



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2025. Т. 25, вып. 3. С. 254–263

Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2025, vol. 25, iss. 3, pp. 254–263

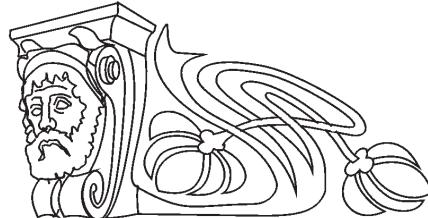
<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-3-254-263>, EDN: FAMVVG

Научная статья

УДК 543.07

Проточная фотометрическая ячейка для онлайн-определения содержания биомассы микроводоросли *Nannochloropsis* sp. в культуральной среде



Е. В. Базарнов , А. Ю. Богомолов

Самарский государственный технический университет, Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244

Базарнов Евгений Вячеславович, аспирант кафедры «Аналитическая и физическая химия», eugene.bazarnov@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0002-5924-7297>

Богомолов Андрей Юрьевич, доктор химических наук, доцент, заведующий кафедрой «Аналитическая и физическая химия», c11b0f5057f5@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4832-638X>

Аннотация. Одним из перспективных направлений развития углеродно-нейтральной энергетики является развитие технологий получения биотоплив из микроводорослей. Для эффективного управления биотехнологическими процессами в области культивации таких микроводорослей требуются экспрессные и эффективные методы контроля протекания процесса. В ходе исследования спроектирована и изготовлена проточная фотометрическая ячейка для онлайн определения содержания биомассы микроводоросли *Nannochloropsis* sp. в культуральной среде. Была произведена культивация биомассы микроводоросли в специально изготовленном фотобиореакторе. При помощи изготовленной ячейки произведена серия фотометрических измерений растворов выращенной биомассы в культуральной среде. По результатам измерений получена линейная зависимость поглощения от содержания биомассы. Показана возможность онлайн-определения содержания биомассы микроводоросли *Nannochloropsis* sp. в среде процесса культивации при помощи разработанной проточной фотометрической ячейки на основе лазера с рабочей длиной волны 650 нм.

Ключевые слова: содержание биомассы, онлайн-мониторинг, проточная фотометрическая ячейка, культивация *Nannochloropsis* sp., Arduino

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2023-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Для цитирования: Базарнов Е. В., Богомолов А. Ю. Проточная фотометрическая ячейка для онлайн-определения содержания биомассы микроводоросли *Nannochloropsis* sp. в культуральной среде // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2025. Т. 25, вып. 3. С. 254–263. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-3-254-263>, EDN: FAMVVG

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Flow-through photometric cell for online determination of the biomass content of microalgae *Nannochloropsis* sp. in the cultural environment

Е. В. Bazarnov , А. Yu. Bogomolov

Samara State Technical University, 244 Molodogvardeyskaya St., Samara 443100, Russia

Evgeniy V. Bazarnov, eugene.bazarnov@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0002-5924-7297>

Andrey Yu. Bogomolov, c11b0f5057f5@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4832-638X>

Abstract. One of the promising directions of carbon-neutral energy development is the development of technologies for biofuel production from microalgae. Effective control of biotechnological processes in the field of cultivation of such microalgae requires express and effective methods of process control. In this study, a flow-through photometric cell has been designed and fabricated for online determination of the biomass content of the microalgae *Nannochloropsis* sp. in the culture medium. The microalgae biomass has been cultured in a custom-made photobioreactor. Using the fabricated cell, a series of photometric measurements of solutions of the grown biomass in the culture medium have been made. A linear dependence of absorbance on biomass content has been obtained from the results of measurements. The possibility of online determination of the biomass content of microalgae *Nannochloropsis* sp. in the culture medium using the developed flow-through photometric cell based on a laser with a working wavelength of 650 nm has been shown.

Keywords: biomass content, online monitoring, flow photometric cell, cultivation of *Nannochloropsis* sp., Arduino



Acknowledgements. The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FSSE-2023-0003) as a part of the state assignment of the Samara State Technical University.

For citation: Bazarnov E. V., Bogomolov A. Yu. Flow-through photometric cell for online determination of the biomass content of microalgae *Nannochloropsis* sp. in the cultural environment. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2025, vol. 25, iss. 3, pp. 254–263 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-3-254-263>, EDN: FAMVVG

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Тема энергетического перехода от ископаемых ресурсов к «зеленой энергетике» не теряет своей актуальности. Основной движущей силой исследований в области «зеленой энергетики» выступает стремление к декарбонизации мировой экономики к 2050 г. Возобновляемые источники энергии привлекательны, в первую очередь, повсеместной доступностью солнечного света и ветра – такой источник энергии можно расположить в любой точке земного шара. Но у солнечных и атмосферных электростанций есть существенный недостаток – нестабильная выработка электроэнергии, зависящая от сезона и времени суток. В период пиковой нагрузки на электросети дефицит электроэнергии нивелируется за счет генерации недостающих объемов на базе ТЭЦ путем сжигания традиционных ископаемых топлив [1]. Полную декарбонизацию энергетического комплекса могли бы обеспечить углеродно-нейтральные топлива. К примеру, биотопливо обладает нулевым углеродным следом и при этом не требует перестройки энергетической инфраструктуры – его углеродная нейтральность достигается поглощением углекислого газа на этапе производства самого топлива [2, 3].

Существует три поколения биотоплив – получаемые из биомассы пищевых сельскохозяйственных культур, из биомассы непищевых сельскохозяйственных культур, из биомассы водорослей. Третье поколение признано наиболее перспективным как по удельному выходу биомассы на единицу производственной площади, так и по скорости прироста биомассы. Выращивание биомассы для получения биотоплив относится к отрасли биотехнологий [4]. В отличие от традиционных ископаемых топлив, на химический состав биомассы, выступающей сырьем для получения биотоплив, можно повлиять на стадии ее роста за счет изменения условий культивации [5]. Для получения биодизельных топлив наиболее ценными соединениями в составе биомассы считаются липиды или триацилглицериды. Известно, что азотная

депривация *Nannochloropsis* sp. в сочетании с повышением яркости освещения позволяет увеличить содержание липидов в составе биомассы в 1.5 раза [6]. В целом же на химический состав биомассы фотоавтотрофных микроводорослей оказывают влияние следующие параметры процесса культивации: количество световой энергии, концентрация углекислого газа в реакционной среде, температура процесса, концентрация питательных соединений в реакционной среде и кислотность реакционной среды. При этом в первую очередь необходимо обеспечить контроль содержания биомассы в реакционной среде процесса в реальном времени. Контроль значений всех вышеперечисленных параметров необходим для обеспечения стабильного роста клеток культуры.

В фотобиореакторах биомасса представлена микроводорослями или бактериями, рост которых происходит в результате фотосинтеза. Стадии фотосинтеза протекают 10^{-5} – 10^{-3} с, а этапы деления клеток и их последующего роста до нового деления исчисляются минутами. В связи с высокой скоростью протекания процесса, традиционные методы определения биомассы, такие как камеры для подсчета клеток (камера Горяева, камера Фукса – Розенталя), являются слишком продолжительными и трудоемкими и не подходят для оперативного получения данных о концентрации биомассы в реакторе [7]. Таким образом, для эффективного управления биотехнологическими процессами требуется реализация поточных методов анализа.

Современные методы аналитического контроля технологических процессов (АКТП) позволяют проводить анализ различных процессов в режиме «онлайн» практически в реальном времени и не требуют постоянного отбора проб. В среде биотехнологического процесса неразрушающий контроль успешно достигается применением оптических методов анализа, в том числе спектральных. В качестве примеров такого рода в биотехнологии можно привести создание миниатюрного биореактора для брожения дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, позволяющего в режиме реального времени

определять стадию развития культуры и поддерживать условия протекания процесса [8], мультиспектральную методику онлайн-определения содержания биомассы и кислорода в среде ферментации тех же дрожжей [9], а также внедрение методов АКТП на биотехнологических производствах биотоплива второго поколения [10].

АКТП только начинает применяться в биотехнологических производствах. Тем более, контроль за концентрацией биомассы микроводорослей в онлайн-режиме в промышленных масштабах еще не реализован, а в экспериментальных установках реализован недостаточно эффективно [11]. Существующие методы поточного определения биомассы в культуральной среде с помощью датчиков мутности [11, 12] не могут быть применены в промышленном процессе. Существуют факторы, критически влияющие на точность и правильность результатов поточного анализа. В указанных датчиках луч немонохроматического света в видимом и ИК диапазонах спектра пропускается через слой анализируемого раствора, а результат измеряется фотометрическим детектором. С точки зрения классификации, эти анализаторы относятся к фототурбидиметрическим. Принцип турбидиметрического и сходного ему нефелометрического методов анализа состоит в измерении падения интенсивности светового потока, прошедшего через раствор, содержащий взвешенные рассеивающие свет частицы [13, 14]. Ожидается, что интенсивность проходящего света уменьшается преимущественно вследствие рассеяния; поглощение в этой группе методов является нежелательным. Поэтому при разработке систем онлайн-мониторинга биотехнологических процессов необходимо руководствоваться углубленными знаниями о реакционной системе, в том числе ее спектральными характеристиками [15]. Раствор биомассы представляет собой негомогенную мультидисперсную систему, в которой происходит как поглощение, так и многократное рассеяние светового излучения частицами разных размеров. Поэтому турбидиметрический и нефелометрический методы анализа биомассы, хотя и применяются на практике для определения некоторых параметров такой системы, но при разработке оптических сенсоров для АКТП биотехнологических процессов предпочтение следует отдавать спектрофотометрическим методам анализа, как более точным [16].

Настоящее исследование ставило своей целью разработку прототипа поточной фотометрической ячейки на основе коммерчески доступных компонентов для проверки возможности поточного определения содержания биомассы фотосинтезирующих микроводорослей в реакционной среде культивации.

Материалы и методы

Материалы

Культура микроводоросли *Nannochloropsis* sp. была получена из коллекции РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева (г. Москва). Для культивации биомассы микроводорослей из полученного образца культуры *Nannochloropsis* sp. применялась питательная среда Guillard f/2 (Aqua Algae, США).

Процесс культивации биомассы

Для проектирования поточной фотометрической ячейки, позволяющей определять содержание биомассы в растворе, была выбрана микроводоросль *Nannochloropsis* sp. На первой стадии культивация минимального объема биомассы для посева в фотобиореактор производилась в колбах с питательной средой Guillard f/2 [17] в шейкере Elmi S-3 (Elmi, Латвия). На основе полученной культуры микроводорослей была произведена культивация биомассы в спроектированном и изготовленном фотобиореакторе закрытого типа. Применявшийся фотобиореактор относится к реакторам идеального смешения с глубинной культивацией биомассы, с контролем температуры среды, концентрации кислорода и углекислого газа в культуральной жидкости (рис. 1).

Выбор источника освещения для культивации производился по спектральным характеристикам с учетом пиков поглощения хлорофилла «а». В качестве наиболее подходящего источника была выбран светодиод модели Lm281b+ (Samsung, Южная Корея) с наиболее соответствующими требованиям спектральными характеристиками (рис. 2), на его основе были изготовлены светодиодные линейки мощностью 42 Вт.

Проточная фотометрическая ячейка

Проточная фотометрическая ячейка была спроектирована и изготовлена в виде трубы с двумя боковыми отводами для ввода и вывода анализируемого раствора биомассы (рис. 3). На противоположных концах пря-

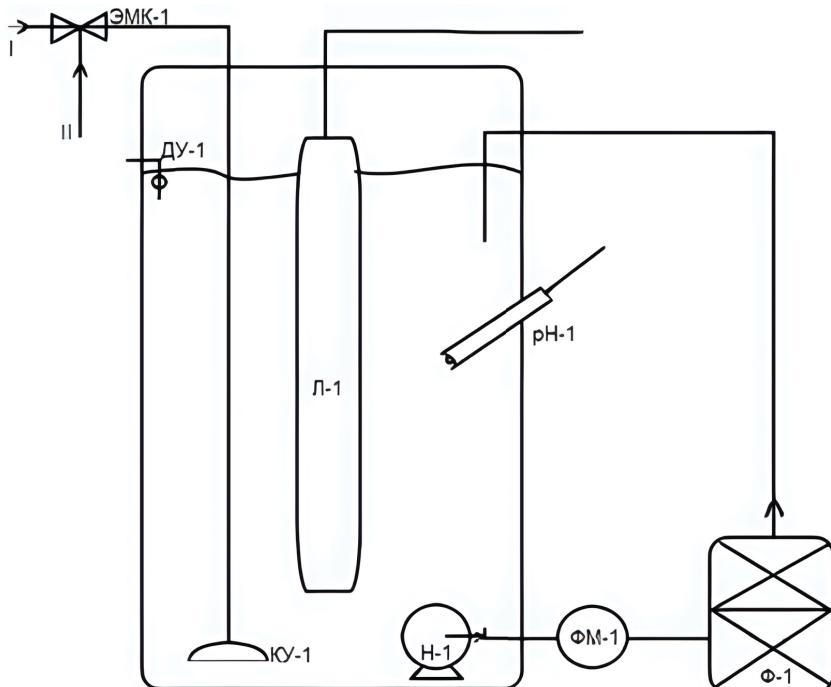


Рис. 1. Схема фотобиореактора: Л-1 – система освещения; Н-1 – циркуляционный насос, Ф-1 – фильтр, FM-1 – проточная фотометрическая ячейка, КУ-1 – колокол ввода CO_2 , pH-1 – pH электрод, ДУ-1 – датчик уровня суспензии, ЭМК – электромагнитный трехходовой клапан. I – линия подачи воздуха, II – линия подачи CO_2

Fig. 1. Photobioreactor diagram: L-1 – lighting system; H-1 – circulation pump, F-1 – filter, FM-1 – flow photometric cell, KU-1 – CO_2 dissolving cone, pH-1 – pH sensor, DU-1 – level sensor, EMK – electromagnetic three-way valve. I – air supply line, II – CO_2 supply line

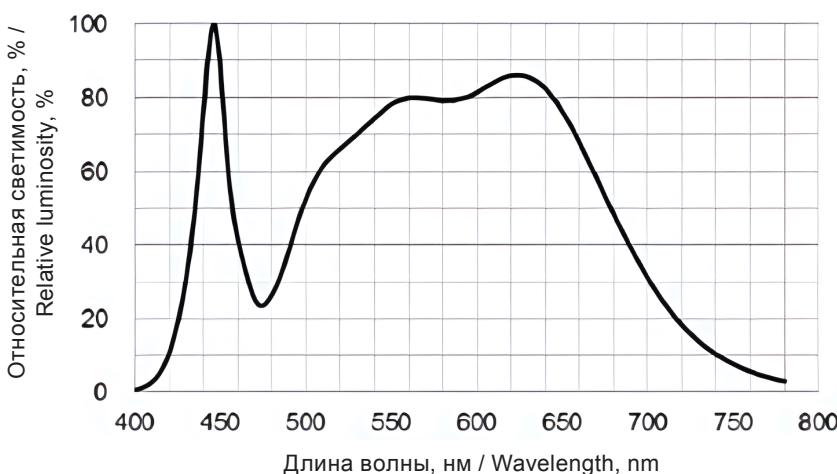


Рис. 2. Нормированный спектр излучения светодиодов Samsung Lm281b+ [18]

Fig. 2. Normalized emission spectrum of Samsung Lm281b+ LEDs [18]

мого участка трубы расположены источник когерентного электромагнитного излучения (лазерный диод) с центральной длиной волны 650 нм и фотодиод, регистрирующий излучение, прошедшее сквозь слой анализируемого

образца. Ввод образца производился через боковой отвод со стороны излучателя.

Лазерный источник света был оснащен схемой, обеспечивающей стабильную во времени яркость излучения.

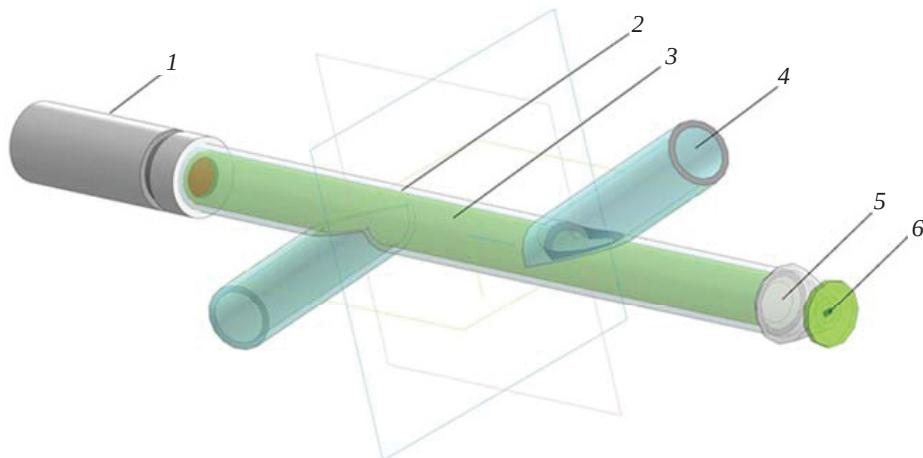


Рис. 3. Проточная фотометрическая ячейка: 1 – лазерный диодный модуль, 2 – проточная ячейка, 3 – слой образца, 4 – ввод/вывод образца, 5 – фокусирующая линза, 6 – фотоэлемент

Fig. 3. Flow photometric cell: 1 – laser diode module, 2 – flow cell, 3 – sample layer, 4 – sample input/output, 5 – focus lens, 6 – photocell

Для регистрации аналитического сигнала применялся фотодиод BPW-34 (Osram, Германия) (спектральные характеристики поглощения представлены на рис. 4).

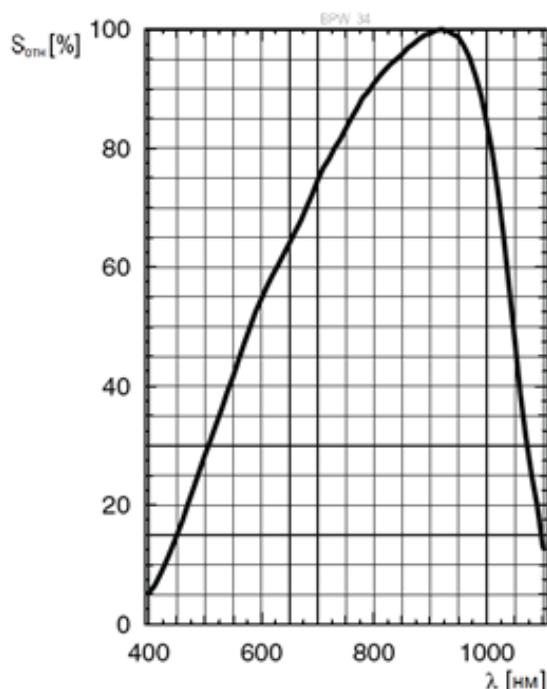


Рис. 4. Спектральная чувствительность фотодиода Osram BPW-34 [19]

Fig. 4. Spectral sensitivity of Osram BPW-34 photodiode [19]

Электрический сигнал с фотоэлемента преобразовывался с помощью $\Delta\Sigma$ аналого-

цифрового преобразователя (АЦП) MCP3421, по каналу I²C передавался в память микроконтроллера Arduino Uno (Atmel, США), где количественно оценивался в виде долей поглощения относительно поглощения чистым раствором среды культивации и записывался на диск памяти. Количественная оценка интенсивности падающего на фотодиод света производилась с помощью Arduino Uno. Интенсивность падающего на элемент света была пропорциональна сигналу с фотоэлемента, который измерялся в милливольтах (мВ) [20].

Фотометрические измерения

Фотометрические измерения на спектрофотометре «ЮНИКО 1201» (UNICO, США) производились в две стадии. На первой стадии эксперимента были проведены измерения поглощения света с длиной волны 650 нм раствором биомассы на спектрофотометре «ЮНИКО 1201».

На второй стадии эксперимента фотометрические измерения производились на спроектированной и изготовленной проточной фотометрической ячейке. Пропускание и поглощение вычислялись по формулам:

$$T = \frac{I}{I_0}, \quad (1)$$

$$A = -\lg(T), \quad (2)$$

где I – значения сигнала с фотодиода для исследуемой пробы, I_0 – значение сигнала для эталонного образца, T – пропускание.



Референтные измерения содержания клеток в растворе

В качестве референтного метода измерения концентрации клеток в растворах культуральной жидкости применялся счетный метод в счетной камере Горяева [7]. Для подсчета клеток в камере Горяева использовали микроскоп МИКМЕД-6 (МТПК-ЛОМО, Россия) с вмонтированной камерой Levenhuk C1400NG (Levenhuk, Россия). Удельная плотность клеток водоросли в счетной камере Горяева определялась независимо для каждого раствора. Каждый отобранный образец раствора был помещен под счетное стекло камеры Горяева, после чего содержание клеток было подсчитано под микроскопом в 5 больших квадратах, расположенных по диагонали, разделенных на 16 малых, и усреднено между отдельными квадратами счетной камеры.

Программное обеспечение

При проектировании проточной фотометрической ячейки использовалось программное обеспечение KOMPAS-3D (ООО «АСКОН – Системы проектирования», Россия) (моделирование), PIPESIM (Schlumberger, США) (гидродинамический расчет).

При анализе полученных экспериментальных данных с построением графических зависимостей применялось ПО Microsoft Office Excel (Microsoft, США).

При написании программного кода к микроконтроллеру Arduino Uno использовалась программная среда Arduino IDE (Atmel, США).

Результаты и их обсуждение

Культивация биомассы в колбах с питательной средой производилась в шейкере с заданной скоростью 110 об/мин при режиме освещения 16/8 ч день/ночь при температуре 27°C. После получения биомассы в количестве 10% от расчетного объема реакционной зоны в фотобиореакторе был осуществлен пересев культуры в фотобиореактор в асептических условиях.

Культивация в фотобиореакторе производилась в питательной среде Guillard f/2, pH среды 7.5–8.2, температура 30°C, световой режим 16/8 – дневная/ночная фаза, ч. Концентрация биомассы в растворе поддерживалась на уровне перехода от стадии экспоненциального роста к лаг-фазе.

Предложенный оптический метод определения содержания биомассы в потоке куль-

туральной жидкости основан на ослаблении интенсивности лазерного излучения на выбранной длине волны при прохождении его через трубку с образцом, от источника к детектору. Причиной падения интенсивности являются два физических явления: многократное рассеяние светового потока взвешенными частицами водоросли размером 3–5 мкм и его поглощение теми же клетками биомассы [21]. Культуральная жидкость, не содержащая клеток биомассы, не показывает собственного поглощения, поскольку используется в качестве образца сравнения (уравнение 1). Согласно молекулярно-кинетической теории, нерастворимые частицы размером 1–3 мкм подвержены воздействию броуновского движения, которое заставляет их хаотично двигаться в объеме жидкости. Размер клеток микроводорослей может составлять от 1 до 20 мкм, поэтому нельзя полагаться на природные способности клеток оставаться во взвешенном состоянии, и требуется обеспечить турбулентность среды в области аналитического сигнала для поддержания раствора биомассы в оптимальном состоянии для фотометрического анализа.

В связи с тем что химический состав клетки может меняться в зависимости от условий культивации, в качестве определяемого вещества был выбран хлорофилл «а». Его содержание в составе клетки также может изменяться в зависимости от стадии развития клетки, но он всегда присутствует в живой клетке микроводоросли, и при стабильных условиях культивации его удельное содержание в клетке остается стабильным [22].

Спектр поглощения видимого света хлорофилла «а» обладает двумя пиками – в зонах 410–440 и 650–660 нм [23]. Исходя из этого, для обеспечения селективности проектируемого сенсора в качестве источника излучения был выбран полупроводниковый лазер с длиной волны монохроматического когерентного излучения 650 нм. С учетом вышеописанных факторов была сконструирована проточная фотометрическая ячейка для оптического определения концентрации биомассы (см. рис. 3).

Форма проточной фотометрической ячейки была спроектирована с учетом гидродинамического расчета застойных зон, углы ввода и вывода анализируемого раствора были выбраны по наименьшему гидродинамическому сопротивлению потока при наименьшем объеме застойных зон в области сенсоров. Таким образом

обеспечивалась наибольшая скорость потока и предотвращалось зарастание ячейки биомассой.

Для градиуровочной модели на содержание биомассы создали серию из 5 растворов (1:4, 1:2, 1:1, 1:0,5, 1:0) с различной концентрацией клеток *Nannochloropsis* sp. (таблица). Растворы изготовили путем разбавления исходного образца, взятого из реактора после достижения лаг-фазы развития биомассы, раствором исходной культуральной жидкости. В качестве эталонного образца для получения спектра

сравнения использовалась питательная среда без биомассы. Таким образом, значение пропускания среды, не содержащей биомассы, составляло 1. Фотометрические измерения проводили на ячейке, изъятой из реактора. Для обеспечения циркуляции измеряемого образца использовали циркуляционный насос, обеспечивающий турбулентный режим потока образца. Эксперимент повторили трижды с разницей отбора проб в 7 дней. Результаты измерений представлены в таблице.

Результаты фотометрических измерений
Table. Photometric measurement results

Раствор / Solution	Удельная плотность клеток, млн×мл ⁻¹ / Cell concentration, mln×ml ⁻¹	T, пропускание / T, transmittance		A, поглощение / A, adsorption	
		Среднее значение / Mean value	Стандартное отклонение / Standard deviation	Среднее значение / Mean value	Стандартное отклонение / Standard deviation
0:1 (культуральная среда / Culture medium)	0	1.000	0.000	0.000	0.003
1:4	5.0	0.913	0.007	0.039	0.003
1:2	8.0	0.820	0.001	0.086	0.000
1:1	12.4	0.753	0.008	0.123	0.005
1:0,5	16.1	0.669	0.007	0.174	0.005
1:0	24.5	0.612	0.007	0.213	0.005

На основании полученных данных были построены графики зависимостей пропускания и поглощения от концентрации клеток в исследуемых растворах (рис. 5). Наблюдалась

хорошая сходимость результатов измерений при среднем значении стандартного отклонения 0,0063 внутри троек значений пропускания и 0,0036 внутри троек значений поглощения для

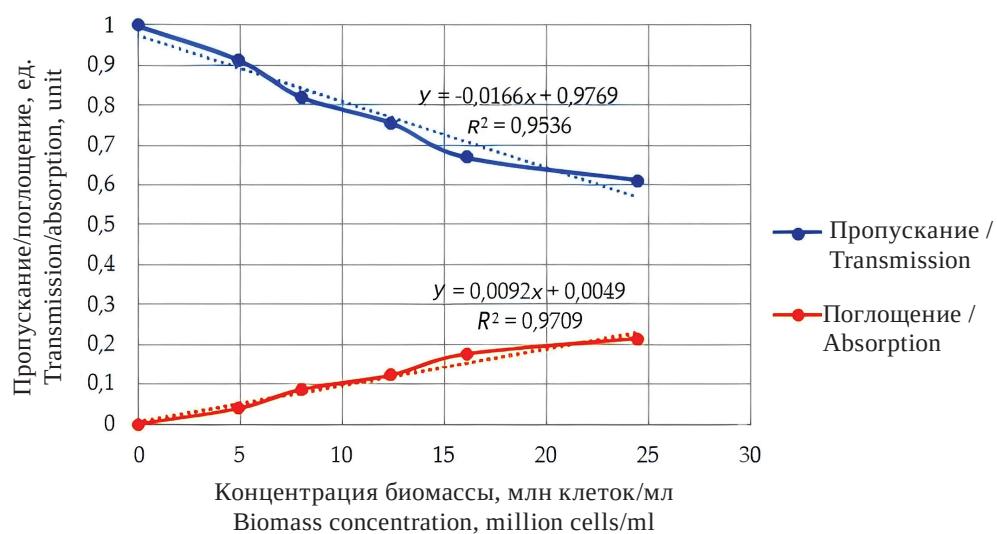


Рис. 5. Графические зависимости пропускания и поглощения от концентрации биомассы
Fig. 5. Graphical dependencies of transmittance and absorbance with biomass concentration

каждой концентрации. Воспроизводимость не оценивалась в связи с проведением 3 серий измерений на одной и той же культуре биомассы. Функции зависимости наблюдаемого сигнала в единицах пропускания и поглощения описываются уравнением прямой. Причем зависимость A от содержания биомассы показывает заметно лучшую точность ее определения ($R^2 = 0.97$), чем зависимость от T ($R^2 = 0.95$), т. е. именно поглощение должно быть использовано для построения градуировочной модели на определение биомассы.

Этот эмпирически полученный результат можно объяснить, исходя из следующих соображений. Раствор биомассы представляет собой мультидисперсную систему, в которой происходит многократное рассеяние светового излучения частицами разных размеров. При этом клетки биомассы способны не только рассеивать, но и поглощать световое излучение. Полученная почти прямая зависимость A от содержания клеток показывает, что оба физических эффекта имеют в рассматриваемом концентрационном диапазоне зависимости, близкие к линейным. Необходимо подчеркнуть, что это наблюдение имеет чисто эмпирический характер и не имеет прямого теоретического объяснения. Поскольку закон Бугера – Ламберта – Бера, строго говоря, к дисперсным системам не применим, при теоретическом рассмотрении нельзя было с уверенностью ожидать линейной зависимости поглощения от концентрации. Тем не менее, результаты показывают, что полученная зависимость A близка к линейной. Аналогично, результат может быть объяснен предположением, что рассеяние света биомассой в проточной ячейке также имеет линейный характер в рассматриваемом диапазоне концентраций.

Для оценки вклада обоих эффектов в результат градуировки необходимы дальнейшие исследования с использованием значительно большего числа измерений на представительном наборе образцов, полученных в различных условиях, в частности на разных стадиях роста культуры биомассы.

Необходимо отметить, что пропорция содержания хлорофилла в клетке относительно других веществ может также меняться в экстремальных условиях, вне стадий логарифмического роста клеток. Таким образом, иногда низкое поглощение света хлорофиллом в растворе биомассы может указывать не на снижение концентрации клеток, а на смену стадии раз-

вития клеток биомассы, поэтому действующая градуировочная модель должна быть построена с учетом основных факторов, влияющих на измерение. Учитывая сложность системы, для построения точной модели для поточного определения биомассы, вероятно, потребуется использование не единичного сенсора, а мультисенсорной системы на основе нескольких оптимизированных источников монохроматического (или близкого к таковому) излучения, таких как стандартные или лазерные светодиоды.

Заключение

В работе проверена гипотеза о возможности измерения концентрации биомассы микроводоросли *Nannochloropsis* sp. фотометрическим методом с использованием проточной фотометрической ячейки. Полученные по результатам эксперимента данные указывают на возможность построения математической модели при использовании хемометрических методов анализа данных с нескольких сенсоров.

Таким образом, принцип может использоваться для экспрессного анализа содержания биомассы в потоке и позволит существенно продвинуться в оптимизации биотехнологического процесса культивации фототрофных микроорганизмов.

Несмотря на линейность в исследованном диапазоне условий, нет гарантий, что линейность будет соблюдаться в других диапазонах условий.

Для разработки метода фотометрического определения концентрации биомассы микроводоросли *Nannochloropsis* sp. необходимо провести спланированный эксперимент в разных диапазонах условий, учитывающий основные факторы, влияющие на процесс).

Построение количественных моделей должно производиться с учетом анализа многомерных данных (хемометрических методов).

Список литературы

1. Кулапин А. И. Энергетический переход: Россия в глобальной повестке // Энергетическая политика. 2021. № 7 (161). С. 10–15. https://doi.org/10.46920/2409-5516_7161_10
2. Смоляков А. Ф., Бандель А. Л. Биомасса: топливо и энергия // Научно-техническая конференция института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2018 года (30 января – 6 февраля 2019 г., Санкт-

- Петербург) : сб. ст. СПб. : Институт технологических машин и транспорта леса, 2019. С. 142–146.
3. Muhammad U., Shamsuddin I., Danjuma A., RuS M., Dembo U. Biofuels as the starring substitute to fossil fuels // Petrol. Sci. and Eng., 2018. Vol. 2, № 1. P. 44–49. <https://doi.org/10.11648/j.pse.20180201.17>
 4. Aresta M., Dibenedetto A., Dumeignil F. Biorefineries: An Introduction. Berlin : De Gruyter, 2015. 348 p. <https://doi.org/10.1515/9783110331585>
 5. Mishra N., Mishra P., Gupta E., Singh P. Synergistic effects of nitrogen deprivation and high irradiance to enhance biomass and lipid production in *Nannochloropsis* // J. of Microbiol., Biotech. and Food Sci. 2023. Vol. 12, № 6. Art. 3632. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.3632>
 6. Чернова Н. И., Киселева С. В., Калинина О. Ю. Биодизель из микроводорослей: методы индукции липидов и скрининга перспективных штаммов // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 21 (185). С. 44–54. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.21.006>
 7. ГОСТ 31960-2012. Приложение Д.В.1. Вода. Методы определения токсичности по замедлению роста морских одноклеточных водорослей *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin и *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve. М. : Стандартинформ, 2014. 44 с.
 8. Lladó Maldonado S., Panjan P., Sun S., Rasch D., Sesay A. M., Mayr T., Krull R. A fully online sensor-equipped, disposable multiphase microbioreactor as a screening platform for biotechnological applications // Biotechnology and Bioengineering. 2019. Vol. 116, № 1. P. 65–75. <https://doi.org/10.1002/bit.26831>
 9. Bogomolov A., Grasser T., Hessling M. In line monitoring of *Saccharomyces cerevisiae* fermentation with a fluorescence probe: New approaches to data collection and analysis // Journal of Chemometrics. 2011. Vol. 25, № 7. P. 389–399. <https://doi.org/10.1002/cem.1365>
 10. Jorissen T., Oraby A., Recke G., Zibek S. A systematic analysis of economic evaluation studies of second generation biorefineries providing chemicals by applying biotechnological processes // Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2020. Vol. 14, № 5. P. 1028–1045. <https://doi.org/10.1002/bbb.2102>
 11. Трофимчук О. А., Малахов А. С. Автоматизированный фотобиореактор для культивирования микроводорослей *Chlorella vulgaris* // Современные техника и технологии : сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Томск, 5–9 октября 2015 г.). Томск : Изд-во ТПУ, 2015. Т. 2. С. 85–87.
 12. Nguyen B., Rittmann B. Low-cost optical sensor to automatically monitor and control biomass concentration in micro-algal cultivation // Algal Res. 2018. Vol. 32. P. 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.03.013>
 13. Cáceres I., Alsina J., Zanden J., Ribberink D., Sánchez-Areilla A. The effect of air bubbles on optical backscatter sensor measurements under plunging breaking waves // Coast. Eng. 2020. Vol. 159. Art. 103721. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103721>
 14. Выучейская Д. С., Еремин Г. Б., Фридман К. Б. Возможности применения нефелометрии в качестве экспресс-метода вирусного загрязнения питьевой воды. Опыт зарубежных стран // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. 2018. Т. 13, № 2. С. 785–795.
 15. Жирнов А. А., Мецлер Э. А., Титов С. С., Павленко А. А., Кудряшова О. Б. Границы применимости высокоселективного турбидиметрического метода // Ползуновский вестник. 2016. № 4, ч. 1. С. 55–58.
 16. Bogomolov A. Multivariate process trajectories: Capture, resolution and analysis // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2011. Vol. 108, № 1. P. 49–63.
 17. Shah M. M. R., Alam M. J., Islam M. L., Khan M. S. A. Growth performance of three microalgae species in filtered brackish water with different inorganic media // Bangladesh Journal of Fisheries Research. 2003. Vol. 7, № 1. P. 69–76.
 18. Samsung : official site. URL: https://download.led.samsung.com/led/file/resource/2022/05/Data_Sheet_LM281B_Plus_RG_.pdf (дата обращения: 12.12.2024).
 19. ЧИП и ДИП : оф. сайт. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/303/DOC011303067.pdf> (дата обращения: 12.12.2024).
 20. Iterheimová P., Foret F., Kubáň P. High-resolution Arduino-based data acquisition devices for microscale separation systems // Anal. Chim. Act. 2021. Vol. 1153. Art. 338294. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338294>
 21. Baroni É. G., Yap K. Y., Webley P. A., Scales P. J., Martin G. J. The effect of nitrogen depletion on the cell size, shape, density and gravitational settling of *Nannochloropsis salina*, *Chlorella* sp. (marine) and *Haematococcus pluvialis* // Algal Research. 2019. Vol. 39. Art. 101454. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101454>
 22. Sá M., Bertinetto C. G., Ferrer-Ledo N., Jansen J. J., Wijffels R., Crespo J. G., Barbosa M., Galinha C. F. Fluorescence spectroscopy and chemometrics for simultaneous monitoring of cell concentration, chlorophyll and fatty acids in *Nannochloropsis oceanica* // Scientific Reports. 2020. Vol. 10, № 1. Art. 7688.
 23. Shipman L. L., Cotton T. M., Norris J. R., Katz J. J. An analysis of the visible absorption spectrum of chlorophyll a monomer, dimer, and oligomers in solution // Journal of the American Chemical Society. 1976. Vol. 98, № 25. P. 8222–8230. <https://doi.org/10.1021/ja00441a056>

References

1. Kulapin A. I. Energy transition: Russia in the global agenda. *Energeticheskaiia politika*, 2021, vol. 7 (161), pp. 10–15 (in Russian). https://doi.org/10.46920/2409-5516_7161_10
2. Smoliakov A. F., Bandel' A. L. Biomass: Fuel and energy. In: *Scientific and Technical Conference of the Institute of Technological Machines and Forest Trans-*

- port on the results of research works in 2018 (January 30–06 February 2019, St. Petersburg): Collection of articles. St. Petersburg, Institute of technological machines and forest transport Publ., 2019, pp. 142–146 (in Russian).
3. Muhammad U., Shamsuddin I., Danjuma A., RuS M., Dembo U. Biofuels as the starring substitute to fossil fuels. *Petrol. Sci. and Eng.*, 2018, vol. 2, no. 1, pp. 44–49. <https://doi.org/10.11648/j.pse.20180201.17>
 4. Aresta M., Dibenedetto A., Dumeignil F. *Biorefineries: An Introduction*. Berlin, De Gruyter, 2015. 348 p. <https://doi.org/10.1515/9783110331585>
 5. Mishra N., Mishra P., Gupta E., Singh P. Synergistic effects of nitrogen deprivation and high irradiance to enhance biomass and lipid production in *Nannochloropsis*. *J. of Microbiol., Biotech. and Food Sci.*, 2023, vol. 12, no. 6, art. 3632. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.3632>
 6. Chernova N. I., Kiseleva S. V., Kalinina O. Iu. Biodiesel from microalgae: Methods for lipid induction and screening of promising strains. *Alternative Energy and Ecology*, 2015, vol. 21 (185), pp. 44–54 (in Russian). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.21.006>
 7. GOST 31960-2012. Annex D.B.1. Water. Methods for determination of toxicity by growth retardation of marine unicellular algae *Phaeodactylum tricornutum Bohlin* and *Skeletonema costatum (Greville) Cleve*. Moscow, Standartinform, 2014. 44 p. (in Russian).
 8. Lladó Maldonado S., Panjan P., Sun S., Rasch D., Sesay A. M., Mayr T., Krull R. A fully online sensor-equipped, disposable multiphase microbioreactor as a screening platform for biotechnological applications. *Biotechnology and Bioengineering*, 2019, vol. 116, no. 1, pp. 65–75. <https://doi.org/10.1002/bit.26831>
 9. Bogomolov A., Grasser T., Hessling M. In line monitoring of *Saccharomyces cerevisiae* fermentation with a fluorescence probe: New approaches to data collection and analysis. *Journal of Chemometrics*, 2011, vol. 25, no. 7, pp. 389–399. <https://doi.org/10.1002/cem.1365>
 10. Jorissen T., Oraby A., Recke G., Zibek S. A systematic analysis of economic evaluation studies of second generation biorefineries providing chemicals by applying biotechnological processes. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2020, vol. 14, no. 5, pp. 1028–1045. <https://doi.org/10.1002/bbb.2102>
 11. Trofimchuk O. A., Malakhov A. S. Automated photobioreactor for cultivation of microalgae *Chlorella vulgaris*. *Modern Engineering and Technology: Proceedings of the XXI International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists (Tomsk, October 5–9, 2015)*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2015, vol. 2, pp. 85–87 (in Russian).
 12. Nguyen B., Rittmann B. Low-cost optical sensor to automatically monitor and control biomass concentration in micro-algal cultivation. *Algal Res.*, 2018, vol. 32, pp. 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.03.013>
 13. Cáceres I., Alsina J., Zanden J., Ribberink D., Sánchez-Areilla A. The effect of air bubbles on optical backscatter sensor measurements under plunging breaking waves. *Coast. Eng.*, 2020, vol. 159, art. 103721. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103721>
 14. Vyucheiskaia D. S., Eremin G. B., Fridman K. B. Possibilities of using nephelometry as an express method of viral contamination of drinking water. Experience of foreign countries. *Health – the basis of human potential: Problems and ways to solve them*, 2018, vol. 13, no. 2, pp. 785–795 (in Russian).
 15. Zhirnov A. A., Metsler E. A., Titov S. S., Pavlenko A. A., Kudryashova O. B. Boundaries of applicability of highly selective turbidimetric method. *Polzunovskii vestnik*, 2016, no. 4, pt. 1, pp. 55–58 (in Russian).
 16. Bogomolov A. Multivariate process trajectories: Capture, resolution and analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2011, vol. 108, no. 1, pp. 49–63.
 17. Shah M. M. R., Alam M. J., Islam M. L., Khan M. S. A. Growth performance of three microalgae species in filtered brackish water with different inorganic media. *Bangladesh Journal of Fisheries Research*, 2003, vol. 7, no. 1, pp. 69–76.
 18. Samsung. *Datasheet LED LM281B+* (online). Available at: https://download.led.samsung.com/led/file/resource/2022/05/Data_Sheet_LM281B_Plus_RG_.pdf (accessed December 20, 2024).
 19. CHIPDIP. *DOC029027961.pdf*. (online). Available at: <https://static.chipdip.ru/lib/303/DOC011303067.pdf> (accessed December 20, 2024).
 20. Itterheimová P., Foret F., Kubáň P. High-resolution Arduino-based data acquisition devices for microscale separation systems. *Anal. Chim. Act.*, 2021, vol. 1153, art. 338294. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338294>
 21. Baroni É. G., Yap K. Y., Webley P. A., Scales P. J., Martin G. J. The effect of nitrogen depletion on the cell size, shape, density and gravitational settling of *Nannochloropsis salina*, *Chlorella* sp. (marine) and *Haematococcus pluvialis*. *Algal Research*, 2019, vol. 39, art. 101454. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101454>
 22. Sá M., Bertinetto C. G., Ferrer-Ledo N., Jansen J. J., Wijffels R., Crespo J. G., Barbosa M., Galinha C. F. Fluorescence spectroscopy and chemometrics for simultaneous monitoring of cell concentration, chlorophyll and fatty acids in *Nannochloropsis oceanica*. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, art. 7688.
 23. Shipman L. L., Cotton T. M., Norris J. R., Katz J. J. An analysis of the visible absorption spectrum of chlorophyll a monomer, dimer, and oligomers in solution. *Journal of the American Chemical Society*, 1976, vol. 98, no. 25, pp. 8222–8230. <https://doi.org/10.1021/ja00441a056>

Поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена после рецензирования 02.04.2025; принятая к публикации 04.04.2025
The article was submitted 27.01.2025; approved after reviewing 02.04.2025; accepted for publication 04.04.2025