

## **О Т З Ы В**

официального оппонента на диссертацию Сердюковой Натальи Алексеевны «Научное обеспечение комплексной переработки семян рапса с использованием теплонасосных технологий», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.18.12 – "Процессы и аппараты пищевых производств" и 05.17.08 – "Процессы и аппараты химических технологий"

Рапсовое масло как возобновляемое сырье широко используется в пищевой, мыловаренной, текстильной, металлургической и химической промышленности; его также используют для производства биотоплива. Кроме того, в мире постоянно возрастает потребность в белках и продуктах на их основе, в связи с чем особую значимость приобретают вопросы создания энерго- и ресурсосберегающих малоотходных технологий переработки рапса в белоксодержащие продукты.

Однако до настоящего времени использование рапса в качестве перспективного возобновляемого источника сырья тормозится сложностью и малой изученностью кинетических закономерностей процесса сушки семян рапса, способов переработки рапсового жмыха в белоксодержащие продукты с применением парокompрессионного и парожеткорого тепловых насосов, аппаратурно-технологического оформления процесса получения биодизельного топлива из рапса и топливных пеллет из рапсового шрота, оптимизации и автоматизации процесса переэтерификации растительного масла.

Разрешению накопившихся противоречий, а именно теоретическому и экспериментальному исследованию системных связей и закономерностей функционирования и развития процессов комплексной переработки семян рапса с использованием теплонасосных технологий, условий их эффективного осуществления посвящена диссертационная работа Сердюковой Н.А. Изучение свойств и режимов технологий комплексной переработки семян рапса в белоксодержащие продукты с применением

парокомпрессионного и парожеторного тепловых насосов, исследование механизмов и кинетики процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке с подъемно-лопастной системой и выявление рациональной области изменения режимных параметров, а также интенсификация и совершенствование аппаратного оформления стадий производства биодизельного топлива из рапса на основе использования современных машин и аппаратов являются актуальными задачами, решение которых имеет существенное значение для развития страны.

*Объектом исследования* в диссертации Сердюковой Н.А. являются процессы и аппараты комплексной переработки семян рапса в белоксодержащие продукты, биодизельное топливо и топливные пеллеты; *предметом исследования* – механизм и кинетика процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке; методы физического и математического моделирования процессов и аппаратов комплексной переработки семян рапса в белоксодержащие продукты, биодизельное топливо и топливные пеллеты; системные связи и закономерности функционирования и развития процессов комплексной переработки семян рапса, условия их эффективного осуществления.

**Новизна проведенных исследований** Сердюковой Н.А. заключается в теоретическом и экспериментальном обосновании совершенствования и создания энергосберегающих технологических схем производства комплексной переработки семян рапса в белоксодержащие продукты с использованием парокомпрессионного и парожеторного тепловых насосов, производства биодизельного топлива из рапса и топливных пеллет из рапсового шрота с использованием двухступенчатого каскадного парокомпрессионного теплового насоса.

Основной задачей науки о процессах и аппаратах пищевых технологий является выявление общих закономерностей протекания технологических процессов и разработка методов расчета аппаратов для их реализации.

Автор грамотно ставит и успешно решает задачи: 1) теоретического и экспериментального исследования механизма и кинетики процесса сушки, семян рапса в барабанном агрегате с подъемно-лопастной насадкой,

теплофизических характеристик семян рапса, моделирования и оптимизации процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке и конструктивного усовершенствования барабанной двухсекционной сушилки (Глава 2); 2) изучения общих закономерностей протекания технологических процессов, их свойств и режимов при комплексной переработке семян рапса в белоксодержащие продукты с применением парокompрессионного и парозежекторного тепловых насосов и конструктивного усовершенствования шнекового пресса при механическом отжиме масличных семян (Глава 3); 3) аппаратурно-технологического оформления производства биодизельного топлива из рапса и топливных пеллет с использованием двухступенчатого каскадного теплового насоса и управления этими процессами (Глава 4); 4) исследования кинетики процесса переэтерификации рапсового масла сверхкритическим этиловым спиртом, определения оптимальной нагрузки реактора переэтерификации, разработки способа получения биодизельного топлива и технологической установки для его осуществления с оценкой термодинамического совершенства технологической схемы с помощью эксергетического КПД (Глава 5).

Несомненную научную новизну представляют результаты теоретического и экспериментального исследования механизмов и кинетики процессов сушки семян рапса и переэтерификации рапсового масла сверхкритическим этиловым спиртом; постановка задачи оптимизации загрузки сушильного барабана семенами рапса по критерию удельных энергозатрат в сушилке с тепловым насосом; эффективные (с позиции термодинамического совершенства) технологические схемы переработки семян масличных культур в белоксодержащие продукты, биодизельное топливо и топливные пеллеты на основе использования тепловых насосов.

Научной новизной обладают и новые экспериментальные данные, полученные соискателем при исследовании свойств и режимов процессов комплексной переработки семян рапса в белоксодержащие продукты, получения биодизельного топлива из рапса и топливных пеллет из рапсового шрота при подготовке энергоносителей в двухступенчатом тепловом насосе (выводы 3, 4 по диссертационной работе).

### **Практическая ценность.**

Работа Сердюковой Н.А. имеет ярко выраженную практическую направленность и определяется решением важной задачи инновационного развития пищевых и химических технологий – создание научного обеспечения процессов и аппаратов комплексной переработки семян рапса в белоксодержащие продукты, дизельное топливо и топливные пеллеты с применением тепловых насосов.

На основе комплекса проведенных экспериментальных исследований автором изучены свойства и режимы технологического процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке, определены рациональные режимы процесса сушки; разработаны новый процесс флюидной сверхкритической CO<sub>2</sub>-экстракции биодизельной смеси в технологи получения очищенного биодизельного топлива (пат. РФ 2714306) и энергосберегающие процессы 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; определены оптимальные значения заполнения барабана по критерию суммарных удельных (на единицу испаряемой влаги) теплоэнергетических затрат в барабанной сушилке для различных значений начальной влажности семян рапса. Разработаны и защищены патентами многосекционная барабанная сушилка (пат. РФ 2649379); маслопресс (пат. РФ 2690332); способы управления процессом переработки семян масличных культур в биодизельное топливо (пат. РФ 2688467) и адаптивной оптимизации процесса переэтерификации рапсового масла сверхкритическим этиловым спиртом по величине удельных материальных и энергетических затрат (пат. РФ 2724889).

Достоверность эффективности научных результатов, полученных в диссертационной работе, – способов получения белоксодержащих продуктов из семян рапса и биодизельного топлива подтверждены производственными испытаниями в ОАО "ВНИИКП" г. Воронеж и ООО "Золотая Нива" Воронежская область (акты внедрения представлены в Приложении (стр. 215 и стр. 219)).

**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.

**Во введении** охарактеризовано современное состояние процессов сушки и хранения зерна, обоснована актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

**В первой главе** приводится анализ современного состояния теории и практики комплексной переработки семян рапса, рассматривается существующее сушильное оборудование и модельные представления процесса сушки, как наиболее энергоемкого процесса пищевой технологии, и процесса переэтерификации растительного масла спиртом, как наиболее важного процесса в химической технологии при получении биодизеля; представлена информация, свидетельствующая о целесообразности применения теплонасосных технологий в различных отраслях промышленности; сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определены пути и методы решения для достижения поставленной цели.

**Во второй главе** приведены экспериментальные исследования процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке АСУ-2.3 с подъемно-лопастной системой. Определены рациональные режимы процесса сушки. Изучены кинетические закономерности процесса и получена эмпирическая модель кривой сушки в широком диапазоне изменения режимных параметров. Решена однопараметрическая задача оптимизации процесса сушки, позволяющая устанавливать степень заполнения сушильного барабана по величине удельных энергозатрат: Представлено аналитическое решение дифференциальных уравнений связанного тепломассопереноса А.В. Лыкова при сушке семян рапса в барабанной сушилке методом разложения в ряды Фурье. Аналитическое решение в рамках сделанных допущений позволяет определять поля температур и влагосодержаний в единичном зерне сферической формы и получать приближенное решение с заданной точностью.

**В третьей главе** разработана линия комплексной переработки масличных семян в белоксодержащие продукты с непосредственным вовлечением в технологический поток как парокompрессионного, так и парожеторного теплового насоса при подготовке теплоносителей разного температурного потенциала. 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. Показано, что изменяя соотношение измельченной выжимки и воды, температуру воды и время перемешивания обеспечивается управление процессом перехода белка и жира из нерастворимой фракции в растворимую, тем самым либо увеличивая количество белка в растворе, либо оставляя его в нерастворимой фракции.

Предложена стратегия управления тепловым насосом, обеспечивающая стабилизацию заданных параметров теплоносителей в конденсаторе и испарителе ТН посредством рекуперативного теплообмена с хладагентом.

**В четвертой главе** предложены аппаратно-технологические схемы производства топливных и кормовых пеллет и биодизельного топлива из семян рапса с применением двухконтурного каскадного ПКТН, который дает дополнительный эффект по минимизации термодинамических потерь и повышению эффективности циклов ПКТН в условиях больших перепадов температур в испарителе и конденсаторе.

Построены термодинамические циклы компрессоров ПКТН и выполнен термодинамический расчет энергетических характеристик рабочих агентов в ступени низкого давления ТН для подготовки охлажденного воздуха в рециркуляционном контуре низкопотенциального теплоносителя и в ступени высокого давления ТН для подготовки перегретого пара в рециркуляционном контуре высокопотенциального теплоносителя.

Установлено, что использование двухступенчатого каскадного ПКТН при подготовке перегретого пара и холодного воздуха в технологии получения пеллет позволяет эффективно использовать электроэнергию, тем самым снизить энергозатраты на 15–20 %; повысить экологическую

безопасность на всех этапах технологического процесса; максимально снизить выброс отработанных теплоносителей в окружающую атмосферу.

Разработан полнорационный рецепт комбикорма для кроликов с пользования кормовых пеллет из рапсового шрота, который позволит частично ликвидировать сложившийся дефицит растительных белковых компонентов.

**В пятой главе** получены экспериментальные данные по кинетике процесса переэтерификации рапсового масла сверхкритическим этиловым спиртом.

Сформулирована и решена задача поиска оптимальной нагрузки реактора переэтерификации рапсового масла этиловым спиртом в сверхкритических условиях. Проведена оптимизация процесса переэтерификации растительного масла сверхкритическим спиртом.

Полученный оптимальный режим процесса переэтерификации использован при разработке способа производства очищенного биодизельного топлива из рапсового масла с применением пароэжекторного теплового насоса.

**В приложении** приведены материалы, подтверждающие практическое внедрение результатов работы.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 27 работ, в том числе 10 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, получено 8 патентов РФ на изобретения.

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

Соискатель Сердюкова Н.А. достаточно корректно использует известные научные методы процессов и аппаратов пищевых производств, процессов и аппаратов химических технологий, системного анализа, математического моделирования и оптимизации, теории автоматического управления для обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Автором изучены и критически анализируются известные достижения и теоретические положения других авторов по вопросам исследования и разработки

энергосберегающих процессов, аппаратов и технологических схем переработки семян рапса в белоксодержащие продукты, биодизельного топлива и топливных пеллет с применением тепловых насосов.

Для подтверждения теоретических положений автором проводятся физические эксперименты, целью которых является исследование свойств и режимов технологических процессов: переэтерификации рапсового масла сверхкритическим этиловым спиртом; комплексной переработки семян рапса в белоксодержащие продукты с применением пароэжекторного и парокомпрессионного тепловых насосов; биодизельного топлива из рапса и топливных пеллет из рапсового шрота с применением тепловых насосов.

Обоснованность полученных результатов Сердюковой Н.А. базируется на удовлетворительной согласованности данных экспериментальных исследований и научных выводов и подтверждается:

- воспроизводимостью экспериментальных данных полученных с применением современных методов измерения, сертифицированных приборов и экспериментального оборудования; их согласованностью с теоретическими результатами;

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

- адекватностью математической модели связанного тепломассопереноса при сушке семян рапса в барабанной сушилке.

### **Критические замечания.**

1. Не вполне понятно, в чем заключается суть модификации известного метода решения дифференциальных уравнений связанного тепломассопереноса А.В. Лыкова с использованием рядов Фурье? Какова погрешность решения дифференциальных уравнений связанного тепломассопереноса с использованием только одного члена ряда Фурье? Оценивалась ли она?

2. Как формулировалась и решалась задача идентификации параметров математической модели по экспериментальным данным? Желательно было бы в параграфе 2.4 привести результаты анализа адекватности

математической модели, описывающей распределение температуры и влагосодержания в единичном зерне рапса.

3. На стр. 75 утверждается, что " Численный эксперимент ...обеспечил наилучшую сходимость расчетных и экспериментальных данных с погрешностью моделирования 12,5%.", но непонятно, каким образом оценивалась погрешность рассогласования расчетных и экспериментальных данных?

4. В диссертации (Глава 3) неубедительно приводятся результаты экспериментального исследования функционирования линий комплексной переработки семян рапса в белоксодержащие продукты с применением парокompрессионного и парожеткторного тепловых насосов? Следовало бы расчетами и экспериментами подтвердить высказывания о том, что 1) "...теплонасосная технология позволила снизить удельные энергозатраты на 15...20% "; 2) "... технология с применением парожеткторного теплового насоса позволила снизить удельные энергозатраты на 5...7% ". Кроме того, в диссертации не указан базовый вариант, с которым сравниваются теплонасосные технологии.

5. Из материалов диссертации не понятно: откуда берутся режимы процесса переэтерификации (схемы на рис. 4.3, 5.5) - вид и соотношение, компонентов, температура, давление, скорость протекания в процесса в разных условиях; почему в одном случае используется метанол, а в другом этанол; какая из рассмотренных схем предпочтительнее с экономической точки зрения; каким образом использовались уравнения (5.1, 5.2).

6. Не совсем понятно как, " ... дополнительные технологические приемы при реализации теплонасосной технология получения биодизельного топлива позволяют: .... повысить качество получаемого дизельного топлива по сравнению с биодизельным топливом, полученным традиционным способом; .... обеспечить стабилизацию параметров в области оптимальных значений, обеспечивающих максимальный выход биодизельного топлива за счет высокой точности и надежности управления; ...", ( стр. 135, 136).

7. Из представленной на 5.5 схеме и её описания не ясно как организуется непрерывный процесс переэтерификации при давлении 150 атм.

и температуре 260 °С: каково должно быть время пребывания в реакторе и за счет каких устройств оно обеспечивается; выдержат ли сальники привода мешалки и на сколько она необходима; за чем нужен насос 9 для выгрузки смеси из реактора и почему перед ним нет запорной арматуры? На сколько целесообразно использовать дорогостоящую сверхкритическую CO<sub>2</sub>-экстракцию для производства биодизеля?

8. Выводы по работе 6 и 7 следовало бы конкретизировать, а именно: 1) указать, какие именно конструктивные решения "...в совершенствовании барабанной сушилки и шнекового пресса ..." позволяют снизить удельные энергозатраты и на сколько (желательно привести количественные оценки)? (вывод 6); 2) "Проведены производственные испытания комплексной переработки ... и способа получения..., которые подтвердили их высокую эффективность". Требуется пояснение, каким образом оценивается "высокая эффективность" (вывод 7)?

9. Технические замечания:

В диссертации отсутствует список принятых обозначений, а по главам диссертации не приводятся выводы и полученные результаты, что затрудняет прочтение и понимание материала, изложенного в диссертации.

По тексту диссертации имеются орфографические и синтаксические ошибки.

В работе встречаются неудачные выражения и непонятные формулы:

Стр. 7, 8.

" – аналитическое решение математической модели, ..."?, "Предложено численно-аналитическое решение математической модели..."?

Стр. 18.

"...качественного функционирования установки на нерасчетном температурном режиме"?

Стр. 28. Непонятная формула: "...

При  $\Delta\theta = \theta - \theta_0 \ll T_{ca}$  ( $T_{ca}$  – температура сушильного агента, К) влажность  $W$  зависит только от  $\Delta\theta$ :

$$W = \frac{\sum C_i \exp(-\beta_i \Delta\theta)}{1 + \sum C_i \exp(-\beta_i \Delta\theta)} \quad (1.6)$$

где  $\beta_i = \varepsilon_i k \theta_0$ .  
..."

Стр. 55.

Схему теоретических и экспериментальных исследований комплексной переработки семян рапса в биодизельное топливо с использованием теплонасосных технологий (Рис. 1.23) трудно прочитать: текст в центральных блоках перевернут на  $180^\circ$ .

Стр. 81 В формуле для определения характера экстремума функции  $R(\xi)$  допущена описка:

$$\frac{d^2 \alpha}{d \xi^2} = \frac{\alpha \xi^2 - \delta}{\xi^4} > 0,$$

На самом деле, необходимо вычислить вторую производную от минимизируемой функции  $R(\xi)$ .

Стр. 83.

На рис. 2.13 по оси ординат не указаны суммарные энергозатраты.

Стр. 88.

Не понятно название Главы 3 диссертации:

### **Глава 3 КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СЕМЯН РАПСА В БЕЛОКСОДЕРЖАЩИЕ ПРОДУКТЫ**

Стр. 95.

Непонятная фраза:

Рациональные режимы технологических операций в области допустимых свойств перерабатываемых семян (табл. 3.2) осуществлялись с помощью компрессорно-конденсаторного агрегата, работающего в режиме теплового насоса, со следующими характеристиками.

Встречаются и другие опiski по тексту диссертации. Складывается впечатление, что у диссертанта было недостаточно времени для редактирования текста диссертации.

Стр. 134.

Непонятная фраза:

"...устанавливают частоту вращения ротора разделительной центрифуги с коррекцией по величине выхода биодизельного топлива 95 – 110 % от количества растительного масла после форпресса."

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы, являющейся законченной научно-квалификационной работой, имеющей существенную научную новизну и практическую ценность в области процессов и аппаратов пищевых производств и химических технологий. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты для проектирования процессов и аппаратов энергосберегающих технологий переработки рапсового жмыха в белоксодержащие продукты с применением парокompрессионного и парожеткторного тепловых насосов, производства биодизельного топлива из рапса и топливных пеллет из рапсового шрота при двухконтурном каскадном подключении парокompрессионного теплового насоса.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований соискателем Сердюковой Н.А. разработаны: 1) малоотходные технологии переработки рапсового жмыха в белоксодержащие продукты с применением парокompрессионного и парожеткторного тепловых насосов, энергосберегающие технологические схемы производства биодизельного топлива из рапса и топливных пеллет из рапсового шрота при двухконтурном каскадном подключении парокompрессионного теплового насоса (эксергетический КПД на 4...5 % выше, чем у известных технологий); 2) система оптимизации непрерывного процесса переэтерификации по критерию удельных сырьевых и энергетических потерь, обеспечивающая экономию сырья и энергии в среднем на 8...10 %;

3) математическая модель процесса сушки семян рапса в барабанной сушилке; 4) конструктивные усовершенствования барабанной сушилки и шнекового пресса, позволяющие снизить удельные энергозатраты.

Предложенные автором диссертации решения аргументированы и критически оценены по сравнению с другими известными решениями, технологии комплексной переработки рапсового масла в белоксодержащие продукты и биодизельное топливо успешно прошли производственные испытания в ОАО "ВНИИКП" г. Воронеж и ООО "Золотая Нива" Воронежская область.

Все теоретические положения диссертации достаточно полно отражены в 10 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ, апробированы на Международных и Всероссийских конференциях. Новизна технических решений защищена 8 патентами на изобретения.

Положения, выдвигаемые на защиту соискателем Сердюковой Н.А., свидетельствуют о личном вкладе автора диссертации в науку.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

### **Заключение**

Диссертационная работа Сердюковой Натальи Алексеевны «Научное обеспечение комплексной переработки семян рапса с использованием теплонасосных технологий», является законченным научным исследованием. В ней, на основании выполненных автором исследований, изложены научно обоснованные технические решения, внедрение которых позволит успешно реализовать поставленные научно-практические задачи, направленных на создание энергоэффективных и экологически безопасных технологий переработки семян рапса в белоксодержащие продукты, биодизельное топливо и топливные пеллеты с использованием теплонасосных технологий. Работа в достаточной мере отражена в периодической печати и апробирована на представительных научных форумах.

Таким образом, выполненная диссертационная работа полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор

**Сердюкова Наталья Алексеевна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по двум специальностям 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств» и 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий».

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», доктор технических наук

(05.17.08, 05.13.01), профессор



Д.С. Дворецкий

31.08.20

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»  
392000, г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1  
Тел. 8 (4752) 639442, 637815  
E-mail: dvoretsky@tambov.ru

Подпись удостоверяю

Ученый секретарь ФГБОУ ВО «ТГТУ»

к.т.н



Г.В. Мозгова

31.08.2020