

Научная статья

УДК 628.539:582.263

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32102>



Н.А. Политаева, П.С. Шинкевич , А.М. Опарина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

 [ps.shinkevich@gmail.com](mailto:ps.shinkevich@gmail.com)

## БИОФИЛЬТРАЦИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЭЦ БИОМАССОЙ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ

*Аннотация.* Статья посвящена методу улавливания углекислого газа от выбросов тепловых электростанций (ТЭЦ). Рассмотрены различные методы для поглощения углекислого газа, абсорбция, каталитическая очистка, криогенная очистка и др. Изучены их достоинства и недостатки. В качестве альтернативного метода улавливания углекислого газа из дымовых газов предлагается метод биофльтрации дымовых газов ТЭЦ биомассой микроводорослей. Данный способ позволяет уловить углекислый газ и при этом получить биомассу микроводорослей, которая может использоваться на корм скоту, в качестве удобрения, как сырье для получения биодизеля и других ценных компонентов и продуктов. В работе представлены результаты исследования поглощения углекислого газа из дымовых газов ТЭЦ Санкт-Петербурга. Показано, что скорость поглощения углекислого газа суспензией микроводорослей составила  $0,312 \text{ г CO}_2 \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ . Предложена блок-схема очистки дымовых газов ТЭЦ с использованием биофльтрации биомассой микроводорослей.

*Ключевые слова:* дымовые газы, очистка, биофльтрация, биомасса микроводорослей, декарбонизация.

*Благодарности:* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Разработка технологий улавливания  $\text{CO}_2$  из отработанных дымовых газов энергетических и промышленных установок биомассой микроводорослей» (Соглашение № 24-17-20004, <https://rscf.ru/project/24-17-20004/>).

*Для цитирования:*

Политаева Н.А., Шинкевич П.С., Опарина А.М. Биофльтрация дымовых газов ТЭЦ биомассой микроводорослей // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 1. С. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32102>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32102>*N.A. Politaeva, P.S. Shinkevich* ✉, *A.M. Oparina*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russia✉ [ps.shinkevich@gmail.com](mailto:ps.shinkevich@gmail.com)

## BIOFILTRATION OF THERMAL POWER PLANT FLUE GASES USING MICROALGAE BIOMASS

**Abstract.** The article discusses the method of capturing carbon dioxide from the emissions of thermal power plants (TPP). Various methods for carbon dioxide absorption, catalytic purification, cryogenic purification, etc. are considered. Their advantages and disadvantages are studied. As an alternative method for capturing carbon dioxide from flue gases, a method of biofiltration of TPP flue gases with microalgae biomass is proposed. This method allows capturing carbon dioxide and at the same time obtaining microalgae biomass, which can be used as animal feed, as a fertilizer, as a raw material for the production of biodiesel and other valuable components and products. The paper presents the results of a study of carbon dioxide absorption from flue gases of a TPP in St. Petersburg. It is shown that the rate of carbon dioxide absorption by a microalgae suspension was  $0.312 \text{ g CO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ . A block diagram of TPP flue gas purification using biofiltration with microalgae biomass is proposed.

**Keywords:** flue gases, purification, biofiltration, microalgae biomass, decarbonization.

**Acknowledgements:** The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-17-20004 “Development of technologies for capturing  $\text{CO}_2$  from exhaust gases of power and industrial plants using microalgae biomass”. Available online: <https://rscf.ru/project/24-17-20004/>

**Citation:**

Politaeva N.A., Shinkevich P.S., Oparina A.M., Biofiltration of thermal power plant flue gases using microalgae biomass, *Global Energy*, 32 (01) (2026) 22–34, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32102>

**Введение.** Тепловые электростанции (ТЭЦ) являются важным источником электроэнергии во многих странах. К сожалению, при работе ТЭЦ происходят выбросы вредных веществ в атмосферу. Одной из основных причин выбросов от ТЭЦ является сжигание топлива для производства электроэнергии. При этом происходит выделение углекислого газа, играющего ключевую роль в глобальном потеплении. Для минимизации негативного воздействия ТЭЦ на окружающую среду используют очистные сооружения, которые позволяют уловить дымовые газы и снизить выбросы вредных веществ. Следует отметить, что применение дополнительных установок для дальнейшего снижения выбросов вредных веществ приведет к резкому удорожанию ТЭЦ на 30–90%. В настоящее время природоохранные затраты составляют от 25 до 40% капитальных затрат на строительство ТЭЦ.

К основным выбросам ТЭЦ относятся частицы золы,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ . В условиях перехода энергетики к низкоуглеродному развитию особую актуальность приобретает формирование сценариев декарбонизации тепло- и электроэнергетики, направленных на снижение углеродного следа за счет уменьшения выбросов  $\text{CO}_2$  [1]. Типичные концентрации  $\text{CO}_2$  в дымовых газах тепловых электростанций составляют порядка 7–15% (об.). Ежегодно в атмосферу за счет сжигания всех видов топлива поступает 35 млрд тонн  $\text{CO}_2$ , что обуславливает необходимость создания эффективных технологий его селективного извлечения из отходящих газов [2]. Для

CO<sub>2</sub> предельно допустимые концентрации в атмосферном воздухе не нормированы, поскольку он не относится к числу токсичных веществ. Вместе с тем в производственных и жилых помещениях превышение объемной доли CO<sub>2</sub> свыше 0,6 % считается нежелательным, так как длительное воздействие таких концентраций приводит к утомляемости, головным болям и другим неблагоприятным изменениям в организме человека.

Для удаления CO<sub>2</sub> из газовых выбросов в промышленности в основном используют жидкофазные методы поглощения, основанные на контакте газа с растворами различных поглотителей. В качестве растворов-абсорбентов используются вода, растворы щелочей, карбонатов, органические поглотители и др.

Поглощение CO<sub>2</sub> водой основано на его растворимости в ней. На практике водную промывку обычно применяют как стадию предварительной очистки и проводят ее при температурах порядка 5–15°С и повышенном давлении 1,0–3,0 МПа. При таких условиях степень извлечения CO<sub>2</sub> достигает примерно 70–80%. В системах, работающих под давлением, регенерацию поглотительного раствора и выделение CO<sub>2</sub> целесообразно осуществлять путем снижения давления в специальных аппаратах-регенераторах.

При использовании водных растворов щелочей (NaOH, KOH) связывание CO<sub>2</sub> происходит за счет химических реакций с образованием карбонатов и гидрокарбонатов. Такие системы поглощения целесообразно применять в основном для глубокой доочистки сравнительно небольших газовых потоков с умеренным содержанием CO<sub>2</sub>. Для больших объемов газа с точки зрения экономичности предпочтительны процессы, предусматривающие регенерацию поглотителя и многократное его использование.

Заметное практическое распространение получили также схемы абсорбции диоксида углерода растворами карбонатов натрия и калия (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), проявляющих щелочные свойства вследствие гидролиза.

В качестве органических поглотителей CO<sub>2</sub> применяют как физические абсорбенты (например, метанол, ацетон), так и хемосорбенты на основе водных растворов этаноламинов. Растворы моно-, ди- и триэтаноламина обеспечивают более высокую селективность и степень очистки газа от диоксида углерода и потому широко используются в промышленных процессах очистки газов [3].

Помимо традиционных абсорбционных методов существуют менее распространенные подходы к поглощению CO<sub>2</sub>, например электрохимический метод («сульфатный цикл»), каталитическая и сорбционная очистка, а также вымораживание диоксида углерода. Процесс вымораживания основан на сублимации CO<sub>2</sub> при температуре около –78°С и позволяет отделять его в виде твердой снегообразной фазы.

Сорбционные технологии, в частности циклическое перемещение оксида кальция между реакторами с кипящим слоем (поглощение CO<sub>2</sub> при пониженной температуре и разложение карбоната при повышенной), ориентированы преимущественно на угольные электростанции с высокими удельными выбросами и дополняются широким спектром современных твердых сорбентов [4].

Перспективным направлением является применение ферментативных систем, в которых ферментативное превращение CO<sub>2</sub> в бикарбонат в жидкой фазе и использование фермент-модифицированных мембран обеспечивают ускорение массопереноса по сравнению с традиционными полимерными мембранами примерно в 2,5 раза [5]. Дополнительно интенсивно развиваются мембранные методы разделения, отличающиеся относительной простотой и возможностью избирательного пропускания компонентов газовой смеси при минимальных капитальных затратах.

Многие из существующих методов очистки газов от CO<sub>2</sub> влекут за собой образование побочных продуктов, которые требуют переработки или утилизации. Альтернативой таким

технологиям является биологическое улавливание  $\text{CO}_2$ , где в качестве биофильтрующей среды используются микроводоросли. В результате такой очистки образуется биомасса, которая может использоваться в дальнейшем как сырье для получения различных продуктов.

Фиксация  $\text{CO}_2$ , образующегося после сжигания топлива, микроводорослями имеет целый ряд преимуществ, которые обеспечиваются высокой фотосинтетической эффективностью, интенсивным ростом культур и их хорошей адаптацией к изменениям условий среды. Кроме этого, данные микроорганизмы способны трансформировать поглощенный углекислый газ в липиды, белки, пигменты, углеводы. Эти вещества могут быть использованы в качестве источников для получения биотоплива, удобрений. Сухая масса микроводорослей примерно на 50% состоит из углерода, источником которого является  $\text{CO}_2$ . По литературным данным, 1 тонна микроводорослей может поглотить за период роста (8–10 дней) около 1,83 тонн углекислого газа. Эта величина будет варьироваться в зависимости от многих факторов (температура, конструкция культиватора, способ подачи  $\text{CO}_2$ , вид микроводорослей и др.) [6].

В работе [7] показано, что микроводоросли рода *Chlorella* sp. KR-1 и *Chlorella* sp. ZY-1, выдерживают чрезвычайно высокие уровни  $\text{CO}_2$  вплоть до 70%. Оптимальная концентрация углекислого газа для большинства микроводорослей лежит в интервале от 0,038 до 10%. Так, максимальный прирост биомассы для *Chlorella* sp. отмечался при 2,5%, а для *Scenedesmus obliquus* и *Chlorella kessleri* – при 6%. Полученные результаты свидетельствуют о возможности роста микроводорослей в среде с содержанием  $\text{CO}_2$ , сопоставимым с типичными концентрациями в дымовых газах ТЭЦ. Так, для *Spirulina* максимальные значения прироста биомассы зафиксированы на седьмые сутки при 6% и на четырнадцатые сутки при 12%  $\text{CO}_2$ , тогда как для *Scenedesmus* наивысшие показатели поглощения диоксида углерода зарегистрированы на восьмые (6%) и девятые (12%) сутки культивирования.

Целью данной статьи является разработка способа биологической очистки дымовых газов от  $\text{CO}_2$  с применением микроводорослей российского штамма *Chlorella kessleri* ВКПМ-АИ-11АРW на примере дымовых газов ТЭЦ Санкт-Петербурга.

### Материалы и методы

Объект исследования – биомасса микроводорослей российского штамма *Chlorella kessleri* ВКПМ-АИ-11АРW. Предмет исследования – условия использования микроводорослей при биологической очистке дымовых газов, отбираемых с Северо-Западной ТЭЦ им. А.Г. Бориса (г. Санкт-Петербург). Эта современная электростанция парогазового цикла работает на сухом отбензинном газе (СОГ, стандарт Газпром СТО 089-2010) и отличается высокой экономичностью и экологичностью. В качестве основного топлива используется природный газ (в качестве резервного – дизельное топливо). Дымовые газы после сжигания топлива (и прохождения через пылевые фильтры) состоят преимущественно из азота ( $\text{N}_2$ ), углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и водяного пара ( $\text{H}_2\text{O}$ ), а также содержат оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ) и лишь следовые количества  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  и твердых частиц<sup>1</sup>.

Для проведения эксперимента смесь дымовых газов с Северо-Западной ТЭЦ была закачана в три специальных баллона (производства ООО «Центргаз») объемом 20 л. Забор концентрированной смеси дымовых газов проводили непосредственно в точке подачи дымовой смеси из трубы специальными шланговыми системами к газоанализатору, установленному на ТЭЦ. Таким образом, собранная газовая смесь является концентрированной смесью, полученной из трубы ТЭЦ, прошедшей только механическую очистку через фильтры для удаления пыли и золы. В каждый баллон закачивали по 120 л газовой смеси, которую предварительно анализировали газоанализатором SERVOPRO MonoExact TCD фирмы SERVOMEX, установленным на ТЭЦ. Результаты анализа показали следующий состав газовой смеси:

<sup>1</sup> Северо-Западная ТЭЦ. Режим доступа: <https://irao-generation.ru/stations/sztec/> (дата обращения 05.11.2025)

- $\text{CH}_4$  – 0,1 vpm;
- $\text{O}_2$  – 15,0 %;
- $\text{SO}_2$  – 0,3 vpm;
- $\text{CO}$  – 0 vpm;
- $\text{NO}$  – 15,6 vpm.

Значение выбросов  $\text{CO}_2$  на ТЭЦ не контролируется и было определено в лаборатории «Промышленная экология» СПбПУ при помощи портативного газоанализатора GA2000+. Данные измерения показали, что в состав дымовых газов входит 2,5%  $\text{CO}_2$ .

Для исследования скорости поглощения  $\text{CO}_2$  из дымовых газов использовали маточную культуру микроводорослей *Chlorella kessleri*. Данная культура способна поглощать  $\text{CO}_2$  из смеси с содержанием  $\text{CO}_2$  до 40% и наращивать качественную биомассу [8]. Маточную культуру микроводорослей загружали с питательной средой [9] в уникальный многофункциональный полупромышленный фотобиореактор-биофильтр объемом 110 л, произведенный компанией «Альготек Грин Технолоджи» по заказу ученых СПбПУ по гранту РНФ (рис. 1).

Система оснащена автоматическим контролем подачи дымовых газов, регулировкой уровня pH, освещения и температуры, что позволяет точно управлять условиями культивирования и моделировать различные сценарии процесса очистки. К полупромышленному фотобиореактору-биофильтру с помощью редуктора подключали баллон с дымовыми газами. Проводили процессы культивирования микроводорослей и одновременную биофильтрацию от дымовых газов в течение 7 суток при температуре  $28 \pm 2^\circ\text{C}$  и освещенности 3000 Лк. Данные условия были выбраны как оптимальные для культивирования в статье [9].

Помимо этого, для оценки скорости поглощения углекислого газа биомассой микроводорослей использовали герметичный фотобиореактор цилиндрической формы объемом 5 л, оснащенный теплонагревателем (3) и распылителем (2) (рис. 2).

Для осуществления аэрации и соблюдения герметичности газоздушная смесь из незанятой части фотобиореактора циркулировала по трубкам (4) через аэратор (5).

Начальная оптическая плотность суспензии микроводорослей, культивируемой в 110-литровом фотобиореакторе, составила 0,7, для 5-литрового фотобиореактора – 1,0.

Режим аэрации для 110-литрового фотобиореактора был выбран исходя из объемов дымовых газов. На протяжении всего эксперимента в фотобиореактор подавалась смесь воздуха и

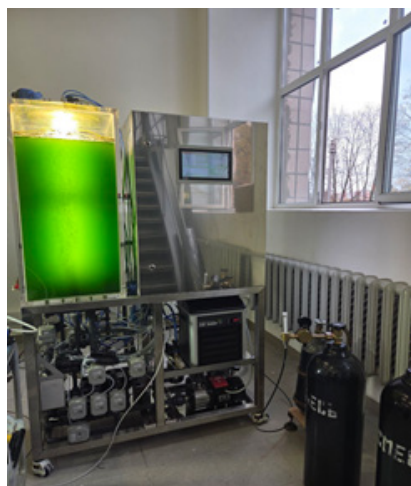


Рис. 1. Вид фотобиореактора-биофильтра и баллонов с дымовыми газами  
 Fig. 1. Photobioreactor-biofilter and flue gas cylinders

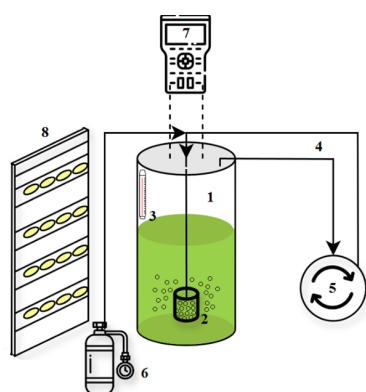


Рис. 2. Фотобиореактор для оценки скорости поглощения углекислого газа биомассой микроводорослей и схема эксперимента: 1 – фотобиореактор; 2 – распылитель; 3 – теплонагреватель; 4 – трубки; 5 – аэратор; 6 – система подачи  $\text{CO}_2$ ; 7 – газоанализатор; 8 – система освещения

Fig. 2. Photobioreactor for assessing the rate of carbon dioxide absorption by microalgae biomass and experimental setup: 1 – photobioreactor; 2 – sprayer; 3 – heater; 4 – tubes; 5 – aerator; 6 –  $\text{CO}_2$  supply system; 7 – gas analyzer; 8 – lighting system

чистого  $\text{CO}_2$  в соотношении 3:1. Скорость подачи смеси составляла 8 л/мин. При этом на первые и третьи сутки в течение 1 часа в фотобиореактор вместо смеси воздуха и чистого  $\text{CO}_2$  подавалась смесь воздуха и дымовых газов в таком же соотношении (скорость подачи дымовых газов составляла 2 л/мин).

Подача дымовых газов для 5-литрового фотобиореактора осуществлялась по следующей схеме. На третьи сутки культивирования в фотобиореактор в течение 20 минут подавали дымовые газы напрямую из баллона со скоростью 1,5 л/мин. При этом через 20 минут после начала подачи дымовых газов на выходе из фотобиореактора содержание углекислого газа составило 2,7%. Далее подачу дымовых газов отключали и подключали аэратор, который обеспечивал замкнутый цикл аэрации внутри фотобиореактора без поступления дополнительного воздуха. Затем с помощью газоанализатора измеряли содержание  $\text{CO}_2$  в незанятой части фотобиореактора.

### Результаты

Проведенные исследования показали, что при пропускании дымовых газов через достаточный объем культуры микроводорослей происходит эффективное удаление  $\text{CO}_2$  из газовой смеси. В 110-литровом фотобиореакторе уже через 1 час после начала подачи дымовых газов (с исходной концентрацией  $\text{CO}_2$  около 2,5%) содержание  $\text{CO}_2$  в выходящем газе снизилось до уровня ниже предела обнаружения газоанализатором. Иными словами, микроводоросли поглотили практически весь углекислый газ, поступивший с дымовыми газами, подтверждая почти 100%-ную эффективность его удаления.

На рис. 3 представлена динамика снижения концентрации  $\text{CO}_2$  во внутреннем газовом пространстве 5-литрового фотобиореактора (замкнутая система) после подачи дымового газа.

С учетом размеров незанятой части фотобиореактора ( $D = 0,15$  м,  $h = 0,21$  м,  $V = 3,7$  л) было определено, что за 272 минуты суспензия микроводорослей поглотила 0,078 л  $\text{CO}_2$  из газового объема. Тогда с учетом плотности  $\text{CO}_2$  при 26°C (1,8 кг/м<sup>3</sup>) 1 литр суспензии микроводорослей за 1 час поглотит 0,013 г  $\text{CO}_2$ . Скорость поглощения  $\text{CO}_2$  1 литром суспензии микроводорослей в сутки составит 0,312 г  $\text{CO}_2 \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ .

Во время эксперимента отмечен существенный рост микроводорослей как в 110-литровом, так и в 5-литровом фотобиореакторах. Изменение оптической плотности суспензии во времени представлено на рис. 4 (для фотобиореактора объемом 110 л) и рис. 5 (для фотобиореактора объемом 5 л).

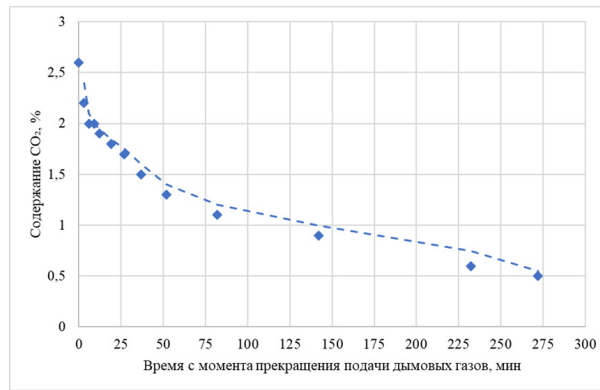


Рис. 3. Динамика снижения CO<sub>2</sub> в свободной части 5-литрового фотобиореактора  
 Fig. 3. Dynamics of CO<sub>2</sub> reduction in the free section of a 5-liter photobioreactor

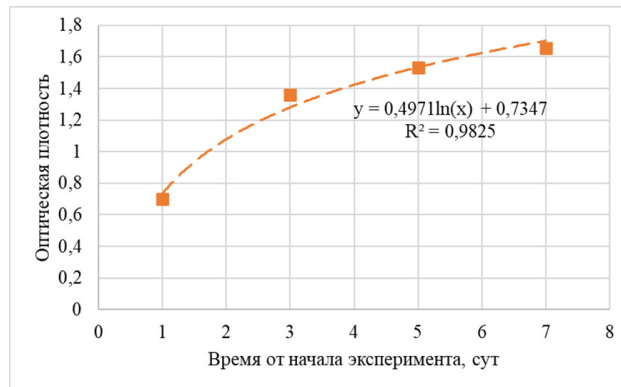


Рис. 4. Изменение оптической плотности суспензии микроводорослей в 110-литровом фотобиореакторе  
 Fig. 4. Change in optical density of microalgae suspension in a 110 L photobioreactor

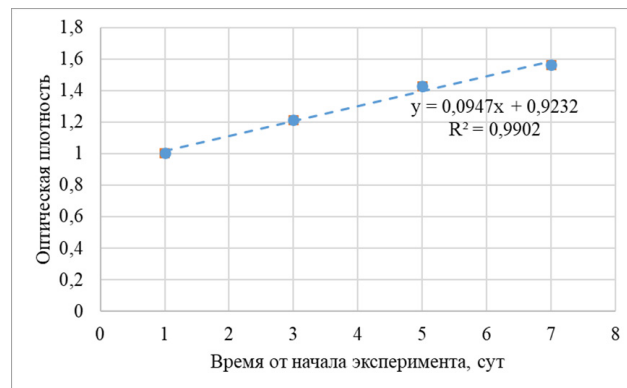


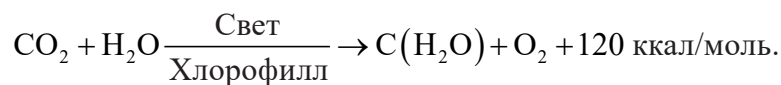
Рис. 5. Изменение оптической плотности суспензии микроводорослей в 5-литровом фотобиореакторе  
 Fig. 5. Change in optical density of microalgae suspension in a 5 L photobioreactor

По полученным данным, концентрация биомассы в 110-литровом фотобиореакторе за период исследования увеличилась примерно в 2,36 раз, тогда как в 5-литровом – примерно в 1,5 раза. Меньший прирост в малом реакторе объясняется ограниченным запасом CO<sub>2</sub> в замкнутой

системе (после поглощения исходного объема газа приток углерода прекращался), в то время как в 110-литровой установке микроводоросли получали  $\text{CO}_2$  как из чистого газа, так и из периодически подаваемых дымовых газов. В целом полученные результаты демонстрируют, что биофильтрация с помощью микроводорослей способна значительно снижать содержание  $\text{CO}_2$  в дымовых газах, сопровождаясь при этом заметным приростом биомассы микроводорослей.

### Обсуждение

Полученные данные подтверждают, что прохождение дымовых газов через культуру микроводорослей позволяет эффективно извлекать углекислый газ.  $\text{CO}_2$ , поглощаемый микроводорослями, фиксируется в клетках в процессе фотосинтеза, т.е. неорганический углерод превращается в органический углерод биомассы. Данный процесс может быть представлен упрощенным уравнением фотосинтеза:



Измеренные значения  $\text{CO}_2$  в дымовых газах, собранных после прохождения биомассы микроводорослей, показали его отсутствие через час. Следовательно, углекислый газ, количество которого в составе дымовых газов ТЭЦ составляет 2,5%, полностью поглощается биомассой водорослей.

Полученные результаты согласуются с литературными данными о высокой способности микроводорослей к поглощению  $\text{CO}_2$ . В проведенном исследовании использовалась относительно умеренная концентрация (2,5%  $\text{CO}_2$ ), которая лежит в пределах оптимума для ряда культур. В частности, известно, что *Chlorella sp.* при 2,5%  $\text{CO}_2$  достигает максимального прироста биомассы, а *Chlorella kessleri* способна эффективно расти и при более высоких долях  $\text{CO}_2$  (до 6%) [10, 11]. Хотя концентрация  $\text{CO}_2$  в дымовых газах в проведенном исследовании была немного ниже оптимальной для *Chlorella kessleri*, микроводоросли продемонстрировали высокую эффективность поглощения. При 2,5%  $\text{CO}_2$  их рост был активным (биомасса увеличилась в 2,36 раза за неделю). В более ранних исследованиях было показано, что штамм *Chlorella kessleri* способен наращивать биомассу при повышенном уровне  $\text{CO}_2$  (до 40%), поэтому можно ожидать, что при более высоких концентрациях углекислого газа эффективность фиксации углерода будет оставаться высокой. Относительно меньший прирост биомассы в 5-литровом реакторе объясним условиями эксперимента. После поглощения порции  $\text{CO}_2$  новый углекислый газ в систему не поступал, что ограничило доступность углерода для фотосинтеза. В 110-литровом фотобиореакторе наличие непрерывной подачи воздуха с  $\text{CO}_2$  и периодической подачей дымовых газов обеспечивало микроводорослям стабильное снабжение углеродом, что отразилось на их приросте.

Расчетная скорость поглощения  $\text{CO}_2$  ( $0,312 \text{ г CO}_2 \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ ) находится на уровне, сопоставимом с данными, приводимыми в литературе [12–14]. Так, авторы статьи [12] культивировали *Chlorella sp.* в пузырьковом колонном реакторе при различных концентрациях  $\text{CO}_2$  (0,03%, 1,75% и 9,45% об.) и расходах газа. По их данным, накопление 44,7–49,5 г  $\text{CO}_2$  в 10-литровом реакторе за 16 суток при оптимальных условиях (1,75 %  $\text{CO}_2$ , изменяемый расход газа) соответствует средним объемным скоростям фиксации порядка  $0,28\text{--}0,31 \text{ г CO}_2 \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ . Таким образом, полученная в проведенном нами исследовании скорость  $0,312 \text{ г CO}_2 \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$  практически совпадает с верхней границей диапазона, достигнутого в оптимизированном пузырьковом фотобиореакторе, что указывает на корректно подобранные условия газообмена и отсутствие существенных ограничений по массообмену  $\text{CO}_2$  в нашей системе. В работе [13] для *Chlorella kessleri*, культивируемой в городских и синтетических сточных водах при подаче смеси воздуха

с 5%  $\text{CO}_2$ , расчетная скорость биофиксации углекислого газа составила порядка 0,307–0,324  $\text{CO}_2 \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$  в зависимости от типа среды, что указывает на сопоставимую эффективность биофильтрации при близких концентрациях  $\text{CO}_2$ . Это значение соответствует фиксации порядка 0,16 г углерода на 1 л в сутки. При пересчете на сухую массу микроводорослей можно условно экстраполировать, что 1 тонна биомассы поглотит до 180–200 кг  $\text{CO}_2$  в сутки, что согласуется с оценками, согласно которым 1 тонна сухой биомассы микроводорослей способна утилизировать до 1,8 тонн  $\text{CO}_2$  за 8–10 дней роста [14, 15]. Разброс значений скорости фиксации углекислого газа, отмечаемый в литературе, объясняется не только биологическими характеристиками конкретных штаммов микроводорослей, но и режимом аэрации, освещенностью, температурой, объемной нагрузкой по углероду, а также конструктивными особенностями фотобиореакторов. Тем не менее полученные результаты подтверждают, что даже при умеренной концентрации  $\text{CO}_2$  (2,5%) культура демонстрирует устойчивое поглощение углекислого газа и значительный прирост биомассы, что позволяет рассматривать описанный метод как эффективный элемент декарбонизации дымовых газов.

Сравнивая предлагаемый биологический метод с традиционными технологиями улавливания  $\text{CO}_2$ , можно отметить ряд важных отличий. Химическая абсорбция с помощью различных растворителей (воды, щелочных растворов, аминов и др.) широко применяется на практике, однако требует значительных энергетических затрат и создает проблемы с регенерацией сорбентов и отходами. Абсорбция с помощью аминов (моноэтаноламин и др.) позволяет улавливать  $\text{CO}_2$  с высокой эффективностью, но нуждается в тепловой регенерации раствора и сопровождается деградацией реагентов.

Биофильтрация дымовых газов микроводорослями, напротив, не приводит к образованию токсичных отходов. Углекислый газ в проведенном исследовании был полностью превращен в биомассу, которая сама представляет ценность. Выходящая газовая смесь, прошедшая через культуру, фактически освобождается от  $\text{CO}_2$ , а побочным продуктом процесса является биомасса, пригодная для дальнейшего использования (удобрения, сырье для получения биотоплива и т.д.). Таким образом, предлагаемый метод сочетает задачу снижения выбросов парникового газа с получением ценного сырья.

На основании полученных результатов разработана технологическая схема внедрения биофильтрации за счет микроводорослей в систему очистки дымовых газов ТЭЦ (рис. 6).

Предлагаемая к внедрению система направлена на улавливание  $\text{CO}_2$  из дымовых газов ТЭЦ с помощью фотосинтезирующих микроводорослей *Chlorella kessleri*. На первом этапе предложенной схемы происходит предварительная очистка дымовых газов за счет их прохождения через скруббер (3), который удаляет  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  и частицы пыли, а также осуществляется охлаждение газов до оптимальной температуры для микроводорослей 25–30°C. Предварительно очищенные дымовые газы осушаются (7) и охлаждаются (8), а затем подаются на второй этап очистки на фотобиореактор-биофильтр с микроводорослями (10), где происходит поглощение ими  $\text{CO}_2$  и культивирование биомассы. Предварительно в фотобиореактор-биофильтр подаются маточная культура микроводорослей (11) и питательная среда (12). Дымовые газы, прошедшие двухступенчатую очистку (20), направляются в трубу для выбросов в атмосферу (19). Накультивированная биомасса подается в отстойник (14) для отстаивания, затем полученная паста складывается в емкость (15) и подается на центрифугу (16) для обезвоживания и затем – в сушильный аппарат (17) для получения сухой биомассы, которую можно использовать как корм для животных и рыб, добавку в компост, удобрение для почв, сырье для получения биодизеля. Питательная среда после центрифугирования поступает в емкость питательной среды и используется вторично.

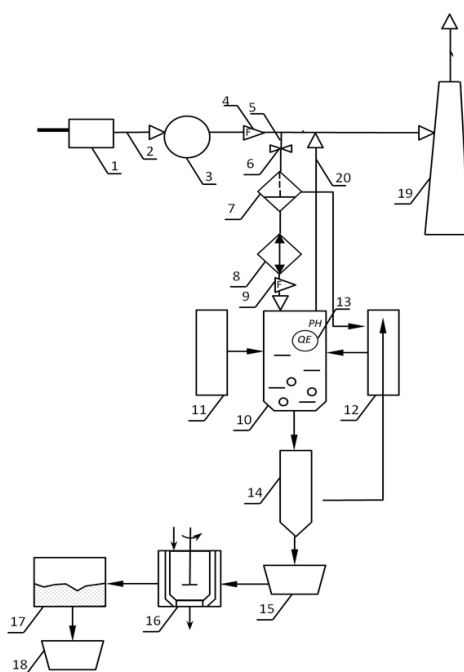


Рис. 6. Технологическая схема культивирования микроводоросли с биофиксацией дымовых газов, полученных с ТЭЦ: 1 – котел; 2 – дымовые газы; 3 – скруббер (первый этап очистки дымовых газов); 4 – расходомер; 5 – дымовые газы на фотобиореактор-биофильтр; 6 – клапан; 7 – осушитель дымовых газов; 8 – охладитель дымовых газов; 9 – расходомер (измерение расхода газовой смеси); 10 – фотобиореактор-биофильтр с микроводорослями (второй этап очистки); 11 – маточная культура микроводорослей; 12 – питательная среда; 13 – pH-метр; 14 – однокамерный отстойник; 15 – емкость для сбора пасты остаточной биомассы; 16 – центрифуга; 17 – сушильный аппарат; 18 – емкость для сбора сухой биомассы микроводорослей; 19 – труба для выбросов очищенных дымовых газов; 20 – очищенные дымовые газы

Fig. 6. Flow chart of microalgae cultivation with biofixation of flue gases obtained from a thermal power plant:

1 – boiler; 2 – flue gases; 3 – scrubber (first stage of flue gas purification); 4 – flow meter; 5 – flue gases to the photobioreactor-biofilter; 6 – valve; 7 – flue gas dryer; 8 – flue gas cooler; 9 – flow meter (measuring the flow rate of the gas mixture); 10 – photobioreactor-biofilter with microalgae (second stage of purification); 11 – microalgae stock culture; 12 – nutrient medium; 13 – pH meter; 14 – single-chamber settling tank; 15 – container for collecting residual biomass paste; 16 – centrifuge; 17 – drying apparatus; 18 – container for collecting dry microalgae biomass; 19 – pipe for emission of cleaned flue gases; 20 – cleaned flue gases

### Заключение

В работе проанализированы существующие методы поглощения углекислого газа из дымовых газов (химическая абсорбция, каталитическая и криогенная очистка и др.) и показано, что их общим недостатком является образование побочных продуктов и отходов, требующих дополнительной утилизации.

В качестве альтернативного подхода для улавливания  $\text{CO}_2$  из дымовых газов ТЭЦ предложен биологический метод – биофильтрация с помощью микроводорослей, что экспериментально исследовано на примере ТЭЦ Санкт-Петербурга. Установлено, что уже через час пропускания дымовой газовой смеси через суспензию микроводорослей в полупромышленном фотобиореакторе-биофильтре углекислый газ полностью поглощается (концентрация  $\text{CO}_2$  на выходе снижается до нуля), что подтверждает высокую эффективность предложенного метода.

Биофильтрация дымовых газов позволяет уловить углекислый газ и при этом получить дополнительный продукт – биомассу микроводорослей, которая может использоваться в качестве удобрения, сырья для получения биодизеля и других ценных компонентов и продуктов.

Разработана технологическая блок-схема очистки дымовых газов ТЭЦ с использованием микроводорослей, включающая предварительную очистку газа и последующую биофиксацию CO<sub>2</sub> в фотобиореакторе-биофилтре. Предложенное решение особенно актуально для ТЭЦ, расположенных в крупных городах, где действуют жесткие экологические нормы и существует повышенный запрос на «зеленые» технологии снижения выбросов. Реализация данного метода позволит существенно сократить выбросы парникового CO<sub>2</sub> и одновременно внести вклад в ресурсосберегающую переработку углерода.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В. Перспективы достижения углеродной нейтральности развивающимися странами // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 3. С. 23–42. DOI: 10.18721/JEST.30302
- [2] Vaz Jr.S., de Souza A.P.R., Baêta V.E.L. Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors, *Cleaner Engineering and Technology*, 8 (2022) 100456. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100456
- [3] Куксов Д.Ю., Филимонова О.Н., Кашников В.И., Федий Г.Л. Продукты окисления углеводородных топлив как источник углекислоты автономной станции // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2022. № 23. С. 50–65.
- [4] Azimi B., Tahmasebpour M., Sánchez-Jiménez P.E., Perejón A., Valverde J.M. Multicycle CO<sub>2</sub> capture activity and fluidizability of Al-based synthesized CaO sorbents, *Chemical Engineering Journal*, 358 (2019) 679–690. DOI: 10.1016/j.cej.2018.10.061
- [5] Han Y., Ho W.S.W. Polymeric membranes for CO<sub>2</sub> separation and capture, *Journal of Membrane Science*, 628 (2021) 119244. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119244
- [6] Prasad R., Gupta S.K., Shabnam N., Oliveira C.Y.B., Nema A.K., Ansari F.A., Bux F. Role of microalgae in global CO<sub>2</sub> sequestration: physiological mechanism, recent development, challenges, and future prospective, *Sustainability*, 13 (23) (2021) 13061. DOI: 10.3390/su132313061
- [7] de Moraes M.G., Costa J.A.V. Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors, *Biotechnology Letters*, 29 (2007) 1349–1352. DOI: 10.1007/s10529-007-9394-6
- [8] Politaeva N., Ilin I., Velmozhina K., Shinkevich P. Carbon dioxide utilization using *Chlorella* microalgae, *Environments*, 10 (7) (2023) 109. DOI: 10.3390/environments10070109
- [9] 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: ИЦ «Наука», 2017.
- [10] Li S., Chang H., Zhang S., Ho S.-H. Production of sustainable biofuels from microalgae with CO<sub>2</sub> bio-sequestration and life cycle assessment, *Environmental Research*, 227 (2023) 115730. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115730
- [11] Faruque M.O., Mohammed K.A., Hossain M.M., Razzak S.A. Influence of elevated CO<sub>2</sub> concentrations on growth, nutrient removal, and CO<sub>2</sub> biofixation using *Chlorella kessleri* cultivation, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18 (2021) 913–926. DOI: 10.1007/s13762-020-02909-4
- [12] Pourjamshidian R., Abolghasemi H., Esmaili M., Amrei H.D., Parsa M., Rezaei S. Carbon dioxide biofixation by *Chlorella* sp. in a bubble column reactor at different flow rates and CO<sub>2</sub> concentrations, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 36 (02) (2019) 639–645. DOI: 10.1590/0104-6632.2019036-2s20180151
- [13] Arbib Z., Ruiz J., Álvarez-Díaz P., Garrido-Pérez C., Perales J.A. Capability of different microalgae species for phytoremediation processes: wastewater tertiary treatment, CO<sub>2</sub> bio-fixation and low cost biofuels production, *Water Research*, 49 (2014) 465–474. DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.036

[14] **Deng X., Chen B., Xue C., Li D., Hu X., Gao K.** Biomass production and biochemical profiles of a freshwater microalga *Chlorella kessleri* in mixotrophic culture: effects of light intensity and photoperiodicity, *Bioresource Technology*, 273 (2019) 358–367. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.11.032

[15] **Valdovinos-García E.M., Barajas-Fernández J., Olán-Acosta M.A., Petriz-Prieto M.A., Guzmán-López A., Bravo-Sánchez M.G.** Techno-economic study of CO<sub>2</sub> capture of a thermoelectric plant using microalgae (*Chlorella vulgaris*) for production of feedstock for bioenergy, *Energies*, 13 (2) (2020) 413. DOI: 10.3390/en13020413

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПОЛИТАЕВА Наталья Анатольевна** – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: politaevana1971@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5914-6210>

**ШИНКЕВИЧ Полина Сергеевна** – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: ps.shinkevich@gmail.com

**ОПАРИНА Анна Михайловна** – ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: annaoparina93@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2043-1866>

### REFERENCES

[1] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin, O.V. Mikushina,** Prospects for achieving carbon neutrality by developing countries, *Global Energy*, 30 (03) (2024) 23–42. DOI: 10.18721/JEST.30302

[2] **S. Vaz Jr., A.P.R. de Souza, B.E.L. Baêta,** Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors, *Cleaner Engineering and Technology*, 8 (2022) 100456. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100456

[3] **D.Y. Kuksov, O.N. Filimonova, V.I. Kashnikov, G.L. Fediy,** Oxidation products of hydrocarbon fuels as a source of an autonomous station carbon dioxide, *Aerospace forces. Theory and practice*, 23 (2022) 50–65.

[4] **B. Azimi, M. Tahmasebpour, P.E. Sánchez-Jiménez, A. Perejón, J.M. Valverde,** Multicycle CO<sub>2</sub> capture activity and fluidizability of Al-based synthesized CaO sorbents, *Chemical Engineering Journal*, 358 (2019) 679–690. DOI: 10.1016/j.cej.2018.10.061

[5] **Y. Han, W.S.W. Ho,** Polymeric membranes for CO<sub>2</sub> separation and capture, *Journal of Membrane Science*, 628 (2021) 119244. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119244

[6] **R. Prasad, S.K. Gupta, N. Shabnam, C.Y.B. Oliveira, A.K. Nema, F.A. Ansari, F. Bux,** Role of microalgae in global CO<sub>2</sub> sequestration: physiological mechanism, recent development, challenges, and future prospective, *Sustainability*, 13 (23) (2021) 13061. DOI: 10.3390/su132313061

[7] **M.G. de Morais, J.A.V. Costa,** Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina sp.* cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors, *Biotechnology Letters*, 29 (2007) 1349–1352. DOI: 10.1007/s10529-007-9394-6

[8] **N. Politaeva, I. Ilin, K. Velmozhina, P. Shinkevich,** Carbon dioxide utilization using *Chlorella* microalgae, *Environments*, 10 (7) (2023) 109. DOI: 10.3390/environments10070109

- [9] N.A. Politaeva, Iu.A. Smiatskaia, T.A. Kuznetsova, L.N. Ol'shanskaia, R.Sh. Valiev, Kul'tivirovanie i ispol'zovanie mikrovodoroslei Chlorella i vysshikh vodnykh rastenii riaska Lemna [Cultivation and use of microalgae Chlorella and higher aquatic plants duckweed Lemna], monograph. Saratov: ITS "Nauka", 2017.
- [10] S. Li, H. Chang, S. Zhang, S.-H. Ho, Production of sustainable biofuels from microalgae with CO<sub>2</sub> bio-sequestration and life cycle assessment, *Environmental Research*, 227 (2023) 115730. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115730
- [11] M.O. Faruque, K.A. Mohammed, M.M. Hossain, S.A. Razzak, Influence of elevated CO<sub>2</sub> concentrations on growth, nutrient removal, and CO<sub>2</sub> biofixation using Chlorella kessleri cultivation, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18 (2021) 913–926. DOI: 10.1007/s13762-020-02909-4
- [12] R. Pourjamshidian, H. Abolghasemi, M. Esmaili, H.D. Amrei, M. Parsa, S. Rezaei, Carbon dioxide biofixation by Chlorella sp. in a bubble column reactor at different flow rates and CO<sub>2</sub> concentrations, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 36 (02) (2019) 639–645. DOI: 10.1590/0104-6632.20190362s20180151
- [13] Z. Arbib, J. Ruiz, P. Álvarez-Díaz, C. Garrido-Pérez, J.A. Perales, Capability of different microalgae species for phytoremediation processes: wastewater tertiary treatment, CO<sub>2</sub> bio-fixation and low cost biofuels production, *Water Research*, 49 (2014) 465–474. DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.036
- [14] X. Deng, B. Chen, C. Xue, D. Li, X. Hu, K. Gao, Biomass production and biochemical profiles of a freshwater microalga Chlorella kessleri in mixotrophic culture: effects of light intensity and photoperiodicity, *Bioresource Technology*, 273 (2019) 358–367. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.11.032
- [15] E.M. Valdovinos-García, J. Barajas-Fernández, M.A. Olán-Acosta, M.A. Petriz-Prieto, A. Guzmán-López, M.G. Bravo-Sánchez, Techno-economic study of CO<sub>2</sub> capture of a thermoelectric plant using microalgae (*Chlorella vulgaris*) for production of feedstock for bioenergy, *Energies*, 13 (2) (2020) 413. DOI: 10.3390/en13020413

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Natalia A. POLITAEVA** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: politaevana1971@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5914-6210>

**Polina S. SHINKEVICH** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: ps.shinkevich@gmail.com

**Anna M. OPARINA** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: annaoparina93@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2043-1866>

**Поступила: 21.11.2025; Одобрена: 11.12.2025; Принята: 12.12.2025.**

**Submitted: 21.11.2025; Approved: 11.12.2025; Accepted: 12.12.2025.**