

## ПОЛУЧЕНИЕ БИОДИЗЕЛЯ ИЗ МИКРОВОДОРОСЛИ *CHLORELLA VULGARIS*

Е. В. Мызгина<sup>1</sup>, Б. Э. Любомудров<sup>2</sup>, Е. Ф. Климова<sup>3</sup>,

[myzghina2000@mail.ru](mailto:myzghina2000@mail.ru)

<sup>1, 2, 3</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург, Россия

**Аннотация.** В процессе эксплуатации электростанций выбрасывается большое количество дымовых газов, содержащих CO<sub>2</sub>, что пагубно влияет на окружающую среду. С целью сокращения выбросов возможно использование фотосинтезирующих микроводорослей *chlorella vulgaris*. Для наращивания биомассы микроводорослей необходимы следующие условия: CO<sub>2</sub>, свет, pH, температура, питательные вещества. Источником CO<sub>2</sub> и питательных веществ для выращивания микроводорослей могут быть соответственно дымовые газы. Таким образом, происходит не только сокращение выбросов CO<sub>2</sub>, но и повторное использование CO<sub>2</sub> для преобразования биомассы микроводорослей в производство биодизеля.

**Ключевые слова:** Водоросли, *Chlorella vulgaris*, биотопливо, биодизель, липиды, перестерификация.

## PRODUCTION OF BIODIESEL FROM MICROALGAE *CHLORELLA VULGARIS*

Boris E. Lyubomudrov<sup>1</sup>, Ekaterina F. Klimova<sup>1</sup>, Ekaterina V. Myzghina<sup>1</sup>

[myzghina2000@mail.ru](mailto:myzghina2000@mail.ru)

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg,  
Russia

**Abstract.** During the operation of power plants, a large amount of flue gases containing CO<sub>2</sub> is emitted, which adversely affects the environment. In order to reduce emissions, it is possible to use photosynthetic microalgae *C. vulgaris*. The following conditions are necessary for the growth of microalgae biomass: CO<sub>2</sub>, light, pH, temperature, nutrients. The source of CO<sub>2</sub> and nutrients for growing microalgae can be flue gases respectively. This not only reduces CO<sub>2</sub> emissions, but also reuses CO<sub>2</sub> to convert microalgae biomass into biodiesel production.

**Keywords:** Algae, *Chlorella vulgaris*, biofuel, biodiesel, lipids, transesterification

## Введение

При использовании ископаемого топлива для выработки электроэнергии образуются дымовые газы, выделяемые при сжигании угля. Они содержат углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), азот ( $\text{N}_2$ ), кислород ( $\text{O}_2$ ) и водяной пар. Также в незначительных количествах присутствуют вещества, такие как окись углерода ( $\text{CO}$ ), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), оксиды серы ( $\text{SO}_x$ ), несгоревшие углеводороды ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ), тяжелые металлы, галогеновые кислоты и твердые частицы (PM).

Нынешняя тенденция к нулевым выбросам представляет собой вызов операторам электростанций по минимизации воздействия сжигаемого угля на окружающую среду. Например, на некоторых электростанциях установлены системы десульфурации дымовых газов для удаления оксид серы ( $\text{SO}_2$ ) и селективное каталитическое восстановление (SCR) и селективное некаталитическое восстановление (SNCR) для удаления оксида азота ( $\text{NO}_x$ ). Электростатические фильтры (ESP) также широко устанавливаются для контроля твердых частиц.

Углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) является основным компонентом дымовых газов, что позволяет дополнительно вырабатывать до 85 кВт электроэнергии. Улавливание и хранение углерода (CCS) имеет значение для сокращения выбросов парниковых газов.

Улавливание после сжигания условно можно разделить на химическую абсорбцию, физико-химическую адсорбцию, мембраны, криогенику, химическое петлевое сжигание и биотехнологию (например, наземная растительность или водоросли). С технической точки зрения все эти методы осуществимы, несмотря на различия в эффективности. С экономической точки зрения, методы, упомянутые выше, сталкиваются с серьезными проблемами, такими как стоимость оборудования, высокое потребление для регенерации (например, с аминными растворителями) и большие требования к площади. Биологическое улавливание  $\text{CO}_2$  привлекло внимание в последние годы из-за его преимущества – производство биотоплива в качестве побочного продукта [1].

Уменьшение запасов нефти, проблемы воздействия ископаемого топлива на окружающую среду привело к значительному интересу к биотопливу как к альтернативному источнику энергии [2].

## I. Биодизель

### 1.1. Выбор источника сырья

Микроводоросли обладают большим потенциалом в качестве источника биомассы для производства жидкого транспортного топлива. Их преимуществами по сравнению с традиционными биотопливными культурами «первого поколения», такими как кукуруза, являются высокая производительность биомассы, способность расти на некачественных землях, непригодных для сельского хозяйства, устойчивость роста за счет извлечения макро- и микроэлементов из промышленных выбросов дымовых труб [2]. Выбросы от угольных электростанций являются потенциальной стратегией производства больших количеств биомассы и представляют собой возможность для разработки, тестирования и оптимизации необходимых технологий [4].

Таблица 1 – Расчетное содержание масла, урожайность для различных видов биодизельного сырья [5]

Сырье	Выход масла (л/га/год)	Содержание масла (% масс. в биомасса)	Производительность биодизеля (кг биодизеля/га/год)
Микроводоросли	136900	70	121 104
Пальмовое масло	5950	30–60	4747
Кукуруза	172	44–48	152
Рапс	1190	38–46	862

## 1.2. Способность поглощения CO<sub>2</sub>

Дымовые газы направляются непосредственно в водоемы для культивирования микроводорослей, что может привести к быстрым изменениям pH среды. Когда микроводоросли не могут адаптироваться к экстремальным условиям культивирования, происходит их гибель. Необходимо проводить скрининг микроводорослей на толерантность к pH.

Таблица 2 – Эффективность фиксации CO<sub>2</sub> и липидная продуктивность культур микроводорослей хлореллы с использованием дымовых газов [6]

Микроводоросли	Источник дымовых газов	CO <sub>2</sub> (%)	Производительность биомассы (г·л) <sup>-1</sup> сут <sup>-1</sup> )	Фиксация CO <sub>2</sub> (г/л/сут)	Липиды (%)	Липидная продуктивность (г/л/сут)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Электростанция	12	0,502	0,919	40,1	0,201
<i>Chlorella vulgaris</i>	Угольный котел	6	0,312	0,571	23,2	0,074

## 1.3 Параметры для культивирования

### 1.3.1 Свет

Из-за фотосинтеза для роста микроводорослей свет является наиболее важным параметром в выращивании микроводорослей. Должно соблюдаться два условия: интенсивность света и длина волны света. Когда интенсивность света превышает насыщение света, которое может переноситься микроводорослями, скорость роста микроводорослей будет значительно снижена. Поэтому для достижения максимальной скорости роста микроводорослей интенсивность света обычно контролируют до «светонасыщения». Рост микроводорослей хлорелл увеличивается при непрерывном освещении с использованием светодиода (LED) при оптимальной интенсивности света без дефицита световой энергии [6].

Фотосинтезирующие организмы используют только ту часть солнечного спектра, которая фотосинтетически активна, то есть 350–700 нм [7].

### 1.3.2 Температура

Оптимальный температурный диапазон для роста микроводорослей обычно составляет 15–26 °С. Оптимальная температура для роста варьируется у разных видов микроводорослей. Температура дымовых газов, как правило, достигает 120 °С, они нуждаются в охлаждении для аэрации в питательную среду. Если термоустойчивый потенциал микроводорослей хороший, стоимость охлаждения дымовых газов может быть снижена [6].

### 1.3.3 pH

pH среды влияет на активность ферментов, связанных с метаболизмом микроводорослей, что влияет на рост и эффективность фиксации углерода. Оптимальный pH для роста варьируется между видами микроводорослей, и является нейтральным для большинства микроводорослей.

Дымовые газы обычно содержат высокие концентрации CO, NO и SO. Когда микроводоросли непосредственно аэрировали дымовыми газами, содержащими 10–30 % CO, pH снижалось до 5,5. Если дымовой газ непосредственно аэрировать в культуральную микроводорослей без разбавления, то избыток CO дымовых газов будет выброшен обратно в атмосферу. Для уменьшения выбросов необходимо направлять газы в щелочную среду, чтобы CO превращался в HCO, который растворяется в воде и используется для роста микроводорослей. Кроме того, постепенное повышение pH в культуре микроводорослей

желательно для уменьшения микробного разнообразия и хорошо для наружного выращивания микроводорослей [6].

Таким образом, pH в большинстве микроводорослей составляет от 7–9 с оптимальным значением от 8,2–8,7 [7].

#### 1.4. Технология, используемая в производстве биодизеля

Масла из микроводорослей отличаются от большинства растительных масел тем, что они весьма богаты полиненасыщенными жирными кислотами с четырьмя и более двойными связями.

Биодизель можно получить путем этерификации или переэтерификации. Этерификация – процесс, при котором жирная кислота реагирует с одноатомным спиртом с образованием сложного эфира, в качестве катализатора используются кислоты. Реакцию, представленную на Рис. 1, используют для удаления свободных жирных кислот из низкокачественного масла с высокой кислотностью.

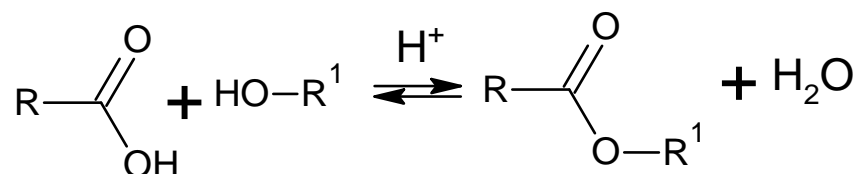


Рис. 1 – Реакция для удаления свободных жирных кислот из низкокачественного масла с высокой кислотностью, где RCOOH – карбоновая кислота, R1-OH – одноатомный спирт

Переэтерификация – это вытеснение спирта из сложного эфира другого спирта в процессе, подобном гидролизу. Этот процесс используется для снижения вязкости триглицеридов. Реакция переэтерификации представлена на Рис. 2.

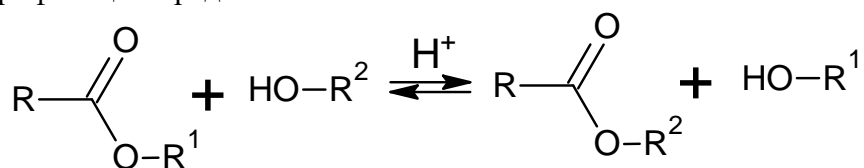


Рис. 2 – Общее уравнение реакции переэтерификации, где RCOOR1 – сложный эфир карбоновой кислоты 1; RCOOR2 – сложный эфир карбоновой кислоты 2

По истечении периода реакции богатую глицерином фазу отделяют от эфирного слоя декантацией или центрифугированием. Полученная сложноэфирная фаза (сырое биодизельное топливо) содержит загрязняющие вещества, такие как метанол, глицериды, мыла, катализаторы или глицерин, которые должны быть очищены в соответствии с европейским стандартом EN 14214.

В обычных процессах переэтерификации и этерификации для производства биодизеля, сильные щелочи или кислоты используются в качестве химических катализаторов. Основной катализ протекает намного быстрее, чем кислотный. Низкая стоимость и благоприятная кинетика превратили NaOH в наиболее часто используемый катализатор в промышленности. Однако мыло и эмульсии, образующиеся в ходе реакции, могут усложнять процесс очистки [3].

#### 1.5. Характеристика полученного биодизеля

По критериям, приведенным в табл.3 биодизель из *C. vulgaris*, находится в установленных пределах стандартов биодизеля.

Таблица 3 –Сравнение биодизеля *C. vulgaris* с нефтяным дизельным топливом и различными стандартами биодизеля [8]

Свойства	Биодизель из <i>C. vulgaris</i>	Дизель из нефти	Стандарты		
			ASTM	EN 14214	IS 15607
Плотность при 15 °С (кг·м <sup>-3</sup> )	881	850	–	860–900	870–900
Вязкость при 40 °С (мм <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> )	4,5	2,6	1,9–6,0	3,5–5,0	3,5–5,0
Кислотная ценность (мгКОН·г <sup>-1</sup> )	0,6	0,4	<0,8	<0,5	<0,8
Цетановый индекс	54,7	49–55	>47	<51	<51
Содержание золы (%)	0,01	0,01	<0,02	<0,02	<0,02

### Заключение

Экологические проблемы вызваны увеличением содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере. Чтобы сократить выбросы CO<sub>2</sub> было предпринято множество исследований для разработки возобновляемых и устойчивых источников энергии, которые должны быть экологически чистыми и экономически эффективными. Производство биодизеля из водорослей технически более целесообразно и рентабельно, так как может покрыть постоянно растущий спрос на ископаемое топливо.

### Список использованных источников

- [1] Zhang, Xing. Microalgae removal of CO<sub>2</sub> from flue gas. DOI: 10.13140/RG.2.2.26617.77929. – 2015.
- [2] Волкова М.В., Климов К.К., Любомудров Б.Э., Сарапулова А.С., Велькин В.И. Разработка концепции экологически чистых ТЭЦ и ТЭС с активным использованием фотосинтетических процессов. Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ). DOI: 10.15518/isjaee.2020.09.017. – 2020.
- [3] Carels, N. The Challenge of Bioenergies: An Overview. In (Ed.), Biofuel's Engineering Process Technology. DOI: 10.5772/16403. – 2011.
- [4] Asinari Di San Marzano C-M, Legros A, Naveau H, Nyns EJ. Biomethanation of the marine algae. Tetraselmis. Int J Sustain Energy 1(4):263–272. – 1981.
- [5] Sani, Y., Daud, W., Aziz, A. A. Biodiesel Feedstock and Production Technologies: Successes, Challenges and Prospects. In: Fang, Z., editor. Biodiesel - Feedstocks, Production and Applications [Internet]. London: IntechOpen. DOI: 10.5772/52790. – 2012.
- [6] Lin, C. Factors Influencing CO<sub>2</sub> Biofixation by Microalgae. Encyclopedia. Web.– 2022.
- [7] Simosa, Alicia E. Factors affecting algal biomass growth and cell wall destruction. –2016.
- [8] Mallick, N., Mandal, S., Singh, A. K., Bishai, M., & Dash, A. Green microalga *Chlorella vulgaris* as a potential feedstock for biodiesel. Journal of Chemical Technology & Biotechnology. – 2011.