

eksport-selhozprodukcii-v-2014-godu-sostavil-167-mlrd-ukab-288511/ © delo.ua

12. ФАО: Обзор мирового рынка молока и молочных продуктов в 2012 [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.fao.org/docrep/015/al989r/al989r00.pdf>
13. Статистичний щорічник України. 2013 год. [Електронний ресурс].– Режим доступа: <http://www.ukrstat.gov.ua/>. Статистичний довідник: тваринництво України. 2013 год. [Електронний ресурс].– Режим доступа: <http://www.ukrstat.gov.ua/>
14. Статистичний збірник «Сільське господарство України» за 2013 рік [Електронний ресурс].– Режим доступа: <http://www.ukrstat.gov.ua/>
15. Статистичний збірник «Тваринництво України»

2013 р. [Електронний ресурс].– Режим доступа: <http://www.ukrstat.gov.ua/>

16. Топ-5 крупнейших производителей молочной продукции [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://delo.ua/business/rejting-top-100-krupnejshie-proizvoditeli-molochnoj-produkcii-244614/>
17. Тест на зрелость отрасли. интервью с андреем дикуном, заместителем министра аграрной политики и продовольствия //–«Молоко и ферма» –№ 3–2014. С.3–6
18. Украина может и должна экспортировать молочную продукцию в ЕС.–[Электронный ресурс].–Режим доступа: <http://delo.ua/business/ukraina-mozhet-i-dolzha-eksportirovat-molochnuju-produkciju-v-e-282077/> © delo.ua

УДК 664.3.032.1:665.3.005.1

# Проектування механічних реакторів для виробництва дизельного палива

**М. Муштрук, В. Сухенко, кандидати техн.наук  
Ю. Сухенко, докт. техн. наук**

**Національний університет біоресурсів і природокористування**

**Анотація.** Розроблена і обґрунтована методика проектування реакторів з механічними змішувачами для виробництва дизельного біопалива.

**Ключові слова:** реактор, модель, змішувач, біопаливо, методика.

**Проектирование механических реакторов для производства дизельного топлива.** М. МУШТРУК, В. СУХЕНКО, Ю. СУХЕНКО (Национальный университет биоресурсов и природопользования)

**Анотація.** Разработана и обоснована методика проектирования реакторов с механическими смесителями для производства дизельного биотоплива.

**Ключевые слова:** реактор, модель, смеситель, биотопливо, методика.

**Reactor design with a mechanical mixer for the production of biodiesel.** М. М. MUSHTRUK, Y. G. SUKHENKO, V.Y. SUKHENKO (National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine).

**Abstract.** For optimization of the reactor design it is necessary to apply the output data. The first thing to take into account the kinetics of chemical reactions, as well as data about the side processes that lead to wastage of raw materials and the formation of unwanted and sometimes harmful substances.

**Key words:** reactor, model, mixer, biofuels, technique.

**К**онструкції реакторів для виробництва дизельного біопалива з тваринних і рослинних жирів дуже різноманітні і

повинні відповідати певним вимогам для максимального виходу та високої якості палива, а також забезпечувати мінімальні витрати

вихідних речовин, енергії і затрат праці [1].

Для оптимізації конструкції реактора необхідно застосовувати

ряд вихідних даних. У першу чергу варто враховувати кінетику хімічної реакції, тобто інформацію про основу реакції, спрямованої на одержання цільового продукту, а також дані про побічні процеси, що призводять до нераціональних витрат сировини і утворення непотрібних, а іноді й шкідливих речовин [2].

Загалом проектування реакторів для виробництва рідкого біопалива надзвичайно складне. Але проблему можна значно спростити, використовуючи деякі граничні моделі.

**Мета досліджень – обґрунтування методики проектування реакторів для виробництва дизельного біопалива з технічних тваринних жирів (ТТЖ).**

**Результати досліджень.** Математично змодельований технологічний процес перетворення ТТЖ при виробництві дизельного біопалива в реакторі періодичної дії з урахуванням фізико-хімічної механіки сировини, реагентів та визначені раціональні конструктивно-технологічні параметри реактора періодичної дії з двох'ярусним 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 у дизельне біопаливо;

– друга аналізує чинники, залежні від умов процесу перетворення ТТЖ у дизельне біопаливо, в першу чергу температурні;

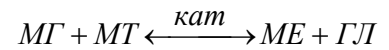
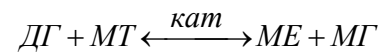
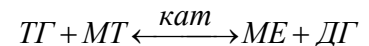
– третя розраховує кінетику утворення ефірів жирних кислот (дизельного біопалива);

– четверта описує теплообмін у проектуваному реакторі, здійснює вибір граничних умов процесу та продуктивність перетворення жирів залежно від умов ведення процесу;

– п'ята визначає механічні па-

раметри проектуваного реактора.

Етапи перетворення ТТЖ у метиловий ефір (дизельне біопаливо) наступні:



де: *TG* – тригліцериди, *DG* – дигліцериди, *MG* – моно гліцериди, *KT* – сірчана кислота ( $H_2SO_4$ ), *MT* – метанол, *GL* – гліцерин; *ME* – метиловий ефір.

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

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

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	$\mu_m + \mu_t$	$-\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial W}{\partial \theta} \right) + \Gamma_\phi \frac{\partial (V/r)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\Gamma_\phi V) - \frac{\rho U}{r} + \frac{\Gamma_\phi}{r^2} \frac{\partial U}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{2\Gamma_\phi U}{r} \right)$
	W	$\mu_m + \mu_t$	$+\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \Gamma_\phi r \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial W}{\partial z} \right)$

де:  $r, \theta, z$  – координати;  $p$  – тиск;  $\rho$  – густина реакційної суміші в реакторі,  $kg/m^3$ ;  $W$  – осьова складова швидкості,  $m/s$ ;  $V$  – тангенціальна складова швидкості,  $m/s$ ;  $U$  – радіальна складова швидкості,  $m/s$ ;  $\mu_m$  – динамічний коефіцієнт молекулярної в'язкості,  $Pa \cdot s$ ;  $\mu_t$  – динамічний коефіцієнт турбулентної в'язкості,  $Pa \cdot s$ ;  $\phi$  – 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.

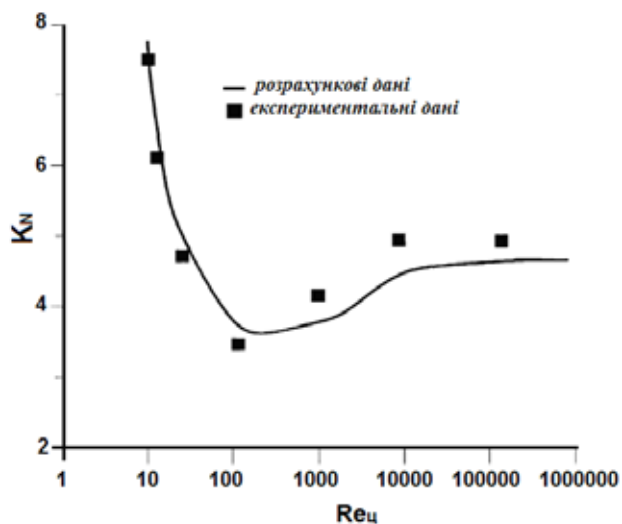


Рис. 1. Залежність критерію потужності  $K_N$  для реактора з відкритою турбінною мішалкою і чотирма відбивними перегородками від відцентрового числа Рейнольдса.

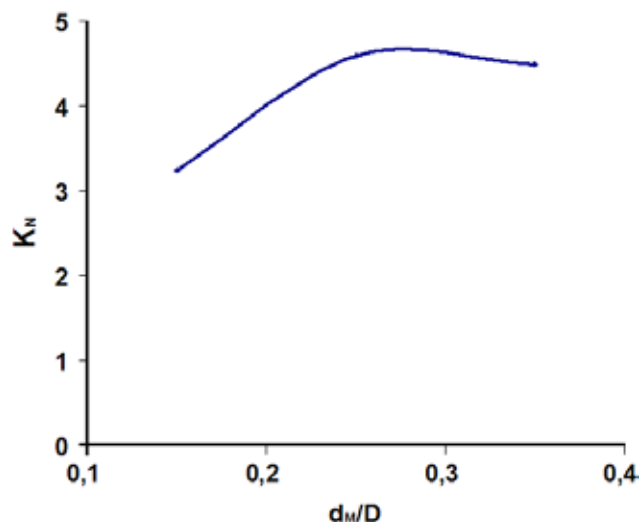


Рис. 2. Залежність критерію потужності  $K_N$  від симплекса  $d_m/D$  для реактора однією відкритою турбінною мішалкою на валу, ( $D$  – внутрішній діаметр реактора,  $d_m$  – діаметр мішалки)

В реакторах з швидкохідними турбінними мішалками можна виділити дві характерні області: перша область, що прилягає до мішалки, характеризується великим градієнтом швидкості, і область, що розповсюджується до стінок апарата.

Досліджено необхідні вимоги до розрахункових сіток для моделювання полів швидкостей 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 перемішувачів пристроїв: 1 – з шестилопатевою стандартною відкритою турбінною мішалкою, 2 – з двох'ярусними відкритими турбінними мішалками. Для

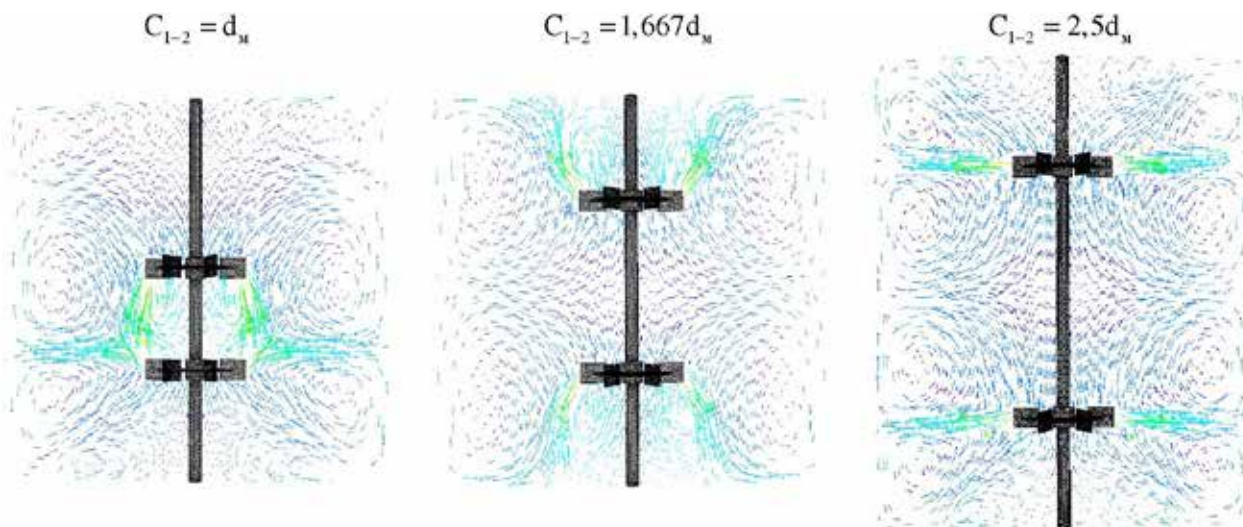


Рис.3. Розподіл потоків в апаратах з двох'ярусними турбінними мішалками



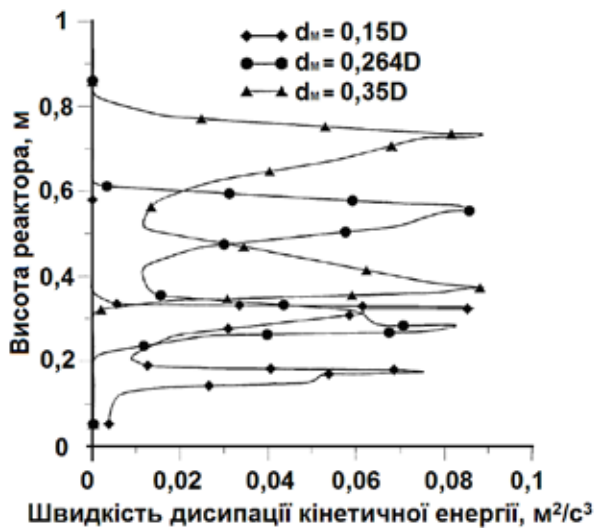


Рис. 4. Наведено швидкість дисипації кінетичної енергії  $\epsilon$ , по висоті реактора на відстані рівній  $r_m$  від центральної осі валу для трьох реакторів з двоох'ярусними мішалками:  $d_m = (0,15 \div 0,35)D$  і відстань між ними  $C_{1-2} = d_m$

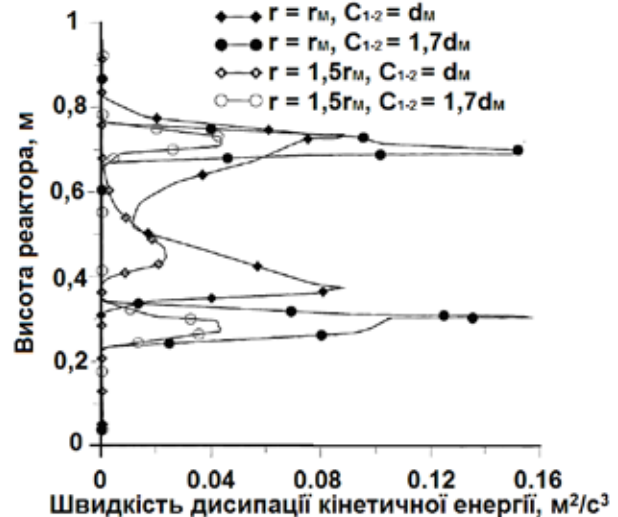
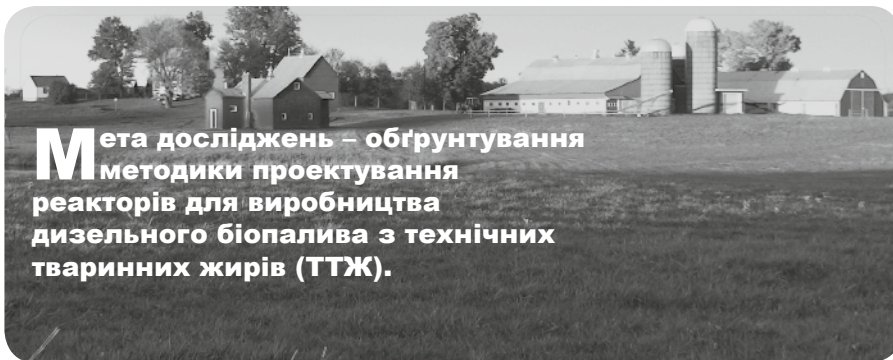


Рис. 5. Наведено швидкість дисипації кінетичної енергії  $\epsilon$ , по висоті реактора на відстані рівній  $r_m$  і  $1,5 r_m$  від центральної осі валу двох реакторів з двоох'ярусними мішалками:  $d_m = 0,35D$  і відстанями між ними  $C_{1-2} = d_m$  та  $1,7d_m$



**М**ета досліджень – обґрунтування методики проектування реакторів для виробництва дизельного біопалива з технічних тваринних жирів (ТТЖ).

них відомі кількісні експериментальні дані у вигляді профілів складових швидкості (осьової, радіальної і тангенціальної) та критеріїв потужності.

На рис. 1 подані експериментальні і розрахункові величини критерію потужності залежно від відцентрового числа Рейнольдса  $Re_{\omega}$  для реактора з відкритою турбінною мішалкою і чотирма відбивними перегородками шириною  $b = (D - \text{діаметр реактора})/12$ , 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 зі збільшенням діаметра мішалки в 2 рази, критерій потужності збільшується в 1,5 рази (рис. 2).

На основі розробленої методики з використанням програмного забезпечення Flow Vision 2,5 були досліджені сім реакторів з внутрішнім діаметром  $D = 2,06$  м (рис. 6) з чотирма рівно-

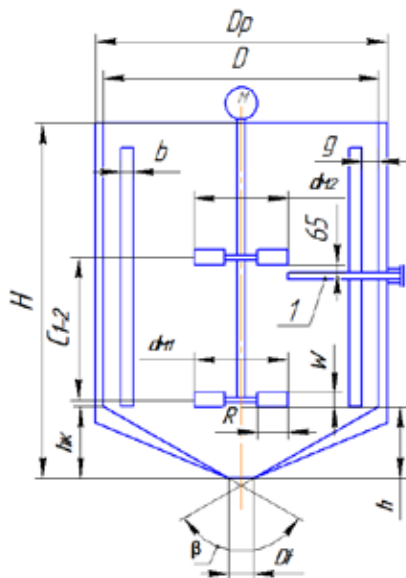
мірно розташованими відбивними перегородками та двома відкритими турбінними мішалками на одному валу. Розглядали можливі варіанти зміни конструкції перемішувачів, які могли б бути використані в реакторі для збільшення виходу дизельного біопалива. У зв'язку з цим змінювали діаметри мішалок в межах  $(0,15-0,35)D$  і відстань між ними в межах  $(1-2,5)d_m$  з метою оцінки критерію потужності і швидкості дисипації кінетичної енергії.

На рис.3 наведений розподіл швидкостей потоків у трьох з семи розглянутих апаратів з мішалками діаметром  $d_m = 0,264D$  і відстанями між ними  $(1-2,5) d_m$ . При відстані між мішалками  $C_{1-2} = d_m$  реалізується об'єднана структура потоку, а при  $C_{1-2} = 2,5 d_m$  - паралельна структура потоку реагентів. При досягненні відстані між мішалками, яка більша за діаметр мішалок, взаємодія між

потоків 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.

Максимальне значення швидкості дисипації кінетичної енергії визначає інтенсивність змішування компонентів реагуючої суміші на мікрорівні, що забезпечує виникнення їх дрібномасштабних зсувних деформацій і, як наслідок, одержання тонкодисперсних емульсій і суспензій.

Проведений аналіз розподілу швидкості дисипації кінетичної енергії в семи розглянутих апаратах дав змогу зробити висновок, що збільшення відстані між мішалками призводить до зростання швидкості дисипації кінетичної енергії  $\epsilon$  (рис. 4) і, при  $C_{1-2} = 1,7d_m$ , досягається її граничне значення. Також необхідно врахувати той факт, що підвищення швидкості дисипації енергії можна досягти і при малих діаметрах мішалок, що видно з рис. 5. Однак необхідно пам'ятати, що збільшення  $C_{1-2}$  призводить до утворення слабо взаємодіючих потоків, що призводить до появи застійних зон і, таким чином, ці ефекти треба розглядати у комплексі.



**Рис.6. Схема 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;  $D_t$ -діаметр зливного клапана,  $h$ -висота встановлення змішувача,  $\beta$ -кут при вершині кінцевого днища,  $C_{1,2}$  – відстань між мішалками, 1 – патрубок для введення каталізатора (в область з максимальним значенням дисипації кінетичної енергії).

Обґрунтовано раціональні конструктивно-технологічні параметри реактора періодичної дії з турбінним змішувачем для виробництва дизельного біопалива. При визначенні особливостей конструкції реактора враховано необхідність перемішування реагентів без застійних зон, забезпе-

чення безперешкодного осадження гліцеролової фази та періодичного зливання проміжних і кінцевих продуктів. Конструктивну схему реактора подано на рис. 6. На основі проведених досліджень і рекомендацій, що випливають з наукових праць попередників та з урахуванням особливостей технологічного процесу виробництва дизельного біопалива розроблено схему методики проектування реакторів періодичної дії для виробництва біопалива (рис. 7).

Інші параметри реактора за-

лежать від ряду специфічних конструкційних рішень. Наведені алгоритм і схема методики проектування дають змогу проводити розрахунки основних конструкційних параметрів реакторів будь-якої продуктивності з механічними змішувачами різного типу.

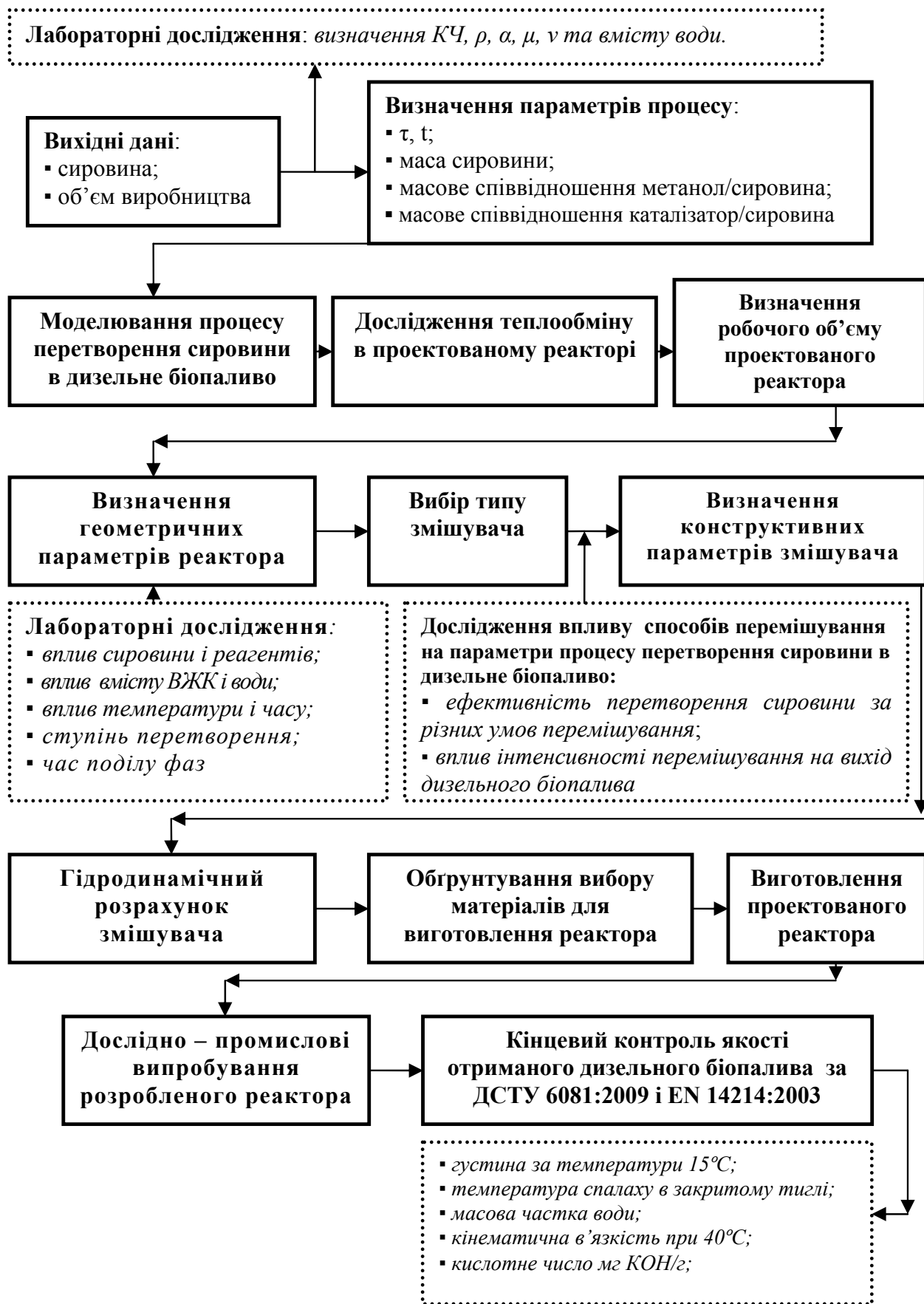
**Висновки**

Розроблені алгоритм і методику розрахунку промислових реакторів із механічними змішувачами для виробництва дизельного біопалива з жирів будь-якого походження.

**Література**

1. Крамерс Х. Химические реакторы.– М.: Химия, 1967.– 264 с.
2. Денбиг К.Г. Теория химических реакторов.– М.: Наука, 1968.– 120 с.
3. Берлин А.А. Кинетический метод в синтезе полимеров.– М.: Химия, 1973.– 360 с.
4. Гуль В.Е. Основы переработки пластмасс.– М.: Химия, 1985.– 400 с.
5. McCarthy L.G., Bradley G., Sexton J.C. et al. Computational fluid dynamics modeling of paddle dissolution apparatus: agitation rate, mixing patterns, and fluid velocities. // AAPS PharmSciTech.– 2004.– 5(2) Article 21
6. Васильцов Э.А., Ушаков В.Г. Аппараты для перемешивания жидких сред.– Л.: Машиностроение, 1979.– 272 с.





**Рис. 7. Структурна схема методики проєктування реакторів періодичної дії для виробництва дизельного біопалива**

$KЧ$  – кислотне число,  $\rho$  – густина,  $\alpha$  – кінематична в'язкість,  $\mu$  – кінематична в'язкість,  $\nu$  – динамічна в'язкість,  $\tau$  – час реакції,  $t$  – температура реакції, ВЖК – вільні жирні кислоти.