy*, 2012, Vol. 93, pp. 176-183. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.12.082.
32. Li J., Tang X., Pan K., Zhu B., Li Y., Ma X., Zhao Y. The Regulating Mechanisms of CO₂ Fixation and Carbon Allocations of Two *Chlorella* sp. Strains in Response to High CO₂ Levels. *Chemosphere*, 2020, Vol. 247, Article No. 125814. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.125814.
33. Chou H.H., Su H.Y., Song X.D., Chow T.J., Chen C.Y., Chang J.S., Lee T.M. Isolation and Characterization of *Chlorella* sp. Mutants with Enhanced Thermo- and CO₂ Tolerances for CO₂ Sequestration and Utilization of Flue Gases. *Biotechnology for Biofuels*, 2019, Vol. 12, Article No. 251.
34. Vadlamani A., Viamajala S., Pendyala B., Varanasi S. Cultivation of Microalgae at Extreme Alkaline pH Conditions: A Novel Approach for Biofuel Production. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2017, Vol. 5, pp. 7284-7294. DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b01534.
35. Vadlamani A., Pendyala B., Viamajala S., Varanasi S. High Productivity Cultivation of Microalgae without Concentrated CO₂ Input. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2019, Vol. 7, pp. 1933-1943. DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b04094.
36. Sachdeva N., Gupta R.P., Mathur A.S., Tuli D.K. Enhanced Lipid Production in Thermo-Tolerant Mutants of *Chlorella Pyrenoidosa* NCIM 2738. *Bioresource Technology*, 2016, Vol. 221, pp. 576-587. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.09.049.
37. Lee T.M., Tseng Y.F., Cheng C.L., Chen Y.C., Lin C.S., Su H.Y., Chow T.J., Chen C.Y., Chang J.S. Characterization of a Heat-Tolerant *Chlorella* sp. GD Mutant with Enhanced Photosynthetic CO₂ Fixation Efficiency and its Implication as Lactic Acid Fermentation Feedstock. *Biotechnology for Biofuels*, 2017, Vol. 10, Article No. 214. DOI: 10.1186/s13068-017-0905-y.
38. Mehta P., Rani R., Gupta R., Mathur A.S., Puri S.K. Biomass and Lipid Production of a Novel Freshwater Thermo-Tolerant Mutant Strain of *Chlorella Pyrenoidosa* NCIM 2738 in Seawater Salinity Recycled Medium. *Algal Research*, 2018, Vol. 36, pp. 88-95. DOI: 10.1016/j.algal.2018.10.015.
39. Varshney P., Beardall J., Bhattacharya S., Wangikar P.P. Isolation and Biochemical Characterisation of Two Thermophilic Green Algal Species - *Asterarcys Quadricellulare* and *Chlorella Sorokiniana*, Which are Tolerant to High Levels of Carbon Dioxide and Nitric Oxide. *Algal Research*, 2018, Vol. 30, pp. 28-37. DOI: 10.1016/j.algal.2017.12.006.

sp. GD Using Piggery Wastewater for Biomass and Lipid Production // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 194. P. 326-333. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.07.026.

45. Chiu S.Y., Kao C.Y., Chen T.Y., Chang Y.B., Kuo C.M., Lin C.S. Cultivation of Microalgal *Chlorella* for Biomass and Lipid Production Using Wastewater as Nutrient Resource // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 184. P. 179-189. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.11.080.

46. Salama E.S., Kurade M., Abou-Shanab R.A., El-Dalatony M.M., Yang I.S., Min B., Jeon B.H. Recent Progress in Microalgal Biomass Production Coupled with Wastewater Treatment for Biofuel Generation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 79. P. 1189-1211. DOI: 10.1016/J.RSER.2017.05.091.

47. Ogbonna J.C., Tanaka H. Light Requirement and Photosynthetic Cell Cultivation - Development of Processes for Efficient Light Utilization in Photobioreactors // *Environ, Boil, Fishes*. 2000. Vol. 12. P. 207-218.

48. Molazadeh M., Ahmadzadeh H., Pourianfar H.R., Lyon S., Rampelotto P.H. The Use of Microalgae for Coupling Wastewater Treatment With CO₂ Biofixation // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2019. Vol. 7. P. 42. DOI: 10.3389/fbioe.2019.00042.

49. Zhao Y., Wang J., Zhang H., Yan C., Zhang Y. Effects of Various LED Light Wavelengths and Intensities on Microalgae-Based Simultaneous Biogas Upgrading and Digestate Nutrient Reduction Process // *Bioresource Technology*. 2013. Vol. 136. P. 461-468. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.03.051.

50. Ma R., Thomas-Hall S.R., Chua E.T., Eltanahy E., Netzel M.E., Netzel G., Lu Y., Schenk P.M. LED Power Efficiency of Biomass, Fatty Acid, and Carotenoid Production in *Nannochloropsis* Microalgae // *Bioresource Technology*. 2018. Vol. 252. P. 118-126. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.12.096.

51. Kim D.G., Lee C., Park S.M., Choi Y.E. Manipulation of Light Wavelength at Appropriate Growth Stage to Enhance Biomass Productivity and Fatty Acid Methyl Ester Yield Using *Chlorella Vulgaris* // *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 159. P. 240-248. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.02.078.

52. Zhao Y., Sun S., Hu C., Zhang H., Xu J., Ping L. Performance of Three Microalgal Strains in Biogas Slurry Purification and Biogas Upgrade in Response to Various Mixed Light-Emitting Diode Light Wavelengths // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 187. P. 338-345. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.03.130.

53. Kuo C.M., Lin T.H., Yang Y.C., Zhang W.X., Lai J.T., Wu H.T., Chang J.S., Lin C.S. Ability of an Alkali-Tolerant Mutant Strain of the Microalga *Chlorella* sp. AT1 to Capture Carbon Dioxide for Increasing Carbon Dioxide Utilization Efficiency // *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 244. P. 243-251. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.07.096.

54. Papone T., Kookkhunthod S., Paungbut M.,

40. Chiu S.Y., Kao C.Y., Huang T.T., Lin C.J., Ong S.C., Chen C.D., Chang J.S., Lin C.S. Microalgal Biomass Production and On-Site Bioremediation of Carbon Dioxide, Nitrogen Oxide and Sulfur Dioxide from Flue Gas Using *Chlorella* sp. Cultures. *Bioresource Technology*, 2011, Vol. 102, pp. 9135-9142. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.06.091.

41. Shahid A., Malik S., Zhu H., Xu J., Nawaz M.Z., Nawaz S., Alam A., Mehmood M.A. Cultivating Microalgae in Wastewater for Biomass Production, Pollutant Removal, and Atmospheric Carbon Mitigation; a Review. *Science of The Total Environment*, 2020, Vol. 704, Article No. 135303. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135303.

42. Moreno-Garcia L., Garipey Y., Bourdeau N., Barnabe S., Raghavan G. Optimization of the Proportions of Four Wastewaters in a Blend for the Cultivation of Microalgae Using a Mixture Design. *Bioresource Technology*, 2019, Vol. 283, pp. 168-173. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.03.067.

43. Hussain F., Shah S.Z., Ahmad H., Abubshait S.A., Abubshait H.A., Laref A., Manikandan A., Kusuma H.S., Iqbal M. Microalgae an Ecofriendly and Sustainable Wastewater Treatment Option: Biomass Application in Biofuel and Bio-Fertilizer Production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, Vol. 137, Article No. 110603. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110603.

44. Kuo C.M., Chen T.Y., Lin T.H., Kao C.Y., Lai J.T., Chang J.S., Lin C.S. Cultivation of *Chlorella* sp. GD Using Piggery Wastewater for Biomass and Lipid Production. *Bioresource Technology*, 2015, Vol. 194, pp. 326-333. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.07.026.

45. Chiu S.Y., Kao C.Y., Chen T.Y., Chang Y.B., Kuo C.M., Lin C.S. Cultivation of Microalgal *Chlorella* for Biomass and Lipid Production Using Wastewater as Nutrient Resource. *Bioresource Technology*, 2015, Vol. 184, pp. 179-189. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.11.080.

46. Salama E.S., Kurade M., Abou-Shanab R.A., El-Dalatony M.M., Yang I.S., Min B., Jeon B.H. Recent Progress in Microalgal Biomass Production Coupled with Wastewater Treatment for Biofuel Generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 79, pp. 1189-1211. DOI: 10.1016/J.RSER.2017.05.091.

47. Ogbonna J.C., Tanaka H. Light Requirement and Photosynthetic Cell Cultivation - Development of Processes for Efficient Light Utilization in Photobioreactors. *Environ, Boil, Fishes*, 2000, Vol. 12, pp. 207-218.

48. Molazadeh M., Ahmadzadeh H., Pourianfar H.R., Lyon S., Rampelotto P.H. The Use of Microalgae for Coupling Wastewater Treatment With CO₂ Biofixation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2019, Vol. 7, pp. 42. DOI: 10.3389/fbioe.2019.00042.

49. Zhao Y., Wang J., Zhang H., Yan C., Zhang Y. Effects of Various LED Light Wavelengths and Intensities on Microalgae-Based Simultaneous Biogas Upgrading and Digestate Nutrient Reduction

Leesing R. Producing of Microbial Oil by Mixed Culture of Microalgae and Oleaginous Yeast Using Sugarcane Molasses as Carbon Substrate // *Journal of Clean Energy Technologies*. 2015. Vol. 4. P. 253-256. DOI: 10.7763/JOCET.2016.V4.292.

55. Sakarika M., Kornaros M. Effect of pH on Growth and Lipid Accumulation Kinetics of the Microalga *Chlorella Vulgaris* Grown Heterotrophically Under Sulfur Limitation // *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 219. P. 694-701. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.08.033.

56. Zhao B., Su Y. Process Effect of Microalgal-Carbon Dioxide Fixation and Biomass Production: A Review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 31. P. 121-132. DOI: 10.1016/J.RSER.2013.11.054.

57. Ong S.C., Kao C.Y., Chiu S.Y., Tsai M.T., Lin C.S. Characterization of the Thermal-Tolerant Mutants of *Chlorella* sp. with High Growth Rate and Application in Outdoor Photobioreactor Cultivation // *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101. P. 2880-2883. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.10.007.

58. Liu G., Qiao L., Zhang H., Zhao D., Su X. The Effects of Illumination Factors on the Growth and HCO₃ – Fixation of Microalgae in an Experiment Culture System // *Energy*. 2014. Vol. 78. P. 40-47. DOI: 10.1016/j.energy.2014.05.043.

59. Bell T.A.S., Prithiviraj B., Wahlen B., Fields M.W., Peyton B.M. A Lipid-Accumulating Alga Maintains Growth in Outdoor, Alkaliphilic Raceway Pond with Mixed Microbial Communities // *Frontiers in Microbiology*. 2016. Vol. 6. Article No. 1480. DOI: 10.3389/fmicb.2015.01480.

60. Kumar A., Ergas S., Yuan X., Sahu A., Zhang Q., Dewulf J., Malcata F.X., van Langenhove H. Enhanced CO₂ Fixation and Biofuel Production Via Microalgae: Recent Developments and Future Directions // *Trends in Biotechnology*. 2010. Vol. 28. P. 371-380. DOI: 10.1016/j.tibtech.2010.04.004.

61. Lilley R.M., Ralph P.J., Larkum A.W.D. The Determination of Activity of the Enzyme Rubisco in Cell Extracts of the Dinoflagellate Alga *Symbiodinium* sp. by Manganese Chemiluminescence and its Response to Short-Term Thermal Stress of the Alga // *Plant, Cell and Environment*. 2010. Vol. 33. P. 995-1004. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2010.02121.x.

62. Bechet Q., Shilton A., Fringer O.B., Munoz R., Guieysse B. Mechanistic Modeling of Broth Temperature in Outdoor Photobioreactors // *Environmental Science and Technology*. 2010. Vol. 44. P. 2197-2203. DOI: 10.1021/es903214u.

63. Kuo C.M., Chang Y.B., Lin T.H., Yang Y.C., Zhang W.X., Lai J.T., Wu H.T., Lin C.S. Effects of a Protein-Enriched Crude Lysate from *Chlorella* sp. Against Acetaminophen-Induced Liver Injury // *IOSR Journal of Biotechnology and Biochemistry*. 2017. Vol. 3. P. 82-88. DOI: 10.9790/264X-03018288.

64. Nayak M., Suh W.I., Lee B., Chang Y.K. Enhanced Carbon Utilization Efficiency and FAME Production of *Chlorella* sp. H₂S Through Combined Supplementation of Bicarbonate and Carbon Dioxide

Process. *Bioresource Technology*, 2013, Vol. 136, pp. 461-468. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.03.051.

50. Ma R., Thomas-Hall S.R., Chua E.T., Eltanahy E., Netzel M.E., Netzel G., Lu Y., Schenk P.M. LED Power Efficiency of Biomass, Fatty Acid, and Carotenoid Production in *Nannochloropsis* Microalgae. *Bioresource Technology*, 2018, Vol. 252, pp. 118-126. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.12.096.

51. Kim D.G., Lee C., Park S.M., Choi Y.E. Manipulation of Light Wavelength at Appropriate Growth Stage to Enhance Biomass Productivity and Fatty Acid Methyl Ester Yield Using *Chlorella Vulgaris*. *Bioresource Technology*, 2014, Vol. 159, pp. 240-248. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.02.078.

52. Zhao Y., Sun S., Hu C., Zhang H., Xu J., Ping L. Performance of Three Microalgal Strains in Biogas Slurry Purification and Biogas Upgrade in Response to Various Mixed Light-Emitting Diode Light Wavelengths. *Bioresource Technology*, 2015, Vol. 187, pp. 338-345. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.03.130.

53. Kuo C.M., Lin T.H., Yang Y.C., Zhang W.X., Lai J.T., Wu H.T., Chang J.S., Lin C.S. Ability of an Alkali-Tolerant Mutant Strain of the Microalga *Chlorella* sp. AT1 to Capture Carbon Dioxide for Increasing Carbon Dioxide Utilization Efficiency. *Bioresource Technology*, 2017, Vol. 244, pp. 243-251. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.07.096.

54. Papone T., Kookkhunthod S., Paungbut M., Leesing R. Producing of Microbial Oil by Mixed Culture of Microalgae and Oleaginous Yeast Using Sugarcane Molasses as Carbon Substrate. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2015, Vol. 4, pp. 253-256. DOI: 10.7763/JOCET.2016.V4.292.

55. Sakarika M., Kornaros M. Effect of pH on Growth and Lipid Accumulation Kinetics of the Microalga *Chlorella Vulgaris* Grown Heterotrophically Under Sulfur Limitation. *Bioresource Technology*, 2016, Vol. 219, pp. 694-701. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.08.033.

56. Zhao B., Su Y. Process Effect of Microalgal-Carbon Dioxide Fixation and Biomass Production: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, Vol. 31, pp. 121-132. DOI: 10.1016/J.RSER.2013.11.054.

57. Ong S.C., Kao C.Y., Chiu S.Y., Tsai M.T., Lin C.S. Characterization of the Thermal-Tolerant Mutants of *Chlorella* sp. with High Growth Rate and Application in Outdoor Photobioreactor Cultivation. *Bioresource Technology*, 2010, Vol. 101, pp. 2880-2883. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.10.007.

58. Liu G., Qiao L., Zhang H., Zhao D., Su X. The Effects of Illumination Factors on the Growth and HCO₃ – Fixation of Microalgae in an Experiment Culture System. *Energy*, 2014, Vol. 78, pp. 40-47. DOI: 10.1016/j.energy.2014.05.043.

59. Bell T.A.S., Prithiviraj B., Wahlen B., Fields M.W., Peyton B.M. A Lipid-Accumulating Alga Maintains Growth in Outdoor, Alkaliphilic Raceway Pond with Mixed Microbial Communities. *Frontiers in Microbiology*, 2016, Vol. 6, Article No. 1480. DOI: 10.3389/fmicb.2015.01480.

60. Kumar A., Ergas S., Yuan X., Sahu A.,

// Energy Conversion and Management. 2018. Vol. 156. P. 45-52. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.11.002.

65. Xu J., Cheng J., Xin K., Xu J., Yang W. Strengthening Flash Light Effect with a Pond-Tubular Hybrid Photobioreactor to Improve Microalgal Biomass Yield // *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 318. Article No. 124079. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124079

66. Богданов Н.И. Суспензия хлореллы в рационе сельскохозяйственных животных. Пенза: Здоровье и экология, 2007. 48 с.

67. Adamczyk M., Lasek J., Skawinska A. CO₂ Biofixation and Growth Kinetics of *Chlorella Vulgaris* and *Nannochloropsis Gaditana* // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2016. Vol. 179. P. 1248-1261. DOI: 10.1007/s12010-016-2062-3.

68. Wong Y.K., Ho K.C., Tsang Y.F., Wang L., Yung K.K.L. Cultivation of *Chlorella Vulgaris* in Column Photobioreactor for Biomass Production and Lipid Accumulation // *Water Environment Research*. 2016. Vol. 88. P. 40-46. DOI: 10.2175/106143015X14362865227553.

69. Kusmayadi A., Philippidis G.P., Yen H.W., Biosci J. Application of Computational Fluid Dynamics to Raceways Combining Paddlewheel and CO₂ Spargers to Enhance Microalgae Growth // *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2020. Vol. 129. P. 93-98. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2019.06.013.

70. Senatore V., Buonerba A., Zarra T., Oliva G., Belgiorio V., Boguniewicz-Zablocka J., Naddeo V. Innovative Membrane Photobioreactor for Sustainable CO₂ Capture and Utilization // *Chemosphere*. 2021. Vol. 273. Article No. 129682. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129682.

71. Qiu R., Gao S., Lopez P.A., Ogden K.L. Effects of pH on Cell Growth, Lipid Production and CO₂ Addition of Microalgae *Chlorella Sorokiniana* // *Algal Research*. 2017. Vol. 28. P. 192-199. DOI: 10.1016/j.algal.2017.11.004.

72. Ren H., Tuo J., Addy M.M., Zhang R., Lu Q., Anderson E., Chen P., Ruan R. Cultivation of *Chlorella Vulgaris* in a Pilot-Scale Photobioreactor Using Real Centrate Wastewater with Waste Glycerol for Improving Microalgae Biomass Production and Wastewater Nutrients Removal // *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 245. P. 1130-1138. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.09.040.

73. Kuo C.M., Jian J.F., Sun Y.L., Lin T.H., Yang Y.C., Zhang W.X., Chang H.F., Lai J.T., Chang J.S., Lin C.S. An Efficient Photobioreactors/Raceway Circulating System Combined with Alkaline-CO₂ Capturing Medium for Microalgal Cultivation // *Bioresource Technology*. 2018. Vol. 266. P. 398-406. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.06.090.

74. Ramirez-Lopez C., Perales-Vela H.V., Fernandez-Linares L. Biomass and Lipid Production from *Chlorella Vulgaris* UTEX 26 Cultivated in 2 m³ Raceway Ponds Under Semicontinuous Mode During the Spring Season // *Bioresource Technology*. 2019. Vol. 274. P. 252-260. DOI: 10.1016/j.biortech.

Zhang Q., Dewulf J., Malcata F.X., van Langenhove H. Enhanced CO₂ Fixation and Biofuel Production Via Microalgae: Recent Developments and Future Directions. *Trends in Biotechnology*, 2010, Vol. 28, pp. 371-380. DOI: 10.1016/j.tibtech.2010.04.004.

61. Lilley R.M., Ralph P.J., Larkum A.W.D. The Determination of Activity of the Enzyme Rubisco in Cell Extracts of the Dinoflagellate Alga *Symbiodinium* sp. by Manganese Chemiluminescence and its Response to Short-Term Thermal Stress of the Alga. *Plant, Cell and Environment*, 2010, Vol. 33, pp. 995-1004. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2010.02121.x.

62. Bechet Q., Shilton A., Fringer O.B., Munoz R., Guieysse B. Mechanistic Modeling of Broth Temperature in Outdoor Photobioreactors. *Environmental Science and Technology*, 2010, Vol. 44, pp. 2197-2203. DOI: 10.1021/es903214u.

63. Kuo C.M., Chang Y.B., Lin T.H., Yang Y.C., Zhang W.X., Lai J.T., Wu H.T., Lin C.S. Effects of a Protein-Enriched Crude Lysate from *Chlorella* sp. Against Acetaminophen-Induced Liver Injury. *IOSR Journal of Biotechnology and Biochemistry*, 2017, Vol. 3, pp. 82-88. DOI: 10.9790/264X-03018288.

64. Nayak M., Suh W.I., Lee B., Chang Y.K. Enhanced Carbon Utilization Efficiency and FAME Production of *Chlorella* sp. H₂S Through Combined Supplementation of Bicarbonate and Carbon Dioxide. *Energy Conversion and Management*, 2018, Vol. 156, pp. 45-52. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.11.002.

65. Xu J., Cheng J., Xin K., Xu J., Yang W. Strengthening Flash Light Effect with a Pond-Tubular Hybrid Photobioreactor to Improve Microalgal Biomass Yield. *Bioresource Technology*, 2020, Vol. 318, Article No. 124079. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124079

66. Bogdanov N.I. *Suspenziya khlorelly v ratsionel'skikh kormakh zhivotnykh* [Chlorella Suspension in the Diet of Farm Animals]. Penza, Zdorov'e i ekologiya Publ., 2007. 48 p. [in Russian].

67. Adamczyk M., Lasek J., Skawinska A. CO₂ Biofixation and Growth Kinetics of *Chlorella Vulgaris* and *Nannochloropsis Gaditana*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2016, Vol. 179, pp. 1248-1261. DOI: 10.1007/s12010-016-2062-3.

68. Wong Y.K., Ho K.C., Tsang Y.F., Wang L., Yung K.K.L. Cultivation of *Chlorella Vulgaris* in Column Photobioreactor for Biomass Production and Lipid Accumulation. *Water Environment Research*, 2016, Vol. 88, pp. 40-46. DOI: 10.2175/106143015X14362865227553.

69. Kusmayadi A., Philippidis G.P., Yen H.W., Biosci J. Application of Computational Fluid Dynamics to Raceways Combining Paddlewheel and CO₂ Spargers to Enhance Microalgae Growth. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2020, Vol. 129, pp. 93-98. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2019.06.013.

70. Senatore V., Buonerba A., Zarra T., Oliva G., Belgiorio V., Boguniewicz-Zablocka J., Naddeo V. Innovative Membrane Photobioreactor for Sustainable CO₂ Capture and Utilization. *Chemosphere*,

2018.11.096.

75. Zhang C.D., Li W., Shi Y.H., Li Y.G., Huang J.K., Li H.X. A New Technology of CO₂ Supplementary for Microalgae Cultivation on Large Scale-A Spraying Absorption Tower Coupled with an Outdoor Open Runway Pond // *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 209. P. 351-359. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.03.007.

76. Shuba E.S., Kifle D. Microalgae to Biofuels: «Promising» Alternative and Renewable Energy, Review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 743-755. DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.042.

77. Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Темнов М.С. Технология получения липидов из микроводорослей. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2015. 1 CD-ROM.

78. Мещерякова Ю.В., Нагорнов С.А. Культивирование микроводоросли хлорелла с целью получения биотоплива // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. 2012. № S3 (43). С. 33-36.

79. Мамедова Ф.Т. Различные подходы к накоплению биомассы микроводорослей *Chlorella Vulgaris* и к процессам её биокаталитической трансформации: дис. ... канд. хим. наук. М., 2015. 176 с.

80. Кругликова Л.Л., Савинова Д.М. Влияние фотометрических характеристик источника излучения на эффективность выращивания микроводоросли *Chlorella Vulgaris* // *Современные техника и технологии: матер. XX междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*. Томск: Изд-во ТПУ, 2014. Т. 1. С. 135-136.

81. Латыпов О.Р., Лаптев А.Б., Шевляков Ф.Б., Голубев И.А., Шапошников Н.О. Технология декарбонизации топочных газов нефтеперерабатывающих предприятий // *Нефтегазовое дело*. 2022. № 6. С. 231-263. DOI: 10.17122/ogbus-2022-6-231-263.

2021, Vol. 273, Article No. 129682. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129682.

71. Qiu R., Gao S., Lopez P.A., Ogden K.L. Effects of pH on Cell Growth, Lipid Production and CO₂ Addition of Microalgae *Chlorella Sorokiniana*. *Algal Research*, 2017, Vol. 28, pp. 192-199. DOI:10.1016/j.algal.2017.11.004.

72. Ren H., Tuo J., Addy M.M., Zhang R., Lu Q., Anderson E., Chen P., Ruan R. Cultivation of *Chlorella Vulgaris* in a Pilot-Scale Photobioreactor Using Real Centrate Wastewater with Waste Glycerol for Improving Microalgae Biomass Production and Wastewater Nutrients Removal. *Bioresource Technology*, 2017, Vol. 245, pp. 1130-1138. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.09.040.

73. Kuo C.M., Jian J.F., Sun Y.L., Lin T.H., Yang Y.C., Zhang W.X., Chang H.F., Lai J.T., Chang J.S., Lin C.S. An Efficient Photobioreactors/Raceway Circulating System Combined with Alkaline-CO₂ Capturing Medium for Microalgal Cultivation. *Bioresource Technology*, 2018, Vol. 266, pp. 398-406. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.06.090.

74. Ramirez-Lopez C., Perales-Vela H.V., Fernandez-Linares L. Biomass and Lipid Production from *Chlorella Vulgaris* UTEX 26 Cultivated in 2 m³ Raceway Ponds Under Semicontinuous Mode During the Spring Season. *Bioresource Technology*, 2019, Vol. 274, pp. 252-260. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.11.096.

75. Zhang C.D., Li W., Shi Y.H., Li Y.G., Huang J.K., Li H.X. A New Technology of CO₂ Supplementary for Microalgae Cultivation on Large Scale-A Spraying Absorption Tower Coupled with an Outdoor Open Runway Pond. *Bioresource Technology*, 2016, Vol. 209, pp. 351-359. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.03.007.

76. Shuba E.S., Kifle D. Microalgae to Biofuels: «Promising» Alternative and Renewable Energy, Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, Vol. 81, pp. 743-755. DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.042.

77. Dvoretiskii D.S., Dvoretiskii S.I., Temnov M.S. *Tekhnologiya polucheniya lipidov iz mikrovodoroslei* [Technology for Obtaining Lipids from Microalgae]. Tambov, TGTU Publ., 2015. 1 CD-ROM. [in Russian].

78. Meshcheryakova Yu.V., Nagornov S.A. Kul'tivirovanie mikrovodorosli khlorella s tsel'yu polucheniya biotopliva [Cultivation of Microalgae *Chlorella* for Biofuel Production]. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo - Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*, 2012, No. S3 (43), pp. 33-36. [in Russian].

79. Mamedova F.T. *Razlichnye podkhody k nakopleniyu biomassy mikrovodoroslei Chlorella Vulgaris i k protsessam ee biokataliticheskoi transformatsii: dis. kand. khim. nauk* [Different Approaches to the Accumulation of *Chlorella Vulgaris* Microalgae Biomass and to the Processes of its Biocatalytic Transformation: Cand. Chem. Sci. Diss.]. Moscow, 2015. 176 p. [in Russian].

80. Kruglikova L.L., Savinova D.M. Vliyanie fotometricheskikh kharakteristik istochnika izlucheniya na effektivnost' vyrashchivaniya mikrovodorosli Chlorella Vulgaris [Influence of Photometric Characteristics of the Radiation Source on the Efficiency of Chlorella Vulgaris Microalgae Cultivation]. *Materialy XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Sovremennye tekhnika i tekhnologii»* [Materials of the XX International Scientific-Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists «Modern Equipment and Technologies»]. Tomsk, TPU Publ., 2014, Vol. 1, pp. 135-136. [in Russian].

81. Latypov O.R., Laptev A.B., Shevlyakov F.B., Golubev I.A., Shaposhnikov N.O. Tekhnologiya dekarbonizatsii topochnykh gazov neftepererabatyvayushchih predpriyatij [Technology of decarbonization of flue gases of oil refineries] // *Neftegazovoye delo* [Oil and gas business]. 2022. № 6. pp. 231-263. DOI: 10.17122/ogbus-2022-6-231-263. [in Russian].

Информация об авторах

• Латыпов Олег Ренатович, доктор технических наук, доцент
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Заведующий кафедрой «Материаловедение и защита от коррозии»
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: o.r.latypov@mail.ru

• Лаптев Анатолий Борисович, доктор технических наук, старший научный сотрудник
НИЦ «Курчатовский институт» - «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
Заведующий кафедрой «Материаловедение»
Россия, 105005, Москва, ул. Радио, 17
e-mail: laptev@bk.ru

• Шевляков Федор Борисович, кандидат технических наук
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Доцент кафедры «Газохимия и моделирование химико-технологических процессов»
Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1;

ООО «РН-БашНИПИнефть»
(ОГ ПАО «НК «Роснефть»)
Старший специалист
Россия, 450006, Уфа, ул. Ленина, 86/1
e-mail: sfb1980@mail.ru

Information about the authors

• Latypov Oleg R., Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Head of Materials Science and Corrosion Protection Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: o.r.latypov@mail.ru

• Laptev Anatoly B., Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher
NRC «Kurchatov Institute» - «All-Russian Research Institute of Aviation Materials»
Head of Materials Science Department
17, Radio str., Moscow, 105005, Russia
e-mail: laptev@bk.ru

• Shevlyakov Fedor B., Candidate of Engineering Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Gas Chemistry and Modeling of Chemical and Technological Processes
Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia;

RN-BashNIPIneft LLC
(Company of Rosneft Group)
Senior Specialist
86/1, Lenin str., Ufa, 450006, Russia
e-mail: sfb1980@mail.ru

• Голубев Иван Андреевич, кандидат технических наук
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Руководитель направления «Нефтегазовый инжиниринг», Научно-Технологический центр «Новые технологии и материалы»
Россия, 195251, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29
e-mail: golubev2m@gmail.com

• Golubev Ivan A., Candidate of Engineering Sciences
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Head of the Oil and Gas Engineering Department, Research and Technology Center «New Technologies and Materials»
29, Politekhnikeskaya str., Saint-Petersburg, 195251, Russia
e-mail: golubev2m@gmail.com

• Шапошников Никита Олегович, кандидат технических наук
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Исполнительный директор,
Научно-Технологический центр «Новые технологии и материалы»
Россия, 195251, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29
e-mail: shaposhnikovno@gmail.com

• Shaposhnikov Nikita O., Candidate of Engineering Sciences
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Executive Director, Research and Technology Center «New Technologies and Materials»
29, Politekhnikeskaya str., Saint-Petersburg, 195251, Russia
e-mail: shaposhnikovno@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26.10.2022; одобрена после рецензирования 14.11.2022; принята к публикации 01.03.2023.

The article was submitted 26.10.2022; approved after reviewing 14.11.2022; accepted for publication 01.03.2023.