

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет харчових технологій

**МУШТРУК МИХАЙЛО МИХАЙЛОВИЧ**

УДК 662.767.2:637.043

**ОБҐРУНТУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАДНАННЯ  
ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА РІДКОГО БІОПАЛИВА  
З ТЕХНІЧНИХ ТВАРИННИХ ЖИРІВ**

05.18.12 - процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та  
фармацевтичних виробництв

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Кабінету Міністрів України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Сухенко Юрій Григорович,**  
Національний університет біоресурсів і  
природокористування України,  
завідувач кафедри процесів і обладнання  
переробки продукції АПК

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Серьогін Олександр Олександрович,**  
Національний університет харчових технологій,  
завідувач кафедри теоретичної механіки та  
ресурсоощадних технологій

кандидат технічних наук, доцент  
**Ковалишин Степан Йосипович,**  
Львівський національний аграрний університет,  
декан факультету механіки і енергетики, завідувач  
кафедри тракторів і автомобілів

Захист відбудеться "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2014 року о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02 Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, аудиторія \_\_\_\_\_.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2014 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02,  
к.т.н., доц.



Л.О. Кривопляс-Володіна

## ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

**Актуальність теми.** В усьому світі витрати мінеральних енергоносіїв, зокрема моторного палива нафтового походження, постійно зростають. Задовольнити потреби виробників продукції у паливі в окремих країнах стає все важче і головне, дорожче. В останні роки досить актуальною стала загальносвітова проблема заміни нафти, з якої виробляється близько 99% моторних палив, на інші альтернативні види сировини.

Такою альтернативою є продукти із рослинних і тваринних жирів під назвою дизельне біопаливо. На м'ясопереробних підприємствах України та у малих фермерських господарствах щорічно накопичуються близько 200 тис. т. тваринного жиру і жирових відходів.

Таким чином, підвищення ефективності процесів переробки технічних тваринних жирів (ТТЖ) та жирових відходів харчових і переробних виробництв для виробництва з них біологічного палива є актуальною темою досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами.** Виконані дослідження пов'язані з виконанням ряду Законів України, постанов і розпоряджень Кабінету Міністрів України, Президії НАН України, пов'язаних з виробництвом альтернативних палив, прийнятих за останні 15 років та з напрямками наукових досліджень НУБіП України, зокрема, з основним напрямком діяльності НДІ техніки і технологій Технічного ННІ – розробкою механізованих технологій, технологічних процесів та засобів механізації для конкурентоспроможного виробництва і використання біопалив.

**Мета роботи і завдання досліджень.** *Мета досліджень* – обґрунтування технологій і технічних характеристик обладнання для виробництва дизельного біопалива з ТТЖ та жирових відходів переробки тваринної сировини.

Досягнення поставленої мети вимагало вирішення таких завдань:

1. Провести аналіз процесів та конструкцій обладнання для перетворення ТТЖ у дизельне біопаливо.

2. Дослідити ефективні процеси підготовки і переробки жировмісної сировини, їх апаратне забезпечення, теоретично і експериментально обґрунтувати процес виробництва рідкого біопалива з ТТЖ.

3. Розробити математичну модель процесу виробництва дизельного біопалива з ТТЖ і жирових відходів і на цій основі розробити алгоритм проектування і раціональну конструкцію реактора та засоби механізації перемішування реагентів для забезпечення високого виходу і якості палива.

4. Визначити раціональні технологічні режими переробки ТТЖ у дизельне біопаливо і запропонувати високопродуктивне технологічне обладнання для реалізації процесу.

5. Дослідити показники якості отриманих зразків дизельного біопалива.

6. Розробити дослідно-промислову технологію виробництва дизельного біопалива та її машинно-апаратне забезпечення, рекомендації щодо застосування і розрахувати очікувану техніко-економічну ефективність від впровадження.

*Об'єкт досліджень* – процеси перетворення ТТЖ та жирових відходів переробки тваринної сировини у рідке біопаливо.

*Предмет дослідження* – реактор з турбінним змішувачем для виробництва рідкого біопалива з ТТЖ і жировмісних відходів харчових виробництв.

*Методи наукових досліджень* – сучасні з використанням ефективних вимірювальних пристроїв, а також розрахунково-експериментальні з використанням фізичного і математичного моделювання процесів виробництва біопалива на підґрунті фізико-хімічної механіки матеріалів, гідродинаміки рідких середовищ та з застосуванням обчислювальної техніки.

*Інформаційну базу досліджень* склали дані вітчизняних і зарубіжних друкованих та електронних ЗМІ, огляди і дослідження провідних організацій в галузі відновлювальної біоенергетики, матеріали виставок і конференцій, законодавчі акти та нормативна документація.

Експериментальні дослідження проведено в лабораторних та виробничих умовах з використанням методів планування повнофакторних експериментів, обґрунтованих стандартних і розроблених автором оригінальних методик. Для обробки отриманих експериментальних даних використані методи математичної статистики, зокрема дисперсійний і регресійний аналізи, застосовані спеціалізовані комп'ютерні програми. Адекватність отриманих математичних моделей оцінювалась за загальноприйнятими правилами.

Випробування розроблених технологічних процесів і нового обладнання проведено на дослідно-промисловому зразку мобільного заводу з виробництва дизельного біопалива. Державні приймальні випробування заводу з виробництва дизельного біопалива проведено за стандартними методиками УкрНДІПВТ ім. Л.Погорілого. На мобільний завод затверджені ТУ У 28.9-21515955-001:2014 р. та позитивний висновок державної санітарно-епідеміологічної експертизи.

Наукову-виробничу перевірку результатів досліджень здійснено на впровадженому мобільному заводі з виробництва дизельного біопалива в с. Рацево Чигиринського району Черкаської області у «Чигиринській аграрній компанії».

Розробка удостоєна Золотої медалі Мінагрополітики і продовольства України на виставці «Агро-2011».

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в наступному:

- теоретично обґрунтовані передумови удосконалення процесу виробництва рідкого біопалива з ТТЖ і жировмісних відходів харчових виробництв і продукції тваринництва, що надає можливість забезпечити показники якості біопалива за ДСТУ 6081:2009 та EN 14214:2003;

- встановлено вплив конструктивних параметрів турбінних змішувачів і режимів гідродинамічного перемішування реагентів на показники перетворення ТТЖ і жировмісних відходів у дизельне біопаливо;

- розроблено математичну модель перетворення ТТЖ і жировмісних відходів у дизельне біопаливо та доведено доцільність її застосування при проектуванні реакторів періодичної дії з механічними змішувачами;

- визначені моделі турбулентності і їх параметри, які адекватно характеризують поля швидкостей у реакторах з турбінними мішалками та забезпечують адекватний опис швидкостей дисипації кінетичної енергії у

різних технологічних зонах реакторів для виробництва біопалив з ТТЖ і жирових відходів;

- встановлено, що зміна відстані між мішалками і їх діаметрів, призводить до істотної зміни швидкості дисипації кінетичної енергії, що дозволяє однозначно визначити місце введення спирто-каталітичного розчину і впливати на ступінь диспергування реагентів, збільшуючи поверхню контакту фаз та вихід кінцевого продукту;

- запропоноване співвідношення для визначення критерію потужності для реакторів з двоюрисними шестилопатовими турбінними мішалками і чотирма відбивними перегородками. Встановлені раціональні співвідношення між діаметрами мішалок і відстанню між ними для забезпечення максимального виходу біопалива з ТТЖ і жирових відходів харчових і переробних виробництв.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

- можливість проектувати обладнання різної продуктивності для переробки жирової сировини різного походження та з різними фізико-хіміко-механічними властивостями;

- забезпечення високого виходу палива та його відповідності діючим стандартам;

- можливість використовувати технологію і механізоване обладнання на переробних, харчових і сільськогосподарських підприємствах різної потужності;

- можливість забезпечувати переробні, харчові і сільськогосподарські підприємства власним паливом;

- можливість використовувати жировмісну сировину з високими кислотними числами для отримання палива;

- результати роботи знайдуть використання у навчальному процесі при читанні лекцій, виконанні лабораторних робіт та в дипломному проектуванні при підготовці фахівців для переробних і харчових виробництв.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідались на 78 Міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів НУХТ (м. Київ, 2010р.), IV Всеукраїнській науковій конференції студентів і молодих вчених університету Україна (м. Київ, 2011р.), Міжнародній науково – практичній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів НУБіП (м. Київ, 2011-2013рр.). VIII Міжнародній науковій конференції студентів і аспірантів «Техніка і технологія харчових виробництв» (м. Могильов, 2011р.), V Всеукраїнській науковій конференції студентів і молодих вчених університету Україна (м. Київ, 2012р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Удосконалення процесів і обладнання-запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» НУХТ (м. Київ, 2012р.); VI Міжнародній науковій конференції «Екобіотехнології та біопалива в АПК Energia 2012» (Київ-Люблін-Сімферополь-Львів, 2012 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів НУБіП (м. Київ, 2013р.), XIV Міжнародній науковій конференції «Наукові-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської

техніки і технологій» (УкрНДІПВТ ім. Л.Погорілого) (сmt. Дослідницьке, 2013р) та ін.

**Публікації.** Основні положення та результати дисертації опубліковано у 12 наукових працях, з яких 11 статей у фахових виданнях, 1-стаття у закордонному фаховому виданні, 30 тез доповідей на міжнародних конференціях і 4 патенти України на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку із 166 бібліографічних джерел та 13 додатків. Загальний обсяг роботи складає 234 сторінок, у тому числі основна частина 145 сторінок і містить також 20 таблиць і 55 рисунків.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

**У першому розділі** розглянутий стан розвитку виробництва рідкого біопалива, сировинних баз, особливостей виробництва та застосування метилових ефірів жирних кислот з ТТЖ. Встановлені актуальні напрямки розробки технології і технологічного обладнання для виробництва дизельного біопалива з ТТЖ.

Основи теорії і результати експериментальних досліджень технологічних процесів, машин і обладнання для виробництва та використання дизельного та інших видів біопалива в умовах АПК детально представлені в наукових працях М. І. Віршовки, В. А. Войтова, Г. А. Голуба, Я. С. Гукова, В. О. Дубровіна, Г. М. Забарного, Б.Ф. Кочірка, С. Й. Ковалишина, В. І. Кравчука, М. К. Лінника, М. Д. Мельничука, В. Г. Мироненка, А. І. Окочі, С. І. Пастушенка, Г. С. Ратушняка, В. Г. Семенова, О. О. Сьогіна, Ю.Г. Сухенка, Г. Е. Топиліна, В. А. Ясенецького та ін.

Однак, дослідженням технологій і обладнання для виробництва рідкого біопалива з ТТЖ і жирних відходів переробки тваринної сировини, що забезпечує зниження собівартості та підвищення виходу і якості кінцевого продукту (дизельного біопалива) приділено мало уваги, хоча об'єм сировини достатньо великий. Тому актуальність вибраного напрямку досліджень не викликає сумніву.

**У другому розділі** подано програму експериментальних досліджень, описано основні методики їх проведення та обробки результатів експериментів. Окремо поданий аналіз показників якості ТТЖ і жирних відходів продукції тваринництва та рідкого біопалива і методів їх визначення, охарактеризовано оригінальні лабораторні експериментальні установки, прилади й обладнання.

Експериментальні дослідження проводились для оцінки впливу основних параметрів процесів попередньої підготовки ТТЖ, перетворення ТТЖ метанолом з кислотним каталізатором  $H_2SO_4$  та перетворення підготовленого жиру метанолом з лужним каталізатором  $KOH$  на кількість та якість метилових ефірів жирних кислот. Для проведення досліджень використовували розроблену і виготовлену лабораторну установку, що дозволяє змінювати за планом повного факторного експерименту типу  $2^4$  склад реагентів, регулювати



Розроблена також методика дослідження характеристик біопалива, ТТЖ і жировмісних відходів, яка поєднує стандартні і оригінальні способи випробувань.

При дослідженні процесу перетворення ТТЖ застосовували методи експериментально-статистичного моделювання (ЕСМ). Для цього був використаний план експерименту  $2^4$  з взаємозалежними змінними. Оцінка якості дизельного біопалива проводилась у відповідності з ДСТУ 6081:2009 та EN 14214:2003.

**В третьому розділі** приведено результати дослідження процесу перетворення ТТЖ і жирових відходів продукції тваринництва у дизельне біопаливо по циклічній технології. За результатами експериментальних досліджень встановлені визначальні чинники, враховані при проектуванні реактора: вид сировини, вміст вільних жирних кислот (ВЖК) в сировині, тип каталізатора і спирту, раціональні масові співвідношення метанол/ТТЖ, каталізатор/ТТЖ, бензол/ТТЖ, спосіб перемішування, оптимальна температура і час процесу.

Для проведення досліджень використовувалася лабораторна установка (рис. 1).

В якості сировини для виробництва дизельного біопалива в лабораторних дослідженнях використовувались технічний тваринний, топлений харчовий і тваринний кормовий жири.

Показано, що жирові відходи, що накопичуються у жировловачах м'ясопереробних підприємств, пройшовши попередню підготовку, можуть також відповідати вимогам до ТТЖ.

Вивчено фізико-хімічний і жирно - кислотний склад широкої номенклатури тваринних жирів і жирових відходів, як потенційної сировини для отримання рідкого біопалива.

Дослідження проводили з використанням ТТЖ, метанолу та лужних каталізаторів при їх постійному активному перемішуванні за температури  $60^{\circ}\text{C}$ , протягом 60 хв (рис. 3), що дало можливість визначити раціональну кількість каталізатора в реакції переестерифікації.

Результати досліджень показали, що ступінь перетворення жирів у паливо значно зростає зі збільшенням концентрації каталізатора в діапазоні 0,5%-1%. Більш високі концентрації лужного каталізатора можуть прискорити алкоголіз жиру, але, в більшості випадків, вони розщеплюють утворені ефіри і реагують з ними з утворенням мила, що викликає їх великі втрати на етапах розділення фаз та очищення рідкого біопалива.

Проведено дослідження з визначення оптимального температурного режиму процесу переестерифікації тригліцеридів ТТЖ при використанні різних спиртів.

Досліди проводили при постійному перемішуванні реагентів і молярних співвідношеннях етилового та метилового спиртів до жиру 6:1 протягом 60 хв (рис. 4).



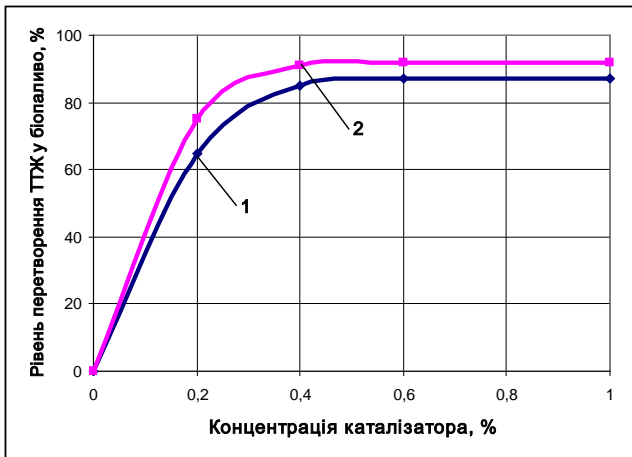


Рис. 3. Визначення раціональної концентрації гомогенного лужного каталізатора:  
1 – NaOH, 2 – KOH.

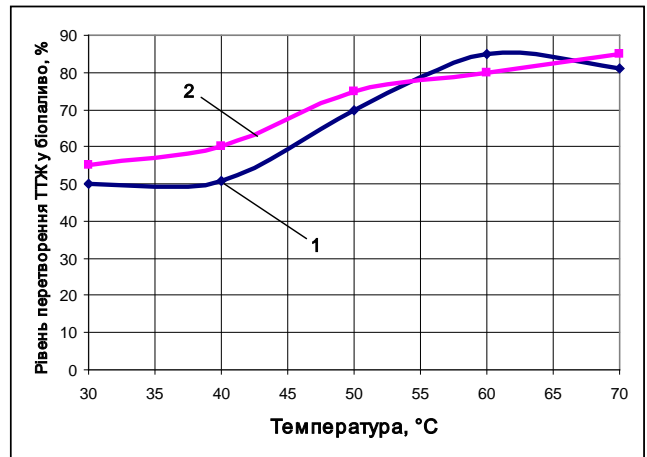


Рис. 4. Вихід палива у реакції перетворення ТТЖ з використанням етилового та метилового спиртів за різних температур:  
1 – метанол, 2 – етанол.

Очевидно (рис. 4), за більш високих температур вихід палива збільшується. Причиною може бути ендотермічна природа процесу. Так, проведенням процесу переестерифікації за температур, близьких до температур кипіння застосовуваних спиртів, забезпечується максимальний вихід рідкого біопалива. Використання більш низьких температурних режимів вимагає великих затрат часу для досягнення потрібного рівня перетворення тригліцеридів у паливо. Одним з найважливіших змінних чинників, що впливають на ступень перетворення жирів в ефіри, є співвідношення молярної концентрації спирту і тригліцеридів. При молярному співвідношенні спирту до ТТЖ вище стехіометричного, надлишок спирту діє як каталізатор і зміщує зворотну реакцію алкоголізу у бік виходу біопалива.

Визначені оптимальні молярні співвідношення різних спиртів і тригліцеридів. Реакції проводили при постійному активному перемішуванні реагентів за температур, близьких до температури кипіння метилового і етилового спиртів протягом 60 хв. Концентрація каталізатора KOH була 0,5 %.

З підвищенням рівня молярної концентрації застосовуваного спирту до молярної концентрації жиру ступінь перетворення ТТЖ у паливо збільшувався, завдяки додатковому каталізу реакції спиртом.

Так, для метанолу та етанолу найбільш оптимальними молярними співвідношеннями є, відповідно, 6:1 та 9:1. Для переестерифікації з лужними каталізаторами тригліцериди і спирти повинні бути обезводнені, тому що присутність води в реакційній суміші викликає реакцію її омилення, яка супроводжується утворенням нерозчинних гелів. Мило знижує повноту перетворення тригліцеридів у дизельне біопаливо, перешкоджає розділенню фаз та спричиняє значні втрати продукту при очищенні.

Переестерифікація тваринних жирів різними спиртами при підібраних раціональних технічних умовах забезпечує максимальне перетворення ТТЖ в метилові ефіри ефіри жирних кислот (рис. 5).

Результати експериментальних досліджень підтверджують, що процес трансформації низькоякісних тваринних жирів у дизельне біопаливо треба вести за температур близьких до температури кипіння застосовуваних спиртів при молярних співвідношеннях спиртів до тваринних жирів у межах 6:1–9:1, концентрації кислотний каталізатора ( $H_2SO_4$ ) при естерифікації 1-15% і лужного (KOH) при переестерифікації 0,5 - 1%.

На рис. 6 поданий вихід рідкого біопалива при застосуванні різних методів перемішування. Через 10 хвилин перемішування ультразвуком реакція пройшла повністю. При гідродинамічній кавітації реакція за цей же час пройшла на 85% і лише на 71% при механічному перемішуванні. Але вже через 30 хвилин за умов гідродинамічної кавітації реакція пройшла на 100%, а при механічному на 80% .

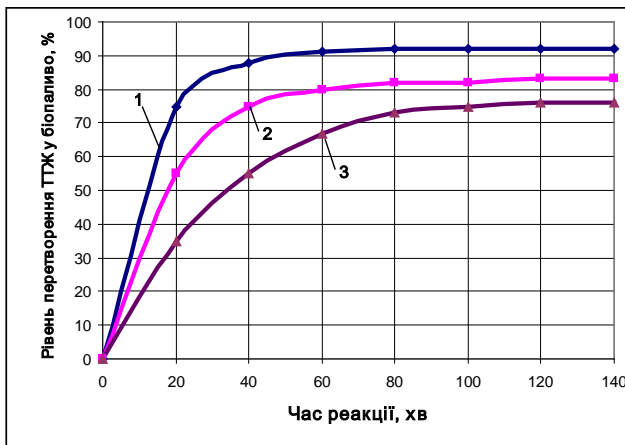


Рис. 5. Кінетика перетворення ТТЖ у паливо під дією різних спиртів: 1-метанол, 2-етанол, 3-ізопропанол.

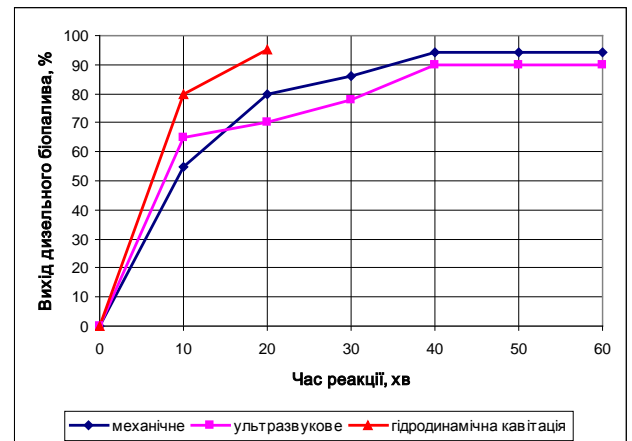


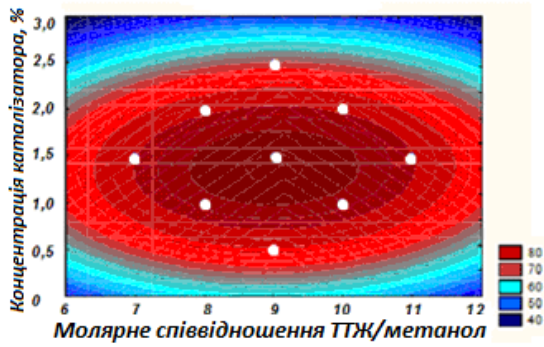
Рис. 6. Ефективність перетворення ТТЖ у дизельне біопаливо за різних умов перемішування.

Використавши результати досліджень, визначили оптимальні умови для проведення процесу метанолізу ТТЖ з максимальним виходом рідкого біопалива. Модель, яка описує перетворення жиру у паливо, можна подати у вигляді:

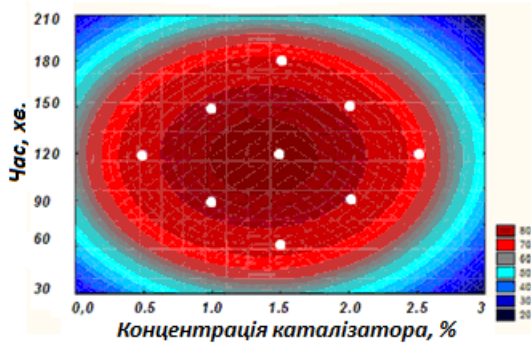
$$Y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2,$$

де  $Y$  – вихід палива,  $x_1$  та  $x_2$  – впливаючі змінні чинники,  $b_0, b_1, b_2$  – коефіцієнти, що визначені за допомогою експериментів. Від'ємні коефіцієнти, отримані для змінних, відбивають зниження виходу основного продукту.

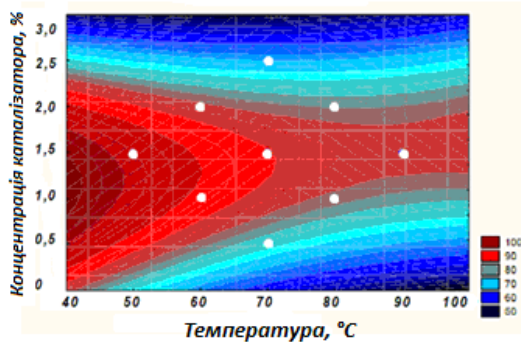
Досліджені наступні змінні (KOH-молярне співвідношення жир/метанол; час- молярне співвідношення жир/метанол; час-кількість каталізатора KOH; час-температура; кількість каталізатора KOH-температура; молярне співвідношення жир/метанол-температура), які мають вплив на процес виробництва рідкого біопалива. За результатами моделювання побудовані поверхні відгуку і контури цих поверхонь, в залежності від виходу біопалива, як функції двох змінних, що дає можливість оптимізувати процес перетворення ТТЖ у дизельне біопалива. Поперечний переріз поверхонь відгуку дозволяє оцінити вплив змінних чинників на вихід палива (рис. 7).



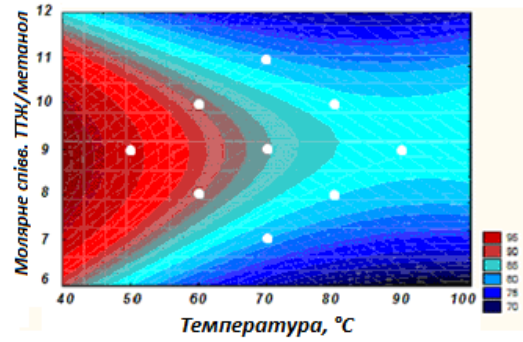
а) вплив концентрації каталізатора і молярного співвідношення жир/метанол



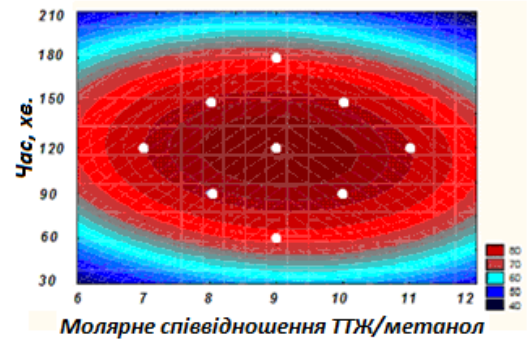
б) вплив часу реакції і концентрації каталізатора



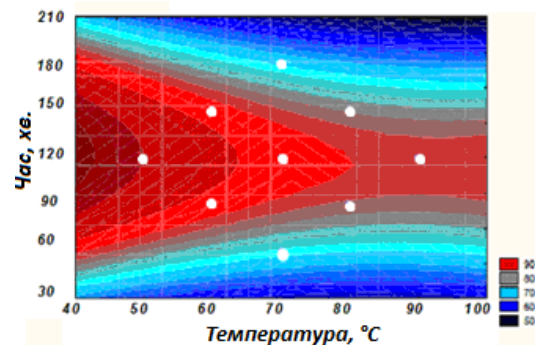
в) вплив концентрації каталізатора і температури



г) вплив співвідношення жир/метанол і температури



г) вплив часу реакції і молярного співвідношення жир/метанол



д) вплив часу реакції і температури

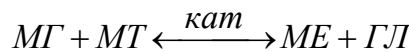
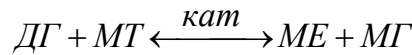
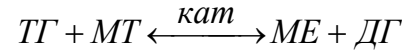
Рис. 7. Переріз поверхонь відгуку, як функції масового виходу рідкого біопалива з ТТЖ.

За результатами досліджень обрані оптимальні параметри проведення реакції переестерифікації: кількість метанолу – 20 % до маси ТТЖ, каталізатора КОН 1 – 1,5 % від маси ТТЖ, температура ведення процесу 60°C при його тривалості 60-70 хвилин.

У четвертому розділі математично змодельований технологічний процес перетворення ТТЖ розчином кислотного каталізатора  $H_2SO_4$  у метанолі при виробництві рідкого біопалива в реакторі періодичної дії з урахуванням фізико-хімічної механіки сировини, реагентів та визначено раціональні конструктивно-технологічні параметри реактора періодичної дії з двохярусним турбінним змішувачем.

Розроблено комп'ютерну модель технологічного процесу перетворення ТТЖ у дизельне біопаливо, яка складається з декількох взаємопов'язаних підпрограм:

– перша визначає змінні, які регулюють процес перетворення ТТЖ в дизельне біопаливо; друга аналізує чинники, які залежать від умов процесу перетворення ТТЖ у дизельне біопаливо, в першу чергу температурні; третя розраховує кінетичні моделі утворення ефірів жирних кислот (рідкого біопалива); четверта описує теплообмін в проєктованому реакторі, здійснює вибір граничних умов процесу та продуктивність перетворення жирів в залежності від умов ведення процесу; п'ята визначає механічні параметри проєктованого реактора.



Отримано рівняння загальної швидкості перетворення ТТЖ в дизельне біопаливо:

$$r_{ME} = [KT] \left\{ \frac{[TG][KT][MT] - K_A[ME][DG]}{A + \frac{[MT]}{K_1}} + \frac{[DG][MT] - K_B[ME][MG]}{B + \frac{[MT]}{K_4}} + \frac{[MG][MT] - K_C[ME][GL]}{B + \frac{[MT]}{K_7}} \right\}$$

де: ТГ – тригліцериди, ДГ – дигліцериди, МГ – моногліцериди, КТ – сірчана кислота ( $H_2SO_4$ ), МТ – метанол, ГЛ – гліцерин; МЕ – метиловий ефір, А = 1,69 (моль/л)<sup>2</sup> год., Б = 0,14 моль<sup>2</sup> · год/л, В = 0,067 моль<sup>2</sup> · год/л., К<sub>А</sub> = 135, К<sub>Б</sub> = 12, К<sub>В</sub> = 0,84, К<sub>1</sub>, К<sub>4</sub>, К<sub>7</sub> – молярна концентрація метанолу, л/моль · год.

Після підстановки даних рівняння швидкості перетворення ТТЖ в біопаливо матиме вигляд:

$$r_{ME} = [KT] \left\{ \frac{[TG][KT][MT] - 135[ME][DG]}{1,69 + 0,1142[MT]} + \frac{[DG][MT] - 12[ME][MG]}{0,14 + 0,107[MT]} + \frac{[MG][MT] - 0,84[ME][GL]}{0,067 + 0,0093[MT]} \right\}$$

Подано методику розрахунку поля швидкостей перемішування реагентів в реакторах з механічними мішалками, що полягає в чисельному рішенні системи диференціальних рівнянь збереження маси і імпульсу з частинними похідними в циліндричних координатах в тривимірній постановці завдання:

$$\frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rU\phi) + \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (V\phi) + \rho \frac{\partial}{\partial z} (W\phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \Gamma_\phi r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\Gamma_\phi}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_\phi$$

Рівняння	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
Нерозривності	1	0	0
Рух	U	$\mu_M + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \Gamma_\phi r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \Gamma_\phi r \frac{\partial (V/r)}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial W}{\partial z} \right) - \frac{2\Gamma_\phi}{r^2} \frac{\partial V}{\partial \theta} - \frac{2\Gamma_\phi U}{r^2} + \frac{\rho V^2}{r}$
	V	$\mu_M + \mu_t$	$-\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\Gamma_\phi}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\Gamma_\phi}{r} \frac{\partial W}{\partial z} \right) + \Gamma_\phi \frac{\partial (V/r)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\Gamma_\phi V) - \frac{\rho UV}{r} + \frac{\Gamma_\phi}{r^2} \frac{\partial U}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{2\Gamma_\phi U}{r} \right)$

	$W$	$\mu_m + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \Gamma_\phi r \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial W}{\partial z} \right)$
--	-----	-----------------	--

де:  $r, \theta, z$  – координати;  $p$  – тиск;  $\rho$  – густина реакційної суміші в реакторі,  $\text{кг/м}^3$ ;  $W$  – осьова складова швидкості,  $\text{м/с}$ ;  $V$  – тангенціальна складова швидкості,  $\text{м/с}$ ;  $U$  – радіальна складова швидкості,  $\text{м/с}$ ;  $\mu_m$  – динамічний коефіцієнт молекулярної в'язкості,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\mu_t$  – динамічний коефіцієнт турбулентної в'язкості,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\phi$  – величина (швидкість, скаляр);  $\Gamma_\phi$  – являє собою коефіцієнт переносу (ламінарної/турбулентної в'язкостей, коефіцієнт дифузії і т. п.);  $S_\phi$  – сили, що не включені в конвективну і дифузійну частини, а також додаткові сили.

В реакторах з швидкохідними мішалками можна виділити дві характерні області: це область, що прилягає до мішалки, яка характеризується великим градієнтом швидкості, і область, що розповсюджується до стінок апарата. Досліджено необхідні вимоги до розрахункових сіток для моделювання полів швидкості і розмірів осередків: для збіжності рішення необхідно, щоб крок сітки в області, що примикає до мішалки, був  $\leq 3$  мм, а поза нею –  $\leq 8$  мм.

Адекватність опису поля швидкостей перевірялася для апаратів з двома типами перемішувальних пристроїв: 1 – з шестилопатевою стандартною відкритою турбінною мішалкою, 2 – з двохярусними відкритими турбінними мішалками. Для них відомі кількісні експериментальні дані у вигляді профілів складових швидкостей (осьової, радіальної і тангенціальної), критеріїв потужності.

На рис. 8 представлені експериментальні і розрахункові величини критерію потужності в залежності від відцентрового числа  $Re_c$  для реактора з відкритою турбінною мішалкою і чотирма відбивними перегородками  $b = D/12$  (рис.13), з яких видно, що розбіжність між ними не перевищує 8%. Для цього ж реактора був визначений критерій потужності для різних діаметрів мішалки. У результаті виявилось, що із збільшенням діаметра мішалки у 2 рази, критерій потужності збільшується у 1,5 рази (рис. 9).

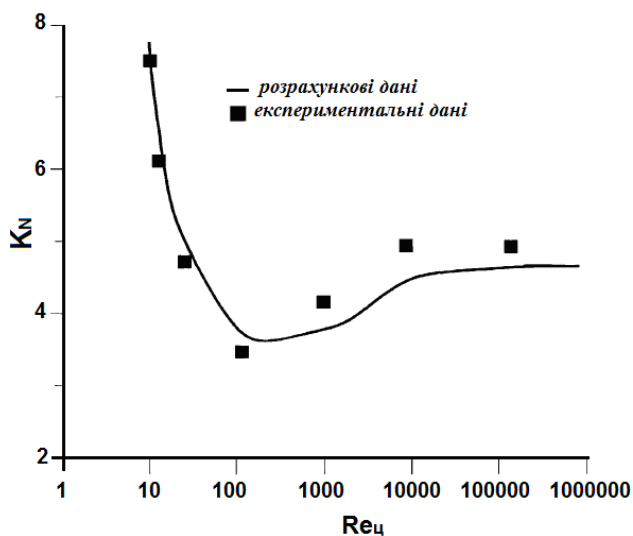


Рис. 8. Залежність критерію потужності  $K_N$  для реактора з відкритою турбінною мішалкою і чотирма відбивними перегородками від відцентрового числа Рейнольдса.

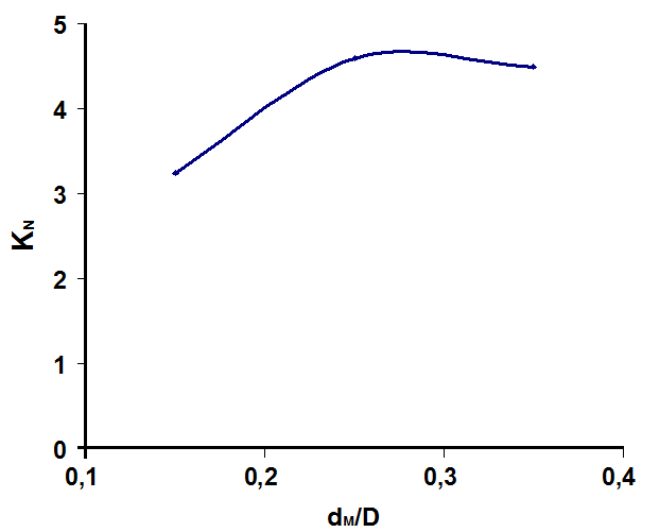


Рис. 9. Залежність критерію потужності  $K_N$  від симплексу  $d_m/D$  для реактора однією відкритою турбінною мішалкою на валу, ( $D$  – внутрішній діаметр реактора,  $d_m$  – діаметр мішалки).

На основі розробленої методики, з використанням програмного забезпечення Flow Vision 2.5, були досліджені сім реакторів з внутрішнім діаметром  $D = 2,06$  м (рис. 10) і чотири рівномірно розташованими відбивними перегородками та двома відкритими турбінними мішалками на одному валу. Розглядали можливі варіанти зміни конструкцій перемішувальних пристроїв, які могли б бути використані в реакторах для збільшення виходу рідкого біопалива. У зв'язку з цим змінювали діаметри мішалок  $d_m$  в межах  $(0,15 \div 0,35)D$  і відстань між ними в межах  $(1 \div 2,5)d_m$  з метою аналізу змін критерію потужності і швидкості дисипації кінетичної енергії.

На рис.10 наведені розподіл швидкостей потоків у трьох з семи розглянутих апаратів з мішалками діаметром  $d_m = 0,264D$  і відстанями між ними  $(1 \div 2,5) d_m$ . При відстані між мішалками  $C_{1-2} = d_m$  реалізується, так звана, об'єднана структура потоку, а при  $C_{1-2} = 2,5 d_m$  - паралельна структура потоку. При досягненні відстані між мішалками, яка більша за їх діаметр, взаємодія між потоками верхньої і нижньої мішалок слабшає і призводить до поділу об'єму реактора на дві рівні симетричні частини по висоті. Також можна відмітити, що зі збільшенням відстані між мішалками утворюється більше циркуляційних контурів.

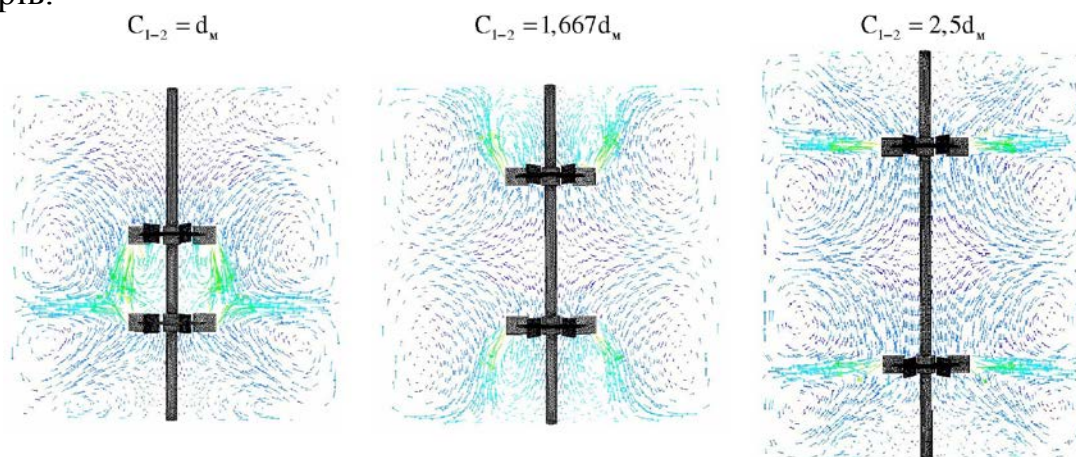


Рис.10. Розподіл потоків в апаратах з двохярусними відкритими турбінними мішалками

Максимальне значення швидкості дисипації кінетичної енергії визначає інтенсивність змішування компонентів реагуючої суміші на мікрорівні, що забезпечує виникнення їх дрібномасштабних зсувних деформацій і, як наслідок, отримання тонкодисперсних емульсій і суспензій. Проведений аналіз розподілу швидкості дисипації кінетичної енергії в семи розглянутих апаратах дозволив зробити висновок, що збільшення відстані між мішалками призводить до збільшення швидкості дисипації кінетичної енергії (рис.11) і, при  $C_{1-2} = 1,7d_m$ , досягається її граничне значення.

Тут також необхідно врахувати той факт, що збільшення швидкості дисипації можна досягти і при малих діаметрах мішалок, що видно з рис. 12. Однак, необхідно пам'ятати, що збільшення  $C_{1-2}$  призводить до утворення не взаємодіючих потоків, що призводить до появи застійних зон, таким чином, ці ефекти треба розглядати в комплексі.

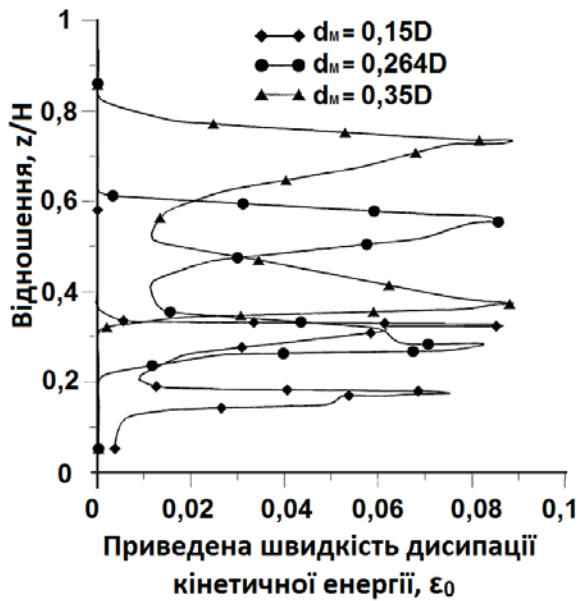


Рис. 11. Приведена швидкість дисипації кінетичної енергії  $\epsilon$ , по висоті реактора на відстані рівній  $r_M$  від центральної вісі валу для трьох реакторів з двохярусними мішалками:  $d_M = (0,15 \div 0,35)D$  і відстань між ними  $C_{1-2} = d_M$ ;  $H$ - висота апарата,  $z$  – змінна координата по висоті.

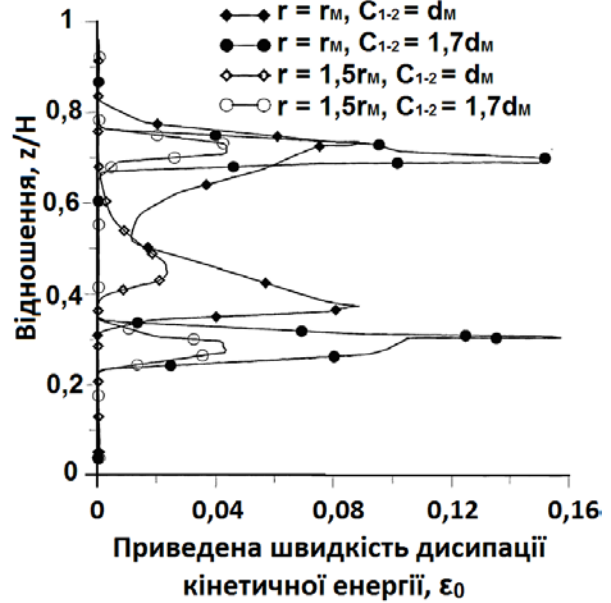


Рис. 12. Приведена швидкість дисипації кінетичної енергії  $\epsilon$ , по висоті реактора на відстані рівній  $r_M$  і  $1,5 r_M$  від центральної вісі валу двох реакторів з двохярусними мішалками:  $d_M = 0,35D$  і відстанями між ними  $C_{1-2} = d_M$  та  $1,7d_M$ ;  $H$ - висота апарата,  $z$  – змінна координата по висоті.

Обґрунтовано раціональні конструктивно-технологічні параметри реактора періодичної дії з турбінним змішувачем для переробки ТТЖ у біопаливо. При визначенні особливостей конструкції реактора враховано необхідність перемішування складових реагентів без застійних зон, забезпечення безперешкодного осадження гліцеролової фази та періодичного зливання проміжних і кінцевих продуктів. Конструктивну схему реактора подано на рис. 13.

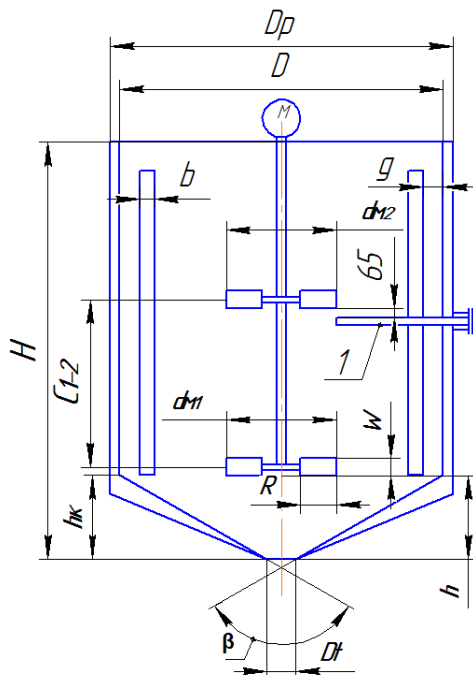


Рис.13. Загальний вигляд реактора з турбінним змішувачем:  $D$ -діаметр реактора;  $D_p$ -діаметр водяної сорочки;  $H$ -висота реактора;  $b$ -ширина перегородок;  $g$ -відстань між стінкою резервуара і перегородкою;  $h_k$ -висота конусної частини реактора;  $W$ -ширина лопаті;  $R$ -довжина лопаті;  $d_{M1}$ ,  $d_{M2}$ , - діаметр мішалки;  $Dt$ -діаметр зливного клапана,  $h$ -висота встановлення змішувача,  $\beta$ -кут при вершині конічного днища,  $C_{1-2}$  – відстань між мішалками,  $1$  – патрубок для введення каталізатора (в область з максимальним рівнем дисипації кінетичної енергії).

На основі власних досліджень і рекомендацій, що впливають з наукових праць попередників, та з урахуванням особливостей технологічного процесу перетворення ТТЖ в дизельне біопаливо з

застосуванням кислотного каталізу, розроблений алгоритм проектування реакторів періодичної дії для виробництва біопалива і запропонований порядок розрахунку їх конструктивних параметрів (табл. 1).

Методику використано для розрахунку конструктивних параметрів реактора з турбінним змішувачем для мобільного заводу з виробництва рідкого біопалива продуктивністю до 3,5 т/добу.

Таблиця 1.

**Алгоритм визначення конструктивних параметрів реактора з турбінним змішувачем для виробництва рідкого біопалива з ТТЖ\***

№ п/п	Параметр реактора	Позн.	Значення параметра, розрахункова формула
1	Діаметр реактора	D	$D > \sqrt[3]{\frac{V_p}{\pi}}; H/D > 5 \div 6$
2	Висота реактора	H	$H = \frac{4}{0.8 \cdot \pi} \cdot V_{ТТЖ} \cdot \left( 1 + \left( \frac{288,36}{M_{ТТЖ}} + 0,13 \right) \cdot \rho_{ТТЖ} \cdot \frac{1}{\rho_{МО}} \right) \cdot \frac{1}{D^2} + h_k - \frac{h_k}{3 \cdot D^2} \cdot (D^2 + Dt^2 + D \cdot Dt)$
3	Кут при вершині конічного дна	$\beta$	60°, 90°, 120°
4	Висота стовпа рідини в реакторі	H <sub>1</sub>	$H_1 = \frac{4}{\pi} \cdot V_{ТТЖ} \cdot \left( 1 + \left( \frac{288,36}{M_{ТТЖ}} + 0,13 \right) \cdot \rho_{ТТЖ} \cdot \frac{1}{\rho_{МО}} \right) \cdot \frac{1}{D^2} + h_k - \frac{h_k}{3 \cdot D^2} \cdot (D^2 + Dt^2 + D \cdot Dt)$
5	Діаметр змішувача	d <sub>м</sub>	d <sub>м</sub> = D/3
6	Ширина лопаті змішувача	W	W = d/5; W = (0.1...0.2)d <sub>м</sub>
7	Висота встановлення мішалки	h	h = (0.6...0.8) d <sub>м</sub>
8	Кількість лопатей мішалки	z	z = 6
9	Частота обертання вала змішувача	n	$n \geq 98 \cdot \frac{\sqrt{D}}{d_m}; n \geq 135,2 \cdot \frac{D}{d_m}$
10	Товщини стінки циліндричної частини реактора	S <sub>p</sub>	$S_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p}$
11	Товщини стінки конусної частини реактора	S <sub>к</sub>	$S_{к.p} = \frac{pD_k}{2\varphi_p[\sigma] - p} \cdot \frac{1}{\cos \alpha}$

\* V<sub>p</sub> – робочий об'єм реактора, ТТЖ – об'єм технічного тваринного жиру, M<sub>MT</sub> – молярна маса метилового спирту, г/моль; M<sub>ТТЖ</sub> – молярна маса ТТЖ, г/моль; ρ<sub>ТТЖ</sub> – густина ТТЖ, кг/м<sup>3</sup>, ρ<sub>МО</sub> – густина розчину метанолу з кислотним каталізатором, кг/м<sup>3</sup>, h<sub>к</sub> – висота конусної частини реактора, м, Dt – діаметр вихідного патрубку, м.



Не визначені конструкційні параметри реактора залежать від конструктивних рішень для його належного розміщення у технологічному комплексі заводу. Приведений алгоритм (табл.1) дозволяє проводити розрахунки основних конструктивних параметрів реакторів періодичної дії будь-якої продуктивності.

В п'ятому розділі подані та описані розроблені апаратурно-технологічні схеми: відділень підготовки та естерифікації ТТЖ, отримання та очищення палива, що входять до складу мобільного заводу для виробництва біопалива (рис. 14). Викладені вимоги до технологічного обладнання.

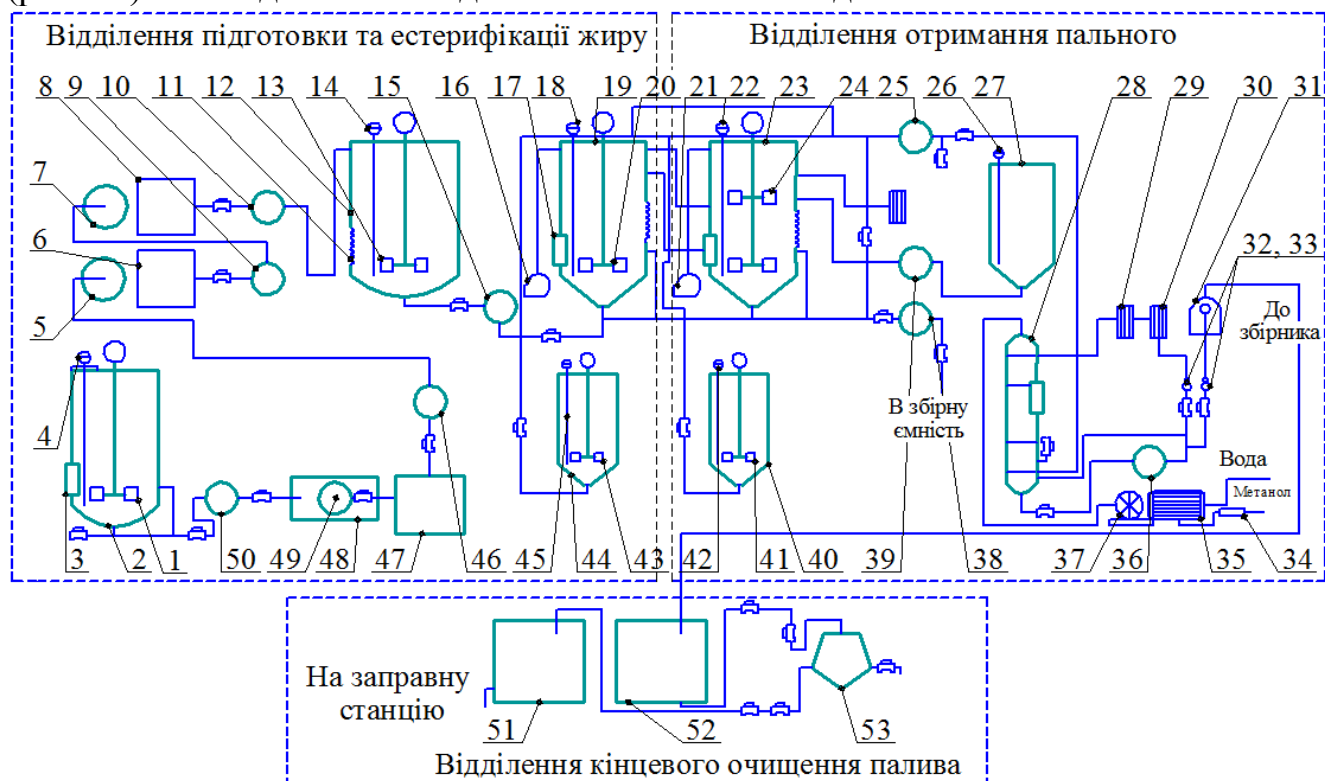


Рис. 14. Апаратурно - технологічна схема мобільного заводу для виробництва рідкого біопалива: 1, 13, 20, 24, 41, 43-мішалки, 2-змішувач-запарник, 3, 11, 17-нагрівач, 4, 14, 18, 22, 26, 42, 45-рівнеметр, 5-сепаратор грубого очищення, 6-проміжна місткість, 7-сепаратор тонкого очищення, 8-проміжна місткість, 9, 10, 15, 25, 38, 39, 46, 50-насоси, 12-проміжна місткість для підготовки жиру до естерифікації, 16-вентилятор, 19-реактор естерифікації, 23-реактор переестерифікації, 27-місткість для кислотного розчину, 28-ректифікатор, 29, 34-термометр, 30-теплообмінник, 31-система фільтрів, 32, 33-ротаметри, 35-вакуумний насос, 36-абсорбер, 40-місткість для метилату калію, 47-проміжна місткість, 48-відстійна центрифуга.

При використанні ТТЖ і жирових відходів переробних і харчових виробництв для виробництва рідкого біопалива треба провести попередню обробку жиру, яка складається з таких стадій: гідрування, поділ жиру-водо-білкової суміші центрифугуванням на твердий осад і жиру-водяну емульсію, сепарування жиру-водної емульсії для отримання зневодненого жиру, реакцію естерифікації з використанням  $H_2SO_4$ , промивання розчином  $KOH$  для нейтралізації  $H_2SO_4$ , промивання водним розчином  $NaCl$  для відділення залишків розчину  $KOH$ , двохразове промивання відділеного жиру водою та

сепарування жиру-водняної емульсії з метою отримання зневодненого жиру для переестерифікації.

На підґрунті розробленої апаратурно-технологічної схеми і схеми розташування обладнання мобільного заводу для виробництва рідкого біопалива з ТТЖ на монтажних платформах розроблено конструкторсько-технологічну документацію на мобільний завод продуктивністю 2000 літрів рідкого біопалива за добу, який успішно експлуатується в СТОВ «Чигиринська аграрна компанія».

Мобільний завод складається із двох послідовно з'єднаних платформ, на яких розміщено три технологічні модулі для виробництва рідкого біопалива. Перший модуль призначений для підготовки і естерифікації жирів, другий - для переестерифікації жирів і первинного очищення рідкого біопалива, а третій - для завершального очищення палива. Мобільний завод успішно пройшов приймальні випробування в УкрНДІПВТ ім. Л.Погорілого та рекомендований для постановки на серійне виробництво. Якість рідкого біопалива відповідає вимогам чинного ДСТУ 6081:2009.

Оцінка економічної ефективності від впровадження мобільного заводу для виробництва рідкого біопалива показала, що сума річного економічного ефекту складає більше 500 тис. грн, а середній рівень рентабельності 55 %.

## ВИСНОВКИ

Доведена можливість отримання і використання в якості альтернативного рідкого палива метилових ефірів жирних кислот ТТЖ і жирових відходів переробних і харчових виробництв АПК. Отримані у дослідженнях результати зводяться до наступних основних висновків:

1. Досліджені кінетичні і фізико-хіміко-механічні закономірності перетворення ТТЖ і жирових відходів метанолом в присутності каталізаторів у дизельне біопаливо, що є підґрунтям для конструювання технологічного обладнання і оптимізації режимів його експлуатації.

2. Визначені раціональні режимні параметри роботи устаткування для підготовки ТТЖ з кислотними числами від 5-180 мг КОН/г, а саме: температура гідрування 75-80°C, тривалість процесу не менше 40 хв; відділення жиру від водно-білкової частини центрифугуванням сепараторами при частоті обертання ротора центрифуги 3000 об/хв протягом 20 хв; температура реакції естерифікації не вища 60°C; молярне співвідношення спирту до ТТЖ 9:1; раціональна концентрація каталізатора ( $H_2SO_4$  – 1-15%); інтенсивність перемішування в реакторі  $n = 31,42 \text{ c}^{-1}$ ; тривалість процесу не менше 120 хв.

3. Розроблена математична модель технологічного процесу переестерифікації ТТЖ метанолом в присутності кислотного каталізатора ( $H_2SO_4$ ), за допомогою якої обґрунтовані технологічні чинники, які забезпечуючи реалізацію оптимальних умов процесу, а саме: температура 60°C; молярне співвідношення спирту до ТТЖ 9:1; раціональні концентрації каталізаторів (для КОН – 0,5-1,5%, для  $H_2SO_4$  – 1-15%); інтенсивність перемішування реагуючої суміші  $n = 10,47...31,42 \text{ c}^{-1}$ ; тривалість процесу не менше 60 хвилин.

4. Запропоновані комп'ютерні моделі (зокрема k-ε модель турбулентності), які адекватно характеризують поля швидкостей в реакторах з шестилопатевими турбінними мішалками та забезпечують адекватний опис розподілу швидкостей дисипації кінетичної енергії в об'ємі апаратів.

5. Встановлено, що зміна відстані між мішалками і їх діаметрів призводить до істотної зміни величини швидкості дисипації кінетичної енергії, що дозволяє впливати на ступінь диспергування реагентів, збільшуючи поверхню контакту фаз та вихід кінцевого продукту.

6. Запропоновано співвідношення для визначення критерію потужності для реакторів з двоюрисними шестилопатевими турбінними мішалками і чотирма відбивними перегородками.

7. Обґрунтовано доцільність введення каталітичної суміші в область реактора з максимальною дисипацією кінетичної енергії, що призводить до збільшується контакту поверхонь взаємодіючих фаз, в результаті чого вихід палива збільшується на 5 %, а поділ палива і гліцеролу завершується вже через 20 – 25 хв.

8. Обґрунтовані алгоритм проектування і методика розрахунку параметрів реакторів періодичної дії, які апробовані на реакторі з механічним турбінним змішувачем для виробництва якісного рідкого біопалива з високим виходом продукту, що відповідає ДСТУ 60811:2009 та EN 14214:2003.

9. Розроблений технологічний регламент і конструкція обладнання для виробництва рідкого біопалива з ТТЖ і жиркових відходів переробних і харчових виробництв АПК.

10. Обґрунтовані раціональні конструктивно-технологічні параметри мобільного заводу для виробництва рідкого біопалива з ТТЖ і жиркових відходів, який впроваджений у “Чигиринській аграрній компанії”, визначені якісні показники отриманого рідкого біопалива і їх взаємозв'язок з конструкцією реактора і параметрами технологічного процесу/

11. Передбачуваний річний економічний ефект від впровадження одного мобільного заводу складає близько 500 тис. грн., а термін окупності капіталовкладень складає – 2,2 роки.

## **ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Статті:**

1. Муштрук М. М. Перспективи виробництва дизельного біопалива з ТТЖ в Україні / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2011. – Вип. 166. Ч. 2. – С. 318–326. (*Особистий внесок здобувача – охарактеризовані перспективні методи виробництва дизельного біопалива з ТТЖ*).

2. Сухенко Ю. Г. Використання гідродинамічної кавітації у виробництві дизельного біопалива / Ю. Г. Сухенко, О. А. Литвиненко, М. М. Муштрук // Техніка і технологія АПК. – 2011. – № 10. – С. 33–36. (*Особистий внесок здобувача – доведена ефективність застосування кавітаційного*

*перемішування реагуючих компонентів в реакціях переестерифікації жирів у дизельне біопаливо).*

3. Муштрук М. М. Математичне моделювання перетворення жирів у дизельне біопаливо / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2012. – Вип. 170. Ч. 1. – С. 203–211. *(Особистий внесок здобувача – проаналізовані математичні моделі, що описують процес перетворення ТТЖ під дією спирту і каталізатора у дизельне біопаливо)*

4. Муштрук М. М. Технології і обладнання для виробництва дизельного біопалива з рослинних олій і тваринних жирів / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Техніка і технологія АПК. – 2012. – №12. – С.21–23. *(Особистий внесок здобувача – охарактеризовані перспективні методи виробництва енергетичного продукту з застосуванням процесу каталітичного гідрування та дезоксигенування відновленої сировини).*

5. Муштрук М. М. Аналітичний огляд сучасних методів оцінки якості дизельного біопалива / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Техніка і технологія АПК. – 2012. – № 4 (31). – С. 35–37. *(Особистий внесок здобувача – розглянуті перспективні методи оцінки якості дизельного біопалива та моніторингу процесу метанолізу жирів і запропоновані критерії їх правильного вибору).*

6. Муштрук М. М. Каталізатори реакцій у технологічних процесах виробництва дизельного біопалива з рослинних олій і тваринних жирів / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2012. – Вип. 184, ч. 1. – С. 126–130. *(Особистий внесок здобувача – охарактеризовані перспективні напрямки застосування каталізаторів реакцій у виробництві дизельного біопалива з рослинних олій і ТТЖ).*

7. Муштрук М. М. Перспективні технології виробництва дизельного біопалива / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Техніка і технологія АПК. – 2011. – № 9 (36). – С. 28–31. *(Особистий внесок здобувача – обґрунтовано застосування того чи іншого технологічного процесу в залежності від обсягів виробництва).*

8. Муштрук М. М. Аналітичний огляд сировинних джерел, організаційних і технологічних проблем у виробництві дизельних біопалив / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Техніка і технологія АПК. – 2012. – № 4(31). – С. 35–37. *(Особистий внесок здобувача – охарактеризовані організаційно-правові, фінансово-економічні, технічні і технологічні проблеми у виробництві дизельних біопалив в Україні).*

9. Муштрук М. М. Виробництво дизельного біопалива з технічних тваринних жирів / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Техніка і технологія АПК. – 2013. – № 4(43) – С. 17–20. *(Особистий внесок здобувача – обґрунтоване застосування процесів естерифікації та переестерифікації жирів для отримання біопалива, що за якістю відповідає діючим стандартам).*

10. Сухенко Ю. Г. Автоматизовані мобільні заводи для виробництва дизельного біопалива / Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко, М. М. Муштрук // Техніка і технології АПК. – 2013. – № 5(44). – С. 23. *(Особистий внесок здобувача – запропонована класифікація заводів для виробництва дизельного біопалива).*

11. Муштрук М. М. Дизельне біопаливо з жиромісних відходів птахопереробних підприємств / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Техніка і технології АПК. – 2013. – № 10(45). – с. 34–36. *(Особистий внесок здобувача – охарактеризовані методи виробництва дизельного біопалива з жиромісних відходів птахопереробних підприємств).*

#### Статті у міжнародних виданнях

12. Муштрук М. М. Интенсификация процесса преобразования жиров в дизельное биотопливо / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Motrol, commission of motorization and energetics in agriculture, an international operation of farm and agri-food industries. – Lublin-Kiev-Simferopol-Mukolayiv-Lviv-Rzeszov. – 2012. – Vol.14. - № 3. – Р. 96–103. *(Особистий внесок здобувача – доведена ефективність застосування кавітационного перемішування при виробництві дизельного біопалива з технічних тваринних жирів).*

#### Патенти

13. Пат. № 80661 Україна, МПК С11С3/04. Спосіб отримання дизельного біопалива з технічних тваринних жирів / Муштрук М. М., Сухенко Ю. Г., Сухенко В. Ю., Баль-Прилипко Л. В.; заявник і патентовласник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – u201213653; заявл. 29.11.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11. *(Особистий внесок здобувача – участь у розробці формули та основної частини опису винаходу)*

14. Пат. № 85994 Україна, МПК С07С41/00. Спосіб отримання дизельного біопалива з насіння соняшника / Муштрук М. М., Сухенко Ю. Г., Сухенко В. Ю.; заявник і патентовласник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – u201307051; заявл. 04.06.2013; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 23. *(Особистий внесок здобувача – участь у розробці формули та основної частини опису винаходу)*

15. Пат. № 84777 Україна, МПК С10L1/08, В01В 1/00. Лінія для виробництва біодизель / Литвиненко О. А., Сухенко Ю. Г., Сухенко В. Ю., Муштрук М. М.; заявник і патентовласник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – u201307527; заявл. 13.06.2013; опубл. 25.10.2013, Бюл. № 20. *(Особистий внесок здобувача – участь у розробці формули та основної частини опису винаходу)*

16. Пат. № 88276 Україна, МПК С11С3/04. Спосіб отримання метилових ефірів з технічних тваринних жирів / Муштрук М. М., Сухенко Ю. Г., Сухенко В. Ю.; заявник і патентовласник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – u201311117; заявл. 18.09.2013; опубл. 11.03.2014, Бюл. № 5. *(Особистий внесок здобувача – участь у розробці формули та основної частини опису винаходу)*

### Матеріали конференцій:

17. Муштрук М. М. Нетрадиційні каталізатори реакцій у виробництві дизельного біопалива з жирів / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Наукові здобутки молоді у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів, 20 квіт. 2011 р.: тези доп. – К., 2011. – С. 305–306.

18. Муштрук М. М. Технічні жири, як сировина для виробництва дизельного біопалива / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Наукові здобутки молоді у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів, 20 квіт. 2011 р.: тези доп. – К., 2011. – С. 307–308.

19. Муштрук М. М. Методи виробництва дизельного біопалива з технічних тваринних жирів / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Молодь: освіта, наука, духовність: всеукр. наук. конф. студентів і молодих вчених, 9–12 берез. 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 313–314.

20. Муштрук М. М. Технологія виробництва дизельного біопалива з застосуванням гідродинамічної кавітації / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко // Молодь: освіта, наука, духовність: всеукр. наук. конф. студентів і молодих вчених, 9–12 берез. 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 316–318.

21. Муштрук М. М. Особливості процесу переестерифікації технічних тваринних жирів в дизельне біопаливо / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко // Удосконалення процесів і обладнання-запорука інноваційного розвитку харчової промисловості: міжнар. наук.-практ. конф., 10–11 квіт. 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 37–39.

22. Муштрук М. М. Перетворення тваринних жирів у дизельне біопаливо / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Удосконалення процесів і обладнання-запорука інноваційного розвитку харчової промисловості: міжнар. наук.-практ. конф., 10–11 квіт. 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 39–41.

23. Муштрук М. М. Науково-технічне забезпечення виробництва якісного біопалива з олійних культур / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко // VIII міжнар. наук. конф. студентів і аспірантів, 26–27 квіт. 2012 р.: тези доп. Могильов, 2012. – С. 81.

24. Муштрук М. М. Чинники, впливаючі на процес переестерифікації технічних тваринних жирів / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Наукові здобутки молоді у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: II міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів, 20–22 квіт. 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 306–309.

25. Муштрук М. М. Дизельне біопаливо з технічних тваринних жирів / М. М. Муштрук, Ю. Г. Сухенко, В. Ю. Сухенко // Наукові-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій: XIV міжнар. наук. конф., 26–27 верес. 2013р. тези доп. – смт. Дослідницьке, 2013 р. – С. 181. (*Особистий внесок здобувача в працях 17-25 – аналіз перспективних методів виробництва дизельного біопалива, обґрунтування процесів естерифікації та переестерифікації ТГЖ, розробка перспективних напрямків застосування різних типів каталізаторів для отримання біопалива*).

## АНОТАЦІЯ

Муштрук М.М. Обґрунтування характеристик обладнання для виробництва рідкого біопалива з технічних тваринних жирів. – Рукопис

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 - Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. - Національний університет харчових технологій, Київ, 2014.

Дисертацію присвячено проблемі підвищення ефективності процесу перетворення ТТЖ у рідке біопаливо завдяки його оптимізації та встановленню раціональних конструктивно-технологічних параметрів і режимів роботи реактора періодичної дії з турбінним змішувачем.

Визначені основні фізико-механічні та хімічні властивості ТТЖ, розроблені та досліджені методи їх перетворення у дизельне біопаливо.

На основі математичного і комп'ютерного моделювання обґрунтований процес перетворення ТТЖ у дизельне біопаливо в реакторах періодичної дії.

Визначені раціональні конструктивно-технологічні параметри реактора з турбінним змішувачем для перетворення ТТЖ у дизельне біопаливо.

На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень розроблена методика проектування промислових реакторів та обґрунтована раціональна конструкція мобільного заводу для виробництва дизельного біопалива з ТТЖ продуктивністю 2 т/добу, який впроваджений в Чигиринській аграрній компанії.

**Ключеві слова:** біопаливо, переестерифікація, жир, метанол, каталізатор, моделювання, реактор, завод, параметри.

## АННОТАЦИЯ

Муштрук М.М. Обоснование характеристик оборудования для производства жидкого биотоплива из технических животных жиров. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – Процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2014.

Диссертация посвящена проблеме повышения эффективности процесса преобразования ТЖЖ в жидкое биотопливо благодаря его оптимизации и установлению рациональных конструктивно-технологических параметров и режимов работы реактора периодического действия с турбинным смесителем.

Обзор известных технологических процессов и оборудования для получения метиловых эфиров жирных кислот, анализ научных исследований, посвященных производству дизельного биотоплива из животных и растительных жиров, позволяет сделать вывод, что вопросы, связанные с обеспечением пищевых, перерабатывающих и сельскохозяйственных предприятий жидким биотопливом и оборудованием для его производства все еще нуждаются в углубленном изучении.

Исследован физико-химический и жирно-кислотный состав широкой номенклатуры животных жиров, как потенциального сырья для производства

биотоплива. Установлены рациональные режимные параметры процессов эстерификации и переэстерификации, а также оптимальные концентрации катализаторов и необходимые молярные соотношения спиртов к жирам.

Экспериментально исследовано влияние основных параметров процессов предварительной подготовки технических животных жиров, эстерификации ТЖЖ метанолом с кислотным катализатором  $H_2SO_4$  и переэстерификации подготовленного жира метанолом со щелочным катализатором КОН на выход и качество метиловых эфиров жирных кислот. Для проведения исследований использовались разработанные методики и изготовленные лабораторные установки, а также стандартные методы исследований.

Разработана математическая модель преобразования ТТЖ в дизельное биотопливо, определены скорости превращения каждого из компонентов реакции, рассчитанный молярный баланс и выход основных компонентов реакции и построенные графические зависимости выхода основных компонентов реакции при изменении концентраций триглицеридов, диглицеридов, моноглицеридов, метанола, катализатора и др. компонентов реакции.

Избранные компьютерные модели (в частности к-ε модель турбулентности), адекватно характеризующие поля скоростей в реакторах с шестилопастными турбинными мешалками и обеспечивают адекватное описание распределения скоростей диссипации кинетической энергии в реакторах с быстроходными мешалками.

Обоснована целесообразность введения каталитической смеси в область реактора с максимальным значением диссипации кинетической энергии за счет чего увеличивается контактная поверхность взаимодействующих фаз, в результате чего выход топлива увеличивается на 5%, а разделение топлива и глицерина завершается уже через 20 - 25 мин.

Обоснованы рациональные конструктивно-технологические параметры реактора периодического действия с турбинным смесителем. Разработана методика проектирования промышленных реакторов для производства дизельного биотоплива и гидродинамического расчета турбинных смесителей.

Методика использована в расчете конструктивно-технологических параметров реактора с турбинным смесителем для мобильного завода по производству дизельного биотоплива.

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработана технологическая схема и обоснованы конструктивно-технологические параметры мобильного завода для производства дизельного биотоплива из ТТЖ производительностью 2 т/сутки, который внедрен в Черкасской области

**Ключевые слова:** биотопливо, переэстерификация, жир, метанол, катализатор, моделирование, реактор, завод, параметры.

#### THE SUMMARY

Mushtruk M. Justification performance equipment for the production of liquid biofuels technical animal fats. – Manuscript.



Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, on a specialty 05.18.12 - Processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical manufactures. - National University of Food Technologies, Kyiv, 2014.

The thesis is devoted to the problem of increasing the efficiency of the conversion process technical animal fat in biodiesel due to its optimization and rational design and installation process parameters and modes of batch reactor with a turbine mixer.

The basic physical, mechanical and chemical properties technical animal fat developed and tested methods for their conversion into biodiesel.

Based on modeling and simulation, grounded in the process of converting technical animal fat biodiesel in batch reactors.

Rational design and technological parameters of the reactor with a turbine mixer to convert technical animal fat into biodiesel.

On the basis of the theoretical and experimental studies of the technique of design of industrial reactors and reasonable rational design of mobile plant for the production of biodiesel from technical animal fat capacity of 2 t/day, which is embedded in Chygyryns'ka agricultural company.

**Keywords:** biodiesel, transesterification, fat, methanol, catalyst, modeling, reactor, plant parameters.