


На правах рукописи



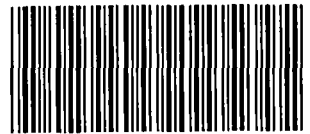
**ПОНОМАРЕВ Александр Владимирович**

**РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА  
МАССОБМЕНА ПРИ КУЛЬТИВИРОВАНИИ  
МИКРОВОДОРОСЛИ В ПЛЕНОЧНОМ ФОТОБИОРЕАКТОРЕ**

Специальности: 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств»,  
03.01.06 – «Биотехнология (в том числе бионанотехнологии)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук



**4851911**

**Воронеж – 2011**

Работа выполнена на кафедре технологии хранения и переработки зерна ГОУ ВПО «Воронежская государственная технологическая академия»

Научный руководитель: Заслуженный изобретатель РФ,  
доктор технических наук, профессор  
**Шевцов Александр Анатольевич**  
(ГОУ ВПО «Воронежская государственная технологическая академия»)

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
**Полянский Константин Константинович**  
(ФГОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет им. К.Д. Глинки»)

кандидат биологических наук, доцент  
**Божко Ольга Юрьевна**  
(ГОУ ВПО «Воронежская государственная технологическая академия»)

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт комбикормовой промышленности»

Защита диссертации состоится « 09 » июня 2011 года в 14<sup>30</sup> часов в конференц-зале на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.035.01 при ГОУВПО «Воронежская государственная технологическая академия» по адресу: 394000 г. Воронеж, пр-т Революции, 19, конференц-зал.

Отзывы (в двух экземплярах) на автореферат, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять в адрес совета академии.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВГТА.

Автореферат размещен на сайте ГОУВПО «ВГТА» [www.vgta.vrn.ru](http://www.vgta.vrn.ru) « 5 » мая 2011 года.

Автореферат разослан « 6 » мая 2011 года

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций  
доктор технических наук, профессор



Калашников Г.В.

**Актуальность работы.** Повышение конкурентоспособности российской сельскохозяйственной продукции через техническую и технологическую модернизацию производства является важнейшей задачей национального проекта «Развитие Агропромышленного комплекса на 2008-2012 годы». В связи со значительным повышением требований к рентабельности животноводческой отрасли все большую актуальность приобретает повышение степени конверсии кормов, направленное на улучшение функционирования пищеварительной и иммунной систем. Получение экологически чистой комбикормовой продукции ведет к необходимости отказа от стимулирующих, гормональных, антибиотических и других фармакологических препаратов, обладающих кумулятивным действием и способных передаваться человеку через потребляемые продукты животноводства. Этим требованиям отвечает природная биологически активная добавка – суспензия микроскопической водоросли хлореллы. Ее действие основано на естественном сочетании природных стимулирующих и биологически активных веществ, выделяемых клетками в культуральную среду (суспензию). Ранее стимулирующий эффект хлореллы не использовался вследствие ее скармливания в виде пасты или порошка. Получаемая белково-углеводная масса является трудноусвояемой вследствие значительной толщины клеточных стенок (до 1 мкм при диаметре клетки 1,5...10 мкм), для разрушения которых требуется термическая обработка, повышающая энергозатраты и снижающая биологическую ценность продукта.

Перспективным является использование хлореллы в виде суспензии, содержащей природный антибиотик хлореллин, арахидоновую кислоту, хлон «А», а также аминокислоты, витамины, ферменты и другие вещества, выделение которых клетками наиболее интенсивно в начальном периоде роста. Наиболее эффективным представляется ввод суспензии хлореллы в состав комбикормов.

Данному научному направлению посвящены труды М.Я. Сальниковой, П.А. Гладышева, Р.Г. Геворгиза, П. Станчева, С.С. Мельникова, Н.И. Богданова, В.А. Жаворонкова, А.С. Константинова, В.В. Мелихова, А.М. Музафарова и Т.Т. Таубаева, И.А. Петрова, А.А. Штоля, R. Andersen, M. Borowitzka, Y. Lee, R. Materassi, M. Miranda, O. Pulz, C. Ward и др.

Научная работа проводилась в рамках Федеральных целевых научно-технических программ Министерства образования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», в соответствии с планом госбюджетной научно-исследовательской работы кафедры технологии хранения и переработки зерна Воронежской государственной технологической академии (№ гос. регистрации 01.200.1 16992) «Интенсификация технологических процессов зерноперерабатывающих предприятий»; ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по

направлению «Экологически безопасные ресурсосберегающие производства и переработки сельскохозяйственного сырья и продуктов питания» на тему «Разработка технологии и оборудования для производства комбикормов с вводом биологически активных добавок для различных групп сельскохозяйственных животных и птицы на основе исследования кинетических закономерностей, гидродинамики и теплообмена с учетом принципов экологичности, энерго- и ресурсосбережения».

**Цель диссертационной работы:** получение новой кормовой добавки на основе микроводоросли хлорелла, позволяющей расширить ассортимент комбикормовой продукции; создание ресурсосберегающей технологии комбикормов с использованием фотоавтотрофного биосинтеза; разработка конструкции фотобиореактора и способа управления процессом культивирования микроводоросли хлорелла.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- изучение микроводоросли хлорелла как объекта культивирования;
- экспериментальные исследования кинетических закономерностей процесса культивирования микроводоросли хлорелла в квазинепрерывном режиме и определение рациональной области изменения технологических параметров и изучение свойств полученной суспензии;
- математическое моделирование массопереноса диоксида углерода в пленочном фотобиореакторе при противоточном режиме истечения пленки суспензии и газовой фазы;
- разработка конструкции фотобиореактора для культивирования микроводоросли хлорелла;
- разработка способа производства крупки из гранул полнорационного комбикорма с вводом суспензии хлореллы для сельскохозяйственной птицы и технологической линии для его осуществления;
- разработка способа управления технологией получения комбикормов с использованием продукта фотоавтотрофного биосинтеза;
- определение показателей качества комбикормов с вводом суспензии хлореллы, оценка их стабильности при хранении и определение эффективности скармливания сельскохозяйственной птице;
- оценка энергетической эффективности предлагаемой технологии;
- промышленная апробация результатов и технико-экономическая оценка предлагаемых технических и технологических решений.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- обоснование и разработка способа фотоавтотрофного культивирования микроводоросли *Chlorella vulgaris* в пленочном фотобиореакторе.
- закономерности процесса биосинтеза *Chlorella vulgaris* в пленочном фотобиореакторе в квазинепрерывном режиме.
- математическая модель изменения концентрации диоксида углерода по высоте рабочей зоны пленочного фотобиореактора.

– обоснование возможности ввода полученной в фотобиореакторе суспензии микроводоросли в комбикорма на существующих технологических линиях.

**Научная новизна.** Научно обоснован способ производства полнорационного гранулированного комбикорма и крупки из гранул с вводом суспензии хлореллы на основе фотоавтотрофного биосинтеза.

Изучены основные кинетические закономерности при культивировании хлореллы и массообмен в пленочном фотобиореакторе.

Разработана математическая модель изменения концентрации диоксида углерода по высоте рабочей зоны пленочного фотобиореактора в противоточном режиме истечения пленки суспензии и газовой фазы, позволяющая определять изменение концентрации клеток диоксида углерода в суспензии по высоте рабочей зоны фотобиореактора в исследуемом диапазоне технологических параметров.

Составлены программно-логические алгоритмы управления технологическими параметрами процессов культивирования и ввода суспензии хлореллы в комбикорм, обеспечивающие экономию материальных и энергетических ресурсов.

**Практическая ценность.** Разработан способ производства крупки из гранул полнорационного комбикорма с вводом суспензии хлореллы для сельскохозяйственной птицы (Пат. РФ № 2328138) и технологическая линия для его осуществления (Пат. РФ № 2411885). Определены рациональные интервалы изменения технологических режимов процесса культивирования хлореллы и конструктивных параметров фотобиореактора: концентрация  $\text{CO}_2$  в газовой смеси – 6,5...7,5 %; давление газовой смеси на входе в фотобиореактор –  $1,8...2,1 \cdot 10^5$  Па; освещенность – 25..29 клк; расход суспензии хлореллы – 2,2...2,5 м<sup>3</sup>/ч; шаг винтовой спирали – 10..15 мм.

Разработана конструкция фотобиореактора пленочного типа (Пат. РФ № 2363728), предложен способ культивирования микроводоросли хлорелла (Заявка № 2010147435 (068512) приоритет 23.11.2010) и алгоритм управления технологическими параметрами процесса ввода суспензии хлореллы в комбикорм (Пат. РФ № 2363235).

Получен новый продукт фотоавтотрофного биосинтеза микроводоросли с повышенной биологической ценностью, позволяющий расширить ассортимент комбикормовой продукции (Пат. РФ № 2320198). Разработан технологический регламент производства комбикормов с вводом суспензии хлореллы.

Определены структурно-механические и технологические показатели качества готовой продукции, свидетельствующие о преимуществе предлагаемой технологии, изучена динамика показателей качества комби-

кормов с вводом суспензии хлореллы при хранении. Качество продукта не ухудшалось в течение одного месяца при хранении в складских условиях.

Зоотехнические исследования в условия ООО «Липецкптица» показали увеличение привесов сельскохозяйственной птицы на 2...3 %.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Работа соответствует п. 1, 2 и 4 паспорта специальности 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств» и п. 3, 4 и 5 специальности 03.01.06 – «Биотехнология (в том числе бионанотехнологии)».

**Апробация работы.** Основные результаты исследований доложены и обсуждены на отчетных научных конференциях в Воронежской государственной технологической академии (2008 - 2010); XXI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Саратов, 2008); Всероссийской научно-технической конференции «Приоритетные направления науки и технологий» (Тула, 2008); VI научно-технической конференции с международным участием «Высокоэффективные пищевые технологии, методы и средства их реализации» (Москва, 2008), III Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии и оборудование для пищевой промышленности (приоритеты развития)» (Воронеж, 2009).

Результаты работы демонстрировались на Воронежском промышленном форуме (2008, 2009), 25-ой межрегиональной выставке «Продторг» (2008), молодежном научно-инновационном конкурсе среди студентов, аспирантов и молодых ученых «У.М.Н.И.К.» (2009) и отмечены дипломами.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК, получено 5 патентов РФ на изобретения, в соавторстве опубликована монография.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 153 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка и 25 таблиц. Список литературы включает 172 наименования, в том числе 15 зарубежных. Приложения к диссертации представлены на 44 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

**В первой главе** систематизированы литературные данные о современном состоянии процесса культивирования микроводорослей и приоритетных направлениях развития технологии комбикормов с использованием биомассы микроводорослей; изложены основные подходы к математическому моделированию массообмена в пленочных

аппаратах. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определены методы решения поставленных задач.

**Во второй главе** представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса культивирования микроводоросли хлорелла в пленочном фотобиореакторе. Для культивирования хлореллы использовалась питательная среда Тамийя.

Исследование процесса культивирования хлореллы проводили на экспериментальном фотобиореакторе (рис. 1) с высотой рабочей зоны 0,6 м в следующих диапазонах изменения технологических режимов и конструктивных параметров: концентрация  $\text{CO}_2$  в газовой смеси – 3...10 %; расход газовой смеси – 13,6...23,3 кг/ч; освещенность – 11,3...28,3 клк; расход суспензии хлореллы – 0,8...2,4 м<sup>3</sup>/ч; шаг витков спирали – 5...25 мм; толщины проволоки спирали – 0,9...2,1 мм.

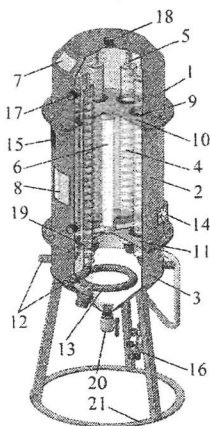


Рис. 1. Схема экспериментального фотобиореактора: 1 – секция ввода; 2 – секция освещения; 3 – секция вывода; 4 – прозрачные трубки со спиралью; 5 – распределители пленки; 6 – лампа; 7, 8 – окна; 9, 19 – уплотнители; 10, 11 – перегородки; 12 – трубки для ввода газовой смеси; 13 – барботер; 14 – вентилятор; 15 – решетка для подсоса воздуха; 16 – коллектор газораспределительный; 17 – штуцер для ввода исходной суспензии; 18 – штуцер для вывода отработанной газовой смеси; 20 – выпускной вентиль; 21 – опорные стойки; 22 – уронемер

Конструктивные особенности экспериментальной установки позволили компенсировать энергию освещения охлаждением рабочей зоны фотобиореактора, создать условия равномерного подвода газовой смеси к пленке суспензии и обеспечить интенсификацию массообмена, благодаря увеличению времени пребывания суспензии в рабочей зоне за счет установки на внутренней поверхности цилиндрических кварцевых трубок винтовых спиралей. Таким образом, в процессе культивирования обеспечивалось формирование закрученной пленки суспензии, стекающей в противотоке с газовой смесью. Абсорбция  $\text{CO}_2$  из смеси осуществлялась по высоте рабочей зоны аппарата, а в его нижней секции суспензия дополнительно насыщалась  $\text{CO}_2$  с помощью барботажа.

По кривой роста биомассы хлореллы (рис. 2а), полученной при накопительном культивировании, методом графического дифференцирования построена кривая скорости прироста биомассы (рис. 2б), кото-

рая позволила выявить интервал концентраций абсолютно сухой биомассы (АСБ), соответствующий максимальной скорости прироста клеток. Установленный интервал (1,5...4,0 г АСБ/дм<sup>3</sup>) является ограничением для культивирования микроводоросли в квазинепрерывном режиме: при достижении верхнего значения ограничения осуществляли частичный слив суспензии до достижения нижнего значения ограничения с одновременной подачей питательной среды в фотобиореактор.

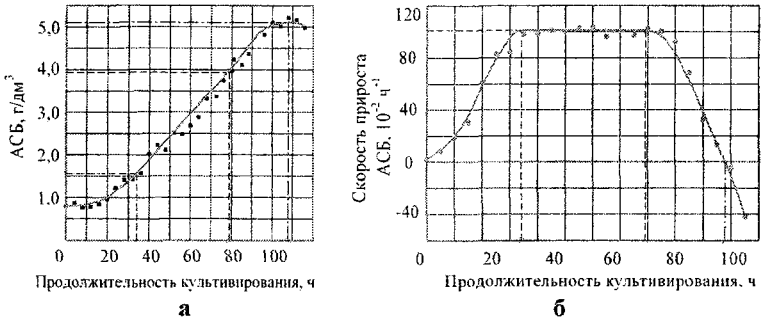


Рис. 2. Ростовая характеристика (а) и кривая скорости роста (б) хлореллы в режиме накопительного культивирования: — — — — границы интервала концентрации АСБ с максимальной скоростью роста; — • — — — — переход культуры к фазе отмирания.

Выявлены кинетические закономерности процесса квазинепрерывного культивирования (рис. 3-6) Установлена зависимость накопления абсолютно сухой биомассы (АСБ) хлореллы в режиме плотностата во времени при различных значениях концентрации  $\text{CO}_2$ , освещенности, расхода суспензии, шага спирали.

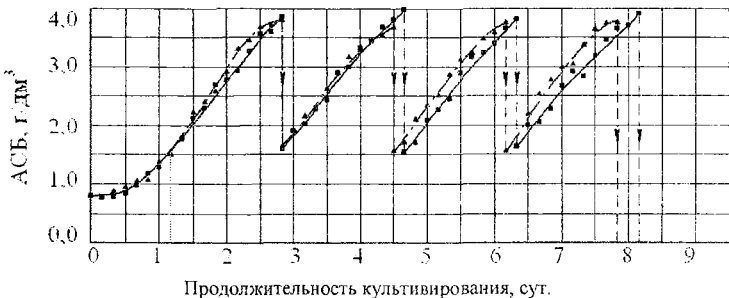


Рис. 3. Зависимость роста биомассы хлореллы от времени при концентрациях  $\text{CO}_2$  в газовой смеси: —■— 7%; —▲— 8%

Установлены рациональные интервалы параметров культивирования микроводоросли хлорелла в квазинепрерывном режиме: концентрация  $\text{CO}_2$

в газозвдушной смеси – 6,5...7,5 %; давление газозвдушной смеси на входе в фотобиореактор –  $1,8...2,1 \cdot 10^5$  Па; освещенность – 25..29 клк; расход суспензии хлореллы – 2,2...2,5 м<sup>3</sup>/ч; шаг винтовой спирали – 10..15 мм.



Рис. 4. Зависимость роста биомассы хлореллы от времени при освещенности, клк: —○— 11,3; —▼— 15,6; —□— 28,3



Рис. 5. Зависимость роста биомассы хлореллы от времени при расходе суспензии, м<sup>3</sup>/ч: —○— 1,8 (Re=4550); —▲— 2,4 (Re=6070)



Рис. 6. Зависимость роста биомассы хлореллы от времени при шаге витков спирали, мм: —◇— 10 ( $d_{wk}=1,4$  мм); —▲— 15 ( $d_{wk}=2,1$  мм)

Методами физико-химического контроля и анализа изучены физические свойства суспензии хлореллы (табл. 1).

Таблица 1

Свойства полученной в фотобиореакторе суспензии хлореллы

Наименование	Значение			
Оптическая плотность (D 440)	1,1	1,2	1,3	1,4
РН	6,7	6,7	6,7	6,7
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	995,0	997,7	1000,5	1005,3
Динамическая вязкость, 10 <sup>-3</sup> Па·с	1,007	1,010	1,014	1,020
Поверхностное натяжение, 10 <sup>-2</sup> Н/м	7,70	7,74	7,78	7,81
Содержание сухого вещества, %	0,06			

В работе использована однопараметрическая диффузионная модель изменения концентрации  $CO_2$ , растворенного в жидкой фазе по высоте рабочей зоны реактора с учетом кинетики процесса:

$$v \frac{dC_L}{dz} = D_L \frac{d^2 C_L}{dz^2} + k_L a \Delta C - \alpha^{CO_2} \mu_m \frac{C_L}{K_{CO_2} + C_L} x, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость потока, м/с;  $z$  – продольная координата, м;  $C_L$  – рабочая концентрация  $CO_2$  в жидкой фазе;  $D_L$  – коэффициент осевой диффузии;  $k_L a$  – объемный коэффициент массопередачи, м/с;  $\alpha^{CO_2}$  – расходный коэффициент по потреблению  $CO_2$ , клетками кг/кг;  $\Delta C$  – разность концентраций  $CO_2$  в газовой и жидкой фазах (движущая сила массопереноса);  $\mu_m$  – максимальная скорость роста биомассы; индексы:  $G$  – газовая фаза;  $L$  – жидкая фаза;  $x = 1,13\tau + 1,59$  – концентрация АСБ в суспензии, г/дм<sup>3</sup>, здесь  $\tau$  – продолжительность культивирования.

Для решения (2.7) были введены следующие допущения:

- концентрация  $CO_2$  меняется только вдоль оси  $z$ , в радиальном направлении она выровнена;

- движение газовой фазы описывается моделью идеального вытеснения;

- рассмотрен установившийся режим культивирования;

- в аппарате отсутствуют застойные зоны и байпасные потоки;

- концентрация растворенного  $CO_2$  превышает критическую.

Скорость потребления  $CO_2$  клетками составит  $q(1,13\tau + 1,59)$ .

Уравнение (2.7) для газовой и жидкой фаз при их противоточном движении в безразмерной форме представлено следующей системой:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\bar{C}_G}{dZ} - a_G(\bar{C}_G - \bar{C}_L) &= 0 \\ \frac{1}{Pe} \frac{d^2 \bar{C}_L}{dZ^2} + \frac{d\bar{C}_L}{dZ} + a_L(\bar{C}_G - \bar{C}_L) - b &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $Pe = \frac{v_L L}{D_L}$  – диффузионный критерий Пекле;  $a_G = \frac{k_L a H}{\varphi_G v_G \psi}$  и  $a_L = \frac{k_L a H}{v_L \varphi_L}$  – безразмерные параметры, определяющие массопередачу

$CO_2$  из газовой фазы в жидкую;  $b = q(1,13\tau + 1,59)\psi L / (v_L C_G^0)$  – безразмерный параметр, определяющий скорость потребления  $CO_2$  клетками микроводоросли (Сток  $CO_2$ );  $Z = z/H$ ;  $\bar{C}_L = C_L \psi / C_G^0$ ;  $\bar{C}_G = C_G / C_G^0$  – относительные длина и концентрации соответственно;  $H$  – высота рабочей зоны реактора, м;  $\varphi$  – содержание фазы в рабочей зоне аппарата;  $C_G^0$  – концентрация  $CO_2$  в газовой фазе на входе в рабочую зону реактора;  $\psi$  – константа фазового равновесия.

Граничные условия при работе биореактора в режиме противотока:

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } Z=0: \frac{d\bar{C}_L}{dZ} = 0; \quad 1 = \bar{C}_G \\ \text{при } Z=1: \frac{d\bar{C}_G}{dZ} = 0; \quad \bar{C}_L^0 = \bar{C}_L - \frac{1}{Pe} \cdot \frac{d\bar{C}_L}{dZ} \end{array} \right\} \quad (3)$$

Расчет диффузионной модели (1-3) на ЭВМ с использованием метода Рунге-Кутты проводили при рациональных значениях параметров культивирования, полученных в ходе исследования кинетических закономерностей процесса квазинепрерывного культивирования хлореллы.

Проверка адекватности результатов моделирования (рис. 7) реальному процессу показала, что средняя ошибка аппроксимации по концентрации  $CO_2$  в жидкой фазе составила 13 %.

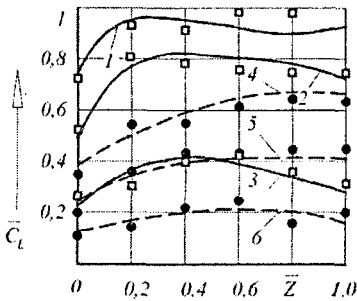


Рис. 2.23. Влияние параметров диффузионной модели на изменение концентрации  $CO_2$  в жидкой фазе по высоте рабочей зоны фотобиореактора:

- □ — влияние параметра  $a_G$ :  
1 – 65; 2 – 30; 3 – 10;
- ● — влияние параметра  $b$ :  
4 – 1,5; 5 – 2,0; 6 – 3,0.

Предлагаемая модель позволяет определить распределение абсорбированного  $CO_2$  в пленке суспензии по высоте рабочей зоны фотобиореактора и проводить масштабирование, то есть нахождение условий, при которых возможен непосредственный переход с экспериментальной установки на промышленный аппарат. Модель может быть использована в задачах проектирования и управления параметрами пленочных реакторов.

В третьей главе представлены результаты исследований по вводу суспензии хлореллы в комбикорм. Технология ввода суспензии хлореллы в комбикорм включала дозирование суспензии, ее смешивание с комбикормом и гранулирование полученной смеси по «влажному» способу с последующим измельчением гранул в крупку.

Погрешность дозирования суспензии хлореллы при ее вводе в количестве 8...14 % к массе комбикорма составила  $\pm 1,5$  %. Необходимая равномерность распределения суспензии в комбикорме рецепта ПК-5 обеспечивалась при его исходной влажности 10,0...10,5 % (рис. 8).

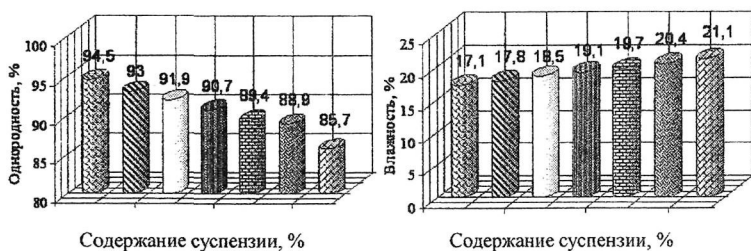


Рис. 8. Гистограммы изменения однородности и влажность комбикорма с вводом суспензии хлореллы: ▨ — 8 %, ▩ — 9 %, ▪ — 10 %, ▫ — 11 %, ▬ — 12 %, ▭ — 13 %, ▮ — 14 %;

Комбикорм с вводом суспензии гранулировали в условиях ОАО «ВЭКЗ» по «влажному» способу с использованием смесителя УЗ-ДСП-0,02, пресса-гранулятора Б6-ДГВ/1 и охладителя Б6-ДГВ/2, разделенного на зоны сушки и охлаждения. Сравнение показателей качества гранулированных комбикормов позволило установить, что рациональная доза ввода суспензии хлореллы в комбикорм составляет 11 % (табл. 2).

Гранулированный комбикорм измельчали на валковом измельчителе Б6-ДГВ/3 и фракционировали на просеивающей машине А1-ДСП.

Хранение выработанной крупки осуществляли в складе напольного хранения в бумажных мешках при температуре 18...20 °С и относительной влажности воздуха 65...70 %. В крупке рецепта ПК-5 с вводом 8...12 % суспензии в течение 1 месяца хранения отмечалось увеличение

общей кислотности (с 6,4 до 6,5...7,4 град.), рост кислотного (с 34,0 до 38,9...48,9 мг КОН/г) и перекисного (с 0,13 до 0,16 % J) числа жира.

Таблица 2

## Показатели качества гранулированных комбикормов

Ввод суспензии %	Показатели качества							
	после пресса-гранулятора			после охладителя				
	Вязкость, %	Температура, °С	Наличие крошечки, %	Вязкость, %	Крошчатость, %	Наличие крошечки, %	Средняя длина гранул, мм	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>
8	16,8	53	12,8	11,9	9,3	13,0	9,7	592
9	17,2	52	10,4	12,6	8,9	11,1	9,8	598
10	17,8	51	9,9	13,4	8,6	10,3	9,8	604
11	18,7	53	7,0	14,0	8,2	7,2	9,9	610
12	19,4	53	6,5	15,1	8,1	6,6	10,0	613
13	19,9	52	6,0	15,7	7,9	6,2	10,0	616
14	20,4	52	5,3	16,3	7,6	5,4	10,0	622

Установлена эффективность использования крупки с вводом суспензии хлореллы цыплятами-бройлерами (табл. 3) в ООО «Липецкптица». Данные приведены на момент окончания опыта.

Таблица 3

## Эффективность использования крупки рецепта ПК-5 с вводом суспензии хлореллы цыплятами-бройлерами

Рацион группы	Живая масса, г	Привес, г/сут
1. Крупка с 8 % суспензии	1830	42,6
2. Крупка с 9 % суспензии	1875	43,6
3. Крупка с 10 % суспензии	1949	45,3
4. Крупка с 11 % суспензии	1968	45,8
5. Крупка с 12 % суспензии	1976	46,0
6. Крупка с 13 % суспензии	1993	46,4
7. Крупка с 14 % суспензии	2017	46,9

За период скормливания комбикормов цыплятам-бройлерам всех групп был получен высокий среднесуточный прирост живой массы, наилучшим он был в 7 группе и составил 46,9 г/сут. Степень конверсии комбикорма на 1 кг привеса составила 1,80...1,95 кг/кг.

В четвертой главе предложен способ ввода суспензии микроводоросли хлорелла в комбикорма для сельскохозяйственной птицы (Пат. РФ № 2328138), в соответствии с которым питательную среду Тамия, содержащую инокулят хлореллы, и смесь воздуха с CO<sub>2</sub> подавали в освещаемый лампой фотобиореактор и осуществляли культивирование микроводоросли при температуре 18...25 °С (рис. 9).

Готовность суспензии определяли по оптической плотности в интервале значений 1,15...1,32. Непрерывный отбор суспензии из реактора

сопровождался подачей свежей питательной среды. Суспензию из реактора подавали в смеситель с помощью форсунок в количестве 8...11 % к массе комбикорма. Полученную смесь направляли в пресс-гранулятор.

Предлагаемый способ позволил создать комбикормовый продукт, обеспечивающий оперативное действие природных биостимуляторов на организм сельскохозяйственной птицы; создать условия для получения комбикорма с равномерно распределенной суспензией хлореллы; повысить выход биомассы и энергоэффективность культивирования микроводоросли.

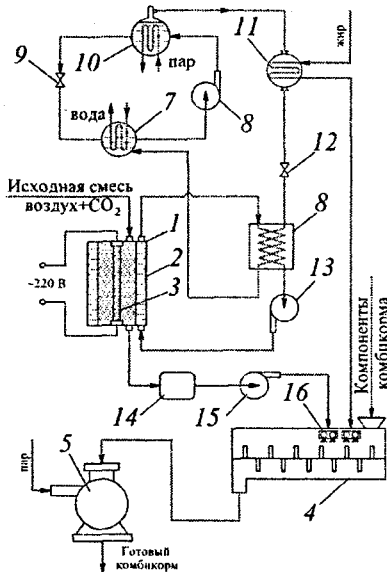


Рис. 9. Технология приготовления комбикорма с вводом суспензии микроводоросли хлореллы: 1 – фотобиореактор (2 – рубашка водяного охлаждения, 3 – источник света); 4 – смеситель; 5 – пресс-гранулятор; абсорбционная холодильная машина: 6 – испаритель; 7 – абсорбер; 8, 13, 15 – насосы; 9, 12 – терморегулирующие вентили; 10 – конденсатор; 14 – расходная емкость; 16 – форсунки.

Для реализации предлагаемого способа в производственных условиях по методу «влажного» гранулирования и биотехнологии культивирования микроводоросли с ее последующим вводом в комбикорм разработана энерго-ресурсосберегающая технология комбикормов для сельскохозяйственной птицы (Пат. РФ № 2411885).

Разработан секционированный фотобиореактор пленочного типа для культивирования микроводорослей (Пат. РФ № 2363728), особенностью которого является то, что культивирование осуществляется в цилиндрических трубках, в которых установлены винтовые спирали, обеспечивающие необходимое время пребывания суспензии в рабочей зоне, турбулизацию и равномерность распределения пленки по ее поверхности. В секциях освещения трубки выполнены прозрачными. В каждую из трубок вводится смесь воздуха с диоксидом углерода в

противоточном режиме с суспензией (рис. 10). В фотобиореакторе предусмотрена компенсация энергии излучения от лампы, установленной в центре аппарата за счет рекуперативного воздушно-водяного теплоотвода по секциям, а также дополнительное насыщение суспензии  $\text{CO}_2$  в секции вывода реактора посредством барботера. Секционирование аппарата позволяет создать необходимые условия для культивирования в зависимости от требуемого выхода и концентрации суспензии.

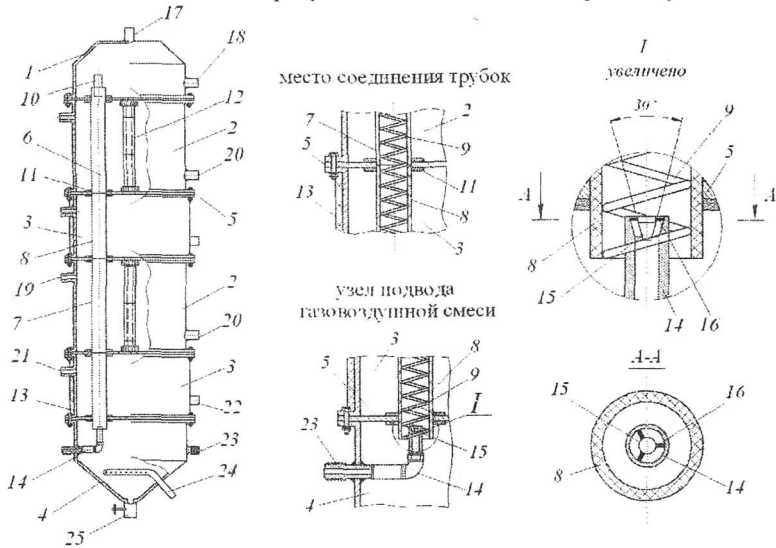


Рис. 10. Фотобиореактор: 1 – секция ввода; 2 – секция освещения; 3 – теплообменная секция; 4 – секция вывода; 5 – горизонтальные перегородки; 6 – цилиндрические трубки (7 – прозрачный, 8 – непрозрачный элемент, 9 – винтовая спираль); 10 – распределители суспензии; 11 – уплотнения; 12 – лампа; 13 – тепловая изоляция; 14 – угловые трубки; 15 – коническая пробка; 16 – опорные штыри; 19-22 – штуцера резьбовые; 23 – штуцера-«ежи»; 24 – барботер; 25 – выпускной вентиль.

Предложена методика инженерного расчета пленочного фотобиореактора, в соответствии с которой определяются предельная скорость газа в цилиндрических трубках, конструктивные параметры реактора, продуктивность культуры в зависимости от интенсивности освещенности и концентрации  $\text{CO}_2$  в газовой смеси.

В пятой главе выполнен эксергетический анализ и проведена оценка термодинамического совершенства теплотехнологической системы производства комбикормов. Оценивали традиционную технологическую систему производства крупки из гранул и технологическую систему с вводом суспензии микроводоросли в комбикорм. В

соответствии с методикой В.М. Бродянского, системы были разделены на ряд контрольных поверхностей.

Удельную эксергию готовой крупки определяли, рассматривая ее как смесь, включающую комбикорм, жиросодержащие компоненты и суспензию микроводоросли:

$$e_{2n} = h \cdot \sum \omega_i \cdot h_i^{np} - T_{np} \cdot \left( S - \sum \omega_i \cdot S_i^{np} \right) \quad (4)$$

Оценку термодинамического совершенства систем проводили по эксергетическому КПД, исходя из эксергии готовой крупки:

$$\eta_{экс} = \left( \sum E_i^3 - \sum D_j \right) / \sum E_i^3 \quad (5)$$

Эксергия потоков и эксергетические потери составили эксергетический баланс теплотехнологической системы производства крупки, представленный диаграммой Грассмана-Шаргута (рис. 11).

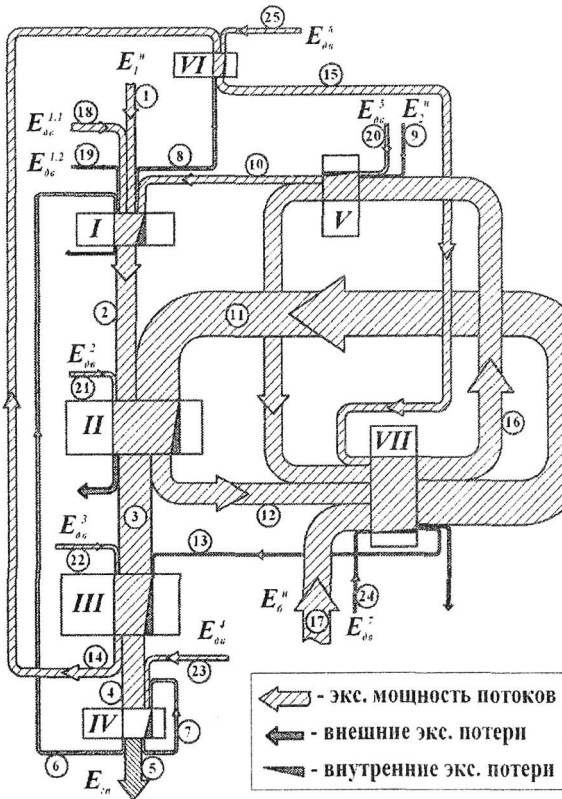


Рис. 11. Эксергетическая диаграмма предлагаемой технологической схемы. Контрольные поверхности: I - смеситель и прессгранулятор с электроприводами; II - сушильная зона охлаждающей колонки и вентилятор; III - охлаждающая зона колонки и вентилятор; IV - измельчитель и просеиватель с электроприводами; V - жиротопка и насос; VI - производство биомассы микроводоросли; VII - абсорбционная холодильная машина

Выполненные расчеты свидетельствуют о преимуществе предлагаемой технологии. Увеличение эксергетического КПД на 23,5 % свидетельствует о повышении степени термодинамического совершенства системы как совокупности тепловых процессов.

На основе результатов проведенных исследований разработаны способы управления процессами приготовления комбикормов с вводом суспензии микроводоросли (Пат. РФ № 2320198) и культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов (Пат. РФ № 2363235).

Способ управления процессом приготовления комбикормов обеспечивает точность и надежность регулирования технологическими параметрами, позволяет снизить энергетические затраты на 5...7 % и сырьевые – на 2...3 %.

В способе управления процессом культивирования предусмотрены стабилизация оптической плотности, температуры, уровня, *pH* суспензии микроводоросли в фотобиореакторе и концентрации диоксида углерода в газо-воздушной смеси воздействием на расходы газовой смеси, суспензии, охлаждающих воздуха и воды. Предлагаемый способ управления позволяет снизить энергетические затраты технологии на 10...15 % и довести длительность культивирования с 4 до 3,5 сут.; поддерживать оптимальные условия фотосинтеза; использовать предлагаемую технологию в составе имеющихся производственных линий; повысить экономическую эффективность производства фотоавтотрофной биомассы.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана и научно обоснована технология полнорационных комбикормов для сельскохозяйственной птицы с вводом суспензии хлореллы (Пат. РФ №№ 2411885, 2320198, 2328138), обладающих высокими питательными свойствами

2. Получены новые данные о физических свойствах готовой суспензии хлореллы: поверхностное натяжение  $7,70...7,81 \cdot 10^{-2}$  Н/м; *pH* 6,7; динамическая вязкость  $1,007...1,020 \cdot 10^{-3}$  Па·с; плотность 995,0...1005,3 кг/м<sup>3</sup> при ее оптической плотности 1,1...1,4.

3. Изучены кинетические закономерности и определены рациональные интервалы изменения технологических режимов процесса квазинепрерывного культивирования хлореллы в фотобиореакторе с шагом винтовой спирали в кварцевых трубках 10..15 мм: концентрация CO<sub>2</sub> в газовой смеси – 6,5...7,5 %; давление газовой смеси на входе в фотобиореактор –  $1,8...2,1 \cdot 10^5$  Па; освещенность – 25..29 клк; расход суспензии хлореллы – 2,2...2,5 м<sup>3</sup>/ч; определен рациональный интервал изменения оптической плотности суспензии – 1,5...2,0 ед. опт. пл.

4. Разработана математическая модель процесса культивирования микроводоросли, позволяющая определять распределение изменения концентрации  $\text{CO}_2$ , растворенного в пленке суспензии по высоте рабочей зоны фотобиореактора, и коэффициент массообмена в пленочном фотобиореакторе.

5. Получены рациональные режимы технологии крупки из гранул комбикорма с вводом суспензии хлореллы, установлен максимальный срок хранения полученной продукции – 30 дней, в течение которого показатели качества не претерпевают существенных изменений.

6. Разработана конструкция фотобиореактора пленочного типа (Патент РФ № 2363728), позволяющего проводить интенсивное культивирование микроводорослей в тонком слое.

7. Предложен автоматизированный способ ввода суспензии хлореллы в состав комбикормов (Патент РФ № 2363235) и составлен программно-логический алгоритм управления технологическими параметрами для его осуществления.

8. Выполнен эксергетический анализ технологических систем производства комбикормов по традиционной и предлагаемой технологии с применением абсорбционной холодильной машины Показано, эксергетический КПД увеличивается на 23,5%.

9. Проведены производственные испытания технологии комбикормов с вводом суспензии хлореллы, которые подтвердили высокую эффективность разработанных технических и технологических решений. Разработан технологический регламент производства комбикормов с вводом суспензии хлореллы в цехе гранулирования ОАО «Бутурлиновский мелькомбинат».

Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составит 114 р. на 1 т комбикорма в сут.

### Условные обозначения

$E$  – эксергетическая мощность потока, кДж/ч;  $D_i, D_e$  – внутренние и внешние эксергетические потери, кДж/ч;  $e_{гн}$  – удельная эксергия готовой крупки из гранул, кДж/кг;  $h, h_i^{гп}, S, S_i^{гп}$  – удельная энтальпия, кДж/кг и энтропия, кДж/(кг·К) готовой крупки из гранул при текущих параметрах технологического процесса и в состоянии равновесия с окружающей средой;  $\omega$  – массовые доли компонентов в крупке из гранул;  $T_{гп}$  – температура условно принятой окружающей среды (273,13 К);  $\eta_{экс}$  – эксергетический КПД, %;  $d$  – внутренний диаметр прозрачных трубок; конструктивные параметры проволочной спирали, мм:  $d_{нс}$  – толщина проволоки;  $s_{нс}$  – шаг витков спирали.

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

#### **Монография**

1. Шенцова, Е.С. Лечебно-профилактические добавки в кормопроизводстве [Текст] / Е.С. Шенцова, А.А. Шевцов, Л.И. Лыткина, А.В. Пономарев. – Воронеж: ВГТА, 2009. – 199 с (объем – 12,4 п.л.).

#### **Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ**

2. Шевцов, А.А. Определение рациональных параметров массового культивирования хлореллы [Текст] / А.А. Шевцов, Е.С. Шенцова, А.В. Драников, Е.Ю. Травина, А.В. Пономарев // Вестник РАСХН. – 2008. - № 2, С. 13-14 (объем – 0,25 п.л.).

3. Шевцов, А.А. Применение суспензии хлореллы в составе комбикормов [Текст] / А.А. Шевцов, Е.С. Шенцова, А.В. Драников, А.В. Пономарев, В.Г. Козлов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. - № 6, С. 68-69 (объем – 0,25 п.л.).

4. Шевцов, А.А. Эксергетический анализ технологии комбикормов выровненного гранулометрического состава [Текст] / А.А. Шевцов, Л.И. Лыткина, А.В. Пономарев, Р.М. Маджидов // Изв. ВУЗов. Пищевая технология. – 2009. - № 1, С. 83-88 (объем – 0,75 п.л.).

5. Шевцов, А.А. Исследование процесса массового культивирования хлореллы методами планирования эксперимента [Текст] / А.А. Шевцов, Е.С. Шенцова, А.В. Драников, А.В. Пономарев // Изв. ВУЗов. Пищевая технология. – 2009. - № 2-3, С. 62-64 (объем – 0,375 п.л.).

6. Шевцов, А.А. Управление автотрофным биосинтезом в технологии производства комбикормов [Текст] / А.А. Шевцов, Е.С. Шенцова, А.В. Драников, А.В. Пономарев // Автоматизация и современные технологии. – 2009. - № 6, С. 11-14 (объем – 0,5 п.л.).

7. Шенцова, Е.С. Реализация прикладных задач автотрофного биосинтеза в технологии комбикормов [Текст] / Е.С. Шенцова, А.В. Драников, А.В. Пономарев, Н.Ю. Ситников // Вестник ВГТА. – 2010. – № 3, С. 19 – 22 (объем – 0,5 п.л.).

8. Шевцов, А.А. Исследование кинетических закономерностей процесса культивирования микроводорослей в пленочном аппарате с рециркуляцией жидкой фазы [Текст] / А.А. Шевцов, А.В. Драников, А.В. Пономарев, Н.Ю. Ситников // Вестник ВГТА. – 2011. – № 1, С. 7-12 (объем – 0,75 п.л.).

#### **Патенты на изобретения РФ**

9. Пат. 2320198 РФ, МПК<sup>7</sup> А23К 1/16 А23К 1/00. Способ приготовления комбикорма для сельскохозяйственной птицы [Текст] / А.А. Шевцов, Е.С. Шенцова, А.В. Драников, Е.Ю. Травина, В.Г. Козлов, А.В. Пономарев (РФ), заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. - № 2006135163/13; заявл. 04.10.2006; опубл. 27.03.2008; бюл № 9.

10. Пат. 2328138 РФ, МПК<sup>7</sup> А23К 1/16. Способ приготовления комбикорма для сельскохозяйственной птицы [Текст] / А.А. Шевцов, Е.С. Шенцова, А.В. Драников, Л.И. Лыткина, Е.Ю. Травина, В.Г. Козлов, А.В. Пономарев (РФ), заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. - № 2007104263/13; заявл. 06.02.2007; опубл. 10.07.2008; бюл № 19.

11. Пат. 2363235 РФ, МПК<sup>7</sup> А23К 1/00. Способ управления процессом приготовления комбикормов [Текст] / А.А. Шевцов, Е.С. Шенцова, А.В.

Драников Л.И. Лыткина, А.В. Пономарев (РФ), – № 2008114776/13; заявл. 15.04.2008; опубл. 10.08.2009; бюл № 22.

12. Пат. 2363728 РФ, МПК<sup>7</sup> C12M 1/04 C12M 1/06 B01D 3/28. Пленочный аппарат [Текст] / А.А. Шевцов, Е.С. Шенцова, А.В. Драников, А.В. Пономарев (РФ), заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2008118450/13; заявл. 13.05.2008; опубл. 10.08.2009; бюл № 22.

13. Пат. № 2411885 РФ, МПК<sup>7</sup> А 23 Р 1/02, А 23 N 17/00. Способ производства крупки по технологии влажного гранулирования с использованием фототрофной биомассы и фуза растительных масел и линия для его осуществления [Текст] / А.А. Шевцов, А.В. Пономарев, Е.С. Шенцова, Л.И. Лыткина, А.В. Драников, Д.А. Бритиков, Д.С. Хорхордин; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. - № 2009132801/13; заявл. 31.08.2009; опубл. 20.02.2011; бюл. № 5.

#### **Материалы конференций**

14. Шенцова, Е.С. Технологическая линия производства комбикормов с вводом суспензии хлореллы [Текст] / Е.С. Шенцова, А.В. Пономарев // Материалы III Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии и оборудование для пищевой промышленности (приоритеты развития)». – Воронеж: ВГТА, 2009. – Т. 1. - С. 554 – 557 (объем – 0,25 п.л.).

15. Пономарев, А.В. Использование пленочных аппаратов в культивировании фотоавтотрофных микроорганизмов [Текст] / А.В. Пономарев // Материалы III Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии и оборудование для пищевой промышленности (приоритеты развития)». – Воронеж: ВГТА, 2009. – Т. 2. - С. 316 – 318 (объем – 0,188 п.л.).

16. Пономарев, А.В. Анализ термодинамической эффективности технологии комбикормов [Текст] / А.В. Пономарев, А.А. Шевцов, Л.И. Лыткина // Материалы III Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии и оборудование для пищевой промышленности (приоритеты развития)». – Воронеж: ВГТА, 2009. – Т. 2. - С. 319 – 321 (объем – 0,188 п.л.).

17. Шевцов, А.А. Способ приготовления комбикорма с добавкой суспензии хлореллы [Текст] / А.А. Шевцов, Е.С. Шенцова, А.В. Драников, А.В. Пономарев // Доклады Всероссийской научно-технической конференции «Приоритетные направления науки и технологий». – Тула: ТулГУ, 2008. – С. 101-102 (объем – 0,125 п.л.).

18. Шевцов, А.А. Пленочный фотобиореактор [Текст] / А.А. Шевцов, Е.С. Шенцова, А.В. Драников, А.В. Пономарев // Сборник докладов VI научно-технической конференции с международным участием «Высокоэффективные пищевые технологии, методы и средства их реализации: эффективное использование ресурсов отрасли». – М.: МГУПП, 2008. – С. 186-187 (объем – 0,125 п.л.).

Подписано в печать 05.05.2011. Формат 60 x 84 1/16

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 109

ГОУВПО «Воронежская государственная технологическая академия»  
(ГОУВПО «ВГТА»)

Отдел полиграфии ГОУВПО «ВГТА»

Адрес академии и отдела полиграфии:

394036, Воронеж, пр. Революция, 19