Амангельды Курамангажинович Тогусов – кандидат технических наук, профессор, заместитель начальника Департамента военного образования и науки МО РК, г. Астана, Республика Казахстан.

Мағауия Қайратұлы Шекеев – ученик 11-го класса 220 школы г. Алматы.

Авторлар туралы мәліметтер

Ербол Жанғабылұлы Жантлесов* – философия докторы (Ph.D), «Kazakhstan Engineering» R&D орталығы» ЖШС жетекші ғылыми қызметкері, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Серік Атаконысұлы Алтынбек – PhD, «Ақпараттық жүйелер және технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Esil University, Астана, Қазақстан, e-mail: Serik_aa@bk.ru**.** ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Владимир Васильевич Грузин – техника ғылымдарының докторы, профессор, «Kazakhstan Engineering» R&D орталығы» ЖШС жетекші ғылыми қызметкері, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Амангелді Құраманғажынұлы Тогусов – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Қазақстан Республикасы Қорғаныс министрлігінің Әскери білім және ғылым департаменті бастығының орынбасары, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Мағауия Қайратұлы Шекеев – Алматы қаласындағы №220 мектептің 11-сынып оқушысы.

Information about the authors

Yerbol Zhangabulovich Zhantlessov* – Ph.D., Leading Researcher, R&D Center «Kazakhstan Engineering» LLP, Astana, Republic of Kazakhstan.

Serik Atakonyssuly Altynbek – PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Esil University, Astana, Kazakhstan, e-mail: Serik_aa@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Vladimir Vasilyevich Gruzin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher, R&D Center «Kazakhstan Engineering» LLP, Astana, Republic of Kazakhstan.

Amangeldy Kuramangazhinovich Togusov – Candidate of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department of Military Education and Science, Ministry of Defense of the Republic of Kazakhstan, Astana, Republic of Kazakhstan.

Magauiya Qairatuly Shekeev – is an 11th-grade student at School No. 220 in Almaty.

Поступила в редакцию 19.06.2026
Поступила после доработки 01.07.2026
Принята к публикации 22.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-14

МРНТИ: 87.45.45

CC BY 4.0
Check for updates

Д.Т. Беккасимова, К.Ю. Дербышев, Ә.М. Сүгірбай, Д.О. Кожахметова, А.Д. Золотов*
Шәкәрім университет, 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: azol64@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ CHLORELLA VULGARIS В ЗАКРЫТЫХ ФОТОБИОРЕАКТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация: *В работе проведён анализ современных математических моделей роста* Chlorella vulgaris *в закрытых фотобиореакторах, применяемых для исследования, прогнозирования и управления процессами культивирования микроводорослей. Рассмотрены основные классы моделей, включая эмпирические и кинетические модели роста, модели светового затухания и распределения освещённости, модели фотоакклимации клеток, а также комплексные динамические модели, учитывающие совместное влияние интенсивности света, концентрации углекислого газа, массопереноса CO_2, уровня pH, температуры, перемешивания среды и других технологических факторов. Особое внимание уделено оценке точности, вычислительной сложности и практической применимости данных моделей для задач автоматизированного управления, мониторинга состояния культуры и оптимизации технологических режимов. Проанализированы возможности интеграции математических моделей с методами оптимального управления, предиктивного*

©Д.Т. Беккасимова, К.Ю. Дербышев, Ә.М. Сүгірбай, Д.О. Кожахметова, А.Д. Золотов, 2026

управления на основе модели (MPC), а также с современными метаэвристическими алгоритмами оптимизации. Выполнен критический анализ преимуществ и ограничений существующих подходов, включая проблемы параметрической идентификации и масштабирования моделей от лабораторных установок к промышленным фотобиореакторам. Показано, что использование комплексных динамических моделей в сочетании с интеллектуальными системами автоматизированного управления способствует повышению продуктивности биомассы, устойчивости технологического процесса, снижению энергозатрат и улучшению эффективности промышленного культивирования Chlorella vulgaris*. Результаты исследования могут быть использованы при разработке и совершенствовании современных автоматизированных систем управления фотобиореакторами.*

Ключевые слова: *Chlorella vulgaris, фотобиореактор, математическое моделирование, автоматизированное управление, оптимизация.*

Введение

Chlorella vulgaris – одноклеточная зелёная микроводоросль, обладающая уникальными свойствами, делающими её ценным ресурсом для различных отраслей промышленности. Она способна эффективно фиксировать CO_2, продуцировать большое количество белка (до 50-60% сухой массы), липидов, витаминов, минералов и биологически активных веществ. Благодаря высокой скорости роста и неприхотливости Chlorella vulgaris широко используется в медицине, косметологии, пищевой промышленности, производстве биотоплива, биопластиков, кормовых добавок и биоудобрений [1].

Моделирование роста Chlorella vulgaris в фотобиореакторах позволяет прогнозировать продуктивность биомассы, оптимизировать режимы освещения, подачи CO_2, питательных веществ, температуры и pH, а также служит научной основой для разработки автоматизированных систем управления технологическим процессом. В современных исследованиях применяются как относительно простые эмпирические и кинетические модели, так и сложные динамические модели, учитывающие процессы массопереноса, светового затухания, фотоакклимации и физиологического отклика клетки [2-5].

Особую роль играют модели, учитывающие совместное влияние интенсивности света и концентрации растворённого неорганического углерода (Dissolved Inorganic Carbon – DIC) на кинетику роста хлореллы и фиксацию CO_2 одноклеточной водорослью [4]. Не менее важны комплексные модели, описывающие одновременно фиксацию углерода и биологическое удаление азота и фосфора из сточных вод [5]. Сравнительный анализ кинетических моделей, основанных на интенсивности света и концентрации биомассы, показывает, что модели учитывающие совокупное влияние факторов часто демонстрируют наилучшую прогностическую способность в сравнении с моделями сосредоточенными на изучении влияния факторов без учета их взаимовлияния [3].

В последние годы активно развивается направление интеграции математических моделей с системами автоматического управления. Оптимизация параметров непрерывных фотобиореакторов с использованием математических моделей и алгоритмов оптимизации позволяет существенно повысить продуктивность и энергоэффективность процесса [2].

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью создания эффективных инструментов управления культивированием Chlorella vulgaris в закрытых фотобиореакторах. Переход к автоматизированным системам на основе точных математических моделей позволит повысить стабильность процесса, минимизировать энергозатраты и обеспечить требуемое качество биомассы при масштабировании производства.

Условия и методы исследования. Анализ проводился на основе научных публикаций за период 2012-2025 годов, отобранных из международных баз, данных Scopus, Web of Science, ScienceDirect, и других источников. Было изучено значительное количество работ, из которых детально проанализированы наиболее релевантные публикации, посвящённые кинетическому моделированию, световому затуханию, массопереносу CO_2, оптимизации параметров и автоматизированному управлению процессом культивирования. Методы исследования включали: сравнительный анализ различных типов математических моделей (эмпирические кинетические, модели Моно, Ферхюльста, Гомперца, комплексные динамические модели); классификацию моделей по уровню сложности и учитываемым параметрам; анализ моделей светового затухания и фотоакклимации; оценку применимости

моделей для оптимизации технологических режимов и автоматизированного управления (оптимальное управление, нечёткая логика, метаэвристические алгоритмы, «мягкие датчики»); критический анализ сильных и слабых сторон моделей, а также возможностей их масштабирования от лабораторных условий к пилотным и промышленным. Отбор литературы проводился по следующим критериям: присутствие в работах экспериментально подтверждённых математических моделей роста Chlorella vulgaris; анализ влияния ключевых параметров (интенсивности освещения, концентрации CO2/DIC, уровня pH, температуры, концентрации биомассы и массопереноса); демонстрация применения моделей в закрытых фотобиореакторах разных конструкций (трубчатых, эрлифтных, плоских, мембранных); оценка перспектив интеграции этих моделей в системы автоматического управления. Для систематизации материала использовались методы литературного обобщения, табличного и графического представления данных.

В таблице 1 приведён сравнительный анализ основных типов математических моделей, применяемых для описания роста Chlorella vulgaris в закрытых фотобиореакторах. Для каждой модели указаны математический аппарат, преимущества, недостатки и рекомендуемая область применения.

Таблица 1 – Сравнительный анализ основных типов математических моделей роста Chlorella vulgaris

Тип модели	Основные уравнения/подход	Преимущества	Недостатки	Лучшее применение	Источники
Эмпирически, кинетические (Логистическая, Гомперца)	Эмпирические S-образные кривые	Простота, хорошая аппроксимация экспериментальных данных	Не учитывают физиологические механизмы	Прогрназировани е кривых роста биомассы	[6, 7]
Модель Моно	$\mu = \mu_{max}\frac{S}{K_s + S}$	Учитывает лимитирование субстратом	Не описывает лаг-фазу и ингибирование	Ограниченный рост по одному субстрату	[2, 3, 5, 7]
Модель Ферхюльста	$\frac{dX}{dt} = \mu X(1 - \frac{X}{E_n})$	Хорошо описывает ограниченный рост	Не учитывает влияние внешних факторов	Описание общей динамики биомассы	[6, 7]
Модель Гомперца	$N(t) = N_0\exp(\frac{\mu_x}{k}(1 - e^{-kt}))$	Лучше описывает лаг-фазу и ассиметрию	Эмпирическая, слабая связь с механизмами	Точное описание S-образных кривых роста	[7]
Комплексные динамические	Системы ОДУ (свет+ CO_2+ pH+температура)	Учитывают множества факторов одновременно	Высокая сложность, требует больших вычислений	Оптимизация и автоматизированн ное управление	[2, 4, 5, 8, 9]

Одним из важных этапов исследования являлась классификация математических моделей роста Chlorella vulgaris по уровню сложности и перечню учитываемых параметров. Данный подход позволил систематизировать значительный объём моделей, выявить закономерности их развития и определить наиболее подходящие модели для задач оптимизации технологических режимов и автоматизированного управления. В результате анализа были выделены пять основных уровней моделей, различающихся по математическому аппарату, количеству учитываемых факторов и степени применимости в практических целях. Сравнительная характеристика данных моделей представлена в таблице 2.

Анализ моделей светового затухания и фотоакклимации заключался в изучении математических подходов, описывающих уменьшение интенсивности света по глубине культуры (световое затухание) и адаптацию клеток Chlorella vulgaris к изменяющимся условиям освещения (фотоакклимация). Особое внимание уделялось моделям, основанным на законе Бера–Ламберта, а также более сложным моделям, учитывающим влияние концентрации биомассы, спектральный состав света и физиологическую адаптацию микроводорослей. Такой анализ позволил оценить точность передачи реальных условий освещения внутри фотобиореактора и их влияние на продуктивность культивирования. Основные модели светового затухания и фотоакклимации, рассмотренные в ходе исследования, представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Классификация математических моделей роста Chlorella vulgaris по уровню сложности и учитываемым параметрам

Уровень сложности	Характеристика модели	Учитываемые параметры	Примеры применения	Источники
Простые модели	Не учитывают внутреннюю структуру объекта	Основные входные параметры (время, начальная биомасса)	Базовые расчёты, прогноз кривых роста	[6, 7]
Кинетические модели	Учитывают лимитирование субстратом и рост популяции	Субстрат, удельная скорость роста, ёмкость среды	Описание роста биомассы и накопления липидов	[3, 6, 7]
Нелинейные модели	Описывают нелинейные зависимости и S-образные кривые	Свет, биомасса, фотоакклимация	Моделирование влияния освещённости	[3, 9, 10]
Комплексные динамические модели	Учитывают множество взаимосвязанных процессов	Свет, CO_2/DIC, pH, температура, массоперенос	Оптимизация и прогнозирование в фотобиореакторах	[2, 4, 5, 8, 9]
Модели с элементами управления	Интегрируют модели с алгоритмами управления	Параметры моделей и управляющие воздействия	Автоматизированные системы управления	[13, 15, 20]

Таблица 3 – Основные модели светового затухания и фотоакклимации, применяемые для Chlorella vulgaris

Модель / Подход	Основные особенности	Учитываемые параметры	Преимущества	Недостатки	Источ-ники
Закон Бера-Ламберта	Экспоненциальное затухание интенсивности света	Свет, биомасса, глубина	Простота и универсальность	Не учитывает адаптацию клеток	[9,10]
Модели Bannister и Grima	Улучшенные модели светового затухания	Свет, биомасса, коэффициент затухания	Хорошая точность для густых культур	Ограниченный учёт спектра	[3]
Модели фотоакклимации	Динамическая адаптация клеток к освещению	Световая история клетки	Учитывает физиологическую адаптацию	Требует много экспериментальных данных	[3, 19]
Гибридные модели	Комбинация затухания света и фотоакклимации	Свет, биомасса, DIC, фотоакклимация	Наиболее полное описание реальных условий	Высокая вычислительная сложность	[9, 19]

В работах ряда авторов показано, что комплексные динамические модели обладают существенным потенциалом для оптимизации технологических режимов и автоматизированного управления культивированием Chlorella vulgaris. Эти модели успешно интегрируются с методами оптимального управления (model-based optimal control), позволяющими рассчитывать оптимальные траектории подачи CO_2, освещения и аэрации, а также с нечёткой логикой, которая эффективно справляется с неопределённостями биологических процессов. Метаэвристические алгоритмы, в частности Particle Swarm Optimization (PSO), демонстрируют высокую эффективность при многокритериальной оптимизации, а технологии «мягких датчиков» (soft sensors) дают возможность оценивать в реальном времени ненаблюдаемые параметры культуры. В целом, сочетание таких моделей с современными интеллектуальными методами управления создаёт прочную основу для масштабирования производства микроводорослей [2, 15].

Рассмотренные математические модели обладают рядом сильных сторон, но также имеют существенные ограничения. К ключевым преимуществам следует отнести способность комплексных динамических моделей одновременно учитывать множественные факторы окружающей среды (освещение, CO_2, pH, температуру и питательные вещества) и успешно интегрироваться с системами автоматизированного управления [4, 5, 8]. Кроме того, эмпирические и простые кинетические модели демонстрируют высокую точность аппроксимации экспериментальных данных и простоту практического применения в строго контролируемых лабораторных условиях [6, 7]. Однако существенным недостатком большинства моделей является их ограниченная валидация в условиях, приближенных к

реальным. Многие модели разработаны и откалиброваны исключительно на лабораторных масштабах, где гидродинамика, распределение света и массоперенос значительно отличаются от пилотных и промышленных фотобиореакторов. Слабой стороной также является недостаточный учёт пространственной неоднородности параметров внутри крупных аппаратов, эффектов биообрастания, долгосрочной стабильности культуры и влияния внешних возмущений. Вопрос масштабирования остаётся одним из наиболее сложных. Переход от лабораторных установок к пилотным и промышленным масштабам требует существенной доработки моделей, особенно в части описания светового поля, гидродинамики и газообмена. В настоящее время лишь небольшое число исследований демонстрирует успешную адаптацию моделей на более крупных масштабах, что указывает на необходимость разработки гибридных и масштабируемых моделирующих подходов.

Результаты исследований. Анализ научной литературы показал, что математическое моделирование культивирования Chlorella vulgaris в закрытых фотобиореакторах развивается по нескольким основным направлениям. Современные модели можно условно разделить на три основные группы: эмпирические и простые кинетические модели (логистическая, Гомперца, Моно, Ферхюльста и их модификации), которые успешно описывают S-образные кривые роста биомассы и используются для прогнозирования продуктивности [6, 7]; модели, учитывающие влияние света, включающие зависимость удельной скорости роста от интенсивности освещения и концентрации биомассы, где наилучшие результаты в сравнительных исследованиях показали модели Bannister и Grima [3]; а также комплексные динамические модели, одновременно описывающие массоперенос CO_2, световое затухание, динамику pH, температуру и потребление питательных веществ [4, 5, 8].

Согласно таблице 4, математические модели роста Chlorella vulgaris в основном ориентированы на учёт ключевых лимитирующих факторов окружающей среды и физиологических процессов. Наиболее проработанными направлениями являются моделирование светового режима и светового затухания, динамики CO_2 и растворённого неорганического углерода (DIC), а также вопросы автоматизированного управления. Остальные факторы (температура, pH, питательные вещества и накопление липидов) освещены в литературе заметно слабее.

Таблица 4 – Основные факторы, учитываемые в математических моделях роста Chlorella vulgaris

Фактор	Подход моделирования	Основные источники
Освещение и световое затухание	Закон Бера-Ламберта, фотоакклимация	[3, 9, 10]
CO_2 и DIC	Массоперенос, ионное равновесие	[4, 5, 8]
Температура	Кардинальные модели, тепловые поля	[11, 7],
pH и питательные вещества	Кинетика потребления N и P	[5, 13]
Накопление липидов	Модели под стрессовыми условиями	[18]
Автоматизированное управление	Оптимизация, нечёткая логика, PSO	[2, 15]

В процессе разработки математических моделей важным этапом является их последующая оптимизация. Так, в работе Брянкина К.В. и соавт. [6] была предложена математическая модель кинетики роста Chlorella vulgaris, основанная на уравнениях Моно и Ферхюльста. Модель продемонстрировала высокую адекватность экспериментальным данным (максимальное отклонение составило 3,1 %). Применение методов оптимизации позволяет существенно повысить продуктивность культивирования. Например, оптимизация ключевых параметров непрерывного фотобиореактора (pH, концентрация CO_2 и уровень освещённости) обеспечила достижение продуктивности ≈ $4{,}03 \cdot 10^9$ клеток/(л·ч) [2]. В пилотных трубчатых фотобиореакторах оптимизация циклов освещения и начальной концентрации биомассы привела к увеличению продуктивности на 35% [12]. Оптимизация геометрии и светового режима в эрлифтном фотобиореакторе позволила повысить прирост биомассы на 41,8% [9].

Значительное внимание в современных исследованиях уделяется разработке и апробации систем автоматического и интеллектуального управления процессом культивирования Chlorella vulgaris. В литературе представлены различные технические и алгоритмические решения, позволяющие обеспечить стабильность параметров среды и

повысить эффективность производства. В частности, были разработаны и успешно апробированы модульные пилотные системы на базе Python, обеспечивающие мониторинг и контроль температуры, интенсивности освещения, фотопериода и уровня pH [14]; полуиндустриальные модульные эрлифтные фотобиореакторы объёмом до 1000 л с динамическим LED-освещением и автоматизированным дозированием CO_2 [16]; регуляторы на основе нечёткой логики, использующие производную pH для управления временем удержания биомассы [13]; а также системы, построенные на метаэвристических алгоритмах (Particle Swarm Optimization) и технологиях «мягких датчиков», реализующие прогнозирующее управление [15].Важным элементом автоматизированных систем управления является конструкция самого закрытого фотобиореактора. На рисунке 1 представлено общее устройство фотобиореактора, оснащённого системой световодов для равномерного освещения, датчиками pH, температуры, оптической плотности и механическим перемешиванием.

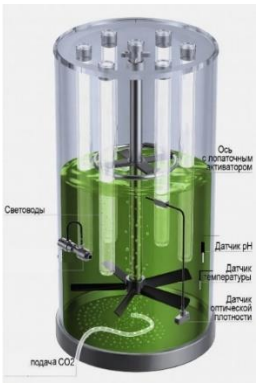


Рисунок 1 – Конструкция закрытого фотобиореактора с системой световодов и датчиками контроля параметров для культивирования Chlorella vulgaris

Данная конструкция позволяет в реальном времени передавать данные от датчиков в контроллер. На основе математической модели контроллер формирует управляющие воздействия на исполнительные устройства (подача CO_2, регулировка интенсивности и спектра освещения, скорость перемешивания). Такой подход обеспечивает автоматическое поддержание оптимальных условий культивирования и минимизирует влияние человеческого фактора.

Обсуждение научных результатов

Анализ научной литературы показывает, что математические модели являются ключевой основой для разработки автоматизированных систем управления культивированием Chlorella vulgaris в закрытых фотобиореакторах. Современные исследования демонстрируют переход от простых кинетических моделей [6, 7] к комплексным динамическим системам, учитывающим взаимодействие нескольких факторов окружающей среды [3, 4, 5, 8, 9, 10].

Особое значение имеют модели, учитывающие совместное влияние интенсивности света и концентрации растворённого неорганического углерода (DIC) [4], процессы массопереноса и биофиксации CO_2 [5, 8], а также световое затухание в густых суспензиях [9, 10]. Экспериментально подтверждённая простая кинетическая модель роста Chlorella vulgaris, разработанная Брянкиным К.В. и соавторами на основе модифицированных уравнений Моно и Ферхюльста [6], продемонстрировала высокую адекватность экспериментальным данным (максимальное относительное отклонение составило 3,1%). Полученные результаты свидетельствуют о надёжности модели и подтверждают перспективы её практического применения для оперативного прогнозирования накопления биомассы и оптимизации технологических режимов культивирования.

Оптимизационные исследования [2, 9, 11, 12] доказывают, что использование математических моделей позволяет существенно повысить продуктивность биомассы и энергоэффективность процесса. Работы [17, 18] подчёркивают важность энергетического и технико-экономического анализа при выборе стратегий управления и типа фотобиореактора.

В сфере автоматизированного управления наблюдается активное внедрение интеллектуальных методов. Разработаны пилотные и полуиндустриальные системы [14, 16], нечётко-логические регуляторы [13], метаэвристические алгоритмы и мягкие датчики [15, 20]. Анализ чувствительности моделей фотоакклимации [19] также вносит важный вклад в понимание поведения культуры в непрерывных режимах.

Вместе с тем, сохраняются определённые ограничения. Большинство моделей разрабатывалось в контролируемых лабораторных условиях и требует дальнейшей валидации в промышленных масштабах при переменных внешних воздействиях [11, 12]. Высокая вычислительная сложность комплексных динамических моделей остаётся одним из ключевых ограничений для их внедрения в системах реального времени. Ввиду большого количества взаимосвязанных уравнений, описывающих одновременно световое затухание, массоперенос CO_2, фотоакклимацию, динамику pH и температуру, такие модели требуют существенных вычислительных мощностей и могут быть затруднительны для оперативного решения на типовых промышленных контроллерах и микроконтроллерах. В ряде случаев для их работы необходимы высокопроизводительные вычислительные модули или использование методов упрощения модели (model order reduction). Поэтому интеграция математических моделей с автоматизированными системами управления (включая нечёткую логику, метаэвристические алгоритмы и мягкие датчики) является перспективным направлением. Создание гибридных моделей, сочетающих кинетическое описание, CFD-моделирование и элементы искусственного интеллекта, позволит перейти к стабильным и высокоэффективным промышленным технологиям культивирования Chlorella vulgaris.

Заключение

Математические модели культивирования Chlorella vulgaris в закрытых фотобиореакторах в сочетании с автоматизированными системами управления представляют собой перспективный инструмент повышения эффективности производства микроводорослей. Проведённый анализ показал, что современные модели эволюционировали от простых кинетических уравнений к комплексным динамическим системам, учитывающим взаимодействие ключевых факторов: освещения, массопереноса CO_2, pH, температуры и светового затухания.

Экспериментально подтверждённые модели демонстрируют достаточную точность для практического применения. Использование математических моделей позволяет оптимизировать технологические режимы, повышать продуктивность биомассы и улучшать энергоэффективность процесса. Значительный прогресс наблюдается в интеграции моделей с системами автоматического управления, включая нечётко-логические регуляторы, метаэвристические алгоритмы и мягкие датчики.

Однако для широкого промышленного внедрения необходимо решение ряда задач: снижение вычислительной сложности моделей, повышение их устойчивости к нестационарным внешним условиям, а также разработка гибридных интеллектуальных систем, объединяющих кинетическое моделирование, CFD-подходы и элементы искусственного интеллекта.

В заключение можно отметить, что дальнейшее развитие математического моделирования и автоматизированных систем управления позволит создать эффективные промышленные технологии культивирования Chlorella vulgaris, сочетающие высокую продуктивность, экологическую безопасность и экономическую эффективность.

Исследовательская работа проводилась в условиях проекта «Разработка автоматизированной линии биореакторов для непрерывного производства биогаза и удобрений» ИРН № AP26195367, по вопросу альгофиторемедиации жидкой фракции переработки субстрата».

Список литературы

1. Knyazeva O.E. Chlorella vulgaris kak tsennyi resurs v razlichnykh otraslyakh / O.E. Knyazeva, E.A. Lyashenkova // Problemy regional'noi ehkologii, 2025. https://doi.org/10.24412/1728-323X-2025-1-30-33. (In Russian).

2. Abu-Reesh I.M. Mathematical Model-Based Optimization of Continuous Flow Photobioreactor Operating at Steady State Using MATLAB Optimization Function / I.M. Abu-Reesh // Arab J Sci Eng. – 2025. – T. 50, № 6. – P. 3779-3792. https://doi.org/10.1007/s13369-024-09155-7.

3. Comparative assessment of microalgal growth kinetic models based on light intensity and biomass concentration / A.F. Esteves et al // Bioresource Technology. – 2024. – T. 394. – P. 130167. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130167.
4. Kinetic characteristics and modeling of microalgae Chlorella vulgaris growth and CO2 biofixation considering the coupled effects of light intensity and dissolved inorganic carbon / H.X. Chang et al // Bioresource Technology. – 2016. – T. 206. – P. 231-238. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.087.
5. Al Ketife A.M.D. A mathematical model for carbon fixation and nutrient removal by an algal photobioreactor / A.M.D. Al Ketife, S. Judd, H. Znad // Chemical Engineering Science. – 2016. – T. 153. – P. 354-362. https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.07.042.
6. Bryankin K.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessa kul'tivirovaniya mikrovodorosli Chlorella / K.V. Bryankin, A.K. Bryankina, M.A. Es'kova // TRNiO. – 2023. – T. 93, № 9. – S. 15-18. (In Russian).
7. Growth of Chlorella vulgaris Under Atmospheric CO2 in Lab-Scale Photobioreactors: Effects of Aeration Rate and Growth Model Comparison / V.A. Pavlov et al // Bioengineering. – 2025. – T. 12, № 12. – P. 1294. https://doi.org/10.3390/bioengineering12121294.
8. Experimental analysis and novel modeling of semi-batch photobioreactors operated with Chlorella vulgaris and fed with 100% (v/v) CO2 / A. Concas et al // Chemical Engineering Journal. – 2012. – T. 213. – P. 203-213. https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.09.119.
9. Numerical Simulation of Radiation Transport to Improve Microalgae Cultivation in an Air-Lift Photobioreactor / X. Zhang et al // J. Therm. Sci. – 2025. – T. 34, № 1. – P. 62-76. https://doi.org/10.1007/s11630-024-2046-5.
10. Growth kinetic model of Chlorella vulgaris in a dark biogas slurry culture system based on a light attenuation model / X. Liu et al // Algal Research. – 2025. – T. 85. – P. 103821. https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103821.
11. Modelling and Simulation of the Effect of Irradiance Related Temperature on Microalgae Cell Growth in an Outdoor Culture for a Horizontal Loop Tubular Photobioreactor / Md.K.H. Chowdury et al // Contemp. Math. – 2025. – P. 425-441. https://doi.org/10.37256/cm.6120253205.
12. Weise T. Experimental and Model-Based Analysis to Optimize Microalgal Biomass Productivity in a Pilot-Scale Tubular Photobioreactor / T. Weise, C. Grewe, M. Pfaff // Front. Bioeng. Biotechnol. – 2020. – T. 8. – P. 453. https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00453.
13. Towards Optimisation of Microalgae Cultivation through Monitoring and Control in Membrane Photobioreactor Systems / J.F. Mora-Sánchez et al // Water. – 2023. – T. 16, № 1. – P. 155. https://doi.org/10.3390/w16010155.
14. Pulido-Aponte Á. Monitoring and Control System for Closed Microalgae Cultures at Pilot Scale / Á. Pulido-Aponte, V. Sangregorio-Soto, C.L. Garzón-Castro // 2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). Bucharest, Romania: IEEE, 2023. – P. 1-6. https://doi.org/10.1109/atee58038.2023.10108267.
15. Minzu V. Control of Microalgae Growth in Artificially Lighted Photobioreactors Using Metaheuristic-Based Predictions / V. Minzu, G. Ifrim, I. Arama // Sensors. – 2021. – T. 21, № 23. – P. 8065. https://doi.org/10.3390/s21238065.
16. Novel, automated, semi-industrial modular photobioreactor system for cultivation of demanding microalgae that produce fine chemicals – The next story of H. pluvialis and astaxanthin / D. Borowiak et al // Algal Research. – 2021. – T. 53. – H. 102151. https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102151.
17. Dynamic Modeling of the Microalgae Cultivation Phase for Energy Production in Open Raceway Ponds and Flat Panel Photobioreactors / M. Marsullo et al // Front. Energy Res. – 2015. – T. 3. https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00041.
18. Techno-economic modelling of high-value metabolites and secondary products from microalgae cultivated in closed photobioreactors with supplementary lighting / S. Rezvani et al // Algal Research. – 2022. – T. 65. – H. 102733. https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102733.
19. Dynamical Simulation, Sensitivity, and Productivity Analysis of a Light-Photoacclimation Model for Microalgae-Based Carbohydrate Production in Continuous Photobioreactors / A. Guzmán-Palomino et al // Processes. – 2023. – T. 11, № 7. – H. 1866. https://doi.org/10.3390/pr11071866.
20. Model Based Optimal Control of the Photosynthetic Growth of Microalgae in a Batch Photobioreactor / G.A. Ifrim et al // Energies. – 2022. – T. 15, № 18. – H. 6535. https://doi.org/10.3390/en15186535.

Д.Т. Беккасимова, К.Ю. Дербышев, Д.О. Кожахметова, Ә.М. Сүгірбай, А.Д. Золотов*
Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі 20 А
*e-mail: azol64@mail.ru

АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, ЖАБЫҚ ФОТОБИОРЕАКТОРЛАРДА CHLORELLA VULGARIS ӨСІРУДІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕРІ

Бұл жұмыста микробалдырларды өсіру процестерін зерттеу, болжау және басқару үшін қолданылатын жабық фотобиореакторлардағы Chlorella vulgaris өсуінің заманауи математикалық модельдеріне талдау жүргізілді. Өсудің эмпирикалық және кинетикалық модельдері, жарықтың әлсіреуі мен таралу модельдері, фотоакклимация модельдері, сондай-ақ жарық қарқындылығының, көмірқышқыл газы концентрациясының, CO_2 массалық тасымалының, pH деңгейінің, температураның, ортаны араластырудың және басқа да технологиялық факторлардың бірлескен әсерін ескеретін кешенді динамикалық модельдер қарастырылды. Бұл модельдердің автоматтандырылған басқару, дақыл күйін мониторингтеу және технологиялық режимдерді оңтайландыру міндеттеріндегі дәлдігіне, есептеу күрделілігіне және практикалық қолданылуына ерекше назар аударылды. Математикалық модельдерді оңтайлы басқару әдістерімен, модельге негізделген болжамды басқарумен (MPC), сондай-ақ заманауи метаэвристикалық оңтайландыру алгоритмдерімен біріктіру мүмкіндіктері талданды. Қолданыстағы тәсілдердің артықшылықтары мен шектеулеріне, оның ішінде параметрлерді сәйкестендіру және модельдерді зертханалық деңгейден өнеркәсіптік фотобиореакторлар деңгейіне дейін масштабтау мәселелеріне сыни талдау жасалды. Кешенді динамикалық модельдерді интеллектуалды автоматтандырылған басқару жүйелерімен бірге қолдану биомасса өнімділігін арттыруға, технологиялық процестің тұрақтылығын қамтамасыз етуге, энергия шығындарын азайтуға және Chlorella vulgaris өсірудің жалпы тиімділігін жоғарылатуға мүмкіндік беретіні көрсетілді. Зерттеу нәтижелері фотобиореакторларды басқарудың заманауи автоматтандырылған жүйелерін әзірлеу және жетілдіру барысында пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *Chlorella vulgaris, фотобиореактор, математикалық модельдеу, автоматтандырылған басқару, оңтайландыру.*

D. Bekkassimova, K. Derbyshev, D. Kozhakhmetova, A. Sugirbay, A. Zolotov*
Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka St., 20A
*e-mail: azol64@mail.ru

MATHEMATICAL MODELS OF CHLORELLA VULGARIS CULTIVATION IN CLOSED PHOTOBIOREACTORS USING AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM

This paper presents an analysis of modern mathematical models describing the growth of Chlorella vulgaris in closed photobioreactors used for the study, prediction, and control of microalgae cultivation processes. The main classes of models are considered, including empirical and kinetic growth models, light attenuation and light distribution models, photoacclimation models, and comprehensive dynamic models that account for the combined effects of light intensity, carbon dioxide concentration, CO_2 mass transfer, pH level, temperature, mixing conditions, and other technological factors. Particular attention is paid to evaluating the accuracy, computational complexity, and practical applicability of these models for automated control, culture monitoring, and process optimization. The possibilities of integrating mathematical models with optimal control methods, Model Predictive Control (MPC), and modern metaheuristic optimization algorithms are analyzed. A critical assessment of the advantages and limitations of existing approaches is performed, including issues related to parameter identification and model scaling from laboratory-scale systems to industrial photobioreactors. The analysis demonstrates that the use of comprehensive dynamic models combined with intelligent automated control systems can improve biomass productivity, process stability, reduce energy consumption, and enhance the overall efficiency of industrial Chlorella vulgaris cultivation. The results of this study can be applied to the development and improvement of advanced automated control systems for photobioreactors.

Key words: *Chlorella vulgaris, photobioreactor, mathematical modeling, automated control, optimization.*

Сведения об авторах

Данар Талгатовна Беккасимова – магистр естественных наук, докторант кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; e-mail: Dantal1976@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0994-9793.

Камиль Юрьевич Дербышев – старший научный сотрудник ShakarimLab, Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; e-mail: kamil.derbyshev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6308-020X.

Динара Ошановна Кожахметова – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

Әділет Мұхитұлы Сүгірбай – PhD, Руководитель конструкторского бюро ShakarimLab, Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; e-mail: Adulet_s_93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3637-2749.

Александр Дмитриевич Золотов* – к.т.н., ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Авторлар туралы мәліметтер

Данар Талгатовна Беккасимова – жаратылыс ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының докторанты, Шәкәрім Университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: Dantal1976@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0994-9793.

Камиль Юрьевич Дербышев – ShakarimLab, «Агротехнопарк» аға ғылыми қызметкері, Шәкәрім Университет, Қазақстан Республикасы; e-mail: kamil.derbyshev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6308-020X.

Динара Ошановна Кожахметова – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

Әділет Мұхитұлы Сүгірбай – PhD, ShakarimLab конструкторлық бюро жетекшісі, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: Adulet_s_93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3637-2749.

Александр Дмитриевич Золотов* – т.ғ.к., «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Information about the authors

Danar Bekkassimova – Master of Science, doctoral student of the Department «Automatization and Information Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Dantal1976@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0994-9793.

Kamil Derbyshev – Senior Researcher at ShakarimLab, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kamil.derbyshev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6308-020X.

Dinara Kozhakhmetova – PhD, Associate Professor of the Department «Automation and Information Technologies», Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: d.kojahmetova@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4327-3899.

Adilet Sugirbay – PhD, Head of the design bureau ShakarimLab, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: Adulet_s_93@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3637-2749.

Alexandr Zolotov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Automatization and Information Technology», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Поступила в редакцию 08.06.2026
Поступила после доработки 27.06.2026
Принята к публикации 01.07.2026