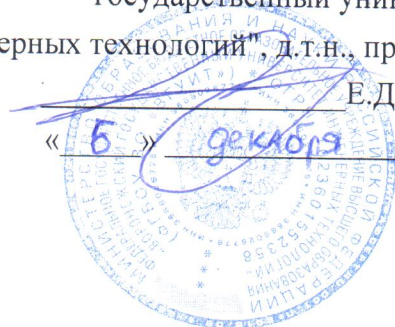


УТВЕРЖДАЮ
 ректор ФГБОУ ВО "Воронежский
 государственный университет
 инженерных технологий", д.т.н., профессор
 Е.Д. Чертов
 « 6 » декабря 2017 г.



О Т З Ы В

ведущей организации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» на диссертацию Темнова Михаила Сергеевича «Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление процессов получения эфиров жирных кислот», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий» и 03.01.06 – «Биотехнология (в том числе бионанотехнологии)»

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Темнова М.С. посвящена разработке, изучению свойств и режимов нового ресурсосберегающего технологического процесса получения эфиров жирных кислот (ЭЖК) из микроводорослей – биотоплива третьего поколения. Создание производств ЭЖК тормозится сложностью и недостаточной изученностью механизмов и кинетики процессов предварительной подготовки биомассы микроводорослей, экстракции и этерификации липидов микроводорослей, низким выходом липидов (4-5 % мас.) при традиционном проведении процесса экстракции, из-за наличия прочной клеточной стенки. Вследствие этого, изучение свойств и режимов технологического процесса получения ЭЖК из микроводорослей, исследование механизмов и кинетики дезинтеграции клеточных стенок, экстракции и этерификации липидов, а также интенсификация и совершенствование аппаратурного оформления стадий производства ЭЖК из микроводорослей на основе использования современных машин и аппаратов являются актуальными задачами, решение которых имеет существенное значение для развития страны.

Актуальность работы подтверждается проведением научных исследований при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания (проекты № 1983 «Разработка технологии комплексной переработки биоразлагаемых отходов», № 14.5059.2017/БЧ «Кинети-

ка процессов технологии очистки сточных вод с использованием микроводорослей») и программы «У.М.Н.И.К» (договор № 6406 ГУ/2015 «Разработка технологии получения биомассы *Chlorella vulgaris* для комплексной переработки»).

Новизна проведенных исследований и полученных результатов

Проведены теоретические и экспериментальные исследования механизмов и кинетики процессов культивирования микроводорослей и экстракции внутриклеточных липидов, разработаны новые математические модели, отличающиеся: учетом энергетических факторов (уровня освещенности и температуры при культивировании), этапностью (выделено три этапа) процесса экстракции, на каждом из которых определены лимитирующие процессы массопереноса липидов через поры и отверстия целых или погибших клеток микроводорослей. Для различных видов клеток микроводорослей определены кинетические коэффициенты процесса экстракции внутриклеточных липидов из микроводорослей. Математическая модель экстракции позволяет рассчитывать изменение массы микроводорослей, содержание внутриклеточных липидов и концентрацию липидов в жидкой фазе (неполярном экстрагенте), что предопределяет ее применение при технологическом расчете аппаратов экстракции.

Методами физического и математического моделирования определены условия эффективного осуществления процессов подготовки и предварительной обработки сырья (микроводорослей), экстракции и этерификации липидов:

- культивирование микроводорослей штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 необходимо проводить при начальной концентрации штамма 2-4 млн кл/мл с использованием питательной среды *Тамийя OPTIMUM*, при температуре 30 °С, уровне освещенности 14 клк, толщине слоя суспензии микроводорослей не более 0,4 м, времени культивирования до создания стрессовых условий 7-8 суток (до концентрации 50-60 млн кл/мл), создании стрессовых условий в течение 6-7 суток путем создания дефицита нитрата калия (менее 100 мг нитрат-анионов/л суспензии);

- концентрирование суспензии целесообразно осуществлять центрифугированием суспензии ($Fr = 1000$) для получения пасты микроводорослей влажностью 95.0-99.5 %;

- комплексное разрушение клеточных стенок следует проводить смесью ферментов «Целлолюкс А»– «Протосубтилин ГЗх» и СВЧ-излучением мощностью 280–420 Вт, что позволяет повысить выход липидов в 5,8 раз по сравнению с контрольным образцом;

- процесс экстракции внутриклеточных липидов целесообразно осуществлять при температуре 50 °С, соотношении экстрагентов - смесь этанола и петролейного эфира 1:2 (об.) и соотношении сухих клеток (г) к количеству смеси экстрагента (мл) (1:20);

- реакцию этерификации необходимо проводить при температуре 60 °С и соотношении этанол-липиды 6:1 (мол.) в присутствии 3 % (от массы липидов) щелочного катализатора - гидроксида натрия.

Значимость результатов диссертации для науки

На основе современных методов математического и физического моделирования получены новые научные результаты для теории проектирования процессов и аппаратов культивирования микроводорослей, разрушения клеток, экстракции липидов в производстве эфиров жирных кислот из растительного сырья.

Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научно обоснованные результаты теоретических и экспериментальных исследований свойств и режимов функционирования химико-технологического процесса получения эфиров жирных кислот, имеющие существенное значение для развития страны.

Практическое значение результатов диссертации

Предложены способ получения ЭЖК из микроводоросли *Chlorella vulgaris* ИФР №С-111, конструкции новых аппаратов для подготовки и предварительной обработки сырья (микроводорослей), процессов экстракции и этерификации липидов, позволяющие повысить уровень ресурсосбережения производства ЭЖК и практические рекомендации по их проектированию.

Изучены свойства и режимы технологического процесса получения ЭЖК из микроводоросли *Chlorella vulgaris* ИФР №С-111 с высоким уровнем ресурсосбережения. На основе экспериментальных исследований влияния химического состава питательной среды, температуры, уровня освещенности, вида источника азота, способа создания стрессовых условий на кинетику процесса роста биомассы мик-

роводорослей и накопление внутриклеточных липидов. Разработаны новый способ подготовки микроводорослей с повышенным содержанием липидов (патент РФ № 2569149) и оригинальные конструкции аппаратов (фотобиореактора и дезинтегратора) для осуществления биотехнологического и физико-химического процессов подготовки сырья: 1) культивирования микроводорослей (патент РФ № 151576); 2) разрушения клеток микроводорослей (патент РФ № 169598).

С использованием методов физического и математического моделирования изучено влияние типов экстрагентов, температуры, соотношения количества микроводорослей и экстрагентов на кинетику процесса экстракции липидов из микроводорослей, выполнен технологический расчет экстрактора и определены рациональные режимы его функционирования, обеспечивающие выход внутриклеточных липидов на уровне 23 %.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Рынок сбыта биотоплива, технологий и оборудования для его производства активно развивается и имеет существенные преимущества по сравнению с традиционными ресурсами. В связи с этим, создание отечественного оборудования и разработка технологий будет способствовать созданию высококачественного конкурентоспособного продукта с более низкими экономическими показателями.

Установленные механизмы культивирования и переработки биомассы микроводорослей могут использоваться при разработке новых энерго- и ресурсосберегающих технологий получения возобновляемых источников энергии. Математическое описание, и разработанные комплексы программ (№ 2015617096 «Программа расчета кинетики накопления липидов в биомассе микроводорослей»; № 2016660175 «Моделирование кинетики экстракции липидов из биомассы микроводорослей») могут быть полезными для расчета кинетики процессов культивирования микроводорослей и экстракции внутриклеточных липидов, а также конструкций аппаратно-технологических модулей.

Предложенные конструкции фотобиореактора, дезинтегратора и экстрактора могут применяться для интенсификации технологических процессов с участием микроорганизмов, модернизации существующих биотехнологических производств и для проектирования новых энерго- и ресурсосберегающих производств возобновляемых источников энергии.

Разработанные в диссертации технологическая схема производства ЭЖК из микроводорослей и практические рекомендации по совершенствованию аппаратного оформления биотехнологического и физико-химического процессов под-

готовки сырья, экстракции и этерификации внутриклеточных липидов с использованием современных машин и аппаратов, математические модели процессов подготовки сырья (микроводорослей) и кинетики экстракции внутриклеточных липидов приняты к использованию в ФГБНУ «ВНИИТиН» г. Тамбов, ОАО «Биохим» г. Рассказово и ОАО «Орбита» г. Тамбов. Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе при подготовке специалистов по направлению «Биотехнология».

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность и обоснованность основных положений и выводов диссертации подтверждаются: 1) корректным использованием методологии научного исследования, объективных законов природы, методов физического и математического моделирования; 2) согласованностью теоретических результатов и экспериментальных данных, полученных с использованием современных методов измерения и сертифицированных приборов, с известными литературными данными.

Положения теории основываются на известных достижениях фундаментальных и прикладных научных дисциплин: процессов и аппаратов химических технологий и биотехнологии, системного анализа, физического и математического моделирования. В работе автор грамотно использует математический аппарат при обосновании полученных результатов, выводов и рекомендаций, достаточно корректно вводит новые понятия и определения.

Автором изучены и критически анализируются известные достижения и теоретические положения других авторов по вопросам культивирования микроводорослей, разрушения клеточных стенок микроорганизмов, экстракции внутриклеточных компонентов из микроорганизмов. Список использованной литературы содержит 183 наименования.

Для подтверждения теоретических положений автором проводятся экспериментальные исследования, целью которых является исследование свойств и режимов технологического процесса подготовки и предварительной обработки микроводорослей; механизмов и кинетики процесса культивирования микроводорослей; закономерностей воздействия СВЧ-излучения, ферментов, антибиотиков, вихревого слоя ферромагнитных частиц, «осмотического шока» и технологических условий осуществления процесса дезинтеграции клеток микроводорослей на интенсификацию процесса экстракции липидов; механизмов и кинетики процесса экстракции внутриклеточных липидов, определение кинетических уравнений и их коэффици-

ентов; совершенствование аппаратного оформления производства ЭЖК из микроводорослей с использованием современных машин и аппаратов. Обоснованность результатов, выдвинутых соискателем, основывается на согласованности данных эксперимента и расчетных данных, полученных с использованием математических моделей. Адекватность математических моделей проверяли по обширному массиву экспериментальных данных, полученных в ходе проведенных экспериментальных исследований на лабораторной установке. Среднеквадратичное отклонение расчетных от экспериментальных данных для моделей статики не превышает 15 %.

Достоверность экспериментальных данных обеспечивается применением современных методов измерения, сертифицированных приборов и экспериментального оборудования, а также высокой точностью и устойчивостью применяемого численного метода Рунге-Кутты 4 порядка для решения обыкновенных дифференциальных уравнений, используемых в математических моделях исследуемых процессов.

Критические замечания

1. Математическая модель культивирования микроводорослей не учитывает влияние величины уровня рН.
2. Отсутствуют экспериментальные данные по варьированию периодами «света/темноты» при культивировании микроводорослей.
3. Не приведены рекомендации по очистке фотобиореактора от биомассы, которая будет нарастать на стенках реактора и осветительных блоках.
4. Не приведено сравнения по экономическому критерию биотоплива первого, второго и третьего поколений.
5. К сожалению, в диссертационной работе Темнова М.С. не ставилась задача разработки полной математической модели технологического процесса получения ЭЖК из микроводоросли, что не позволило соискателю в полной мере оценить экономический эффект от внедрения предлагаемой технологической схемы производства ЭЖК из микроводоросли.

Указанные замечания в целом не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертационная работа Темнова М.С. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся новые подходы к решению поставленных задач. Оформление диссертации соответствует Национальному стандарту РФ ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». М.: Стандартинформ, 2012.

Автореферат диссертации выполнен с соблюдением установленных требований и правильно отражает содержание диссертации. Основные научные результаты и положения достаточно полно отражены в 2 монографиях и 6 статьях в рецензируемых научных журналах, апробированы на международных научных конгрессах и конференциях. Новизна технических решений подтверждается полученными патентами на полезные модели и изобретение, свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Заключение

По тематике, содержанию, методам исследования диссертационная работа соответствует паспортам специальностей *05.17.08, 03.01.06*.

05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий»

Формуле специальности: «интегрированная научная дисциплина, сформированная из отдельных областей знаний, содержание которой базируется на физических и химических явлениях (перенос массы, физико-химические воздействия на перерабатываемые материалы и т. п.)», «совершенствование аппаратного оформления технологических процессов с позиций энерго- и ресурсосбережения», «решение проблем совершенствования и создания эффективных технологических схем и производств на основе использования современных машин и аппаратов».

Областям исследования: «исследования массообменных процессов и аппаратов», «...создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов...».

03.01.06 – "Биотехнология (в том числе бионанотехнологии)"

Формуле специальности: «область науки об использовании живых организмов и биологических процессов в производстве с целью получения полезных продуктов для народного хозяйства, целенаправленно улучшающих воздействие на окружающую среду».

Областям исследования: «исследование и разработка требований к сырью (включая вопросы его предварительной обработки)», «изучение и разработка технологических режимов выращивания микроорганизмов-продуцентов для получения биомассы, ее компонентов», «изучение и разработка процессов и аппаратов микробиологического синтеза, массо- и теплообмены... в аппаратах для... экстракции».


Считаем, что диссертационная работа отвечает требованиям п. 9 действующего «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 28.08.2017), а ее

автор Темнов Михаил Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий» и 03.01.06 – «Биотехнология (в том числе бионанотехнологии)» за самостоятельно выполненную научную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения – свойства и режимы функционирования ресурсосберегающего химико-технологического процесса получения эфиров жирных кислот из микроводоросли *Chlorella vulgaris* ИФР №С-111, оснащенного современными машинами и аппаратами, имеющие существенное значение для развития страны.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсуждены на заседании кафедры технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (протокол № 06 от 06 декабря 2017 г.).

«06» декабря 2017 г.

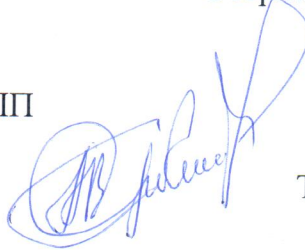
Зав. кафедрой ТЖ, ПАХПП
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук,
профессор



5.12.2017

Остриков Александр Николаевич

Секретарь кафедры ТЖ, ПАХПП
кандидат технических наук,
доцент



Терехина Анастасия Викторовна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО "ВГУИТ").

Адрес: 394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19.

Контактные телефоны: справочная служба: +7 (473) 255-38-87, факс: 7 (473) 255-38-87

Электронная почта: oan@vsuet.ru

Веб-сайт: <http://vsuet.ru/>

