

На правах рукописи



МУРАВЬЕВ Александр Сергеевич

**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
ФИЛЬТРАТА СПИРТОВОЙ БАРДЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
БЕЛКОВОГО КОРМОВОГО КОНЦЕНТРАТА**

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 – 2016

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 технических наук, доцент

Дранников Алексей Викторович

(ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»)

Официальные оппоненты:

Короткова Татьяна Германовна

доктор технических наук, профессор,

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», профессор

Пономарев Александр Владимирович

кандидат технических наук,

ООО «Инжиниринговый центр ВСМ»,

главный технолог проектного отдела

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Майкопский

государственный технологический университет», г. Майкоп

Защита состоится «09» июня 2016 г. в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 212.035.01 при ФГБОУ ВО «ВГУИТ» по адресу: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах), заверенные гербовой печатью учреждения, просим присылать ученому секретарю совета Д 212.035.01.

С диссертацией 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> «21» марта 2016 г.

Автореферат размещен в сети «Интернет» на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ по адресу: <https://vak3.ed.gov.ru> и на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «8» апреля 2016 г.

Автореферат разослан «22» апреля 2016 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук
Д 212.035.01, к. т. н., доцент



Л. Н. Фролова

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Согласно Федеральному закону № 171–ФЗ от 22.11.1995 (ред. от 29.12.2015) «О государственном регулировании производства и оборота этилового спирта, алкогольной и спиртосодержащей продукции и об ограничении потребления (распития) алкогольной продукции» (ст. 8, п. 5), производство этилового спирта возможно только при условии полной переработки и/или утилизации барды. Возможным решением этой проблемы может служить получение белкового кормового концентрата из фильтрата барды как импортозамещающего продукта, который в составе комбикормов оказывает положительное влияние на процесс воспроизводства животных и птицы, способствует предупреждению их заболеваний, связанных с недостатком витаминов и микроэлементов.

Наиболее распространенной технологией по переработке спиртовой барды является её концентрирование в выпарных аппаратах. При этом процесс выпаривания требует значительных энергетических затрат, а утилизация фильтрата спиртовой барды является отдельной задачей, которая не нашла своего решения в отечественном производстве спирта. В настоящее время сделаны первые попытки по использованию баромембранных технологий для переработки фильтрата спиртовой барды. Однако, недостаточное научное обеспечение сдерживает реализацию концентрирования фильтрата с помощью мембранных установок, что не может не отразиться на экономии энергетических затрат.

Основными зарубежными поставщиками белкового концентрата из фильтрата барды на Российский рынок являются компании Ace Ethanol, Marquis Grain Inc, Zeeland Farm Services и другие. Поэтому создание отечественной конкурентной, экологически безопасной и энергоэффективной технологии получения белкового кормового концентрата из фильтрата спиртовой барды является актуальной задачей.

Определяющую роль в технологии переработки барды играет мембранное разделение фильтрата перед сгущением в выпарных установках при подготовке к распылительной сушке. Теоретические основы данных процессов и их аппаратурное оформление отражены в работах И. А. Тищенко, Н. А. Ушатинского, И. Т. Кретова, С. Т. Антипова, Н. И. Гельперина, Н. Н. Липатова, Т. Г. Коротковой, Б. А. Лобасенко, Е. Н. Калошиной, а также Т. Брока, У. Маршалла, С. Хоффмана, Р. Шленкера и др.

Научная работа проводилась в рамках Федеральных целевых научно-технических программ Министерства образования РФ и в соответствии с тематическим планом НИР кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств ВГУИТ (№ гос. регистрации 01201253866) «Разработка энерго-, ресурсосберегающих и экологически чистых технологий хранения и переработки сельскохозяйственного сырья в конкурентоспособные продукты с программируемыми свойствами и соответствующим аппаратурным оформлением на предприятиях АПК».

Цель работы — разработка ресурсосберегающей, экологически безопасной и энергоэффективной технологии утилизации фильтрата спиртовой барды для получения белкового кормового концентрата и разработка эффективных аппаратов для её реализации.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка научно–практических подходов к энергосбережению процессов барботажного выпаривания и распылительной сушки.
2. Исследование теплофизических свойств фильтрата барды как объекта концентрирования при получении белкового кормового концентрата.
3. Экспериментальные исследования кинетических закономерностей процессов баромембранного разделения и барботажного выпаривания фильтрата спиртовой барды горячим воздухом.
4. Получение численно–аналитического решения математической модели процесса барботажного выпаривания фильтрата спиртовой барды.
5. Адаптация математической модели распылительной сушки на основе уравнений Навье–Стокса к сушке фильтрата спиртовой барды.
6. Разработка конструкций мембранных аппаратов и барботажного выпарного аппарата для реализации процессов концентрирования фильтрата спиртовой барды.
7. Создание энергоэффективной технологии получения белкового кормового концентрата из фильтрата барды.
8. Разработка способа управления технологическими параметрами при получении белкового кормового концентрата из фильтрата барды, обеспечивающего наименьшие потери теплоты и электроэнергии.
9. Изучение основных показателей качества белкового кормового концентрата и определение рациональных условий его хранения методами математической статистики.
10. Составление рецептуры полнорационного комбикорма для сельскохозяйственных животных с использованием белкового кормового концентрата.
11. Промышленная апробация, эксергетический анализ и технико–экономическая оценка предлагаемой технологии получения белкового кормового концентрата из фильтрата спиртовой барды.

Научная новизна. Получены функциональные зависимости изменения теплофизических характеристик фильтрата спиртовой барды от температуры.

Сформулирована и решена математическая модель процесса ультрафильтрации фильтрата барды по определению изменения слоя поляризованной концентрации. Получены зависимости удельной производительности мембраны от времени протекания процесса ультрафильтрации для фильтрата барды из пшеничного и кукурузного сырья при различных значениях трансмембранного давления.

Выявлены закономерности кинетики барботажного выпаривания фильтрата спиртовой барды, определены численные значения и диапазон изменения основных кинетических характеристик.

Разработана математическая модель процесса барботажного выпаривания спиртовой барды на основе уравнений непрерывности, а также законов Фика и Фурье; предложено численно–аналитическое решение задачи нестационарного тепло– массообмена с граничными и начальными условиями, а также фазовым переходом на поверхности пузырька для определения зависимости скорости испарения, содержания сухих веществ (СВ), температуры фильтрата и радиуса пузырька от продолжительности процесса.

Методами математического моделирования определены зависимости, позволяющие прогнозировать распределение скорости, температуры и влагосодержания капель фильтрата барды в процессе распылительной сушки.

Составлен программно–логический алгоритм управления технологическими параметрами процесса получения белкового кормового концентрата из фильтрата барды, обеспечивающий повышение энергетической эффективности совместно протекающих процессов ультрафильтрации, выпаривания и распылительной сушки.

Научная новизна предложенных технических решений подтверждена 4 патентами РФ и свидетельством РОСПАТЕНТА о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Теоретическая и практическая значимость.

Показана целесообразность использования процесса баромембранного концентрирования фильтрата барды перед выпариванием из кукурузного и пшеничного сырья, позволяющего снизить удельные энергозатраты на 8. . . 12 % и 14. . . 18 % соответственно при трансмембранном давлении 500. . . 950 кПа.

Установлены рациональные режимы барботажного выпаривания, обеспечивающие минимальный расход энергии и высокое качество белкового кормового концентрата: расход воздуха 22 . . . 25 л/мин, температура горячего воздуха 663 . . . 673 К.

Разработана энергоэффективная технология получения белкового кормового концентрата из фильтрата спиртовой барды (Пат. РФ № 2514666).

Разработаны программа для ЭВМ (свидетельство РОСПАТЕНТА о гос. регистрации № 2015619721) и способ управления технологией получения белкового кормового концентрата (Пат. РФ № 2546214).

Разработаны конструкции мембранных аппаратов (Пат. РФ № 2560417, 2558894) и барботажного выпарного аппарата (положительное решение по заявке № 2015111124).

Обоснован и развит эксергетический подход к термодинамическому анализу взаимосвязанных процессов, достигнута минимизация термодинамических потерь на 5,47 % от внутрицикловой и внешней регенерации тепловых стоков.

Проведены производственные испытания в условиях ОАО «Воронежский экспериментальный комбикормовый завод (ВЭКЗ)» и ООО «Пивное ремесло», которые показали высокую эффективность предлагаемых решений.

Продана лицензия (договор № 26/15 от 26.10.2015 г.) на право использования интеллектуальной собственности ООО «Пивное ремесло» по патенту на изобретение РФ № 2558894. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения предлагаемых технических решений составит 4,7 млн. р.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты экспериментальных исследований кинетических закономерностей процессов баромембранного разделения и барботажного выпаривания фильтрата спиртовой барды горячим воздухом;
- математические модели процессов баромембранного разделения, барботажного выпаривания и распылительной сушки фильтрата барды;
- технология получения белкового кормового концентрата из фильтрата барды с максимальной рекуперацией и утилизацией вторичных энергоресурсов и способ управления технологическими параметрами для её реализации;
- конструкции аппаратов для концентрирования фильтрата барды.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует п. п. 1, 3 и 4 паспорта специальности 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств» и п. п. 2 и 5 специальности 05.18.01 – «Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства».

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на международных, всероссийских, региональных научно–практических конференциях, семинарах и выставках (Воронеж, 2013–2015), (Иваново, 2014), (Алматы, 2014), (Краснодар, 2015), отчетных научных конференциях ВГУИТ (Воронеж, 2013–2014), по итогам которых работа награждена дипломами.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 24 печатных работах, в том числе 8 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, получено 4 патента РФ на изобретения, одно свидетельство РОСПАТЕНТА о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и результатов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 170 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка и 26 таблиц. Список литературы содержит 127 наименований, в том числе 37 на иностранных языках.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе систематизированы литературные данные о современном состоянии теории, техники и технологии утилизации фильтрата спиртовой барды как системы процессов.

Даётся обзор методов решения задач тепло- и массопереноса. Детально рассмотрены вопросы проектирования баромембранных и выпарных аппаратов; перспективы применения известных технологий переработки спиртовой барды, а также возможные варианты максимально полного использования энергии теплоносителей. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы, представлена структурно-логическая схема проведения исследований для их реализации.

Во второй главе предложена научная программа исследований, направленная на разработку энергоэффективной технологии получения белкового кормового концентрата из фильтрата спиртовой барды.

Экспериментальные исследования проводились в лабораториях кафедр технологии хлебопекарного, макаронного, кондитерского и зерноперерабатывающего производств; технологии броидильных и сахаристых производств, а также в производственно-технологической лаборатории ОАО «ВЭКЗ».

В качестве основных объектов исследований были выбраны фильтрат спиртовой барды из кукурузного и пшеничного сырья (таблица 1).

Аминокислотный состав определяли методом капиллярного электрофореза на оборудовании Капель 105. Минеральные элементы (Na, Ca, Mg, Fe, K) — методом атомно-адсорбционной спектроскопии на анализаторе ААС-1.

Таблица 1 — Химический состав фильтрата барды из различного сырья (% в пересчете на абсолютно сухое вещество)

Образец	Крахмал	Белок	Волокно	Жир	Зола
Фильтрат кукурузной барды	2,3	10,4	5,9	0,3	13,3
Фильтрат пшеничной барды	0,7	22,3	15,6	0,2	11,9

Изучены кинетические закономерности процесса ультрафильтрации образцов фильтрата барды полученных из кукурузного (содержание СВ 5,5 %) и пшеничного (СВ 6,0 %) сырья при рабочем давлении 500–950 кПа с применением керамической мембраны INSIDE CéRAM «TAMI Deutschland GmbH».

Установлено, что эффективность концентрирования зависит от содержания липидов и крахмалистых соединений в барде, что отразилось на удельной производительности мембраны при сгущении фильтрата спиртовой барды из кукурузного и пшеничного сырья (рисунок 1).

Изучение процесса баромембранного разделения проводили методами математического моделирования, основанного на принципе теории сопротивления пограничного слоя и проницаемости слоя концентрата вблизи поверхности раздела мембраны.

Проницаемость мембраны определяли по формуле:

$$J = \frac{\Delta P}{\eta_0 (R_M + R_{Гс})} \quad (1)$$

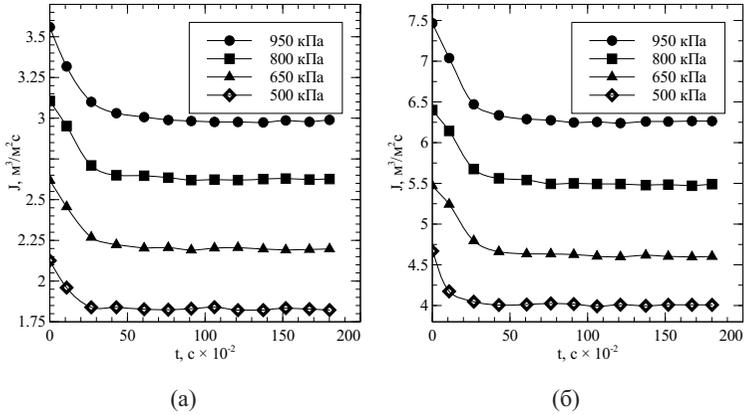


Рисунок 1 — Зависимости удельной производительности мембраны J , $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ при различном трансмембранном давлении ΔP , кПа от времени процесса t , с: (а) — фильтрат барды из пшеничного сырья; (б) — фильтрат барды из кукурузного сырья

Из условия массового баланса вещества:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -J_v \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

с граничными и начальными условиями:

$$t = 0 : C = C_{\text{Гс}}; \quad x = \delta : C = C_{\text{Гс}}; \quad x = 0 : J = C_{\text{м}} = D \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0} + (1 - R) J C_{\text{ок}} \quad (3)$$

получено решение в виде:

$$\frac{1}{J} = \frac{1}{J} + \frac{\eta C_{\text{ок}} R}{\Delta P} \frac{r_{\text{Гс}}}{C_{\text{Гс}}} \frac{V_{\phi}}{A}, \quad (4)$$

Уравнение (4) позволяет определить производительность мембраны в широком диапазоне режимных параметров (рисунок 1).

По результатам исследований предложены высокоэффективные мембранные аппараты для сгущения фильтрата барды, обеспечивающие снижение влияния концентрационной поляризации на производительность (Пат. РФ № 2560417, 2558894) (рисунок 2).

Методом нестационарного теплового режима определены теплофизические характеристик фильтрата барды:

$$\begin{aligned} \alpha &= 2,806 + 2,802e-02 \cdot T - 3,121e-05 \cdot T^2, \\ \lambda &= -80,708e-03 + 1,512e-03 \cdot T - 1,462e-06 \cdot T^2, \\ c &= -202,405 + 14,565 \cdot T - 1,682e-02 \cdot T^2. \end{aligned} \quad (5)$$

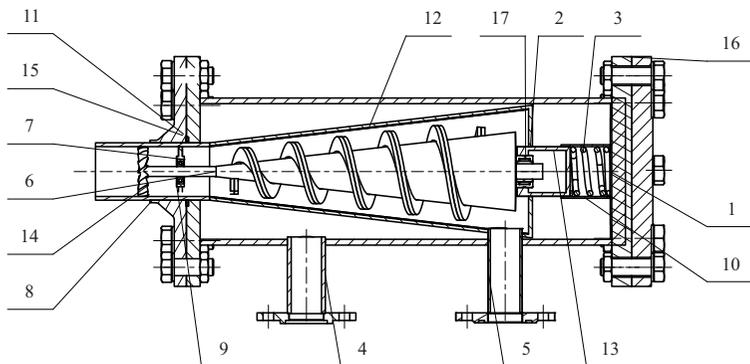


Рисунок 2 — Мембранный аппарат: 1 — корпус; 2 — трубчатый мембранный модуль; 3 — пружина сжатия; патрубки: 4 — вывода концентрата и 5 — фильтрата, 8 — ввода исходного раствора; 6 — турбулизатор; 7, 17 — подшипники; 10 — стакан; 11 — прокладка; 12 — полупроницаемая мембрана; 13 — кожух; 14 — пропеллер; 15, 16 — фланцы

В работе отдается предпочтение барботажным выпарным аппаратам, в которых достигается высокая эффективность теплообмена за счет разности температур между раствором и теплоносителем, отсутствует возможность снижения коэффициента теплопередачи за счет загрязнения поверхности теплообмена, они обладают высокой эксплуатационной надежностью.

В этой связи выполнены исследования процесса барботажного выпаривания фильтрата барды после мембранного модуля в следующей области значений: содержание СВ в фильтрате 20...25 %, время эксперимента 400 мин; температура воздуха $T = 473 \dots 673$ К; расход воздуха $v = 15 \dots 25$ л/мин.

По результатам эксперимента получен профиль распределения температуры фильтрата барды по высоте барботажной колонны (рисунок 3) для максимальной эффективности испарения $E_v = 160 \dots 180$ г/ч, которая достигается при $v = 22 \dots 25$ л/мин и $T = 663 \dots 673$ К.

Разработана математическая модель процесса барботажного выпаривания при следующих допущениях:

- задача рассматривалась в сферической системе координат;

- процесс испарения квазистатический: стационарные уравнения непрерывности определяли массовый расход испарившейся жидкости из фильтрата через поверхность пузырька, а массовое уравнение непрерывности определяло скорость изменения его диаметра;

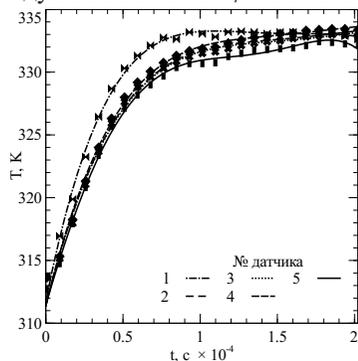


Рисунок 3 — Зависимости распределения температуры фильтрата по высоте барботажной колонны, $m \cdot 10^{-3}$: 1 — 15; 2 — 30; 3 — 45; 4 — 60; 5 — 75 от времени эксперимента t , с

- температура пузырька однородная и оставалась равной его начальному значению;
- поверхность пузырька находилась в паро–жидкостном равновесии: фильтрат спиртовой барды находился под давлением насыщения;
- использовалось число Льюиса, что позволяло объединить уравнения непрерывности для энергии и массовой доли без расчета коэффициента диффузии.

Уравнение непрерывности массы для пузырька воздуха (поток пара через поверхность элементарного объема):

$$m_{\text{п}} = 4\pi r^2 \rho_{\phi} \nu = 4\pi R^2 m_{\text{пс}}, \quad (6)$$

Уравнения непрерывности для энергии по закону Фурье и фаз, содержащихся в пузырьке, по закону Фика:

$$\rho_{\phi} \alpha_{\phi} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial b_T}{\partial r} \right) - m_{\text{пс}} R^2 \frac{\partial b_T}{\partial r} = 0, \quad (7)$$

$$\rho_{\phi} D_{\text{п}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial b_D}{\partial r} \right) - m_{\text{пс}} R^2 \frac{\partial b_D}{\partial r} = 0. \quad (8)$$

Профили температуры и массовой доли пара на поверхности пузырька определяли через элементарный объём в соответствии с расчетной схемой (рисунок 4). Для решения математической модели было предложено двойное интегрирование уравнений (7), (8), с граничными условиями по температуре:

$$\begin{cases} r = R, & T = T_s \text{ и } m_{\text{п}} \cdot q = \lambda_{\phi} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_s \\ r = r_{\infty} & T = T_{\infty} \end{cases} \quad (9)$$

и для массовой доли паро–газовой смеси в пузырьке:

$$\begin{cases} r = R & Y_{\text{п}} = Y_{\text{пс}} \text{ и } m_{\text{пс}} \cdot Y_{\text{пр}} = m_{\text{пс}} \cdot Y_{\text{пс}} + \left(-\rho_{\phi} D_{\text{п}} \frac{\partial Y_{\text{п}}}{\partial r} \Big|_s \right) \\ r = r_{\infty} & Y_{\text{п}} = Y_{\text{пс}} \end{cases} \quad (10)$$

После интегрирования при $r = R$ уравнение (7) приведено к виду:

$$m_{\text{пс}} = \frac{\rho_{\phi} \alpha_{\phi}}{R} \ln(b_T + 1) \quad (11)$$

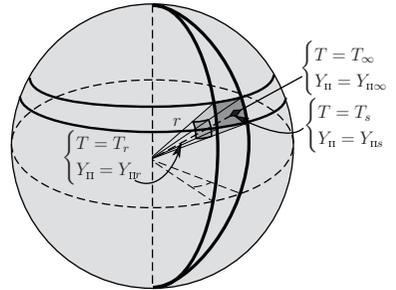


Рисунок 4 – Профили температуры и массовой доли на поверхности пузырька

После аналогичных вычислений преобразовано уравнение (8):

$$m_{п.с} = \frac{\rho_{\phi} D_{п}}{R} \ln(b_D + 1) \quad (12)$$

Решение системы уравнений (7)–(12) с двумя неизвестными основано на зависимости $b_T = b_D$.

После сопоставления уравнений (11), (12) определяли T_s и $Y_{п.с}$, используя относительное значение температуры $T_{отн}$ методом приближений:

$$T_{отн} = T_s + \frac{T_{\infty} - T_s}{3}, \quad Y_{п.отн} = Y_{п.с} + \frac{Y_{\phi\infty} - Y_{п.с}}{3} \quad (13)$$

Для нахождения T_s определяли теплоемкость и коэффициент теплопроводности паро–газовой фазы пузырька по функциональным зависимостям, учитывающим сумму долей пара, испарившегося из фильтрата барды, и воздуха в пузырьке:

$$c_{п}(T_s) = (1 - Y_{отн}(T_s)) c_{\phi} T_{отн}(T_s) + Y_{отн}(T_s) c_{в}(T_{отн}(T_s)) \quad (14)$$

$$\alpha_{п}(T_s) = (1 - Y_{отн}(T_s)) \alpha_{\phi} T_{отн}(T_s) + Y_{отн}(T_s) \alpha_{в}(T_{отн}(T_s)) \quad (15)$$

Законы изменения (14), (15) подбирали методом машинного эксперимента, обеспечивающего максимальное сближение расчетных и экспериментальных данных. Условия моделирования: содержание СВ в исходном фильтрате 4,5...5,5 %, объем фильтрата 4 л, температура фильтрата 330...335 К, температура воздуха 663...673 К, расход воздуха 22...25 л/мин. Погрешность результатов моделирования составила 12 % (рисунок 5).

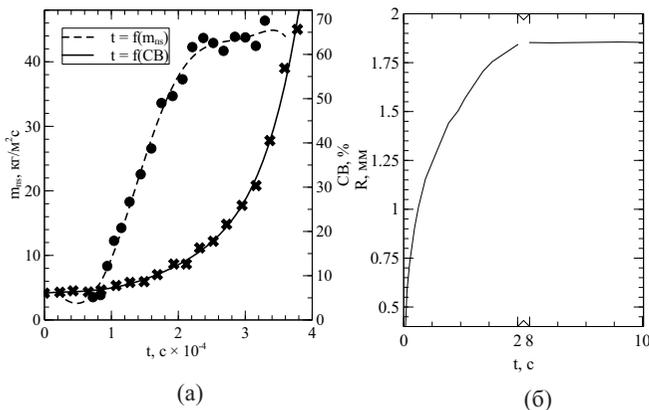


Рисунок 5 — Зависимости скорости испарения $m_{п.с}$, кг/м²·с, содержания СВ, % (а) и радиуса пузырька R , мм (б) от времени процесса t , с.

Разработан барботажный выпарной аппарат (положительное решение по заявке № 2015111124) для осуществления процесса сгущения в прямом контакте теплоносителя и жидкости (рисунок 6), обеспечивающий равномерный тепло–

массообмен по всему объему аппарата при непрерывной рециркуляции фильтрата барды, и экономию энергозатрат на 15 % (с 288 до 244 кДж/кг) при использовании вторичного пара.

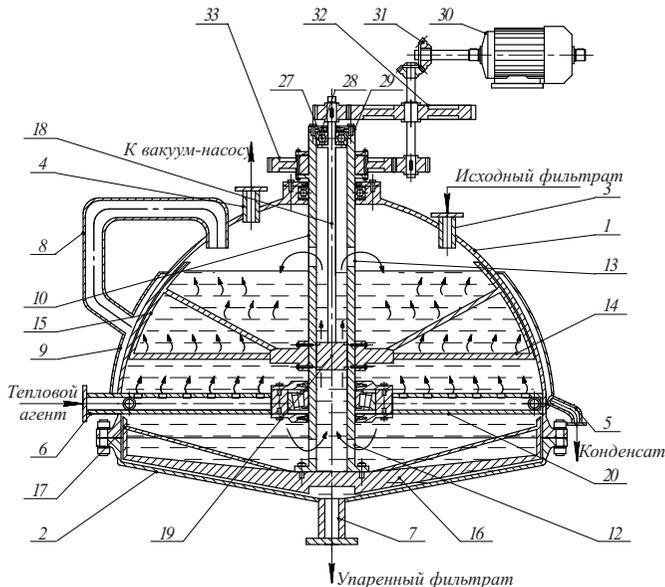


Рисунок 6 — Барботажный выпарной аппарат: 1 — верхняя часть аппарата; 2 — нижняя часть аппарата; 3 — ввода фильтрата барды; 4 — вакуумирования; 5 — отвода конденсата; 6 — подачи теплового агента; 7 — удаления фильтрата; 8 — удаления испаряемых паров; 9 — паровая рубашка; 10 — рециркуляционная труба; 12, 13 — входные и выходные окна; 18 — вал; 19 — ротор; 14, 16 — мешалки; 15, 17 — скребки; 20 — коллектор; 21, 24, 27 — подшипники; 22, 25, 28 — сальники; 23, 26, 28 — крышки подшипников; 30 — электропривод; 31, 32, 33 — зубчатые передачи

В третьей главе представлена математическая модель процесса распылительной сушки фильтрата барды при следующих допущениях: компоненты образуют идеальную смесь, которая рассчитывалась непосредственно из свойств компонентов и их пропорций; капли имеют сферическую форму, плотность и удельная теплоемкость раствора и коэффициент диффузии паров в газовой фазе усреднены и остаются постоянными.

Использовались уравнения неразрывности для энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho J) - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j J) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(L \frac{\partial T}{\partial x_j} + \sum_i^{N_k} D_i J_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \frac{\partial J}{\partial x_j} \right), \quad (16)$$

для тепловой диффузии:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho J) - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j J) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{L}{C} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial J}{\partial x_j} \right], \quad (17)$$

Модель k - ε турбулентности задавали уравнениями:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho vk) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] - \rho \varepsilon, \quad (18)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho v \varepsilon) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon), \quad (19)$$

Решение задачи (16)–(19) методом конечных объемов в пакете прикладных программ ANSYS CFX позволило прогнозировать распределение скорости, температуры и влагосодержание капель фильтрага барды относительно геометрии сушильной камеры (рисунок 7).

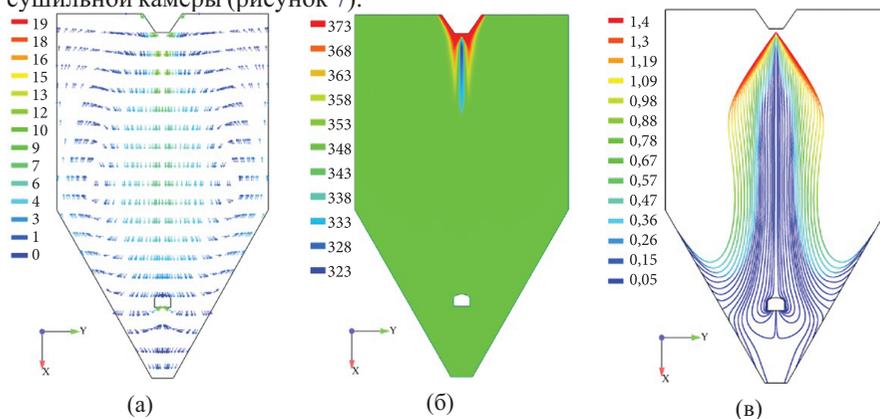


Рисунок 7 — Профили распределения скоростей (а), температуры (б) сушильного агента и влагосодержания фильтра барды (в) от геометрии распылительной сушилки. Разработаны способ получения белкового концентрата из фильтрага барды (Пат. РФ № 2514666) и способ управления, обеспечивающий повышение энергетической эффективности совместно протекающих процессов ультрафильтрации, выпаривания и распылительной сушки (Пат. РФ № 2546214) (рисунок 8).

Для оценки энергоэффективности способа производства белкового концентрата из фильтрага барды был выполнен эксергетический анализ. Оценку термодинамического совершенства теплотехнологической системы проводили по эксергетическому КПД. Расчетный эксергетический КПД, составил 5,47%, что свидетельствует о высокой степени ее термодинамического совершенства.

В четвертой главе оценивали возможность использования белкового кормового концентрата из фильтрага барды в рецептуре комбикормов по его технологическим свойствам (таблица 2) и химическому составу (таблица 3). Показано преимущество предлагаемой технологии переработки фильтрага барды с точки зрения получения готового полнорационного комбикорма для свиней (таблица 4). При исследовании гигроскопических свойств белкового концентрата из фильтрага барды были определены зависимости $W_p = f(\varphi)$ (рисунок 9), $W_p = f(\tau)$ (рисунок 10).

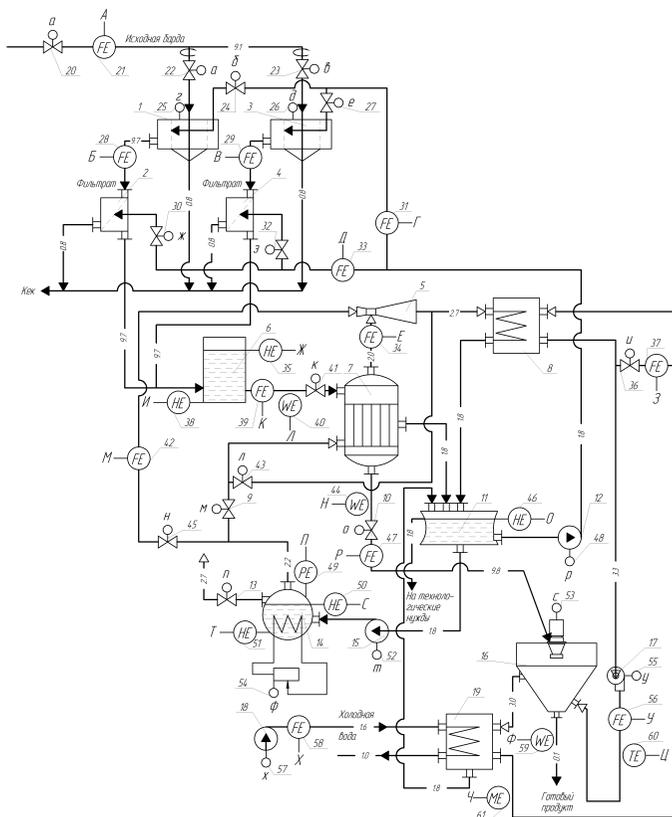


Рисунок 8 – Технология получения белкового кормового концентрата из фильтрата спиртовой барды со средствами контроля и управления: 1, 3 – сепараторы; 2, 4 – мембранные аппараты; 5 – эжектор; 6 – накопительная емкость фильтрата; 7 – вакуум-выпарной аппарат; 8 – конденсатор; 9 – вентиль редуцирующий; 10 – вентиль регулирующий; 11 – сборник конденсата; 12, 15, 18 – насосы; 13 – вентиль предохранительный; 14 – парогенератор; 16 – распылительная сушилка; 17 – вентилятор; 19 – теплообменник-рекуператор

Таблица 2 – Технологические свойства белкового кормового концентрата

Наименование показателя	Значение
Влажность, %	7,9
Объемная масса, кг/м ³	368
Угол естественного откоса, град	
Средний размер частиц, мм	2,0
Содержание металло-магнитных примесей, мг/кг в т. ч. частиц размером свыше 2 мм	–
гигроскопическая точка, %	56,0
степень гигроскопичности	Гигроскопичный

Таблица 3 — Химический состав белкового кормового концентрата из фильтрата барды (в пересчете на а. с. в.)

Параметр	Значение		
Основной химический состав, %	Аминокислотный состав (незаменимые), г/100 г белка		
Общая влага	9,05	Валин	0,968
Массовая доля белка	28,37	Изолейцин	0,72
Углеводы	31,57	Лейцин	1,87
Клетчатка	17,4	Лизин	0,405
Зола	13,61	Метионин + цистин	0,452
Минеральный состав, мг		Треонин	1,79
Натрий (Na)	457,47	Витаминный состав, мг%	
Калий (K)	2141,05	Тиамин (B1)	4,62
Кальций (Ca)	1221,01	Рибофлавин (B2)	63,135
Магний (Mg)	141,08	Витамин E	21,78
Железо (Fe)	216,31	Витамин C	85,7
Фосфор (P)	2329,67	Ниацин (PP)	6,95

Таблица 4 — Показатели качества полнорационного комбикорма для свиней

Наименование	Значение
Обменная энергия свиней, мдж/кг	12,8
кормовые единицы, в 100 кг	115
	Состав (%):
Сырой протеин	17,14
Сырой жир	4,46
Линолевая кислота	2,49
Сырая клетчатка	5,41
Лизин	1,04
Метионин	0,32
Метионин+Цистин	0,64
Треонин	0,69
Триптофан	0,22
Лизин усвояемый свиньями	0,90
Метионин усвояемый свиньями	0,27
Метионин+Цистин усвояемый	0,53
Треонин усвояемый свиньями	0,56
Ca	0,75
P	0,55
P усвояемый	0,31
Na	0,20
Cl	0,41
NaCl	0,66

Методами планирования эксперимента были получены уравнения регрессии, адекватно описывающее процесс хранения белкового кормового концентрата в складских условиях:

$$Y_1 = 3,18 + 0,15 \cdot X_1 + 0,078 \cdot X_2 + 0,21 \cdot X_3 + 0,18 \cdot X_4 - 0,024 \cdot X_1 \cdot X_2 + - 0,050 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,051 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,020 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,029 \cdot X_2 \cdot X_4 \quad (20)$$

$$Y_2 = 4,21 - 0,092 \cdot X_1 + 0,037 \cdot X_2 + 0,44 \cdot X_3 - 0,67 \cdot X_4 - 0,06 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,32 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,26 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,025 \cdot X_2 \cdot X_4 \quad (21)$$

Решена задача оптимизации по минимальным значениям удельных энергозатрат на хранение (Y_1), (кВт·ч)/т) и максимальному содержанию витамина С в белковом кормовом концентрате (Y_2 , %); определены рациональные значения параметров хранения белкового кормового концентрата: начальная влажность белкового кормового концентрата $X_1 = 6,5 \dots 9,0$ %; температура окружающего воздуха в складе $X_2 = 12 \dots 14$ °С; расход воздуха на поддержание необходимых условий в складе $X_3 = 3,5 \dots 4,5$ м³/(ч·т); относительная влажность воздуха $X_4 = 75 \dots 85$ %.

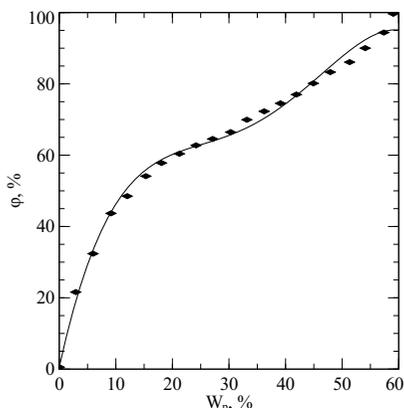


Рисунок 9 – Зависимость равновесной влажности белкового концентрата фильтрата барды W_p при температуре окружающей среды 25 °С от относительной влажности воздуха (ϕ), %

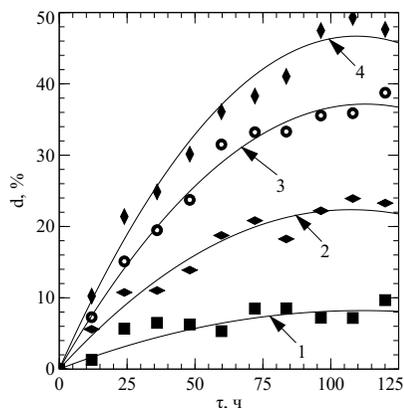


Рисунок 10 – Зависимость равновесной влажности белкового концентрата фильтрата барды от времени сорбции при различной относительной влажности воздуха, %: 1 – 45; 2 – 58; 3 – 80; 4 – 93

Для получения образцов комбикорма с использованием белкового концентрата из фильтрата барды и его дальнейшего исследования была разработана технологическая линия. Результаты производственных испытаний предлагаемой технических решений в условиях ООО «Пивное ремесло» и ОАО «ВЭКЗ» показали целесообразность их внедрения в производство. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения предлагаемых технических решений составит 4,7 млн. р.

Условные обозначения

R – гидродинамическое сопротивление; ΔP – приложенное давление, кПа; η – динамическая вязкость вещества, Па·с; x – расстояние до пограничного слоя, м; δ – толщина слоя поляризации концентрации, м; $-J\partial C/\partial x$ – перенос вещества к мембране; $D\partial^2 C/\partial x^2$ – градиент концентрации; r/C – величина снижения проницаемости;

C — концентрация, кг/м³; V — совокупный объем фильтрата, м³; A — площадь мембраны, м²; c — теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг·К); λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); T — температура, К; t — время, с; Y — массовая доля, кг/кг; b_T — безразмерная температура; L — энтальпия испарения, кДж/кг; $\alpha = \lambda/\rho c$ — коэффициент температуропроводности, м²/с; b_D — безразмерная массовая доля; q — количество теплоты для испарения бесконечно малого слоя фильтрата барды, кДж/кмоль; ρ — плотность, кг/м³; v — радиальная скорость, м/с; r — радиальная координата, м; m — массовый расход, кг/с; m_{ns} — массовый расход пара через поверхность пузырька (s , м², кг/м²с; R — радиус пузырька, м; b_T и b_D числа тепло- и массопереноса соответственно; $Le = \alpha/D$ — число Льюиса; M — молекулярная масса, г/моль; χ — мольная доля пара на поверхности пузырька; v — скорость потока, м/с; J — энтальпия при постоянном давлении, кДж; x — горизонтальная координата; D — коэффициент диффузии, м²/с; L — удельная теплота парообразования, Дж/кг; p — давление, Па; N_k — число капель; Pr — число Прандтля; j — смесь компонентов; k — кинетическая энергия турбулентности, м²/с²; ε — скорость диссипации вихревой турбулентности, м²/с³; $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε — константы; индексы: ок — объемная концентрация, гс — граничный слой; r — внутренняя часть пузырька ограниченная радиальной координатой; ∞ — окружающая среда пузырька; п — пузырьки воздуха; ф — фильтрат барды; в — воздух; н — насыщение; т — параметр зависящий от турбулентности сушильного агента

Основные выводы и результаты

1. Сформулирован научно-практический подход к созданию высокоэффективной комплексной технологии переработки фильтрата спиртовой барды для производства белкового концентрата, направленный на интенсификацию процессов ультрафильтрации, барботажного выпаривания и распылительной сушки, а также рационального использования теплоэнергетических ресурсов, что достигается моделированием и проектированием перспективных конструкций баромембранных и барботажно-выпарных аппаратов.
2. Методом нестационарного теплового режима исследованы теплофизические свойства фильтрата спиртовой барды как объекта концентрирования при получении белкового концентрата.
3. Изучены кинетические закономерности процесса баромембранного концентрирования при режимных параметрах процесса: содержание СВ в исходном фильтрате барды 5...6 %; трансмембранное давление 500...950 кПа; барботажного выпаривания при следующих рациональных режимах: расход воздуха 22...25 л/мин, температура воздуха 663...673 К. Содержание СВ в фильтрате барды после мембранного модуля 20...25 % и на выходе из барботажного выпарного аппарата — 30...35 %.
4. Получено численно-аналитическое решение задачи нестационарного тепло-массообмена в процессе барботажного выпаривания фильтрата спиртовой барды с граничными и начальными условиями, а также фазовым переходом на поверхности пузырька для определения зависимости скорости испарения,

массовой концентрации, температуры фильтра и радиуса пузырька от продолжительности процесса.

5. Адаптирована модель процесса распылительной сушки к сушке фильтра барды, выполнена идентификация её параметров и получено решение, позволяющее прогнозировать профили распределения скорости, температуры и влагосодержания капель фильтра.

6. Разработаны конструкции мембранных (Пат. РФ № 2560417, 2558894) и барботажного вакуум–выпарного аппаратов (положительное решение по заявке № 201511124) для реализации процессов концентрирования фильтра барды.

7. Разработаны научно–практические подходы к созданию энергоэффективной технологии получения кормовой добавки из фильтра барды с использованием холодильной техники (Пат. РФ № 2514666).

8. Разработан способ управления технологическими параметрами при получении белкового кормового концентрата из фильтра барды, обеспечивающий наименьшие потери теплоты и электроэнергии (Пат. РФ № 2546214).

9. Изучены основные показатели качества белкового кормового концентрата и определены рациональные условия его хранения: начальная влажность белкового кормового концентрата 6,5... 9,0 %; расход воздуха на поддержание необходимых условий в складе 3,5... 4,5 м³/(ч·т); температура окружающего воздуха в складе 12... 14 °С; относительная влажность воздуха 75... 85 %.

10. Рассчитан рецепт полнорационного комбикорма № СПК–5–17716–130 для поросят в возрасте от 66 до 108 дней с использованием белкового кормового концентрата по программе «Корм Оптима Эксперт» в условиях ОАО «ВЭКЗ».

11. Проведена промышленная апробация предлагаемых технических и технологических решений в ООО «Пивное ремесло» и ОАО «ВЭКЗ»; выполнены эксергетический анализ и технико–экономическая оценка, свидетельствующие о целесообразности внедрения технологии получения белкового концентрата из фильтра барды при переработке отходов спиртового производства. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения предлагаемых технических решений составит 4,7 млн. р.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Шевцов А. А., Дранников А. В., Муравьев А. С. Оптимизация процесса сушки фильтра послеспиртовой барды // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2013. – 4 (58). – С. 22–25.

2. Шевцов А. А., Муравьев А. С. Модельные представления процесса распылительной сушки фильтра спиртовой барды на основе уравнений Навье–Стокса // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2015. – 4 (66). – С. 11–16.

3. Шевцов А. А., Дранников А. В., Муравьев А. С. Управление энергоэффективной технологией получения порошкообразного продукта из фильтра спиртовой барды // Автоматизация. Современные технологии. – 2015. – № 9. – С. 10–13.

4. Шевцов А. А., Муравьев А. С. Задачи моделирования процесса барботажного выпаривания фильтрата послеспиртовой барды // Известия вузов. Пищевая технология. — 2015. — № 5–6 (347–348). — С. 80–82.

5. Шевцов А. А., Дранников А. В., Муравьев А. С. Энергосберегающая технология утилизации фильтрата послеспиртовой барды // Известия вузов. Пищевая технология. — 2014. — № 4. — С. 78–80.

6. Шевцов А. А., Муравьев А. С. Эксергетический анализ технологии получения порошкообразного продукта из фильтрата барды с использованием парожеткторного теплового насоса // Вестник Международной академии холода. — 2016. — № 1. — С. 55–59.

7. Шевцов А. А., Дранников А. В., Муравьев А. С. Численно-аналитическое решение математической модели процесса барботажного выпаривания фильтрата спиртовой барды // Известия вузов. Пищевая технология. — 2016. — № 1 (349). — С. 78–81.

8. Влияние конструктивных особенностей турбулизатора мембранного аппарата на гидродинамику процесса ультрафильтрации / А. А. Шевцов, А. А. Дерканосова, А. А. Коротаева, Н. В. Тонких, А. С. Муравьев // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия "Процессы и аппараты пищевых производств". — 2015. — № 3. — С. 81–90.

Патенты на изобретения и свидетельства РОСПАТЕНТА

9. Способ автоматизации технологии получения порошкообразного продукта из фильтрата спиртовой барды [Текст] : пат. 2546214 Рос. Федерация : А23К1/06 А23К1/00 (2006.1) / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, А. С. Муравьев ; Воронеж. гос. университет. инж. техн. — № 2013144104/13 ; заявл. 02.10.2013 ; опубл. 10.04.2015. — 12 с.

10. Мембранный аппарат [Текст] : пат. 2560417 Рос. Федерация : В01D 63/06 (2006.01) / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, А. И. Ключников, А. С. Муравьев ; Воронеж. гос. университет. инж. техн. — № 2014116355/05 ; заявл. 22.04.2014 ; опубл. 20.08.2015. — 7 с.

11. Способ получения порошкообразного продукта из фильтрата спиртовой барды [Текст] : пат. 2514666 Рос. Федерация : С12F3/10 А23К1/06 / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, А. Н. Яковлев, А. С. Муравьев ; Воронеж. гос. университет. инж. техн. — № 2012153941/10 ; заявл. 14.12.2012 ; опубл. 27.04.2014. — 11 с.

12. Вертикальный мембранный аппарат [Текст] : пат. 2558894 Рос. Федерация : В01D63/16 / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, А. С. Муравьев, А. А. Коротаева, Н. В. Тонких ; Воронеж. гос. университет. инж. техн. — № 2014122596/05 ; заявл. 03.06.2014 ; опубл. 10.08.2015. — 7 с.

13. Расчет процесса распылительной сушки суспензии вегетативной массы растений [Текст] : 2015619721 Рос. Федерация / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, А. А. Дерканосова, А. А. Коротаева, А. С. Муравьев ; Воронежский государственный университет инженерных технологий. — № 2015616410 ; заявл. 14.07.2015 ; опубл. 20.10.2015. — 10 с.

Статьи и материалы конференций

14. Конструктивные особенности сушилки для высоковлажных дисперсных материалов / А. А. Шевцов, А. А. Дерканосова, А. С. Муравьев, А. А. Коротаева, Н. В. Тонких // Инновационные технологии переработки сырья животного происхождения: сборник материалов международной научно-практической конференции. — Краснодар:изд. ФГБОУ ВПО «КубГТУ», 2015.

15. Перспективные технические решения при получении высокоусвояемых добавок в производстве кормовых смесей / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, А. С. Муравьев, А. А. Коротаева, Н. В. Тонких // Инновационные технологии переработки сырья животного происхождения: сборник материалов международной научно-практической конференции. — Краснодар:изд. ФГБОУ ВПО «КубГТУ», 2015.

16. Кинетические закономерности и определение продолжительности сушки высоковлажных дисперсных материалов / А. В. Дранников, А. А. Дерканосова, А. А. Коротаева, А. С. Муравьев // Международная научно-техническая конференция «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК» (ПРЭТ-2014)(23-26 сентября 2014, Иваново, Россия): сборник трудов (секционные доклады). Т. 1. — Иваново : Иван.гос. хим.-технол. ун-т, 2014.

17. *Муравьев А. С.* Энергосберегающие процессы сгущения фильтрата послеспиртовой барды // Инновационные решения при производстве продуктов питания из растительного сырья: материалы Международной научно-практической конференции / под ред. Агафонов Г. В. — Воронеж : Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2014.

18. *Шевцов А. А., Дранников А. В., Муравьев А. С.* Технология получения порошка из фильтрата спиртовой барды как система взаимосвязанных процессов // Материалы ЛП отчетной научной конференции за 2013 год: В 3 ч. Ч. 2. — Воронеж: ВГУИТ : Воронеж. гос. ун-т инж. технол, 2014.

19. *Шевцов А. А., Дранников А. В., Муравьев А. С.* Перспективы использования распылительной сушки фильтрата послеспиртовой барды // матер. III Междунар. науч.-техн. конф. — Воронеж : Воронеж. гос. ун-т инж. технол., 2013.

20. Применение мембранных технологий при очистке сточных вод / А. А. Шевцов, А. А. Дерканосова, А. А. Коротаева, Н. В. Тонких, А. С. Муравьев // Международный академический вестник. — 2015. — 3 (9). — С. 77–78.

21. Study of the basic modes of drying of high-moisture disperse materials of vegetable origin / A. Shevtcov, A. Derkanosova, N. Lobatchyova, A. Korotaeva, A. Murav'ev // 1st International Academic Conference "Science and Education in Australia, America and Eurasia: Fundamental and Applied Science". Vol. 1 / ed. by R. Coventry. — 2014.

22. *Шевцов А. А., Дранников А. В., Муравьев А. С.* Конструктивные особенности вертикального мембранного аппарата для фильтрата спиртовой барды // Материалы ЛП отчетной научной конференции за 2014 год, посвященной 85-летию ВГУИТ: В 3 ч. Ч. 2. — Воронеж: ВГУИТ : Воронеж. гос. ун-т инж. технол, 2015.

23. *Шевцов А. А., Дранников А. В., Муравьев А. С.* Комплексный анализ порошкообразного продукта из спиртовой барды // Материалы ЛП отчетной научной конференции за 2014 год, посвященной 85-летию ВГУИТ : В 3 ч. Ч. 1. — Воронеж: ВГУИТ : Воронеж. гос. ун-т инж. технол, 2015.

24. *Шевцов А. А., Дранников А. В., Муравьев А. С.* Постановка задачи математического моделирования процесса барботажного выпаривания фильтрата барды на основе балансовых уравнений // матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. — Воронеж : ВГУИТ, 2014.

Подписано в печать 07.04.2016. Формат 60 × 90 1/16.

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

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

Отдел полиграфии ФГБОУ ВО ВГУИТ

Адрес университета и отдела оперативной полиграфии

394036, Воронеж, пр. Революции, 19