

## О Т З Ы В

официального оппонента 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 работы

В Стратегии развития химической и нефтехимической промышленности на период до 2030 года и «Комплексной программой развития биотехнологий в Российской Федерации до 2020 года» предусматривается широкомасштабное развертывание биоиндустрии в регионах России; создание инфраструктуры развития биотехнологии; сохранение и развитие биоресурсного потенциала как основы биоиндустрии. Ключевыми проблемами их развития в настоящее время являются отсутствие необходимого ассортимента сырья и, в частности, возобновляемых источников. Решение этих проблем напрямую связано с разработкой и реализацией «прорывных» инновационных проектов по созданию новых экономически эффективных и экологически безопасных энерго-и ресурсосберегающих химических и биотехнологических производств, основанных на использовании возобновляемого растительного сырья и, в частности, микроводорослей.

Эфиры жирных кислот (ЭЖК) из микроводорослей могут с полным основанием рассматриваться как перспективное возобновляемое растительное сырье, способствующее повышению эффективности и качества производственных процессов в различных сферах народного хозяйства и улучшению качества жизни и здоровья населения, в том числе при производстве широкого спектра продуктов - биотоплива, белков, полисахаридов, пигментов, биополимеров, кормов, удобрений и др. Как возобновляемый источник растительного сырья микроводоросли имеют неоспоримые преимущества перед наземными растениями: 1) высокая конверсионная эффективность фотонов (3,8 % против 0,5 % для наземных растений), дающая возможность получать более высокие урожаи биомассы на гектаре посевной площади; 2) более высокая поглотительная емкость углекислого газа, что обеспечивает снижение нагрузки на биосферу; 3) возможность использования в процессе жизнедеятельности клеток микроводорослей азот и фосфор из различных источников сточных вод (например, сельскохозяйственных, промышленных и муниципальных).

Однако, до настоящего времени использование микроводорослей в качестве перспективного возобновляемого источника сырья для био- и химических производств тормозится сложностью и малой изученностью механизмов и кинетики процессов концентрирования суспензии микроводорослей вследствие малого размера клеток, экстракции и

этерификации липидов микроводорослей, низким выходом липидов (4-5 % массовых) при традиционном проведении процесса экстракции из-за наличия прочной клеточной стенки. Разрешению накопившихся противоречий, а именно теоретическому и экспериментальному исследованию системных связей и закономерностей функционирования и развития процессов культивирования и разрушения клеток микроводорослей, экстракции и этерификации липидов, условий их эффективного осуществления на основе математического моделирования посвящена диссертационная работа Темнова М.С. 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 аппаратного 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 темы диссертационной работы Темнова М.С. также подтверждается тем, что она выполнялась 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 «Кинетика 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»).

*Объектом исследования* в диссертации Темнова М.С. являются процессы и аппараты получения ЭЖК из микроводорослей, *предметом исследования* - механизмы и кинетика процессов получения ЭЖК из биомассы микроводорослей, условия их эффективного осуществления, методы физического и математического моделирования процессов и аппаратов получения ЭЖК из микроводорослей.

### **Новизна проведенных исследований и полученных результатов**

Новизна диссертационной работы Темнова М.С. заключается в теоретическом и экспериментальном обосновании совершенствования и создания эффективных технологических схем производства ЭЖК из микроводорослей на основе использования современных машин и аппаратов.

Автор грамотно ставит и успешно решает задачи теоретического и экспериментального исследования механизмов и кинетики процессов культивирования и разрушения клеток микроводорослей (Глава 2); экстракции и этерификации липидов, условий их эффективного осуществления (Глава 3, параграфы 3.1, 3.3.); экспериментального исследования 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 (Глава 2, параграф 2.3); математического моделирования кинетики процессов культивирования клеток микроводоросли *Chlorella vulgaris* ИФР №111 и экстракции внутриклеточных липидов (Глава 2, параграф 2.1.2, Глава 3, параграф 3.2.); аппаратурно-технологического оформления процессов культивирования микроводорослей, разрушения клеточных стенок, экстракции и этерификации липидов и разработки эффективной технологической схемы производства ЭЖК из микроводорослей на основе современных машин и аппаратов (Глава 4).

Несомненную научную новизну представляют результаты теоретического и экспериментального исследования механизмов и кинетики процессов подготовки и предварительной обработки сырья, комплексного воздействия СВЧ-излучения и смеси ферментов для интенсификации процесса экстракции; влияния химического состава питательной среды, температуры, интенсивности света, вида источника азота, способа создания стрессовых условий на кинетику процессов накопления биомассы микроводорослей и внутриклеточных липидов. Разработаны оригинальные математические модели процессов культивирования микроводорослей и экстракции внутриклеточных липидов (предложены кинетические уравнения и определены их коэффициенты), 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).

Научной новизной обладают и новые экспериментальные данные, полученные соискателем при исследовании свойств и режимов процессов культивирования микроводорослей штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111, концентрирования суспензии, экстракции и этерификации внутриклеточных липидов, использующиеся при разработке технологической схемы производства ЭЖК (Заключение по диссертации на стр. 179,180 , выводы 1, 2).

### **Практическая ценность**

Работа Темнова М.С. имеет ярко выраженную практическую направленность и определяется решением важной задачи инновационного развития химического комплекса РФ - создание нового ресурсосберегающего технологического процесса получения из растительного сырья (микроводорослей) ЭЖК (возобновляемого сырьевого источника для производства биодизельного топлива) и эффективной технологической

схемы производства ЭЖК на основе использования современных машин и аппаратов.

На основе комплекса проведенных экспериментальных исследований автором изучены свойства и режимы технологического процесса получения ЭЖК из микроводоросли *Chlorella vulgaris* ИФР №С-111 с высоким уровнем энерго- и ресурсосбережения. Разработаны и защищены патентами 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).

На базе 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%.

Разработаны эффективная технологическая схема производства ЭЖК из микроводорослей и практические рекомендации по совершенствованию аппаратного оформления биотехнологического и физико-химического процессов подготовки сырья, экстракции и этерификации внутриклеточных липидов.

Результаты работы - математические модели и комплекс программ ЭВМ для расчета процессов и аппаратов производства эфиров жирных кислот; новые конструкции фотобиореактора и дезинтегратора, оптимальные технологические режимы осуществления процессов культивирования биомассы микроводорослей с повышенным содержанием липидов, экстракции и этерификации липидов; рекомендации по разработке технологической схемы производства эфиров жирных кислот из растительного сырья (микроводорослей) и проектированию промышленных аппаратов приняты к использованию в ОАО «Орбита» г. Тамбов, ФГБНУ «ВНИИТиН» г. Тамбов, ОАО «Биохим» г. Рассказово (Акты внедрения представлены в Приложении Д).

Математические модели процессов подготовки сырья (микроводорослей) и экстракции внутриклеточных липидов, технология получения липидов и аппаратное оформление процессов получения эфиров жирных кислот используются в учебном процессе Тамбовского государственного технического университета при подготовке дипломированных специалистов, бакалавров и магистров по специальности «Проектирование технологических машин и комплексов» и направлениям «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в нефтехимии, химической технологии и биотехнологии», «Биотехнология».

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

Соискатель Темнов М.С. достаточно корректно использует известные научные методы системного анализа, математического моделирования и обработки информации для обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Автором изучены и критически анализируются известные достижения и теоретические положения других авторов по вопросам исследования и разработки энерго- и ресурсосберегающих процессов, аппаратов и технологических схем производства ЭЖК из растительного сырья, включая проблемные вопросы исследования механизмов и кинетики процессов культивирования клеток микроводорослей с повышенным содержанием липидов и экстракции внутриклеточных липидов, математического моделирования и оптимизации аппаратурно-технологического оформления процессов производства ЭЖК из микроводорослей. Список использованной литературы содержит 183 наименования, в том числе, 93 ссылки на работы зарубежных ученых.

Для подтверждения теоретических положений автором проводятся физические эксперименты, целью которых является исследование свойств и режимов технологического процесса подготовки и обработки сырья, механизмов и кинетики процессов культивирования и разрушения клеток микроводорослей, экстракции и этерификации липидов; 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.

Обоснованность полученных Темновым М.С. результатов базируется на удовлетворительной согласованности данных экспериментальных исследований и научных выводов и подтверждается:

- воспроизводимостью и согласованностью теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными с применением современных методов измерения, сертифицированных приборов и экспериментального оборудования;

- корректным применением теоретических и эмпирических методов при проведении научных исследований по теме диссертации;

- методологической обоснованностью и непротиворечивостью исходных теоретических положений, использованием при математическом моделировании лишь таких приближений, которые не противоречат физике рассматриваемых явлений и являются принятыми в литературе по данному вопросу;

- адекватностью математических моделей кинетики процессов подготовки микроводорослей и экстракции внутриклеточных липидов.

### **Замечания**

1. В главе 2 диссертации приводится большой объем экспериментальных данных по исследованию кинетики процессов культивирования микроводорослей и

- экстракции внутриклеточных липидов из них. Остается неясным, проводилось ли планирование экспериментов, и какие современные методы обработки экспериментальных данных использовались при этом?
2. Материал главы 4 носит описательный, а не доказательный характер. В главе 4 хотелось бы видеть математические постановки и решения задачи оптимального проектирования аппаратурно-технологического оформления процесса получения ЭЖК из микроводоросли с высоким уровнем энерго- и ресурсосбережения. Каким образом при этом будут изменяться (дополняться) математические модели кинетики процессов культивирования микроводорослей и экстракции липидов?
  3. Представляется интересным разработка методики технологического расчета процессов и аппаратов технологической схемы производства ЭЖК из микроводорослей в условиях неопределенности исходных данных и коэффициентов математической модели?
  4. Не проведены экспериментальные исследования процесса этерификации липидов микроводорослей с использованием кислотного катализатора.
  5. Не проведены экспериментальные исследования процесса этерификации липидов микроводорослей метиловым спиртом.
  6. Требуется разъяснения термин "математические модели ... создают предпосылки для эффективного управления процессами получения липидов".

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы, являющейся законченной научно-квалификационной работой, имеющей существенную научную новизну и практическую ценность в области процессов и аппаратов химической технологии и биотехнологии. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты для теории проектирования процессов и аппаратов подготовки и предварительной обработки растительного сырья, разрушения клеток, экстракции липидов в производстве эфиров жирных кислот из растительного сырья.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований соискателем Темновым М.С.

установлены условия эффективного осуществления процессов:

1) культивирования микроводорослей штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 (при начальной концентрации штамма 2-4 млн кл/мл, с использованием питательной среды *Тамийя OPTIMUM*, температуре 30 °С и уровне освещенности 14 клк, создании стрессовых условий в течение 6-7 суток);

2) концентрирования суспензии микроводорослей до пасты влажностью 95,0-99,5 %;

3) разрушения клеточных стенок смесью ферментов «Целлолюкс А»– «Протосубтилин ГЗх» и СВЧ-излучением (выход липидов увеличивается в 5.8 раз по сравнению с контрольным образцом);

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

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

#### разработаны

1) способ получения ЭЖК из микроводоросли *Chlorella vulgaris* ИФР №С-111 и конструкции новых аппаратов для стадий подготовки и предварительной обработки сырья, экстракции и этерификации липидов, позволяющие повысить уровень энерго- и ресурсосбережения производства ЭЖК;

2) математические модели процессов культивирования микроводорослей и экстракции липидов из микроводорослей, создающие предпосылки для эффективного управления процессами получения липидов;

3) практические рекомендации по проектированию процессов и аппаратов подготовки и предварительной обработки сырья, экстракции и этерификации липидов, созданию эффективной технологической схемы производства ЭЖК на основе предложенных конструкций современных машин и аппаратов.

Предложенные автором диссертации решения аргументированы и критически оценены по сравнению с другими известными решениями.

Все теоретические положения диссертации достаточно полно отражены в 2 монографиях, 4-х статьях в научных изданиях, индексируемых *Web of Science* и *Scopus*, 2 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ, апробированы на многочисленных Международных и Всероссийских конференциях. Новизна технических решений защищена 3 патентами на изобретения и полезную модель, 2 свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Положения, выдвигаемые на защиту соискателем Темновым М.С., свидетельствуют о личном вкладе автора диссертации в науку.

### **Заключение**

По тематике, содержанию, методам исследования диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

По 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».

По областям исследования: «исследования массообменных процессов и

аппаратов», «...создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов...».

Таким образом, диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (ред. от 28.08.2017)), а автор работы, Темнов Михаил Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий», 03.01.06 – «Биотехнология (в том числе бионанотехнологии)».

д.т.н., профессор, зам. директора  
по научной работе ФГБНУ  
«Всероссийский научно-  
исследовательский институт  
использования техники и  
нефтепродуктов в сельском  
хозяйстве»

Нагорнов Станислав Александрович



« 1 » декабря 2017 г.

*Контактные данные официального оппонента:*

Почтовый адрес: 392022, г. Тамбов,

пер. Ново-Рубежный, д.28, ФГБНУ ВНИИТиН

Контактный телефон: (8 4752) 44-01-37

Адрес электронной почты: [snagornov@yandex.ru](mailto:snagornov@yandex.ru)