

На правах рукописи



**СЕРДЮКОВА Наталья Алексеевна**

**НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ  
СЕМЯН РАПСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ТЕПЛОНАСОСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальности 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств  
05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Автореферат  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2020

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**

доктор сельскохозяйственных наук, доцент  
**Тертычная Татьяна Николаевна**

**Официальные оппоненты:** **Полянский Константин Константинович**  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
(Воронежского филиала ФГБОУ ВО «Российский  
экономический университет им. Г.В. Плеханова»),  
профессор  
**Дворецкий Дмитрий Станиславович**  
доктор технических наук, профессор  
(ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный  
технический университет»), заведующий кафедрой

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Кубанский государственный  
технологический университет», г. Краснодар

Защита состоится «17» сентября 2020 г. в 11.30 на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 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://vak.minobrnauki.gov.ru> и ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «06» июля 2020 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> «15» июня 2020 г. Автореферат разослан «10» августа 2020 г.

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

 Л. Н. Фролова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время вторичные ресурсы растительного сырья активно используются в решении продовольственных, экологических и энергетических проблем, являясь дополнительным источником веществ природного происхождения. В современном мире постоянно растет потребность в белках и продуктах на их основе. По данным ВОЗ, более 60 % человечества не получает достаточного количества белка. Недостаток белков в питании нарушает динамическое равновесие метаболических процессов и приводит к истощению организма. В связи с этим особую значимость приобретают вопросы создания безотходных технологий переработки вторичного возобновляемого растительного сырья в белоксодержащие продукты, отвечающих требованиям экологической безопасности и энергетической эффективности, которые составляют значительную часть научных исследований и актуальны в практической реализации получаемых научных результатов. Разработке научно-технологических решений в получении белковых изолятов посвящены работы отечественных и зарубежных ученых В.Б. Толстогузова, А.П. Нечаева, В.В. Колпаковой, И.Ф. Горлова, Ю.Ф. Рослякова Л.В. Антиповой, Н.В. Аникеевой, М.Л. Доморощенковой, В.Г. Щербакова, П.И. Кудинова, S. Berot, A. Davin, S. Sercl, F. Sosulsky, D. Knott и др.

Комплексная переработка масличных семян связана с возрастающим интересом к биотопливу как альтернативному источнику энергии. Один из основных видов биотоплива - «биодизель», получают на основе растительных масел, а также продуктов их этерификации. Биодизель является экологически чистым продуктом и подвергается практически полному биологическому распаду. В Европе для производства биодизеля, как правило, используется рапс, в Америке – соя. Согласно прогнозам аналитиков компании ABERCADE объем потребления биодизеля в ЕС к 2020 г. достигнет 20,4-26,0 млрд. л.

Для разработки отечественных энергоэффективных и экологически безопасных технологий получения биодизельного топлива необходим технологический рынок в биоэнергетике. Достойный вклад в данной области внесли ученые Д.Б. Бубнов, П.А. Вальехо, И.И. Габитов, С.В. Гусаков, Б.П. Загородских, С.П. Кулманаков, А.П. Марченко, С.А. Нагорнов, Г.С. Савельева, В.Г. Семенова, О.Н. Слепцов, Е.П. Шилова, А.П. Уханов, Т. Natonen, H.J. Kampmann, W. Korbitz, S.A. Niemi, M.E. Tat, K. Yamane, F.A. Zähler и др.

В технологии комплексной переработки растительного масла все более широкое применение находят тепловые насосы (ТН), которые позволяют довести эксплуатацию оборудования до высокого энергетического совершенства в отношении использования энергоносителей.

Теоретические основы тепломассообмена в теплотехнологических процессах, а также их аппаратурное оформление отражены в работах А.В. Лыкова, А.С. Гинзбурга, В.И. Жидко, И.Ф. Пикуса, И.Л. Любошица, В.С. Уколова, В.А. Резчикова, Б.И. Леончика, И.Т. Кретьова, А.Н. Острикова и др.

Идеология создания ТН базируется на масштабном опыте разработки

холодильных машин, что не всегда оправдано, поскольку температурные режимы работы, охлаждаемые и нагреваемые среды, рабочие тела и термодинамические циклы при совместной выработке тепла и холода в общем случае различаются. Это делает необходимым разработку и использование универсальных подходов анализа и поиска решений по повышению эффективности ТН и теплоснабжающих систем на их основе. Повышение эффективности теплонасосных установок за счет совершенствования их рабочих циклов и схем составляет основу современных исследований в области теплонасосных технологий.

Работа проводилась в соответствии с планом госбюджетной НИР кафедры технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств ФБГОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий».

**Цель и задачи диссертационной работы.** Цель работы: решение комплексных научно-практических задач, направленных на создание энергоэффективных и экологически безопасных технологий переработки семян рапса в белоксодержащие продукты, биодизельное топливо и топливные pellets с использованием теплонасосных технологий; разработка рекомендаций по проектированию высокоэффективных барабанных сушилок и шнековых прессов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучение основных кинетических закономерностей процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке с подъемно-лопастной системой и выявление рациональной области изменения режимных параметров, обеспечивающих снижение энергозатрат и получение готовой продукции высокого качества; постановка и решение задачи оптимизации степени заполнения сушильного барабана по величине удельных энергозатрат в сушилке с ТН;

- аналитическое решение математической модели, представленной дифференциальными уравнениями связанного тепломассопереноса А.В. Лыкова при сушке семян рапса в барабанной сушилке, методом разложения в ряды Фурье и ее использование для проведения численных исследований;

- разработка энергетически эффективных и экологически безопасных технологий комплексной переработки семян рапса в белоксодержащие продукты с применением пароконденсационного (ПКТН) и парозежкторного тепловых насосов (ПЭТН); составление полнорационных рецептов комбикормов для кроликов с использованием рапсового шрота;

- разработка аппаратурно-технологических схем получения биодизельного топлива из семян рапса с применением катализатора и pellets из рапсового шрота при подготовке энергоносителей в двухступенчатом ТН;

- выбор оптимальной нагрузки реактора переэтерификации растительного масла сверхкритическим спиртом по технико-экономическому показателю с последующей реализацией сверхкритической флюидной  $\text{CO}_2$ -экстракции в технологии получения биодизельного топлива; оценка энергоэффективности

технологической системы получения биодизельного топлива с использованием парэжекторного теплового насоса методом эксергетического анализа;

- разработка конструктивных решений по совершенствованию барабанной сушилки и шнекового пресса, направленных на снижение энергозатрат и повышение качества целевых продуктов;

- производственные испытания предлагаемых технологий и их технико-экономическая оценка.

**Научная новизна.** Выявлены кинетические закономерности процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке с подъемно-лопастной системой в широком диапазоне изменения режимных параметров; установлено наличие только периода убывающей скорости сушки, что позволило в качестве аппроксимирующей функции использовать экспоненциальное уравнение с агрегацией переменных при коэффициенте сушки; сформулирована и решена задача оптимального выбора степени заполнения сушильного барабана семенами рапса по величине удельных энергозатрат в сушилке с тепловым насосом.

Предложено численно-аналитическое решение математической модели, представленной дифференциальными уравнениями связанного теплопереноса А.В. Лыкова при сушке семян рапса в барабанной сушилке, методом разложения в ряды Фурье. Численные эксперименты позволили определить распределение полей температур и влагосодержания в единичном зерне рапса.

Показано, что применение теплонасосных технологий при переработке семян масличных культур в белоксодержащие продукты, биодизельное топливо и топливные пеллеты на основе сопряжения тепловых насосов с теплотехнологическими процессами обеспечивает минимизацию энергетических потерь за счет максимальной рекуперации и утилизации отработанных энергоносителей в замкнутых термодинамических циклах.

Установлено, что повышение термодинамической эффективности циклов ПКТН при большой разнице температур в испарителе и конденсаторе возможно за счет внешней регенерации тепла отработанных энергоносителей; при этом снижение температуры кипения рабочих тел в испарителе и повышение температуры в конденсаторе достигается при двухконтурном каскадном подключении теплонасосного оборудования.

Предложен метод поиска оптимальной нагрузки реактора перезтерификации по величине суммарных материальных и энергетических затрат, приходящихся на единицу массы получаемой биодизельной смеси при различном соотношении расходов растительного масла и этилового спирта.

Методом эксергетического анализа обоснована целесообразность применения флюидной сверхкритической  $\text{CO}_2$ -экстракции биодизельной смеси в технологии получения очищенного биодизельного топлива с использованием ПЭТН.

Достоверность эффективности научных разработок подтверждена производственными испытаниями способа получения белоксодержащих фракций из семян рапса на ОАО «ВНИИКП» и способа получения биодизельного топлива из семян масличных культур в ООО «Золотая Нива».

**Практическая ценность и реализация результатов.** Экспериментально-статистическими методами определены рациональные режимы процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке с подъемно-лопастной системой АСУ-2.3: температура и скорость сушильного агента 363-383 К; 3,3-3,7 м/с; степень заполнения барабана 0,30-0,35; частота вращения барабана  $(0,15-0,20) 10^{-2}$ ; время сушки 25-30 мин; начальная и конечная влажность семян 18-22 %, 8-12 %.

Найдены оптимальные значения степени заполнения барабана по величине суммарных теплоэнергетических затрат, приходящихся на единицу массы испаряемой влаги в барабанной сушилке с ТН при различных значениях начальной влажности семян рапса. По результатам исследований предложены: многосекционная барабанная сушилка (пат. РФ 2649379), в каждой секции которой оптимальное значение степени заполнения достигается путем изменения частоты вращения, и маслопресс (пат. РФ2690332), позволяющий оптимизировать работу за счет оперативного изменения расстояния между зернами пластинами.

Разработаны энергоэффективные технологии переработки рапсового масла в белоксодержащие продукты (пат. РФ 2688467, 2689672), в биодизельное топливо (пат. РФ 2693046) и топливные пеллеты (пат. РФ 27221704) с использованием тепловых насосов. Разработан способ управления линией комплексной переработки семян масличных культур в биодизельное топливо с применением двухступенчатого парокомпрессионного теплового насоса (пат. РФ 2688467).

Предложен способ автоматической оптимизации процесса переэтерификации рапсового масла сверхкритическим этиловым спиртом по величине удельных материальных и энергетических затрат (пат. РФ 2724889).

Разработана технология флюидной сверхкритической  $\text{CO}_2$ -экстракции биодизельной смеси в технологи получения очищенного биодизельного топлива (пат. РФ 2714306).

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

- результаты экспериментального исследования кинетических закономерностей процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке с подъемно-лопастной системой;
- результаты численного эксперимента по математической модели связанного теплообмена при сушке семян рапса в барабанной сушилке;
- схемы теплонасосных технологий комплексной переработки семян рапса в белоксодержащие продукты, биодизельное топливо и топливные пеллеты;
- метод оптимизации процесса переэтерификации рапсового масла сверхкритическим этиловым спиртом при получении биодизельной смеси.

**Степень достоверности результатов.** Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации, соответствуют теоретическим концепциям, общепринятым в выбранной области исследований. При выпол-

нении работы применялись современные методы экспериментальных исследований. Проверка достоверности полученных результатов проводилась посредством апробированных математических методов моделирования.

**Апробация работы.** Материалы и отдельные результаты исследований по теме диссертации докладывались на международных, всероссийских научных, научно-технических и научно-практических конференциях: (Уфа, 2017); (Оренбург, 2017 г); (Барнаул, 2018); (Москва, 2018); (Алматы, 2018); (Воронеж, 2018, 2019, 2020).

Результаты работы демонстрировались на региональных выставках (2019, 2020), на IV Международной выставке изобретений и инноваций (ВГУИТ, 2019), по итогам которой работа награждена серебряной медалью.

**Соответствие диссертации паспорту научных специальностей.** Данная работа соответствует паспорту специальности 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств» в области исследований «Интенсификация процессов. Оптимизация процесса и его аппаратурного оформления. Повышение равномерности полей потенциалов в рабочем объеме аппаратов. Выбор новых принципов построения процесса и конструкций машин и аппаратов, обеспечивающих материало- и энергосбережение» и паспорту специальности 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий» в области исследований «Методы изучения и создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности, обеспечивающие минимизацию отходов, газовых выбросов и сточных вод. Принципы и методы синтеза ресурсосберегающих химико-технологических систем с оптимальными удельными расходами сырья, топливно-энергетических ресурсов и конструкционных материалов».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 29 работ, в том числе 10 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, получено 7 патентов РФ на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 234 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков и 23 таблицы. Список литературы включает 160 наименований, в том числе 13 зарубежных. Приложения к диссертации представлены на 45 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** выполнен анализ современного состояния теории, техники и технологии комплексной переработки семян масличных культур в белоксодержащие продукты, биодизельное топливо и топливные пеллеты. Рассматриваются существующие модельные представления в данной области. Даётся обзор методов решения задач тепломассопереноса при сушке семян масличных культур. Определены направления совершенствования способов перера-

ботки масличных семян с применением теплонасосных технологий. Показаны объективные предпосылки для повышения роли ТН в тепловом хозяйстве страны: положительные системные эффекты, перспективы широкого внедрения при переходе на энергосберегающие системы теплоснабжения, высокий потенциал замещения органического топлива за счет утилизации техногенных сбросов тепла. Рассмотрены вопросы проектирования сушилок барабанного типа, шнековых прессов. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определены пути и методы решения поставленных научных задач.

**Во второй главе** приведены экспериментальные исследования процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке АСУ-2.3 с подъемно-лопастной системой. Изучение кинетических закономерностей процесса сушки проводилось в следующем диапазоне режимных параметров: температура и скорость сушильного агента 350-395 К; 2,0-3,8 м/с; степень заполнения барабана 0,2-0,4; частота вращения барабана (0,15-0,20) 10<sup>-2</sup>; время сушки 35-40 мин; начальная и конечная влажность семян 18-22 %, 8-12 %.

Кинетика процесса сушки представлена кривыми сушки, скорости сушки и нагрева семян, анализ которых свидетельствует о наличии только периода убывающей скорости сушки (рисунок 1).

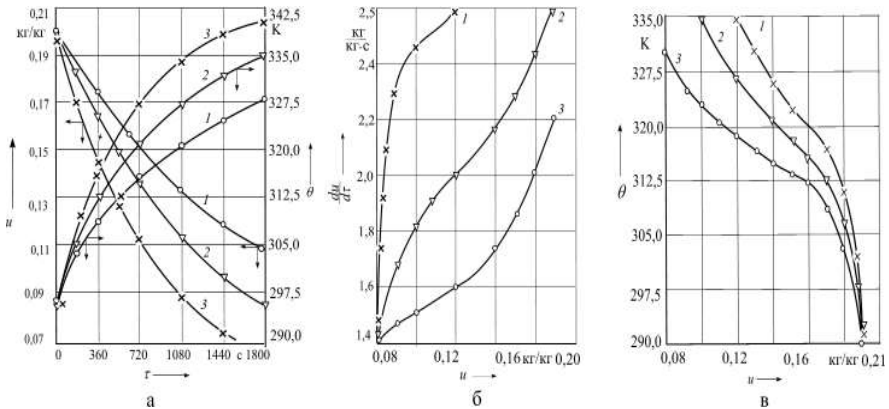


Рисунок 1 - Кривые сушки и нагрева семян рапса (а); кривые скорости сушки семян рапса (б), термограммы (в):  $v = 2,2$  м/с;  $T = 393$  К;  $x_o = 0,020$  кг/кг  $\xi$ : 1 – 0,40; 2 – 0,35; 3 – 0,25

В результате обработки и систематизации экспериментального материала для аппроксимации кривых сушки семян рапса предложена эмпирическая модель в виде:

$$\frac{u - u_k}{u_n - u_k} = \exp(-1,37 \cdot 10^{-15} (T - 273)^5 \cdot v^6 \cdot x^{1.8} \cdot \xi^{-2} \cdot \tau) \quad (1)$$



где  $T$  – температура (К);  $v$  – скорость (м/с) и влагосодержание сушильного агента кг/кг;  $u_n, u, u_k$  – начальное, текущее и конечное влагосодержание семян, кг/кг;  $x$  – влагосодержание сушильного агента, кг/кг;  $\xi$  – степень заполнения барабана семенами рапса;  $\tau$  – время, с.

Погрешность графической интерпретации кривых сушки по модели (1) в исследуемом интервале режимных параметров составила 6-8 %.

Экспериментально-статистическими методами определена рациональная область изменения параметров процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке:  $T=360-370$  К;  $v= 2,0-3,5$  м/с;  $\xi= 0,30-0,35$ ;  $n = 0,17-0,20$  с<sup>-1</sup>;  $x_0=0,010-0,015$  кг/кг;  $\tau=1200-1800$  с;  $u_n=0,18-0,22$  кг/кг,  $u_k=0,08-0,12$  кг/кг.

Получена однозначная функциональная зависимость суммарных энергетических затрат, приходящихся на единицу массы испаряемой влаги, от степени заполнения барабана. Найдены оптимальные значения степени заполнения барабана по величине суммарных теплоэнергетических затрат, приходящихся на единицу массы испаряемой влаги в барабанной сушилке с тепловым насосом, при различных значениях начальной влажности семян рапса. По результатам исследований предложена многосекционная барабанная сушилка (пат. РФ 2649379), в каждой секции которой оптимальное значение степени заполнения достигается путем изменения частоты вращения.

Теоретические исследования заключались в решении математической модели тепловой обработки семян рапса высокотемпературным теплоносителем на основе дифференциальных уравнений А.В. Лыкова. Для ее решения приняты следующие упрощающие допущения: пренебрегается теплопередачей за счёт теплопроводности; не учитывается усадка и градиент давления; единичное зерно представляется в форме шара; теплофизические параметры зависят от температуры и влажности семян.

С учетом принятых допущений уравнения нестационарного теплопереноса в сферической системе координат представлены в виде.

$$c_m \rho_0 \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \varepsilon r_0 \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + a_m \delta \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right),$$

с граничными условиями третьего рода:

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=R} + \alpha (\theta|_{x=R} - \theta_c) - (1 - \varepsilon) r_0 \rho_0 \beta (u|_{x=R} - u_p) = 0, \quad (3)$$

$$a_m \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=R} + a_m \delta \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{x=R} + \beta (u|_{x=R} - u_p) = 0,$$

и начальными условиями:

$$\theta(x, 0) = \theta_0, \quad u(x, 0) = u_0, \quad (4)$$

где  $\Theta_0, \Theta$  – начальная и текущая температура семян, К;  $\Theta_c$  – температура теплоносителя, К;  $u, u_p, u_0$  – соответственно текущее, равновесное и начальное влагосодержание семян, кг/кг;  $\varepsilon$  – критерий фазового превращения, величина безразмерная, характеризующая долю влаги, перемещающейся в виде пара;  $r_0$  – удельная теплота парообразования, кДж/кг;  $a_m$  – коэффициент диффузии влаги, м<sup>2</sup>/с;  $\delta$  – термоградиентный коэффициент, 1/К;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $t$  – текущее время тепловой обработки, с. После замены переменных:  $r = x/R$  – безразмерная пространственная координата;  $T = (\theta - \theta_0)/(\theta_c - \theta_0)$ ,  $U = u/u_0$  – соответственно безразмерные температура и влагосодержание семян;  $\tau = t/t_k$  – безразмерное время, где  $t_k$  – конечное время тепловой обработки, получена безразмерная форма уравнений (2) – (4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= A_{11} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + A_{12} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} &= A_{21} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + A_{22} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right), \\ r &\in [0,1], \tau \in [0,1] \end{aligned} \quad (5)$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned} -\left. \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=1} + a_1 [1 - T(r, \tau)]_{r=1} - a_2 (U(r, \tau))_{r=1} - u_p / u_0 &= 0, \\ \left. \frac{\partial U(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=1} + b_1 [1 - T(r, \tau)]_{r=1} + b_2 (U(r, \tau))_{r=1} - u_p / u_0 &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

с начальными условиями:

$$T(r, 0) = 0, U(r, 0) = 1, \quad (7)$$

и условием ограниченности решения:

$$|T, U| < \infty, \quad (8)$$

где комплексы критериев определяются уравнениями:  $A_{11} = 1 + \varepsilon K_0 L_u P_n$ ,  $A_{12} = \varepsilon K_0 L_u$ ,  $A_{21} = L_u P_n$ ,  $A_{22} = L_u$ ,  $a_1 = Bi_q$ ,  $a_2 = (1 - \varepsilon) K_0 L_u Bi_m$ ,  $b_1 = P_n Bi_q$ ,  $b_2 = Bi_m$  ( $1 - (1 - \varepsilon) P_n K_0 L_u$ ), а используемые критерии имеют вид:  $K_0 = r_0 u_0 / c_q (\Theta_c - \Theta_0)$  – Коссовича;  $L_u = a_m / a$  – Лыкова;  $P_n = \delta (\Theta_c - \Theta_0) / u_0$  – Поснова;  $F_0 = at / R^2$  – число Фурье; теплообменный и массообменный критерии Био соответственно  $Bi_q = \alpha R / \lambda$ ,  $Bi_m = \beta R / a_m$ .

После ряда преобразований получено приближённое решение, которое представлено рядами Фурье:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{r} [M_z + Z_1(\tau) \sin(m\pi r)], \\ U &= \frac{1}{r} [M_w + W_1(\tau) \sin(m\pi r)] \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$M_z = \varphi(\tau)r + \varphi_0(\tau) \left[ \frac{r^2}{2} - \frac{r^3}{6} - \frac{r}{3} \right] + \varphi_1 \left[ \frac{r^3}{6} - \frac{r}{6} \right],$$

$$M_w = \psi(\tau)r + \psi_0(\tau) \left[ \frac{r^2}{2} - \frac{r^3}{6} - \frac{r}{3} \right] + \psi_1 \left[ \frac{r^3}{6} - \frac{r}{6} \right] \quad (10)$$

Численный эксперимент обеспечил наилучшую сходимость расчетных и экспериментальных данных (рисунок 2) с погрешностью моделирования 12,5 %.

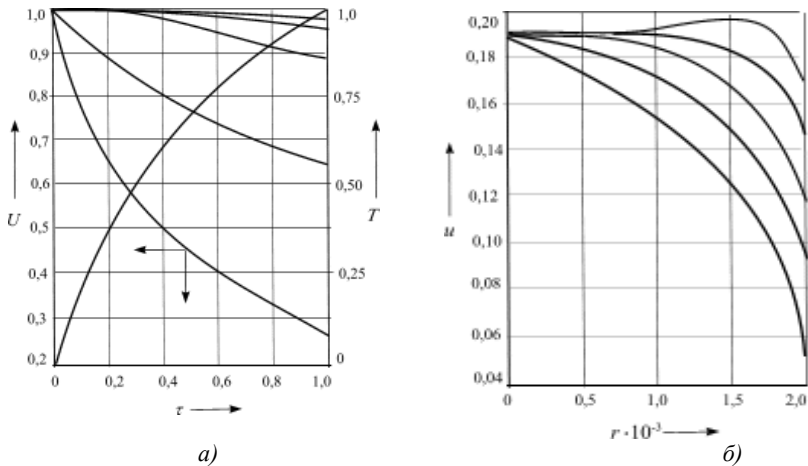


Рисунок 2 - Графики изменения влагосодержания и температуры от времени (а) и влагосодержания по радиусу зерна (б) в относительных единицах

**В третьей главе** разработана линия комплексной переработки масличных семян в белоксодержащие продукты. Важной концептуальной задачей являлось использование современного оборудования с непосредственным вовлечением в технологический поток как парокompрессионного (пат. РФ 2688467), так и парозежкторного теплового насоса (пат. РФ 2689672) при подготовке теплоносителей разного температурного потенциала (рисунок 3).

Изложен технологический цикл комплексной переработки масличных семян с получением растительного масла, растворимой и нерастворимой фракции из смеси измельченной выжимки с нагретой водой; белка из растворимой фракции, высушенной нерастворимой фракции. Полученная суспензия разделяется на фракции: растворимую и нерастворимую (таблица 1).

Изменяя соотношение измельченной выжимки и воды, температуру воды и время перемешивания, обеспечивали управление процессом перехода белка и жира из нерастворимой фракции в растворимую, тем самым либо увеличивали количество белка в растворе, либо оставляли его в нерастворимой фракции.

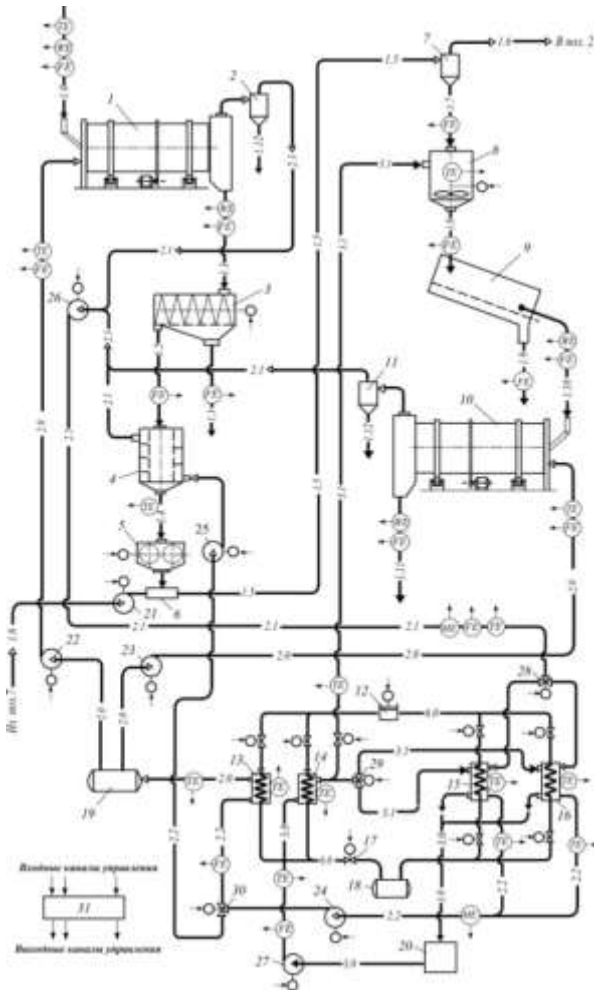


Рисунок 3 – Линия комплексной переработки масличных культур: 1,10-барabanные сушилки; 2, 7, 11-циклоны; 3-шнековый маслопресс; 4-гравита-ционный охладитель; 5-валковую мельницу; 6-пневмопитатель с вибромешалкой; 9-вибросито; 12-парокомпрессионный тепловой насос, включающий компрессор, 13,14-секции двухсекционного конденсатора, установленные параллельно; 15, 16-рабочая и резервная секции испарителя; 17-терморегулирующий вентиль; 18, 19-ресиверы; 20-сборник конденсата; 21-воздуходувка; 22, 23, 24, 25, 26-вентиляторы; 27-насос; 28,29-перелючатели потока; 30-распределитель потока; 31-микропроцессор.

Управление тепловым насосом позволяет обеспечить заданные параметры теплоносителей в кон-

денсаторе и испарителе посредством рекуперативного теплообмена с хладагентом. Температура конденсации паров хладагента в конденсаторе регулируется компрессионным сжатием, а температура его кипения регулируется изменением давления хладагента, дросселирующего через терморегулирующий вентиль в замкнутом контуре ТН.

Способ управления процессами переработки масличных семян в белок-содержащие продукты (пат. РФ 2688467) позволил сократить интервалы отклонения параметров теплоносителей, подготовленных в ПКТН, от заданных значений; повысить производительность линии на 5...7 % и снизить удельные энергозатраты на 5...10 %.

Таблица 1 – Технологические параметры комплексной переработки семян рапса

Параметры	Диапазон
Влажность семян, %: начальная	18...23
конечная	7...8
Температура, °С: сушильного агента	90...95
нагревания семян	80...85
кондиционированного воздуха	7...10
охлажденной выжимки	14...15
смешивания выжимки с водой	50...53
Влагосодержание, кг/кг: сушильного агента	0,005...0,008
кондиционированного воздуха	0,014...0,019
Скорость, м/с: сушильного агента	3,2...4,0
воздуха в зону охлаждения	3,5...4,2
Влажность нерастворимой фракции, %	6...8
Содержание общего белка, %	38,2...40,4
Содержание белков, % к общему белку: сумма растворимых белков	85,8...90,7
нерастворимый белковый остаток	9,3...14,2
Частота вращения дисковой вибромешалки, мин <sup>-1</sup>	185...195
Амплитуда колебаний дисковой вибромешалки, мм	1,5...2,0

Применение ПЭТН открывает возможность использования теплоты низкотемпературного потенциала, в частности, бросового тепла газотурбинных установок и котельных агрегатов. При отсутствии источников вторичного тепла в условиях децентрализованных систем теплоснабжения предпочтительно применять ПКТН, способные перекрывать мощность различных теплоисточников.

**В четвертой главе** для реализации комплексной переработки семян рапса предложен двухконтурный каскадный ПКТН. Применяемая каскадная теплонасосная система дает дополнительный эффект по минимизации термодинамических потерь и повышению эффективности циклов ПКТН в условиях больших перепадов температур в испарителе и конденсаторе.

Рассмотрены аппаратно-технологические схемы производства топливных и кормовых пеллет (пат. РФ 2721704) и биодизельного топлива из семян рапса (пат. РФ 2693046, 2714306) с применением двухконтурного каскадного ПКТН.

Для предлагаемых схем определено эксергетическое состояние термодинамического цикла ТН:

- потери эксергии:

$$\Sigma d = d_{np1} + d_{np2} + d_{конд} + d_{конд-испар} + d_{испар} + d_{дрос1} + d_{дрос2} + \Sigma d_i + d_{окр} \quad (11)$$

где  $d_{пр1}$   $d_{пр2}$  – потери эксергии в приводах компрессоров, конденсаторе, конденсаторе-испарителе, испарителе, дросселирующих вентилях,  $i$ -м аппарате в окружающую среду;

- суммарные внутренние потери эксергии:

$$\sum d_{внутр} = \sum d_i - d_{внешн}; \quad (12)$$

- эксергетический КПД:

$$\eta_{в}^{тн} = \frac{e_{вых}}{e_{вх}} = (e_{вх} - \sum d_i) / e_{вх}, \quad (13)$$

где  $e_{вх}$  и  $e_{вых}$  – соответственно удельные значения эксергии на входе и выходе и двухступенчатого каскадного ПКТН.

Построены термодинамические циклы компрессоров каскадного ТН (рисунок 4) и выполнен термодинамический расчет энергетических характеристик для рабочих агентов R142b и R113.

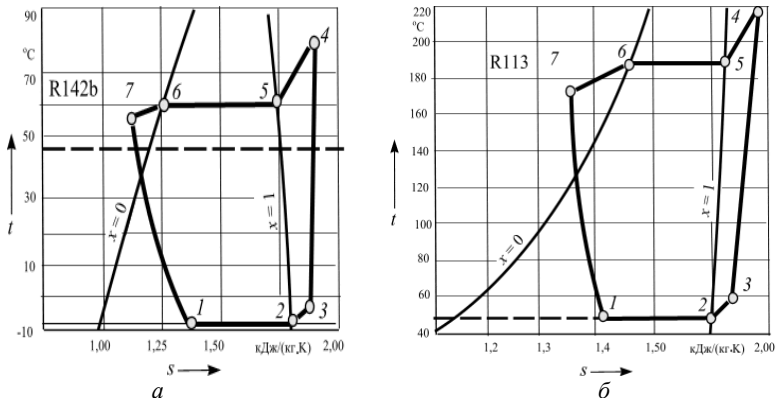


Рисунок 4 – Термодинамические циклы каскадного теплового насоса: а - ступень низкого давления; б - ступень высокого давления; 1-2 – отбор теплоты от охлаждаемых сред (воздуха - для ступени низкого давления; хладагента R=113 – для ступени высокого давления) при парообразовании (кипении) хладагентов в испарителе и конденсаторе-испарителе при постоянном давлении; 2-3 – отбор теплоты от охлаждаемой среды при перегреве газообразного хладагента в испарителе и испарителе-конденсаторе; 3-4 – сжатие хладагента компрессором; 4-5 – снятие перегрева хладагента в конденсаторе; 5-6 – конденсация хладагента; 6-7 – переохлаждение хладагента; 7-1 – дросселирование хладагента через ТРВ

При средней тепловой нагрузке 282 кДж и 395 кДж, степени сжатия 27,5 и 14,4; коэффициенте преобразования теплоты 3,2 и 3,5 и коэффициенте преобразования электроэнергии 2,2 и 2,5; удельном расходе электро-энергии на производство тепловой энергии 1,15 и 1,28 в ступенях низкого и высокого давления ПКТН соответственно, эксергетический КПД составил в среднем 0,14.

Показана целесообразность использования рапсового шрота в рецептуре комбикормов, который позволит частично ликвидировать сложившийся дефицит растительных белковых компонентов.

Предложен способ получения биодизельного топлива путем переэтерификации растительного масла спиртом в присутствии катализатора при последующем разделении полученных продуктов кавитацией в гидродинамическом смесителе с отделением от полученной смеси глицерина и биодизеля в поле центробежных сил с применением двухступенчатого парокompрессионного теплового насоса (пат. РФ 2693046).

При производстве пеллет и биодизельного топлива установлено, что повышение термодинамической эффективности циклов ПКТН при большой разнице температур в испарителе и конденсаторе достигается за счет внешней регенерации теплоты отработанных энергоносителей и обеспечивается двухконтурным каскадным ПКТН.

**В пятой главе** выполнены исследования процесса переэтерификации растительного масла сверхкритическим спиртом на экспериментальной установке при следующих параметрах: расход рапсового масла  $G_m = 0,02 \dots 0,04 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; расход спирта  $G_c = 0,45 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; расход биодизельной смеси (этилового эфира рапсового масла)  $G_o = 0,32 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; температура и массовый расход высокопотенциального пара в змеевик реактора  $270 \dots 280 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $40 \dots 50 \text{ кг/ч}$ ; расход паров непрореагировавшего спирта  $0,023 \dots 0,036 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; температура процесса переэтерификации  $260 \text{ }^\circ\text{C}$ ; давление рапсового масла на входе в реактор  $15 \text{ МПа}$ ; частота вращения лопастной мешалки  $0,8 \text{ с}^{-1}$ .

Для описания кинетики процесса переэтерификации использовали упрощенную модель при следующих допущениях: концентрация этанола в жидкой фазе усреднена и не меняется по высоте реактора; пренебрегалось концентрациями диглицеридов и моноглицеридов; пренебрегалось обратной реакцией, так как равновесие в системе сильно сдвинуто в сторону образования эфиров; порядок реакции по концентрации триглицерида и порядок реакции по давлению этанола принимали равными единице; процесс переэтерификации рапсового масла описывается одной необратимой реакцией второго порядка, скорость которой имеет вид

$$w = k_1 C P, \quad (14)$$

где  $w$  - скорость реакции, отнесенная к единице объема реактора, моль/(л·ч);  $k_1$  - эффективная кажущаяся константа скорости реакции ( $\text{МПа}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ );  $C$  - концентрация триглицерида моль/л;  $P$  — давление этанола МПа.

С учетом принятых допущений выражение для конверсии триглицерида использовалось в виде

$$x = [1 - \exp(-k_1 P \tau)] 100, \quad (15)$$

где  $\tau$  - время реакции переэтерификации, с

Значение константы скорости реакции  $k_1$ , входящее в выражение (15), определяли методом наименьших квадратов путем сравнения эксперименталь-

ных данных по конверсии рапсового масла с данными, рассчитанными по зависимости (15). При этом минимизировали следующую целевую функцию:

$$F(k_1) = \sum_i [x_i - x(P_i, k_1)]^2 \quad (16)$$

где  $x_i$  и  $x(P_i, k_1)$  — соответственно экспериментальные и расчетные значения конверсии рапсового масла для  $i$ -й экспериментальной точки.

Получены экспериментальные данные по кинетике процесса переэтерификации рапсового масла этиловым спиртом (рисунок 5).

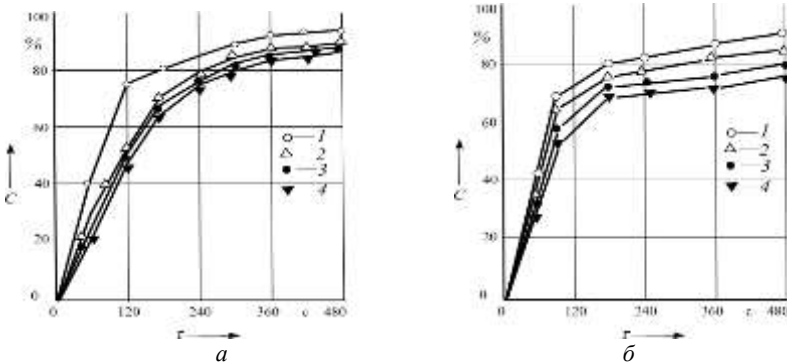


Рисунок 5 – Выход биодизельной смеси: а – в зависимости от соотношения «масло-спирт»: 1 – 1:15; 2 – 1:12; 3 – 1:10; 4 – 1:8 при давлении 15 МПа; б – в зависимости от давления, МПа: 1 – 20; 2 – 16; 3 – 12; 4 – 8 при соотношении 1:12

Сформулирована и решена задача поиска оптимальной нагрузки реактора переэтерификации рапсового масла этиловым спиртом в сверхкритических условиях.

В качестве критерия оптимизации использовались удельные сырьевые и теплоэнергетические потери:

$$R_{min} = \min \left[ C_M \left( \frac{G_M - \frac{M_M}{M_G} G_G}{G_G} \right) + C_C \left( \frac{G_C - G_C^H - \frac{M_C}{M_G} G_G}{G_G} \right) + \frac{\sum N}{G_G} \right] \quad (17)$$

где  $C_M, C_C$  – оптовые цены соответственно растительного масла и спирта, р/кг;  $G_M, G_C, G_C^H, G_G$  – соответственно массовые расходы растительного масла, сверхкритического спирта, непрореагировавшего спирта на выходе из реактора, биодизельной смеси, кг/ч;  $M_M, M_C, M_G$  – молярные массы соответственно растительного масла, спирта, биодизельной смеси, кг/моль;  $\sum N$  – суммарные теплоэнергетические затраты в единицу времени, р/ч

$$\sum N = c_1 q_1 + c_2 q_2 + c_2 (N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6) \quad (18)$$

где  $c_1, c_2$  – стоимость хладагента, р/кг и электроэнергии, р/кВт·ч;  $q_1$  – расход хладагента на конденсацию паров непрореагировавшего спирта, м<sup>3</sup>/ч;



$q_2$  – расход электроэнергии парогенератора на создание сверхкритических условий в реакторе, р/кВт·ч;  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6$  – соответственно потребляемые мощности насосов высокого давления подачи рапсового масла и этилового спирта, привода мешалки, насоса отвода биодизельной смеси, вакуум-насоса отвода паров избыточного спирта и парогенератора, кВт.

По данным производственного процесса переэтерификации

$$G_M - \frac{M_M}{M_G} G_G \cong 0 \quad (19)$$

$$\frac{G_c - G_c^H - \frac{M_c}{M_G} G_G}{G_G} = \alpha (G_G)^\beta \quad (20)$$

где  $\alpha, \beta$  – некоторые фиксированные коэффициенты.

Из (18) следует:

$$G_G = \frac{M_G}{M_M} G_M, \quad (21)$$

тогда

$$R = \Psi_c \cdot \alpha \cdot \left( \frac{M_G}{M_M} G_M \right)^\beta + \frac{M_M}{M_G \Sigma N} k \Sigma N \quad (22)$$

где  $k$  – нормирующий коэффициент.

Существование единственного минимума определяли из условия;

$$\frac{dR}{dG_M} = \Psi_c \cdot \alpha \cdot \left( \frac{M_G}{M_M} \right)^\beta \beta G_M^{\beta-1} - \frac{M_M}{M_G} k \Sigma N \cdot G_M^{-2} = 0 \quad (23)$$

После преобразования (15) получено:

$$\frac{G_M^{\beta-1}}{G_M^{-2}} = G_M^{\beta+1} = \frac{\frac{M_M}{M_G} k \Sigma N}{\Psi_c \cdot \alpha \cdot \left( \frac{M_G}{M_M} \right)^\beta \beta} = \beta+1 \sqrt{\frac{\frac{M_M}{M_G} k \Sigma N}{\Psi_c \cdot \alpha \cdot \left( \frac{M_G}{M_M} \right)^\beta \beta}} \quad (24)$$

отсюда следовал единственный экстремум

$$G_M^* = \left( \frac{\frac{M_M}{M_G} k \Sigma N}{\Psi_c \cdot \alpha \cdot \left( \frac{M_G}{M_M} \right)^\beta \beta} \right)^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (25)$$

Дифференцируя (23), получено

$$\frac{d^2 R}{(dG_M)^2} = \Psi_c \cdot \alpha \cdot \left( \frac{M_G}{M_M} G_M \right)^\beta \beta (\beta - 1) G_M^{\beta-2} + 2 \frac{M_M}{M_G} k (\Sigma N) \cdot G_M^{-3} > 0 \quad (26)$$

т.е. в точке единственного экстремума (25) имеет место минимум.

Сумма мольных долей компонентов биодизельной смеси в реакторе как идеального бинарного раствора, состоящего из растительного масла и спирта, равна единице и в соответствии с первым законом Рауля определяется соотношением:

$$\frac{P_c^0 - P_c}{P_c} = \frac{n}{n+N} \quad (27)$$

где  $P_c^o$  - давление пара чистого спирта (растворителя), кПа;  $P_c$  - давление паров спирта над биодизельным раствором, кПа;  $n$  – число молей нелетучих веществ в биодизельном растворе;  $N$  – число молей спирта в биодизельном растворе.

Давление паров спирта над раствором биодизельной смеси равно давлению растительного масла на входе в реактор:

$$P_c = P_m \quad (28)$$

Давление пара чистого спирта определяется температурой в рабочей зоне реактора и для него применимо эмпирическое уравнение Редлиха-Квонга:

$$P_c^o = \frac{Rt_p}{V-b} - \frac{a}{(t_p+273)^{0.5} V(V+b)} \quad (29)$$

где  $R$  – газовая постоянная Дж/К·моль;  $t_p$  – температура реакции, °С;  $V$  – объёмный расход паров непрореагировавшего спирта, м<sup>3</sup>/ч;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты, определяемые экспериментально. Для данного режима реакции переэтерификации  $a = 2145,3777$ ;  $b = 0,0027$ . Эмпирическая формула (29) справедлива в интервале температур  $513 \leq (t_p + 273) \leq 533$  К.

Парциальное давление насыщенного пара компонента раствора (спирта) прямо пропорционально его мольной доле в растворе  $X_c$  причём коэффициент пропорциональности равен давлению насыщенного пара над чистым компонентом  $P_c^o$ :

$$P_c = P_c^o X_c \Rightarrow X_c = \frac{P_c}{P_c^o} \Rightarrow X_c = P_m \left( \frac{Rt_p}{V-b} - \frac{a}{(t_p+273)^{0.5} V(V+b)} \right)^{-1} \quad (30)$$

В этом случае

$$X_c = \frac{N}{N+n} = \frac{\frac{G_c}{M_c}}{\frac{G_c}{M_c} + \frac{G_m}{M_m}} = P_m \left[ \frac{Rt_p}{V-b} - \frac{a}{(t_p+273)^{0.5} V(V+b)} \right]^{-1} \quad (31)$$

Подставляя (31), (21) и (18) в (17), получили

$$R_{min} = \zeta_c \frac{\left[ G_c - G_c^* - \frac{P_m \left[ \frac{Rt_p}{V-b} - \frac{a}{(t_p+273)^{0.5} V(V+b)} \right]^{-1} \frac{M_6 G_m}{M_m}}{1 - \left( P_m \left[ \frac{Rt_p}{V-b} - \frac{a}{(t_p+273)^{0.5} V(V+b)} \right]^{-1} \right)} \right]}{G_6} + \left[ \frac{c_1 q_1 + c_2 q_2 + c_2 (N_1 + N_2 + N_3 + N_4)}{G_6} \right] \quad (32)$$

Таким образом, получая текущую информацию о  $G_m$ ,  $G_c$ ,  $G_6$ ,  $P_m$ ,  $t_p$ ,  $V$  с помощью выражения микропроцессор 20 вычисляет текущее значение  $G_m$  и по знаку производной  $\frac{dR}{dG_m}$  устанавливает такое значение  $G_m^*$ , которое обеспечивает минимум выражения (32).

По предлагаемому алгоритму (17) – (32) разработана система автоматической оптимизации процесса переэтерификации растительного масла сверхкритическим спиртом (пат. РФ 2724889), которая по информации, получаемой с датчиков, непрерывно определяет концентрации растительного масла и спирта в биодизельном растворе, вычисляет текущие значения удельных потерь и обеспечивает такую нагрузку реактора по растительному маслу, при которой удельные сырьевые и энергетические потери были бы минимальными.

Полученный оптимальный режим процесса переэтерификации использован при разработке способа производства биодизельного топлива из семян рапса с применением парожекторного теплового насоса (пат. РФ 2714306) (рисунок 6).

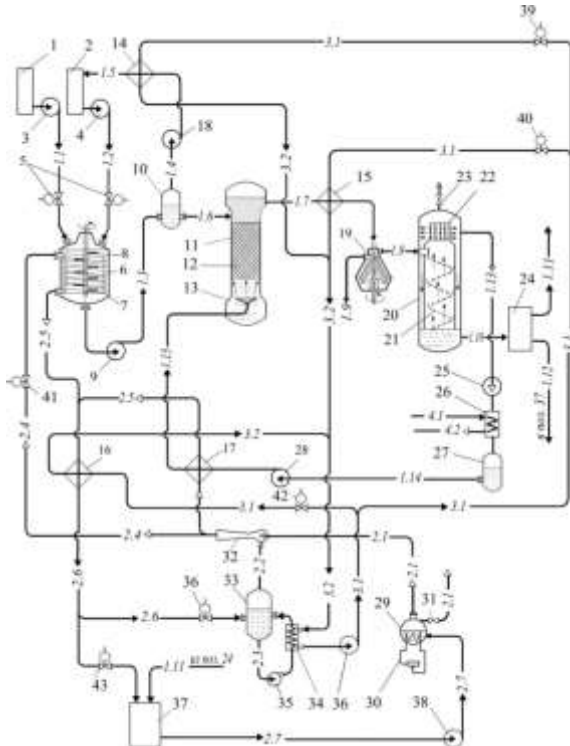


Рисунок 6 – Способ производства очищенного биодизельного топлива: 1, 2-емкости; 3, 4, 9, 28, 35, 38-насосы; 5, 39, 40, 41, 42, 43-заслонки; 6-реактор переэтерификации; 7-змеевик; 8-мешалка; 10-сборник; 11-сверхкритический флюидный CO<sub>2</sub>-экстрактор; 12-насадка; 13-распределительное устройство; 14, 15, 16, 17-теплообменники; 18-вакуум-насос; 19-тарельчатый сепаратор; 20-газожидкостный сепаратор; 21-наклонные полки; 22-каплеуловитель; 23-предохранительный клапан; 24-отстойник; 25-компрессор; 26-испаритель холодильного агрегата; 27-резервуар; 29-парогенератор; 30-эжектор; 31-предохранительный элемент; 31-предохранительный клапан, 32-эжектор; 33-испаритель; 34-холодоприемник; 36-ТРВ; 37-сборник конденсата

В способе предусмотрена переэтерификация растительного масла сверхкритическим спиртом в объемном соотношении 1:10 - 1:15 при температуре 250-280 °С, давлении 15 МПа; конденсация паров избыточного спирта при температуре 60-80 °С, экстракция полученной реакционной смеси диоксидом углерода в сверхкритических условиях при температуре 240-260 °С, давлении 15 МПа, охлаждение полученной биодизельной смеси до температуры 20-30 °С и отделение от нее сначала глицерина, а затем диоксида углерода с получением очищенного биодизельного топлива и возвратом диоксида углерода на стадию экстракции в режиме рециркуляции.

Физико-химические показатели полученного биодизельного топлива соответствуют ГОСТ 305-2013 «Топливо дизельное».

В ООО «Золотая Нива» проведена проверка энергетической и экологической эффективности использования рапсового этилового эфира (биодизельного топлива), полученного по предлагаемой технологии, и его смесей с минеральным дизельным топливом в соотношении 30:70 и 50:50 при выполнении сельскохозяйственных работ трактором «Кировец» К-701 с дизелем мощностью 220,6 кВт (300 л.с.). В ходе проверки установлено, что удельный расход чистого биодизельного топлива на 9 % выше, чем минерального дизельного топлива. При работе с топливными смесями в соотношении 50 % и 30 % расход топлива был выше соответственно на 6,0 % и 4,0 %. В одинаковых условиях эксплуатации трактор при работе на биодизельном топливе и его смесях с минеральным дизельным топливом на максимальной мощности развивает одинаковую силу тяги. Применение биодизельного топлива и его смесей снижает загрязнение окружающей среды окисью углерода, повышает чистоту выхлопа по сравнению с работой тракторного агрегата на минеральном дизельном топливе.

Выполнен эксергетический анализ технологической системы получения биодизельного топлива. Эксергетический КПД технологии получения биодизельного топлива в сверхкритических условиях с применением ПЭТН составил 14,39 %, что на 4...5 % выше, чем у известных технологий. При переходе технологической системы в состояние равновесия с окружающей средой эта часть энергии полезным образом использована в термодинамических процессах. Это характеризует технологию как теплотехнологическую систему с более высокой степенью термодинамического совершенства, что было достигнуто за счет организации работы в замкнутых термодинамических циклах и использования обработанных теплоносителей.

### **Основные выводы и результаты**

1. Выявлены кинетические закономерности процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке с подъемно-лопастной системой в широком диапазоне изменения режимных параметров; установлено наличие только периода убывающей скорости сушки, что позволило в качестве аппроксимирующей функции использовать экспоненциальное уравнение с агрегацией переменных при

коэффициенте сушки; сформулирована и решена задача оптимального выбора степени заполнения сушильного барабана семенами рапса по величине удельных энергозатрат в сушилке с ТН.

2. Предложено аналитическое решение математической модели процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке, представленной дифференциальными уравнениями связанного теплообмена А.В. Лыкова, методом быстрых разложений нелинейных дифференциальных уравнений в ряды Фурье. Разработана и откорректирована численная модель по экспериментальным данным. Результаты численных экспериментов позволили определить распределение полей температур и влагосодержаний в единичном зерне рапса.

3. Разработаны безотходные технологии переработки рапсового жмыха в белоксодержащие продукты с применением парокомпрессионного и парожеткого тепловых насосов. Показана целесообразность применения замкнутых термодинамических циклов по энергоносителям в решении задач энергосбережения при ограничениях на показатели качества получаемых целевых продуктов. Предложены рецепты комбикормов для кроликов с использованием рапсового шрота, что позволит частично ликвидировать сложившийся дефицит растительных белковых компонентов.

4. Разработаны аппаратно-технологические схемы получения биодизельного топлива из семян рапса с применением катализатора и пеллет из рапсового шрота при подготовке энергоносителей в двухступенчатом каскадном ПКТН. Показано, что повышение термодинамической эффективности циклов двухступенчатых ПКТН при большой разнице температур в испарителе и конденсаторе возможно за счет внешней регенерации теплоты отработанных энергоносителей; при этом снижение температуры кипения рабочих тел в испарителе и повышение температуры в конденсаторе достигается при двухконтурном каскадном подключении теплонасосного оборудования.

5. Предложен алгоритм выбора оптимальной нагрузки реактора переэтерификации растительного масла сверхкритическим спиртом по технико-экономическому показателю с последующей реализацией сверхкритической флюидной  $\text{CO}_2$ -экстракции в технологии получения биодизельного топлива; разработана система автоматической оптимизации непрерывного процесса переэтерификации по величине удельных сырьевых и энергетических потерь, обеспечивающая экономию сырья и энергии в среднем на 8...10 %. Эксергетический КПД технологии получения биодизельного топлива с применением ПЭХМ составил 14,39 %, что на 4...5 % выше, чем у известных технологий.

6. Предложены конструктивные решения в совершенствовании барабанной сушилки и шнекового пресса, позволяющие снизить удельные энергозатраты.

7. Проведены производственные испытания комплексной переработки рапсового масла в белоксодержащие продукты в ОАО «ВНИИКП» и способа получения биодизельного топлива из семян рапса в ООО «Золотая Нива», которые подтвердили их высокую эффективность.

### Результаты работы отражены в следующих публикациях:

#### Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Шевцов, А.А. Резервы энергоэффективности конвективной сушки дисперсных материалов при переменных режимах / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2017. – № 2. – С. 91-99.
2. Остриков, А.Н. Оптимизация процесса сушки зерновых культур в барабанной сушилке с тепловым насосом / А.Н. Остриков, А.А. Шевцов, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Известия вузов. Пищевая технология. – 2018. – № 1. – С. 74-78.
3. Шевцов, А.А. Эффективное внедрение парокompрессионного теплового насоса в линию комплексной переработки семян масличных культур / А.А. Шевцов, Е.С. Бунин, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова, Д.И. Фофонов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2018. – № 1. – С. 60–64.
4. Шевцов, А.А. Моделирование тепловой обработки семян масличных культур высокотемпературным теплоносителем / А.А. Шевцов, Л.И. Лыткина, В.В. Ткач, Ю.В. Чернухин, Н.А. Сердюкова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2018. – № 4. – С. 163–171.
5. Шевцов, А.А. Разработка алгоритма управления процессами переработки масличных семян в белоксодержащие продукты / А.А. Шевцов, Т.Н. Тертычная, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Известия вузов. Пищевая технология. – 2019. – № 4. – С. 61-65.
6. Шевцов, А.А. Энергосберегающая технология выделения белоксодержащих фракций из масличных семян с применением парожеткорного теплового насоса / А.А. Шевцов, Т.Н. Тертычная, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2019. – № 2. – С. 35-40.
7. Остриков, А.Н. Эксергетический анализ технологии получения биодизельного топлива из рапсового масла / А.Н. Остриков, А.А. Шевцов, Т.Н. Тертычная, Н.А. Сердюкова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. – № 1. – С. 252-261.
8. Шевцов, А.А. Автоматическая оптимизация процесса перэтерификации рапсового масла сверхкритическим этиловым спиртом / А.А. Шевцов, Т.Н. Тертычная, Н.А. Сердюкова // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 2. – С. 67–72.
9. Шевцов, А.А. Управление теплонасосной технологией переработки масличных культур в биодизельное топливо / А.А. Шевцов, Т.Н. Тертычная, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Химическая промышленность.– 2020. –№ 2, – С. 102-108.
10. Курчаева Е. Рапсовый шрот и пробиотики в комбикормах для кроликов / Е. Курчаева, Т. Тертычная, А. Шевцов, Н. Сердюкова // Комбикорма. – 2020. – № 7-8. – С. 40-41.

#### Статьи и материалы конференций

11. Шевцов, А.А. Подготовка высокопотенциальных теплоносителей в многозонной сушилке барабанного типа с тепловым насосом / А.А. Шевцов, Т.Н. Тертычная, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Роль и значение науки и техники для развития современного общества: сб. статей Международной научно-практической конференции. – В 2 ч. Ч.1. –Уфа: ОМЕГА САЙНС, 2017. – С. 96-99.

12. Шевцов, А.А. Однопараметрическая оптимизация процесса сушки масличных материалов в производстве биодизельного топлива / А.А. Шевцов, Т.Н. Тертычная, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Инновационные технологии и стратегии развития промышленности: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа: ОМЕГА САЙНС, 2017. – С. 125-129.

13. Шевцов, А.А. Разработка высокоэффективной линии комплексной переработки семян масличных культур / А.А. Шевцов, Т.Н. Тертычная, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Актуальная биотехнология. 2018. – №3 (26). – С. 516-517.

14. Ткач, В.В. Компьютерное моделирование теплофизических характеристик семян рапса методом нестационарного теплового режима / В.В. Ткач, А.А. Шевцов, Н.А. Сердюкова // Наука, образование и инновации в современном мире: сб. ст. по материалам науч.-практ. конф. Воронеж: ВГАУ. – 2018. – С. 199 – 204.

15. Шевцов, А.А. Реализация осциллирующих режимов сушки с использованием многозонной барабанной сушилки / А.А. Шевцов, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: сб. статей XIX Междунар. науч.-практ. конф. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2018. – Ч. 3. – С. 189-193.

16. Шевцов, А.А., Ткач В.В., Сердюкова Н.А. Резервы энергоэффективности при сушке семян масличных культур / А.А. Шевцов, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства: сб. науч. трудов Междунар. науч.-техн. семинара, посвящённого 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева. – М.: Издательство «Перо», 2018. – С. 156-161.

17. Ткач, В.В. Линия производства альтернативного топлива с использованием теплового насоса / В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // IX Междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт Евразии XXI века: современные цифровые технологии на рынке транспортных и логистических услуг». – Алматы: Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева, 2018. – С. 480-484.

18. Шевцов, А.А. Конструктивные решения при проектировании многозонной сушилки барабанного типа / А.А. Шевцов, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж, 2018. – С. 225-228.

19. Сердюкова, Н.А. Микропроцессорное управление технологией переработки семян рапса в белокосодержащие продукты / Н.А. Сердюкова // Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство: сб. ст. по материалам VI Междунар науч.-техн. конф. – Воронеж: ВГУИТ, 2019. – С. 150-154.

### Патенты

20. Пат. РФ 2649379 С1, МПК F26В 11/14. Барабанная сушилка / Ткач В.В., Шевцов С.А., Сердюкова Н.А.; заявитель и патентообладатель В.В. Ткач, С.А. Шевцов, Н.А. Сердюкова. - № 2017122769; заявл. 27.06.2017; опубл. 02.04.2018. Бюл. № 10.

21. Пат. РФ 2688467 С1, МПК С11В 1/06. Способ управления линией комплексной переработки семян масличных культур / Шевцов А.А., Ткач В.В., Салтыков С.Н., Сердюкова Н.А., Копылов М.В.; заявитель и патентообладатель Военно-воздушная акад. им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. - № 2018121873; заявл. 13.06.2018; опубл. 21.05.2019. Бюл. № 15.

22. Пат. РФ 2689672 C1, МПК A23L 5/00. Способ комплексной переработки семян сои с выделением белоксодержащих фракций / Четверикова И.В., Шевцов А.А., Ткач В.В., Сердюкова Н.А.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. лесотехнич. ун-т.- № 2018107149; заявл. 26.02.2018; опубл. 01.07.2019. Бюл. № 19.

23. Пат. РФ 2690332 C1, МПК C11B 1/06. Маслопресс / Шевцов А.А., Копылов М.В., Татаренков Е.А., Ткачев О.А., Ткач В.В., Прошкина А.А., Сердюкова Н.А.; заявитель и патентообладатель А.А.Шевцов, М.В. Копылов, Е.А. Татаренков, О.А. Ткачев, В.В. Ткач, А.А. Прошкина, Н.А. Сердюкова. - № 2018120824; заявл. 05.06.2018; опубл. 31.05.2019. Бюл. № 16.

24. Пат. РФ 2693046 C1, МПК C11C 3/04, C11C 3/10, C10L 1/02, C07C 67/03. Способ управления процессом переработки масличных семян в биодизельное топливо / Шевцов А.А., Ткач В.В., Тертычная Т.Н., Сердюкова Н.А.; заявитель и патентообладатель А.А. Шевцов, В.В. Ткач, Т.Н. Тертычная, Н.А. Сердюкова. - № 2018126879; заявл. 20.07.2018; опубл. 31.05.2019. Бюл. № 19.

25. Пат. РФ 2714306 C1, МПК C11C 3/10, C10L 1/02, C10G 3/00; C07C 67/02. Способ получения биодизельного топлива и установка для его осуществления / Тертычная Т.Н., Шевцов С.А., Ткач В.В., Сердюкова Н.А.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. аграрный. ун-т.- № 2019114066; заявл.06.05.19; опубл. 14.02.2020. Бюл. № 5.

26. Пат. РФ 2721704 C1, МПК C11C 1/10. Способ производства пеллет из жмыха семян масличных культур и устройство для его осуществления / Тертычная Т.Н., Шевцов С.А., Ткач В.В., Сердюкова Н.А.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. аграрный. ун-т. - № 2019113592; заявл.30.04.19; опубл. 21.05.2020. Бюл. № 15.

27. Пат. РФ 2724886 C1, МПК C10L 1/02, C07C 67/03, C11C 3/10, C11C 3/04. Способ управления непрерывным процессом переэтерификации рапсового масла сверхкритическим этиловым спиртом / Шевцов А.А., Тертычная Т.Н., Ткач В.В., Сердюкова Н.А.; заявитель и патентообладатель Военно-воздушная акад. им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. - № 2019127099; заявл. 27.08.2019; опубл. 26.06.2020 Бюл. № 18.

Подписано в печать 04 07..2020. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

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

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

Отдел полиграфии

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