

Методи досліджень і вимірювальні прилади

УДК 664.3.032.1:665.3.005.1

Сухенко Ю., д-р техн. наук, професор, **Муштрук М.**, асистент, **Соколов Д.**, студент магістратури (Національний університет біоресурсів і природокористування України)

Методика проектування реакторів для виробництва дизельного біопалива з тваринних і рослинних жирів

Розроблено й обґрунтовано методику проектування реакторів з механічними змішувачами для виробництва дизельного біопалива.

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

Вступ. Конструкції реакторів для виробництва дизельного біопалива з тваринних і рослинних жирів дуже різноманітні і повинні відповідати певним вимогам для забезпечення максимального виходу палива високої якості з мінімальними експлуатаційними витратами [1].

Для оптимізації конструкції реактора необхідно застосовувати вихідні дані. У першу чергу слід врахувати кінетику хімічної реакції, тобто інформацію про основу реакції, в результаті якої отримують цільовий продукт, а також дані про побічні процеси, що призводять до нераціональних витрат сировини і утворення непотрібних, а іноді й шкідливих речовин [2]. Також необхідно оцінити рівень теплоти, що виділяється або поглинається в ході реакції, і зібрати дані з інформаційних джерел про можливий ступінь перетворення вихідних жиромісних речовин у біопаливо. Всі поставлені проблеми вирішуються з використанням хімічної термодинаміки для здійснення реакції молекули вихідних реагентів (жиру, спирту, каталізатора), які повинні вступити в реакцію, а тому реакційну суміш необхідно добре перемішувати з тим, щоб забезпечити необхідний контакт фаз. Ефективність змішування залежить від в'язкості компонентів, взаємної розчинності вихідних речовин, швидкостей потоків, геометричних параметрів реактора і різного роду пристроїв для введення реагентів. Цими питаннями займається гідродинаміка. Плин у часі хімічної реакції також впливає на змішування [3]. Цей процес описує хімічна гідродинаміка. Нарешті, температурний режим у реакторі треба підтримувати у відповідності з вимогами процесу кінетики, щоб оптимізувати швидкість реакції і забезпечити високий вихід цільового продукту та відокремлення побічних речовин. Наука, яка займається описом хімічних реакцій з урахуванням процесів масо- і теплоперенесення, отримала назву макрокінетика [4].

В цілому задача проектування реакторів для виробництва рідкого біопалива надзвичайно складна. Однак проблему можна значно спростити, використовуючи деякі граничні моделі.

Мета досліджень – обґрунтувати методику проектування реакторів для виробництва дизельного біопалива з технічних тваринних жирів (ТТЖ).

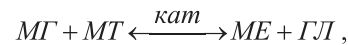
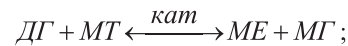
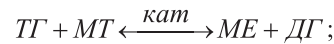
Результати досліджень. Математично змодельовано технологічний процес перетворення ТТЖ для виробництва дизельного біопалива в реакторі періодичної дії з урахуванням фізико-хімічної механіки сировини, реагентів та визначено раціональні конструкційно-технологічні параметри реактора періодичної дії з двоярусним турбінним змішувачем, розроблено комп'ютерну модель технологічного процесу перетворення ТТЖ у дизельне біопаливо, яка складається з п'яти взаємопов'язаних підпрограм:

- перша – визначає змінні, які регулюють процес перетворення ТТЖ у дизельне біопаливо;
- друга – аналізує чинники, які залежать від умов процесу перетворення ТТЖ у дизельне біопаливо, передусім температурні;
- третя – розраховує кінетику утворення ефірів жирних кислот (дизельного біопалива);
- четверта – описує теплообмін у проєктованому реакторі, здійснює вибір граничних умов процесу та

продуктивність перетворення жирів у залежності від умов ведення процесу;

- п'ята – визначає механічні параметри проєктованого реактора.

Перетворення ТТЖ у метиловий ефір (дизельне біопаливо) здійснюється поетапно:



де TG – тригліцериди, DG – дигліцериди, MG – моногліцериди, KT – сірчана кислота (H_2SO_4), MT – метанол, GL – гліцерин; ME – метиловий ефір.

Окрім того, розроблено методику розрахунку поля швидкостей перемішування реагентів в реакторах з механічними турбінними мішалками, яка полягає в числовому розв'язанні системи диференціальних рівнянь збереження маси та імпульсу з частковими похідними в циліндричних координатах у тривимірній постановці завдання:

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

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

де r, θ, z – координати; p – тиск; ρ – густина реакційної суміші в реакторі, кг/м³; W – осьова складова швидкості, м/с; V – тангенціальна складова швидкості, м/с; U – радіальна складова швидкості, м/с; μ_m – динамічний коефіцієнт молекулярної в'язкості, Па·с; μ_t – динамічний коефіцієнт турбулентної в'язкості, Па·с, ϕ – величина (швидкість, скаляр); Γ_{ϕ} – коефіцієнт перенесення (ламінари чи турбулентної в'язкості, коефіцієнт дифузії тощо); S_{ϕ} – сили, що не включені в конвективну і дифузійну частини, а також додаткові сили.

В реакторах з швидкохідними турбінними мішалками можна виділити дві характерні області: ту, що прилягає до мішалки і характеризується великим градієнтом швидкості та область, що поширюється 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 прилягає до мішалки, був ≤ 3 мм, а поза нею – ≤ 8 мм.

Адекватність опису поля швидкостей перевіряли для апаратів з двома типами перемішувальних пристроїв: 1 – з шестилопатевою стандартною відкритою турбінною мішалкою, 2 – з двоярусними відкритими турбінними

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

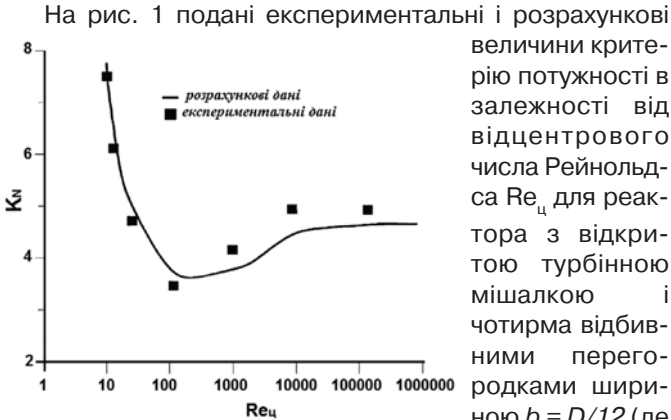


Рис. 1 – Залежність критерію потужності K_N для реактора з відкритою турбінною мішалкою і чотирма відбивними перегородками від відцентрового числа Рейнольдса

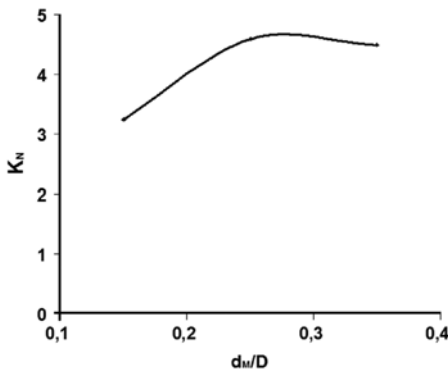


Рис. 2 – Залежність критерію потужності K_N від симплекса d_m/D для реактора з однією відкритою турбінною мішалкою на валу (D – внутрішній діаметр реактора, d_m – діаметр мішалки)

На основі розробленої методики з використанням програмного забезпечення Flow Vision 2.5 було досліджено сім реакторів з внутрішнім діаметром $D = 2,06$ м (рис. 6), що мають чотири рівномірно розташованих відбивних перегородки та дві відкритих турбінних мішалки на одному валу. Розглядали можливі варіанти зміни конструкцій перемішувальних пристроїв, які могли б бути використані в реакторі для збільшення виходу дизельного біопалива. У зв'язку з цим змінювали діаметри мішалок в межах $(0,15 \div 0,35)D$ і відстань між ними в межах $(1 \div 2,5)d_m$ з тим щоб оцінити критерій потужності і швидкості дисипації кінетичної енергії.

На рис. 3 наведено 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 об'єднана структура потоку, а при $C_{1-2} = 2,5d_m$ – паралельна структура потоку реагентів. При досягненні між мішалками відстані, більшої за діаметр мішалок, взаємодія між потоками верхньої і нижньої мішалок слабшає, що приводить до поділу об'єму реактора на дві рівні симетричні частини по висоті. Також можна відзначити, що зі збільшенням відстані між мішалками

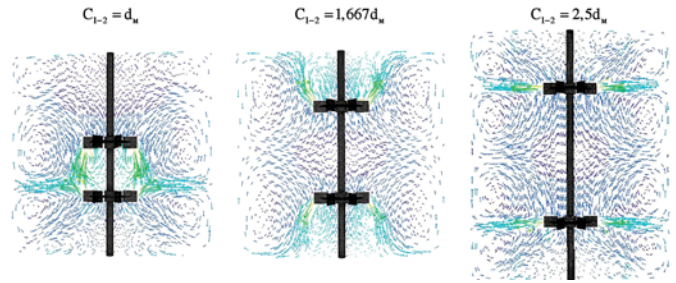


Рис. 3 – Розподіл потоків в апаратах з двоюрисними турбінними мішалками

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, отримання тонкодисперсних емульсій і суспензій.

Аналіз розподілу швидкості дисипації кінетичної енергії в семи розглянутих апаратах дозволив зробити висновок, що збільшення відстані між мішалками веде до збільшення швидкості дисипації кінетичної енергії ε (рис. 4) і, при $C_{1-2} = 1,7d_m$, досягається її граничне значення. Також необхідно враховувати той факт, що збільшення швидкості дисипації енергії можна досягти також з використанням мішалок малих діаметрів, що видно з рис. 5. Однак слід пам'ятати, що із збільшенням C_{1-2} слабшає взаємодія потоків, що призводить до появи застійних зон, а тому ці ефекти треба розглядати в комплексі.

Рациональні конструкційно-технологічні параметри реактора періодичної дії з турбінним змішувачем для виробництва дизельного біопалива обґрунтовано з урахуванням необхідності перемішування реагентів без застійних зон, забезпечення безперешко-

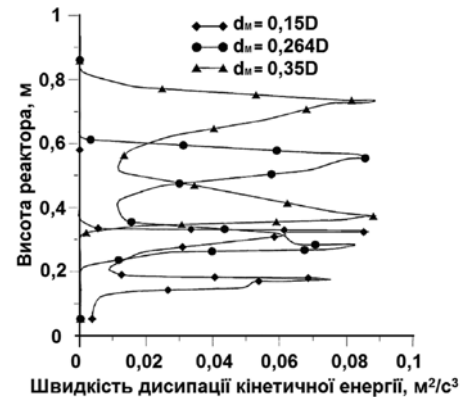


Рис. 4 – Швидкість дисипації кінетичної енергії ε по висоті реактора на відстані, рівній r_m від центральної осі вала для трьох реакторів з двоюрисними мішалками: $d_m = (0,15 \div 0,35)D$ і відстань між ними $C_{1-2} = d_m$

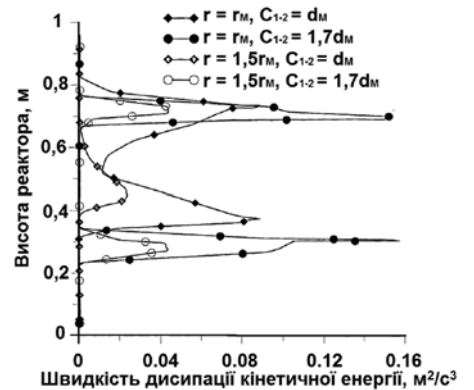


Рис. 5 – Швидкість дисипації кінетичної енергії ε по висоті реактора на відстані, рівній $1,5 r_m$ і $1,5 r_m$ від центральної осі вала двох реакторів з двоюрисними мішалками діаметром $d_m = 0,35D$ і відстанями між ними $C_{1-2} = d_m$ та $1,7d_m$

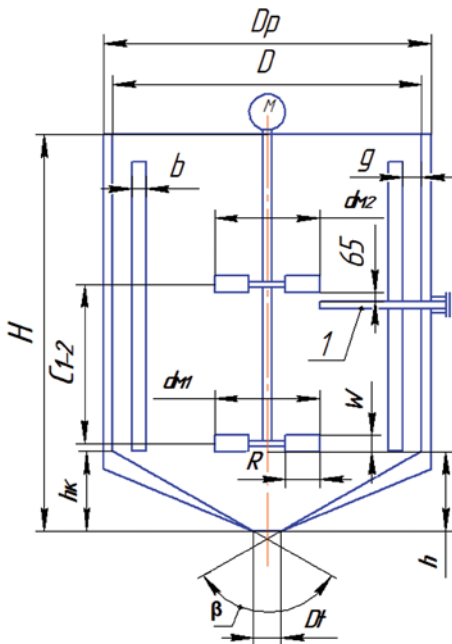


Рис. 6 – Загальний вигляд реактора з турбінним змішувачем: D – діаметр реактора; D_p – діаметр водяної сорочки; H – висота реактора; b – ширина перегородок; g – відстань між стінкою резервуара і перегородкою; h_c – висота конусної частини реактора; W – ширина лопаті; R – довжина лопаті; d_{m1} , d_{m2} – діаметр мішалки; Dt – діаметр зливного клапана; h – висота встановлення змішувача; β – кут при вершині конічного днища; C_{1-2} – відстань між мішалками; 1 – патрубок для введення каталізатора (в область з максимальним значенням дисипації кінетичної енергії)

ного осадження гліцеролової фази та періодичного зливання проміжних і кінцевих продуктів. Конструкційну схему реактора наведено на рис. 6. На основі досліджень і рекомендацій, що впливають 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 залежать від низки специфічних конструкційних рішень. Наведені алгоритм і схема методики проектування дозволяють проводити розрахунки основних конструкційних параметрів реакторів будь-якої продуктивності з механічними змішувачами всякого типу.

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

Список літератури

1. Крамерс Х. Химические реакторы [Текст] / Х. Крамерс. – М.: Химия, 1967. – 264 с.
2. Денбиг К.Г. Теория химических реакторов [Текст] / К.Г. Денбиг // – М.: Наука, 1968. – 120 с.
3. Берлин А.А. Кинетический метод в синтезе полимеров. [Текст] / А.А. Берлин. – М.: Химия, 1973. – 360 с.

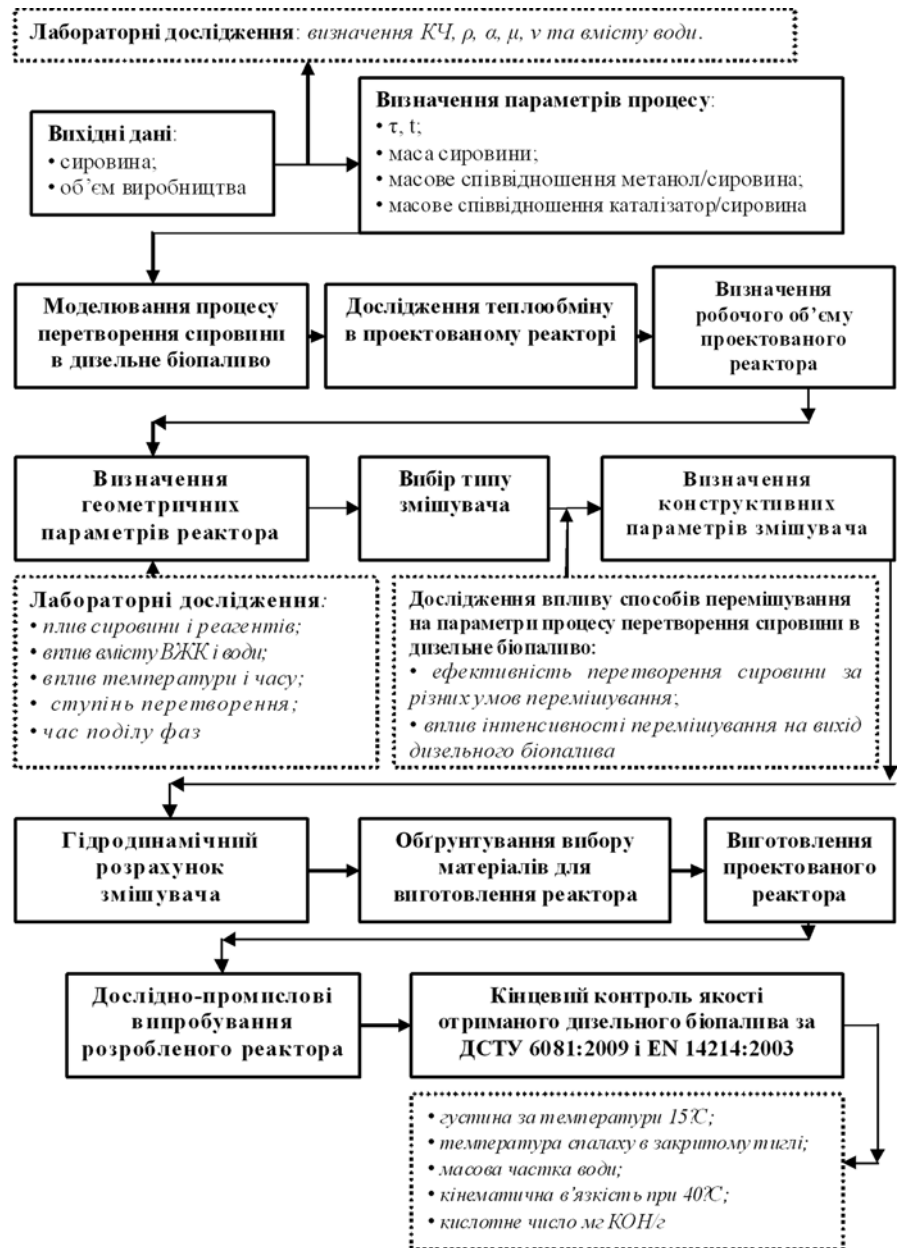


Рис. 7 – Структурна схема методики проектування реакторів періодичної дії для виробництва дизельного біопалива: КЧ – кислотне число, ρ – густина, α – кінематична в'язкість, μ – кінематична в'язкість, ν – динамічна в'язкість, τ – час реакції, t – температура реакції, ВЖК – вільні жирні кислоти

4. Гуль В.Е. Основы переработки пластмасс [Текст] / В.Е. Гуль. – М.: Химия, 1985. – 400 с.

5. McCarthy L.G. Computational fluid dynamics modeling of paddle dissolution apparatus: agitation rate, mixing patterns, and fluid velocities [Текст] / LG McCarthy, G Bradley, JC Sexton, OI Corrigan, AM Healy. – AAPS PharmSciTech. – 2004. – 5(2) Article 21.

6. Васильцов Э.А. Аппараты для перемешивания жидких сред: Справочное пособие [Текст] / Э.А. Васильцов, В.Г. Ушаков. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 272 с.

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

Summary. Developed and proved technique of designing reactors with mechanical mixers for the production of biodiesel.

Стаття надійшла до редакції 22 січня 2014 р.