

На правах рукописи



**ШАБУНИНА Елена Александровна**

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ МАССОБМЕНА  
ПРИ АВТОТРОФНОМ БИОСИНТЕЗЕ ДУНАЛИЕЛЛЫ  
И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ  
МУЧНЫХ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Специальности:

05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств»

05.18.01 – «Технология обработки, хранения и переработки  
злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов,  
плодоовощной продукции и виноградарства»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Воронеж – 2018**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО «ВГУИТ»)

Научные руководители: Заслуженный изобретатель РФ,  
доктор технических наук, профессор  
**Шевцов Александр Анатольевич**  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»  
Доктор сельскохозяйственных наук, доцент  
**Тертычная Татьяна Николаевна**  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный сельскохозяйственный университет имени императора Петра I»

Официальные оппоненты: **Новоселов Александр Геннадьевич**  
доктор технических наук, профессор  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», профессор  
**Садыгова Мадина Карипуловна**  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова», профессор

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ)», г. Москва**

Защита состоится «24» января 2019 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.035.01 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал.

Отзывы (в двух экземплярах) на автореферат, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета университета. Автореферат размещен в сети Интернет на официальных сайтах: Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak3.ed.gov.ru/> и ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru/> «21» ноября 2018 г.

С диссертационной работой можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru/> «2» ноября 2018 г.

Автореферат разослан «3» декабря 2018 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук  
Д 212.035.01

 Л.Н. Фролова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Научно-техническая политика государства в области питания должна быть направлена на укрепление здоровья нации. Для выполнения этой задачи необходимо производство доступных пищевых продуктов высокого качества.

В последние годы в нашей стране произошли глубокие качественные изменения структуры питания населения. В результате технологической обработки, использования неполноценного с точки зрения химического состава пищевого сырья, организм человека не получает необходимого количества незаменимых для его качественной жизнедеятельности компонентов. Одним из путей ликвидации дефицита в этом отношении и повышения стрессоустойчивости организма человека к различным неблагоприятным факторам окружающей среды является регулярное употребление продуктов питания с улучшенным химическим составом.

Ведущая роль отводится разработке новых обогащенных пищевых продуктов, сбалансированных по химическому составу.

Объектом изучения в данной работе стала природная биологически активная добавка – фотоавтотрофная микроводоросль *Dunaliella Salina* с богатым сбалансированным биохимическим составом, отличающимся высоким содержанием белка (более 60 % ее биомассы), включающего почти все аминокислоты,  $\beta$ -каротина, витаминов и минеральных веществ. Ее использование (в качестве суспензии или порошка) в технологиях производства мучных кондитерских изделий позволило бы пищевым предприятиям решить несколько задач одновременно.

Для микроскопических водорослей технологии получения биомассы схожи. Однако технологический процесс выращивания *Dunaliella Salina* пока далек от идеального вследствие физиолого-биохимической сложности метаболизма водорослей и его слабой изученности с точки зрения регуляции синтеза микроэлементов.

Данному научному направлению посвящены труды Н.П. Масюк, Е.С. Милько, Е.В. Юриной, Г.П. Серенкова, Л.А. Сиренко, В.Е. Семененко, А.И. Божкова, И.А. Харчука, Е.А. Мурадяна, А.Б. Боровкова, Р.П. Тренкеншу, Р.Г. Геворгиза, И.Н. Гудвилевича, Воинова Н.А., А.М. Ляха, А. Ven-Amotz, M. Garcia-Gonzalez, P.P. Lamers и др. Предоставляемая работа является дальнейшим научным развитием в этой области.

Диссертационная работа проводилась в соответствии с тематическими планами госбюджетных научно-исследовательских работ кафедр «ТХКМиЗП» (№ гос. регистрации 01.201.2.53868) и «ТЖ,ПАХПП» (№ гос. регистрации 01.130.2.12440) ФГБОУ ВО «ВГУИТ».

**Цель диссертационной работы:** получение новой БАД из фотоавтотрофной микроводоросли *Dunaliella Salina* и использование ее в производстве мучных кондитерских изделий с высокой пищевой и биологической ценностью.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- изучение фотоавтотрофных микроорганизмов *Dunaliella* как объекта пищевых биодобавок, условий и способов их культивирования;
- создание экспериментальной установки для накопления биомассы фотоавтотрофной микрокультуры в квазинепрерывном режиме;
- экспериментальное исследование кинетических закономерностей культивирования микроводорослей *Dunaliella Salina*, целесообразное обозначение области изменения технологических параметров и анализ свойств полученной суспензии;
- математическое моделирование процесса массопереноса углекислого газа в биореакторе пленочного типа при противоточном режиме движения суспензии микрокультуры и газовой смеси;
- разработка способа управления процессом фотоавтотрофного культивирования микроводоросли *Dunaliella Salina*;
- разработка конструкции аппарата для интенсивного культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов *Dunaliella Salina*;
- разработка высокопродуктивного ресурсосберегающего способа производства порошка микроводоросли *Dunaliella Salina*;
- обоснование применения порошка микроводоросли *Dunaliella Salina* в рецептуре мучных кондитерских изделий на основе комплексной оценки качества, анализа химического состава и биологической ценности готовой продукции;
- промышленная апробация результатов и технико-экономическая оценка предлагаемых технических и технологических решений.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- закономерности процесса массообмена микроскопической водоросли *Dunaliella Salina* в фотобиореакторе пленочного типа с противоточным движением жидкой и газовой фаз;
- математическая модель изменения концентрации абсолютно сухих веществ суспензии микроскопической культуры при развитии ее вдоль высоты рабочей зоны фотобиореактора;
- обоснование новых возможностей получения биомассы фотоавтотрофных микроорганизмов;
- алгоритм автоматизированного управления процессом культивирования микроскопических организмов, обеспечивающий точность и надежность регулирования технологических параметров;

- обоснование применения полученной биодобавки из микроводоросли *Dunaliella Salina* в технологии производства мучных кондитерских изделий.

**Научная новизна.** Изучены кинетические закономерности накопления биомассы микроводоросли *Dunaliella Salina* в режиме субкультивирования.

Разработана математическая модель процесса массообмена при противоточном движении суспензии фотоавтотрофного микроорганизма и газовой смеси вдоль рабочей зоны биореактора пленочного типа в исследуемом интервале технологических параметров.

Составлен алгоритм управления процессом культивирования фотоавтотрофных микроводорослей *Dunaliella Salina*, обеспечивающий точность и надежность управления технологическими параметрами.

Научно обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность использования микроскопической культуры *Dunaliella Salina* в качестве биологически активной добавки в производстве кеков функционального назначения.

**Степень достоверности результатов.** Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации, абсолютно соответствуют теоретическим концепциям, общепринятым в выбранной области исследований. В процессе написания научной работы применялись современные методы экспериментальных испытаний. Проверка достоверности предоставляемого материала проводилась посредством апробированных математических методов моделирования.

**Практическая ценность и реализация результатов.**

В результате фотоавтотрофного биосинтеза в аппарате пленочного типа получена и изучена биомасса микроводоросли *Dunaliella Salina* (в виде суспензии и порошка) как биологически активная добавка.

Установлены рациональные интервалы изменения технологических параметров при культивировании микроводоросли *Dunaliella Salina*: концентрация углекислого газа в газовой смеси – 6,0...7,5 %; давление газовой смеси на входе в пленочный биореактор - 1,8...2,2 Па (массовый расход ГВС – 22,8...24,1 кг/ч); освещенность – 26...36 клк; расход суспензии дуналиеллы – 2,2...2,5 м<sup>3</sup>/ч; размер щели в распределителях потока – 2...3 мм; шаг проволоочной спирали – от 10...15 мм.

Разработана энергосберегающая технология производства порошка (биомассы) фотоавтотрофных микроорганизмов (Патент РФ №2577150), обеспечивающая максимальный выход готовой культуры при минимальных энергетических затратах в замкнутых термодинамических циклах по материальным и тепловым потокам.

Разработан способ управления процессом культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов (Патент РФ №2622081), позволяющий создать оптимальные условия для интенсивного прироста клеток микрокультуры за счет использования различных видов истечения суспензии.

Разработана конструкция фотобиореактора пленочного типа (Патент РФ №2586534) для интенсивного культивирования широкого спектра автотрофных микроорганизмов, позволяющая получать биомассу высокого качества при рациональном распределении энергоресурсов.

Разработана технология получения кекса с добавлением порошка микроводоросли *Dunaliella Salina* (Патент РФ № 2660268), при которой готовые изделия характеризуются высокой пищевой и биологической ценностью и отличными органолептическими показателями.

**Апробация работы.** Работа выполнялась в лабораториях кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающих производств (ТХКМиЗП) ФГБОУ ВО «ВГУИТ», в лаборатории предприятия АО «Воронежский экспериментальный комбикормовый завод», а также в лаборатории АО «Хлебозавод №7» г. Воронежа. Материалы и отдельные результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались на международных всероссийских, научных, научно-технических и научно-практических конференциях и симпозиумах (Ялта, 2014, 2018), (Краснодар, 2015, 2016); (Алматы, 2015); (Москва, 2016), (Екатеринбург, 2017); отчетных научных конференциях ВГУИТ (Воронеж, 2014–2018 гг.).

Результаты работы демонстрировались в г. Воронеже на IV межрегиональной выставке «Инновационные технологии в производстве кондитерских, хлебобулочных, макаронных изделий и зернопродуктов» (2014); межрегиональных агропромышленных выставках «Агросезон–2017, 2018 и «Воронежагро–2017 и отмечены дипломами.

В условиях АО «Хлебозавод №7» г. Воронежа проведены производственные испытания технологии кекса из муки пшеничной первого сорта с добавлением какао-порошка и порошка из микроводоросли *Dunaliella Salina*, подтверждающие целесообразность промышленного внедрения данного изделия повышенной пищевой и биологической ценности.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Данная работа соответствует п.п. 1, 2 и 4 паспорта специальности 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств» и п.п. 3, 6 и 9 специальности 05.18.01 – «Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 23 работы, в том числе, 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 монография, получено 4 патента РФ на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Работа изложена на 230 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка и 35 таблиц. Список литературы включает 237 наименований, в том числе 9 зарубежных. Приложения к диссертации представлены на 40 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** аргументирована актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

**В первой главе** систематизированы научные литературные данные о фотоавтотрофной микроводоросли *Dunaliella Salina*, выступающей в роли биологического объекта исследований; способах накопления биомассы микрокультур и современных конструкциях биореакторов; рассмотрены гидродинамические и массообменные закономерности, характерные для процесса культивирования микроводорослей; методы математического описания популяций фотоавтотрофных микроорганизмов в аппарате пленочного типа; проанализированы возможности применения фотоавтотрофных микроводорослей в качестве биологически активных добавок. Сформулирована цель и задачи диссертационной работы, определены методы решения поставленных задач.

**Во второй главе** приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса накопления биомассы микроводоросли *Dunaliella Salina* в фотобиореакторе пленочного типа с противоточным движением жидкой и газовой фаз (рис. 1). При культивировании микрокультуры *Dunaliella Salina* использовалась питательная среда Тренкеншу.

Высота рабочей зоны экспериментального фотобиореактора составила 1,3 м. Исследование процесса культивирования водоросли *Dunaliella Salina* осуществляли при следующих интервалах изменения технологических и конструктивных параметров: концентрация  $\text{CO}_2$  в газовой смеси (ГВС) – 3...10 %; расход ГВС – 14,9...24,1 кг/ч; освещенность – 15,6...36,3 клк; расход суспензии водоросли – 0,9...2,5 м<sup>3</sup>/ч; шаг витков проволоочной спирали – 5...20 мм; толщина спирали – 1,4...2,1 мм; ширина зазора в пленкообразующих устройствах – 1...3 мм.

Наличие в конструкции фотобиореактора прозрачных цилиндрических трубок из кварцевого стекла, на внутренней поверхности которых была закреплена винтовая спираль из проволоки, позволило увеличить время пребывания суспензии микроводоросли в рабочей зоне аппарата (в секции освещения) и предотвратить ее срыв при закрученном стекании. В связи с этим удалось осуществить равномерность освещения культуральной пленки и подвода к ней в противотоке ГВС, а также, в целом, обеспечить интенсификацию массообмена.

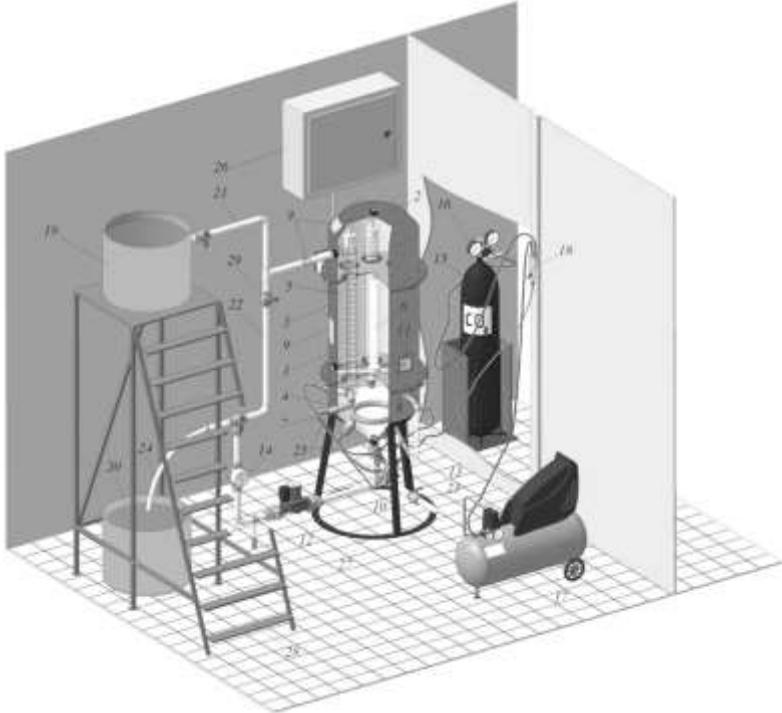


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – фотобиореактор; секции: 2 – ввода, 3 – освещения, 4 – вывода; 5 – цилиндрические трубки; 6 – лампа; 7 – газовые трубки; 8 – барботажное устройство; 9 – окна; 10 – газовый коллектор; 11 – вентилятор; 12 – насос; 13 – уравнемер; 14 – расходомер; 15 – баллон с  $\text{CO}_2$ ; 16 – газовый редуктор; 17 – компрессор; 18 – газовый смеситель; 19, 20 – емкости для первичной и готовой суспензии; трубопроводы: 21 – подводящий, 22 – рециркуляционный; 23 – сливной; 24 – подачи готовой суспензии; 25 – газовые шланги; 26 – щит управления; 27 – станина; 28 – лестница; 29 – обратный клапан.

Оптимальная температура для культивирования *Dunaliella Salina* +30...+32 °С в биореакторе поддерживалась за счет компенсации теплоты от источника света всасывающим вентилятором. В секции вывода суспензии водоросли дополнительно насыщалась  $\text{CO}_2$  посредством барботажного устройства.

Изучены кинетические закономерности процесса квазинепрерывного накопления абсолютно сухой биомассы микроводоросли *Dunaliella Salina* в фотобиореакторе пленочного типа в исследуемых интервалах изменения технологических и конструктивных параметров (рис. 2).

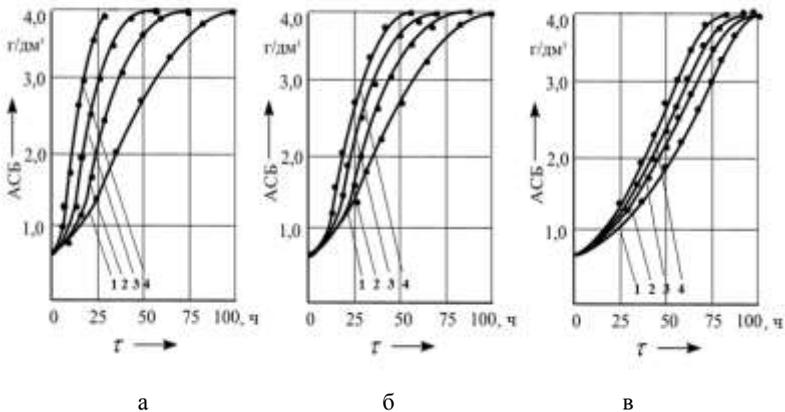


Рисунок 2 – Зависимость накопления абсолютно сухой биомассы дуналиеллы от времени при различных значениях:

- а) концентраций  $\text{CO}_2$  в ГСВ, %: 1 – 5; 2 – 7; 3 – 8; 4 – 10;
- б) массового расхода ГВС, кг/ч: 1 – 15; 2 – 20; 3 – 23; 4 – 24;
- в) освещённости, клк: 1 – 16; 2 – 22; 3 – 28; 4 – 36

В ходе проведения эксперимента были определены рациональные интервалы технологических параметров культивирования микроводоросли *Dunaliella Salina* в квазинепрерывном режиме: концентрация  $\text{CO}_2$  в ГСВ – 6,0...7,5 %; давление ГСВ на выходе из газового смесителя – 1,8...2,2 Па (массовый расход ГВС – 22,8...24,1 кг/ч); освещенность – 26...36 клк от лампы OSRAM Fluora L 36 W/77 (при высоте зоны пленочного течения суспензии дуналиеллы 1300 мм); расход суспензии дуналиеллы – 2,2...2,5 м<sup>3</sup>/ч; размер щели в верхнем и нижнем распределителях потока – 2...3 мм; шаг проволочной спирали – от 10...15 мм при толщине проволоки 2,1 мм.

Накопление АСБ культуры *Dunaliella Salina* при установленных рациональных параметрах с кратностью рециркуляции 10:1 и пяти циклах представлено в виде кинетической кривой (рис. 3).

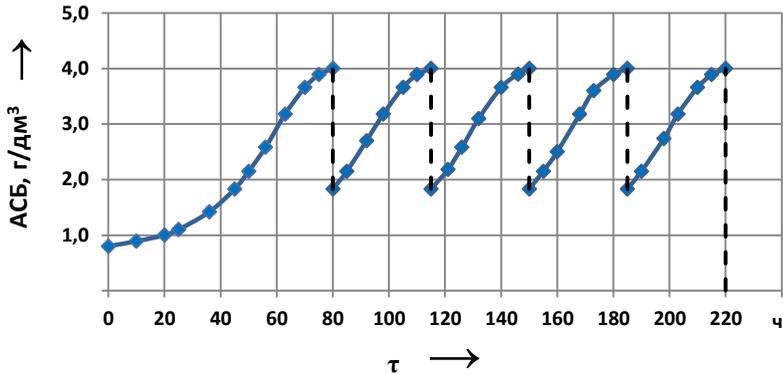


Рисунок 3 – Накопление биомассы при рациональных технологических параметрах в режиме рециркуляции

Определены физические свойства суспензии микроводоросли *Dunaliella Salina* (табл. 1) и химический состав ее сухого вещества (табл. 2).

Таблица 1

Свойства суспензии *Dunaliella Salina*

Наименование показателя	Значение			
	Проба 1	Проба 2	Проба 3	Проба 4
Время культивирования, сут	5,5	5,9	6,4	6,7
Оптическая плотность, Б (D 750)	0,24	0,38	0,66	0,88
pH	7,4	7,5	7,5	7,6
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	845,0	873,7	912,3	936,4
Динамическая вязкость, 10 <sup>-3</sup> Па·с	0,86	0,94	1,02	1,04
Поверхностное натяжение, Н/м	7,64	7,67	7,70	7,72
Содержание СВ, %	0,41	0,42	0,43	0,45
Цвет	зеленый			
Запах	слабый травянистый			

Таблица 2

Химический состав порошка *Dunaliella Salina* (в пересчете на СВ)

Наименование компонента	Содержание
Белковые вещества, %	36,4±1,27
Углеводы, %	33,0±1,25
Липиды, %	7,8±0,24
Нуклеиновые кислоты, %	7,7±0,23
Хлорофиллы, %	5,0±0,2
Каротиноиды, %	4,5±0,15
Аскорбиновая кислота, мг/100 г	102±4,0
Калий, мг/100 г	432±15,0
Натрий, мг/100 г	35,4±1,45
Кальций, мг/100 г	210±8,4
Магний, мг/100 г	137±5,45
Фосфор, мг/100 г	158±6,32
Железо, мг/100 г	4,5±0,18

Исследованы сорбционные свойства порошка дуналиеллы в интервале значений влажности 4-6 %. Установлено, что полученный продукт характеризуется невысокой гигроскопичностью. В связи с этим хранение порошка микроводоросли можно осуществлять при температуре 20-25 °С и относительной влажности воздуха 80-85 % в хорошо вентилируемых и защищенных от света помещениях. Данный режим хранения позволяет довести срок годности порошка дуналиеллы до 1 года без ущерба его качеству.

В качестве объекта обогащения микроводорослью *Dunaliella Salina* были выбраны кексы. За основу выбрана рецептура «Кекса с какао» (ГОСТ 15052–2014).

**В третьей главе** представлены результаты математического моделирования процесса массообмена при накоплении биомассы фотоавтотрофных микроорганизмов *Dunaliella Salina* в аппарате пленочного типа при следующих упрощающих допущениях: накопление биомассы в суспензии определяется однопараметрической диффузионной моделью, учитывающей распределение компонентов питания и микробных клеток по высоте трубок пленочного биореактора; структура потока истечения суспензии представлена уравнением, аналогичным уравнению молекулярной диффузии; одним из параметров диффузионной модели служит коэффициент продольного перемешивания или коэффициент турбулентной диффузии.

Уравнение материального баланса по оси  $z$  для элемента трубки  $\Delta z$  имеет вид:

$$Sdz \frac{\partial C}{\partial \tau} = vSC + D_L S \frac{\partial}{\partial z} \left( C + \frac{\partial C}{\partial z} \Delta z \right) - vS \left( C + \frac{\partial C}{\partial z} \Delta z \right) - D_L S \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $S$  – сечение трубки, м<sup>2</sup>;  $v$  – скорость потока, м/с;  $\tau$  – время, с;  $C$  – концентрация дуналиеллы, кг/м<sup>3</sup>;  $L$  – длина трубки, м;  $D_L$  – коэффициент продольного перемешивания, м<sup>2</sup>/с с начальным условием

$$C(0, z) = C_n(z), \text{ при } \tau=0, \quad (2)$$

и граничными условиями для верхнего и нижнего конца трубки:

$$vC_{\text{вх.}} + D_L \frac{\partial C}{\partial z} = vC \quad vC_{\text{вых.}} + D_L \frac{\partial C}{\partial z} = vC \quad (3)$$

Переходя к пределу  $\Delta z \rightarrow 0$  уравнение (1) было приведено к безразмерному виду:

$$\frac{D_L}{L^2} L^2 \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{v}{L} L \frac{\partial C}{\partial z} \pm \frac{\bar{\tau}}{\bar{\tau}} \frac{\partial C}{\partial \tau} = 0, \quad (4)$$

где (+) – относится к «источнику», а (-) – к «стоку»;  $Z = z/L$  – безразмерная пространственная координата;  $y = \tau/\bar{\tau}$  – безразмерное время;  $\bar{\tau} = L/v$  – среднее время пребывания.

С учетом введенных переменных и преобразований уравнение (4) приведено к виду:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - Pe \frac{\partial C}{\partial Z} \pm Pe \bar{\tau} \frac{\partial C}{\partial \tau} = 0, \quad (5)$$

где  $Pe = \frac{vL}{D_L}$  – критерий Пекле.

В безразмерной форме граничные условия (3) имеют вид:

$$\frac{1}{Pe} \frac{\partial C}{\partial Z} = \frac{C}{C_{\text{вх}}}, \text{ при } Z=0; \quad \frac{\partial C}{\partial Z} = 0, \text{ при } Z=1. \quad (6)$$

В модель введена кинетическая составляющая, которая учитывает влияние условий культивирования популяций микроводоросли и взаимовлияние клеток, или эффект тесноты, что также приводит к недостатку субстрата отдельным клеткам:

$$\partial C / \partial \tau = \vartheta C - \beta C^2. \quad (7)$$

В данном уравнении коэффициент  $\vartheta$  характеризует максимальную скорость роста клеток в популяции при отсутствии их взаимодействия, то есть ограничения субстратом и ингибирования продуктами метаболизма, а коэффициент  $\beta$  определяет меру взаимовлияния клеток вследствие недостатка питательных веществ и ингибирования продуктами метаболизма, и оценивает эффект торможения потенциально возможной скорости роста культуры.

В виду особенности конструкции биореактора процесс культивирования осуществляется при максимально возможном количестве

питательных веществ и отводе продуктов метаболизма клеток (кислорода), при этом влиянием коэффициента  $\beta$  пренебрегаем, тогда:

$$\partial C / \partial \tau = \vartheta C. \quad (8)$$

Уравнение (5) с учетом (8) представлено следующим образом:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - Pe \frac{\partial C}{\partial Z} \pm Pe \bar{\tau} \vartheta C = 0. \quad (9)$$

Для получения приближенного решения дифференциального уравнения (9) использован метод Галёркина при условии, что разность между приближенным и точным решениями должна быть ортогональна функциям, используемым при аппроксимации.

В соответствии с методом Галёркина и конечных элементов решение сводится к нахождению интеграла:

$$\int_R N_\alpha K(x) dR = 0, \quad \alpha = i, j, \dots, n \quad (10)$$

где  $N_\alpha$  – базисная функция;  $K$  – дифференциальный оператор;  $x$  – искомая величина (концентрация), которая аппроксимируется соотношением:

$$x = N_i * X_i + N_j * X_j = [N]\{X\}, \quad (11)$$

здесь  $[N] = [N_i \ N_j]$  – матричная строка;  $\{X\} = \begin{Bmatrix} X_i \\ X_j \end{Bmatrix}$  – вектор-столбец.

Дифференциальный оператор  $K(x)$  в подынтегральном выражении (10) представлен уравнением, аналогичным (9):

$$K(x) = \frac{\partial^2 x}{\partial Z^2} - Pe \frac{\partial x}{\partial Z} + Pe \bar{\tau} \vartheta x, \quad (12)$$

$$x(0) = 1, \quad x(1) = 0.$$

После замены переменных уравнение (12) приведено к виду:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial Z^2} - a \frac{\partial x}{\partial Z} + bx = 0, \quad (13)$$

с граничными условиями:

$$\frac{\partial x}{\partial Z} = Q \quad \text{при } Z = 0, \quad \frac{\partial x}{\partial Z} = 0 \quad \text{при } Z = 1 \quad (14)$$

где

$$a = Pe, \quad b = Pe \bar{\tau} \vartheta, \quad Q = Pe \frac{C}{C_{\text{вх}}}.$$

Алгоритм решения задачи моделирования (10 - 14) составлен для многократной рециркуляцией суспензии *Dunaliella Salina*. Длину трубки экспериментальной установки принимали за элемент  $NE_i$ , который определялся кратностью рециркуляции суспензии через трубку. При  $i = 5$  ко-

личество измерений концентрации дуналиеллы в суспензии  $NP_j = 6$ , что позволило рассматривать некоторую область  $M: \{X_{i,j}\}$  с узлами  $i=1..5$   $j=1..6$

Из (14) известны значения производных функции  $x$  в узлах 1 и 6:

$$\left. \frac{\partial x}{\partial Z} \right|_{X_1} = Q \quad \text{и} \quad \left. \frac{\partial x}{\partial Z} \right|_{X_6} = 0.$$

В других узлах значения производной определено в матричной форме в виде:

$$\left\{ \begin{array}{c} 1 - \frac{0}{L} \\ 0 \\ \frac{0}{L} \end{array} \right\} Q + \left\{ \begin{array}{c} 1 - \frac{X_2}{L} \\ \frac{X_2}{L} \end{array} \right\} \cdot 0 - \left[ \begin{array}{cc} \frac{1}{L} - \frac{a}{2} & -\frac{1}{L} + \frac{a}{2} \\ -\frac{1}{L} - \frac{a}{2} & \frac{1}{L} + \frac{a}{2} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} X_1 \\ X_2 \end{array} \right\} + b \left[ \begin{array}{cc} \frac{L}{3} & \frac{L}{6} \\ \frac{L}{6} & \frac{L}{3} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} X_1 \\ X_2 \end{array} \right\} = 0, \quad (15)$$

где  $L$  – длина элемента.

Это уравнение для первого узла. Для получения системы уравнений, определяющей значения  $\{X_1\}$ ,  $\{X_2\} \dots \{X_n\}$ , уравнение для первого узла объединялось с аналогичным уравнением соседнего элемента.

Для элементов  $n = 2, \dots, NE$ :

$$- \left[ \begin{array}{cc} \frac{1}{L} - \frac{a}{2} & -\frac{1}{L} + \frac{a}{2} \\ -\frac{1}{L} - \frac{a}{2} & \frac{1}{L} + \frac{a}{2} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} X_n \\ X_{n+1} \end{array} \right\} + b \left[ \begin{array}{cc} \frac{L}{3} & \frac{L}{6} \\ \frac{L}{6} & \frac{L}{3} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} X_n \\ X_{n+1} \end{array} \right\} = 0. \quad (16)$$

Обозначая значение концентрации как  $x_n = c_n$ , и объединяя матрицы элементов (15) и (16), получена система линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} - \left( \frac{1}{L} + \frac{a}{2} + \frac{bL}{3} \right) c_1 + \left( \frac{1}{L} - \frac{a}{2} + \frac{bL}{6} \right) c_2 - Q &= 0; \\ \left( \frac{1}{L} + \frac{a}{2} + \frac{bL}{6} \right) c_1 + \left( -\frac{2}{L} + \frac{2bL}{3} \right) c_2 + \left( \frac{1}{L} - \frac{a}{2} + \frac{bL}{6} \right) c_3 &= 0; \\ \left( \frac{1}{L} + \frac{a}{2} + \frac{bL}{6} \right) c_2 + \left( -\frac{2}{L} + \frac{2bL}{3} \right) c_3 + \left( \frac{1}{L} - \frac{a}{2} + \frac{bL}{6} \right) c_4 &= 0; \\ \left( \frac{1}{L} + \frac{a}{2} + \frac{bL}{6} \right) c_3 + \left( -\frac{2}{L} + \frac{2bL}{3} \right) c_4 + \left( \frac{1}{L} - \frac{a}{2} + \frac{bL}{6} \right) c_5 &= 0; \\ \left( \frac{1}{L} + \frac{a}{2} + \frac{bL}{6} \right) c_4 + \left( -\frac{2}{L} + \frac{2bL}{3} \right) c_5 + \left( \frac{1}{L} - \frac{a}{2} + \frac{bL}{6} \right) c_6 &= 0; \\ \left( \frac{1}{L} + \frac{a}{2} + \frac{bL}{6} \right) c_5 + \left( -\frac{1}{L} - \frac{a}{2} + \frac{bL}{3} \right) c_6 &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Полученное уравнение позволяет вычислить все требуемые значения  $\{X_n\}$  для любого  $n$  больше двух.

Из решения системы (17) получены значения концентраций *Dunaliella Salina* в узловых точках  $c_i$ ,  $i = 1 \dots 6$ . Составлен текст программы в языке символьных вычислений Maple.

Результаты расчета методом конечных элементов оценивали средней ошибкой аппроксимации:

$$Q_N = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - x'_i}{x_i} \right|, \quad (18)$$

где  $x$ ,  $x'$  – точное и вычисленное по методу конечных элементов значения концентрации;  $n$  – число узлов конечно-элементной модели.

При  $NE = 5$  средняя ошибка аппроксимации вычисленной концентрации составила 2,2 %, а при  $NE = 10 - 0,04$  %. Результаты расчета изменения концентрации по высоте трубки представлены в виде кривой на рис. 4.

Идентификация параметров предлагаемой модели по экспериментальным данным позволила получить удовлетворительную сходимость результатов моделирования с погрешностью 10...12 % и использовать их для определения геометрических размеров биореактора.

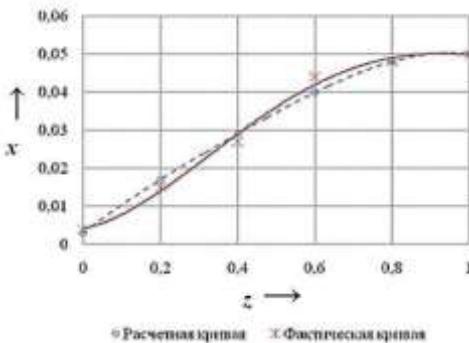


Рисунок 4 - Кривые изменения концентрации суспензии по высоте трубки

Используя разработанную математическую модель и программное обеспечение, предложен способ управления процессом культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов (Патент РФ №2622081), обеспечивающий оптимальные условия для интенсивного прироста клеток микроорганизмов *Dunaliella Salina* за счет синхронного изменения освещенности в рабочей зоне биореактора и концентрации  $CO_2$  в газовой смеси. Повышение точности и надежности управления технологическими параметрами обеспечивает снижение удельных энергозатрат в процессе культивирования на 12...15 %.

**В четвертой главе** представлена энергоэффективная технология получения биомассы фотоавтотрофных микроорганизмов *Dunaliella Salina* (Патент РФ № 2577150, рис. 5).

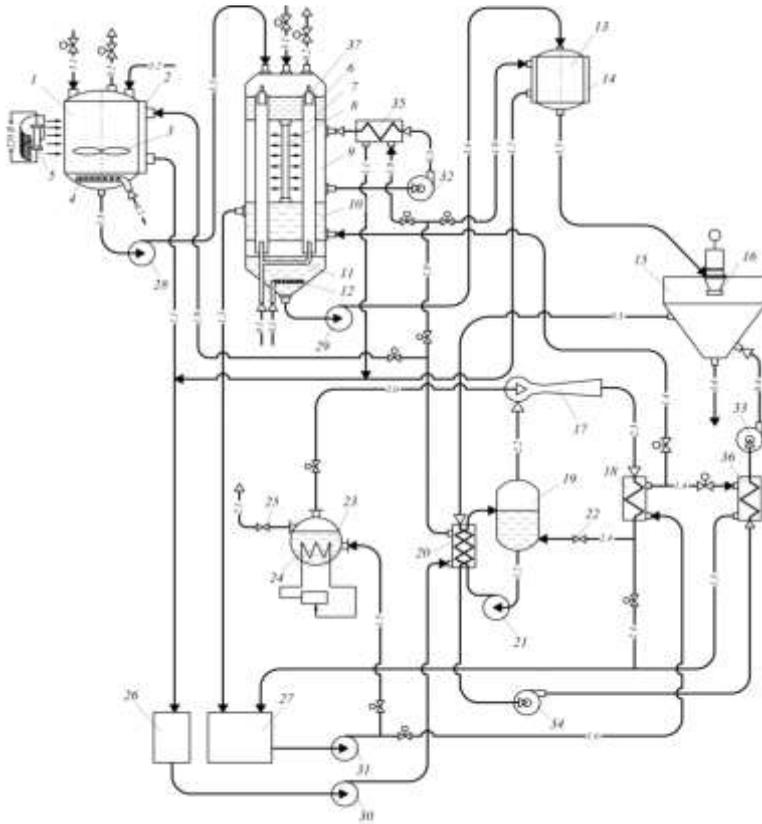


Рисунок 5 – Технологическая схема получения биомассы фотоавтотрофных микроорганизмов: 1 - инокулятор; 2 - охлаждающая рубашка; 3 - устройство перемешивания; 4 - устройство аэрации; 5 - источник света; 6 - пленочный фотобиореактор; 7 - прозрачные трубки; 8 - лампа; 9 - секция охлаждения; 10 - секция нагрева; 11 - коллектор; 12 - барботер; 13 - сборник готовой продукции; 14 - охлаждающая рубашка; 15 - распылительная сушилка; 16 - диск; 17 - эжектор; 18 - конденсатор; 19 - испаритель; 20 - холодоприемник; 21 - циркуляционный насос; 22 - терморегулирующий вентиль; 23 - парогенератор; 24 - электронагревательные элементы; 25 - предохранительный клапан; 26, 27 - сборники воды; 28, 29, 30, 31 - насосы; 32, 33, 34 - вентиляторы; 35, 36 - теплообменники

При создании энергосберегающей технологической системы наиболее важной концептуальной задачей являлось использование пленочного биореактора с непосредственным вовлечением в теплообменные процессы теплонасосной технологии при подготовке энергоносителей для поверхностного культивирования светозависимой микроводоросли *Dunaliella Salina* и распылительной сушки культуральной жидкости при непосредственном получении порошка.

Выполненные исследования подготовили условия для реализации предлагаемой технологии с подключением пароэжекторного теплового насоса по замкнутой термодинамической схеме. Основным преимуществом применения пароэжекторного теплового насоса является его энергоэффективность, безопасность и высокий коэффициент преобразования низкопотенциальной тепловой энергии: на 1 кВт затраченной электроэнергии выделяется в среднем 3-5 кВт тепла.

Предлагаемая технология позволяет увеличить выход готовой биомассы вследствие компенсации теплоты от источников света как в инокуляторе, так и в биореакторе. Предусмотрен автономный отвод отработанных теплоносителей различных температурных потенциалов без их непосредственного смешивания в рециркуляционных потоках. Целевой продукт получают в порошкообразном виде, соответственно, увеличивается срок его хранения.

Выполнен эксергетический анализ и проведена оценка термодинамического совершенства теплотехнологической системы производства биомассы фотоавтотрофных микроорганизмов, эксергетический КПД составил 7,2 %, что на 2,7 % выше, чем при использовании технологии-прототипа.

Разработана конструкция пленочного фотобиореактора (Патент РФ №2586534), позволяющая увеличить выход готовой биомассы продукта в связи с наличием в конструкции рециркуляционной трубы, обеспечивающей интенсивное перемещение культуральной жидкости (рис. б).

Созданы условия для более равномерного освещения культуральной жидкости, что способствует повышению качества получаемой биомассы. Используется кинетическая энергия газового субстрата на входе в биореактор, позволяющая рационально распределять энергоресурсы при культивировании. Повышается коэффициент массообмена благодаря равномерному освещению культуральной жидкости при ее рециркуляции посредством коаксиального размещения лампы и рационального распределения потока газа с помощью кольцевого коллектора, установленного по всему сечению аппарата.

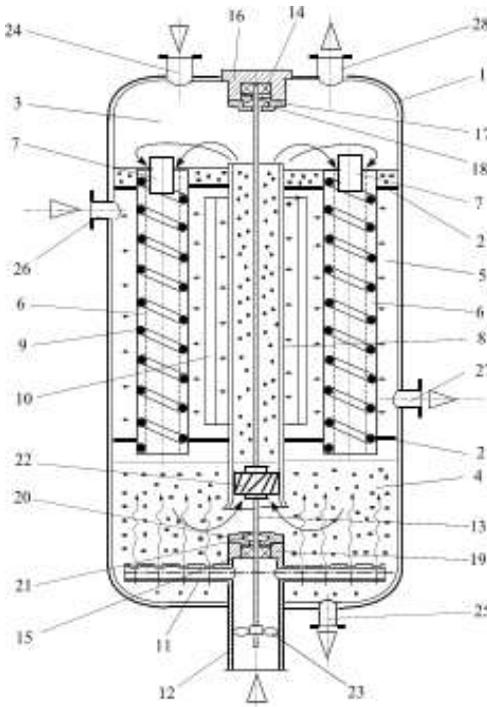


Рисунок 6 – Биореактор: 1 - корпус; 2 - горизонтальные перегородки; 3, 4 - секция ввода и вывода культуральной жидкости; 5 - дополнительная секция с внутренней зеркальной поверхностью; 6 - прозрачные цилиндрические трубки; 7 - пленкообразующие устройства; 8 - прозрачная рециркуляционная труба; 9 - винтовая спираль; 10 - лампа накаливания; 11 - барботажное устройство; 12 - патрубок для подачи газовой смеси; 13 - вал; 14, 15 - подшипники; 16, 19 - корпуса подшипников; 17, 20 - крышки подшипников; 18, 21 - сальники; 22 - роторный нагнетатель; 23 - крыльчатка; 24, 25, 26, 27, 28 - штуцера.

**В пятой главе** исследована возможность внесения в рецептуру мучных кондитерских изделий порошка из микроводоросли *Dunaliella Salina* (патент РФ №2660268). Был интересен как сам факт получения кексов с применением нетрадиционного сырья с повышенной пищевой ценностью, так и возможность достижения в нем высоких качественных показателей. В целях экономии сырьевых ресурсов муку пшеничную хлебопекарную высшего сорта заменили на муку пшеничную первого сорта.

Исследования показали, что порошок *Dunaliella Salina* содержит большое количество белковых веществ и незаменимых аминокислот, а также витаминов (А, Е, С, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, РР, β-каротин), макро- и микроэлементов (натрия, калия, кальция, магния, железа, фосфора), что позволяет существенно повысить пищевую ценность мучных кондитерских изделий на его основе.

Для оптимизации соотношений мучных компонентов использовалось симплекс-решетчатое планирование эксперимента. В данном случае за единицу условно была принята сумма следующих компонен-

тов:  $X_1$  – дозировка какао-порошка, %;  $X_2$  – дозировка порошка Dunaliella Salina %;  $X_3$  – дозировка муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта, %. В качестве выходного параметра использовался показатель комплексной оценки качества кексов ( $Y$ , баллы). Расчет параметров оптимизации проводили по программе «STATISTICA».

Выявлено, что оптимальными дозировками мучных компонентов кексов следует считать: дозировка какао-порошка – 11,0-12,0 %;  $X_2$  – дозировка порошка Dunaliella Salina – 4,5-6,5 %;  $X_3$  – дозировка муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта 1,5-2,5 %; дозировка муки пшеничной 1 сорта – 80,0 %.

Результаты исследований показали, что кексы, выпеченные по выбранным рецептурам, имеют приятный коричневый цвет, соответствующий для данной группы мучных кондитерских изделий, ровную поверхность, с небольшими трещинами, характерными для кексов с внесением при замесе теста аммония углекислого, обладают повышенной пищевой ценностью.

Проведены исследования содержания отдельных элементов химического состава рекомендуемых к применению в производстве мучных кондитерских изделий. Анализировались такие показатели кексов как содержание белковых веществ, общих сахаров, в т.ч. моносахаров, содержание фосфора и кальция в кексах. Результаты исследований приведены в таблице 3.

Таблица 3

## Химический состав кексов, %

Наименование показателей	Характеристика показателей качества кексов при следующих соотношениях компонентов			
	Контроль «Кекс с какао»	$X_1 = 12,5$ % $X_2 = 5,0$ % $X_3 = 2,5$ %	$X_1 = 12,0$ % $X_2 = 5,5$ % $X_3 = 2,5$ %	$X_1 = 11,5$ % $X_2 = 6,5$ % $X_3 = 2,0$ %
Содержание белковых веществ, %	8,9	11,25	11,38	11,67
Влажность, %	11,8	11,9	12,0	11,9
Массовая доля, % общих сахаров моносахаров	57,70 6,10	57,60 6,73	58,60 6,93	58,20 6,85
Содержание фосфора, %	0,7	1,6	1,8	1,9
Содержание кальция, %	0,03	0,09	0,12	0,14
Содержание клетчатки, %	0,6	1,2	1,2	1,6

В готовой продукции отмечено повышенное содержание белковых веществ (11,25-11,67 %) по сравнению с контролем (8,9 %), клетчатки, витаминов.

Кексы с использованием порошка *Dunaliella Salina* содержат большее количество аминокислот, в том числе незаменимые – лизин, треонин, валин, лейцин, изолейцин, фенилаланин, а также заменимые – серин, аргинин, глицин и гистидин. Коэффициент различия аминокислотного сора равен 15,83 %. Биологическая ценность кексов составила 84,17 % (таблица 4).

Таблица 4  
Расчет биологической ценности кекса «Крымчаночка»

Аминокислота	Содержание аминокислоты в идеальном белке, г на 100 г белка	Содержание аминокислоты в исследуемом образце, г на 100 г белка	Скор, %	ΔРАК, %	БЦ, %
Изолейцин	4,0	2,609	65,23	10,31	84,17
Лейцин	7,0	6,486	92,66	37,74	
Лизин	5,5	3,352	60,95	6,03	
Метионин + цистин	3,5	1,640 +1,317	84,49	29,57	
Фенилаланин + тирозин	6,0	3,691 +1,252	54,92	-	
Треонин	4,0	3,740	93,50	38,58	
Триптофан	1,0	0,622	62,20	7,28	
Валин	5,0	4,184	83,68	28,76	
Итого	-	-	-	158,27	

Данные, приведенные в таблице 4, подтверждают повышение биологической ценности кексов с внесением в рецептуру изделий порошка микроводоросли *Dunaliella Salina*.

Таким образом, оптимизирована рецептура кексов повышенной пищевой ценности с внесением в рецептуру порошка микроводоросли *Dunaliella Salina* (патент РФ №2660268). На основании проведенных комплексных исследований предприятиям кондитерской промышленности рекомендованы новые рецептуры кексов (таблица 5).

Предлагаемые рецептуры кексов

Наименование сырья	Количество, кг на 1 т готовой продукции
Мука пшеничная хлебопекарная первого сорта	253,5
Мука пшеничная хлебопекарная высшего сорта	8,0–9,0
Сахар белый	263,2
Маргарин	263,2
Меланж	194,5
Порошок <i>Dunaliella Salina</i>	16,0–18,0
Виноград сушеный	263,2
Соль пищевая	1,0
Аммоний углекислый	1,0
Эссенция	1,0
Какао-порошок	37,0–38,0
Пудра сахарная (на обсыпку)	12,5

В установленном порядке разработан и утвержден пакет нормативно-технической документации на кекс «Крымчаночка» (РЦ, ТИ 9113-488-02068108-2018).

Ожидаемый годовой экономический эффект от реализации предлагаемой технологии при суточной выработке 50 кг в течение 250 рабочих дней в году составил 100,63 тыс.р.

### Основные выводы и результаты

1. Научно обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность использования *Dunaliella Salina* в качестве биологически активной добавки.

2. Изучены кинетические закономерности процесса культивирования микроводоросли *Dunaliella Salina* в фотобиореакторе, установлены рациональные интервалы изменения технологических параметров: концентрация  $\text{CO}_2$  в ГВС – 6,0...7,5 %; давление ГВС на входе в биореактор – 1,8...2,2 Па; освещенность – 26...36 клк; расход суспензии – 2,2...2,5 м<sup>3</sup>/ч; размер щели в распределителях потока – 2...3 мм; шаг проволочной спирали – от 10...15 мм, продолжительность – 80 ч.

3. Предложен метод моделирования процесса культивирования микроводорослей, базируемый на математическом описании концентрации АСВ суспензии по высоте рабочей зоны биореактора.

4. Предложен способ управления процессом культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов (Пат. РФ № 2622081), позволяющий создать оптимальные условия для интенсивного прироста клеток микрокультуры.

5. Разработана конструкция фотобиореактора пленочного типа (Пат. РФ №2586534) для интенсивного культивирования автотрофных микроорганизмов, позволяющая получать биомассу высокого качества.

6. Разработана энергосберегающая технология производства порошка (биомассы) фотоавтотрофных микроорганизмов (Пат. РФ №2577150).

7. Выполнен эксергетический анализ разработанной технологии производства биомассы фотоавтотрофных микрокультур, подтверждающий эффективность ее использования - эксергетический КПД повысился на 7,2 %.

8. Разработана технология получения кекса с использованием порошка микроводоросли *Dunaliella Salina* (Пат. РФ № 2660268), при которой готовые изделия характеризуются высокой пищевой и биологической ценностью и высокими органолептическими показателями качества.

9. Рассчитан ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения технологии производства кекса с порошком *Dunaliella Salina* при суточной выработке 50 кг в течение 250 рабочих дней в году, составивший 100,63 тыс. р.

10. Проведены производственные испытания технологии кекса из муки пшеничной первого сорта с добавлением какао-порошка и порошка из микроводоросли *Dunaliella Salina* в условиях АО «Хлебозавод №7» г. Воронежа, подтвердившие целесообразность промышленного внедрения мучных кондитерских изделий функционального назначения. Разработан и утвержден пакет нормативно-технической документации на кекс «Крымчаночка» (РЦ, ТИ 9113-488-02068108-2018).

**Основные положения диссертации опубликованы  
в следующих работах:**

**Монография**

1. Шевцов А.А. Научно-практические основы энерго- и ресурсосберегающих процессов для получения кормовых добавок из растительного сырья [Текст]: монография / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, Л.И. Лыткина, Е.С. Шенцова, Е.А. Шабунина. – Воронеж: ВГУИТ, 2015. – 268 с.

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

2. Шевцов А.А. Моделирование управляемого процесса массообмена при культивировании микроводорослей в фотобиореакторе пленочного типа [Текст] / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, Е.А. Шабунина // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2015. – №1. – С. 89-93.

3. Шевцов А.А. Современные тенденции совершенствования конструкций пленочных аппаратов для фотоавтотрофного биосинтеза светозависимых микроорганизмов [Текст] / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, А.В. Пономарев, Е.А. Шабунина // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2016. – №3. – С. 68-76.

4. Шевцов А.А. Энергосберегающая биотехнология получения порошкообразных препаратов из биомассы фотоавтотрофных микроорганизмов [Текст] / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, Т.Н. Тертычная, Е.А. Шабунина, И.В. Мажулина // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 6. – С.98-107.

5. Тертычная Т.Н. Функциональные продукты питания с использованием микроводоросли *Dunaliella Salina* [Текст] / Т.Н. Тертычная, И.В. Мажулина, А.А. Шевцов, Е.А. Шабунина // Хлебопродукты. – 2018. – №10. – С.55-58.

### Патенты на изобретения РФ

6. Патент РФ № 2577150 РФ, С1, МПК С 12N 1/12, С 12Q 3/00, С 12M 1/36. Способ производства биомассы фотоавтотрофных микроорганизмов /А.А. Шевцов, Т.Н. Тертычная, А.В. Дранников, Е.А. Шабунина. - заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. инж. технол. - № 2014153348/10; заявл. 29.12.2014; опубл. 10.03.2016; Бюл. № 7.

7. Патент РФ № 2586534 РФ, С1, МПК С12M 1/04, С12N 1/12, С12N 1/20. Аппарат для культивирования автотрофных микроорганизмов / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, Е.А. Шабунина. - заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.– № 2014153346/10; заявл. 29.12.2014; опубл. 10.06.2016; Бюл. № 16.

8. Патент РФ № 2622081 РФ, С1, МПК С12Q 3/00, С12M 1/36, С12N 1/12. Способ управления процессом культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов [Текст] / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, А.В. Пономарев, Е.А. Шабунина, Д.В. Коптев (РФ) - заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. ун-т. инж. технол. - № 2016116825; заявл. 28.04.2016; опубл. 09.06.2017; Бюл. № 16.

9. Патент РФ № 2660268. МПК А21D 13/80 (2017.01). Способ производства кекса / Т.Н. Тертычная, И.В. Мажулина, С.А. Шевцов,

Е.А. Шабунина; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. аграрный ун-т. – № 2017122285; заявл. 23.06.2017; опубл. 05.07.2018. Бюл. № 19.

### **Основные статьи и материалы конференций**

10. Шевцов А.А. Программно-логический алгоритм управления процессом культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов в пленочном аппарате [Текст] / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, Е.А. Шабунина, Д.В. Коптев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж: ВГЛТУ, 2015. – №5. – Ч.1. – С. 182 – 185.

11. Шабунина Е.А. Получение препаратов из биомассы фотоавтотрофных микроорганизмов [Текст] / Е.А. Шабунина // Матер. Междун. науч.-практ. конф.: Достижения и проблемы современных тенденций переработки сельскохозяйственного сырья: технологии, оборудование, экономика. – Краснодар: КГТУ, 2016. – С. 195-198.

12. Шевцов А.А. Управление автотрофным биосинтезом светозависимых микроорганизмов [Текст] / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, Е.А. Шабунина // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: сбор. науч. трудов Междун. науч.-технич. конф., Т.2. – М.: МГУДТ, 2016. – С. 147-251.

13. Шевцов А.А. Применение трехслойной модели Прандтля-Тейлора для определения геометрических параметров пленочного био-реактора [Текст] / А.А. Шевцов, Е.С. Шенцова, А.В. Дранников, Е.А. Шабунина // Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств. – Воронеж: ВГУИТ, 2016. – С. 112 – 115.

14. Лыткина Л.И. Ресурсосберегающая технология кормовых порошкообразных препаратов из биомассы фотоавтотрофных микроорганизмов [Текст] / Л.И. Лыткина, Н.Ю. Ситников, Е.А. Шабунина // Актуальные проблемы пищевой промышленности и общественного питания. – Екатеринбург: УГЭУ, 2017. – С. 140-144.

15. Тертычная Т.Н. Разработка рецептуры кекса высокой пищевой ценности [Текст] / Т.Н. Тертычная, А.А. Шевцов, И.В. Мажулина, Е.А. Шабунина // Актуальная биотехнология. – 2018. - №3. - С. 515.

Подписано в печать 19.11.2018. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 76.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО ВГУИТ)

Отдел оперативной полиграфии

Адрес университета и отдела оперативной полиграфии  
394036, Воронеж, пр. Революции, 19