

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЧАСУ ВИПАРЮВАННЯ РІДИНИ ВІД КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОТОРНОГО ПЛІВКОВОГО АПАРАТА

Волоха М., д-р техн. наук, проф.,

<https://orcid.org/0000-0002-0112-7324>, e-mail: volmp@i.ua

Голова О., канд. техн. наук, доц.,

<https://orcid.org/0000-0001-6984-8673>, e-mail: golova.olga@lil.kpi.ua

Воробйов О., здобувач PhD, старший викладач,

<https://orcid.org/0000-0001-5314-1075>, e-mail: vorobyov.kpi@gmail.com

Лазарчук-Воробйова Ю., аспірантка,

<https://orcid.org/0000-0002-7866-3299>, e-mail: jullazarchuk@gmail.com,

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Анотація

Робота присвячена дослідженню залежності часу випарювання рідини від конструктивних параметрів роторного плівкового апарата (РПА), що є важливим для харчової, фармацевтичної та нафтохімічної промисловостей. РПА ефективні для термолабільних і в'язких розчинів завдяки інтенсивному теплообміну та короткому контакту з нагрівальною поверхнею. Однак їхнє масове впровадження стримується складністю конструкції, високою вартістю, обмеженою продуктивністю та ризиком пригорання. Малий робочий об'єм РПА (у 10-15 разів менший за аналоги) є перевагою, однак ускладнює контроль часу перебування продукту.

Метою роботи є обґрунтування показників і методу розрахунку середнього часу перебування продукту в РПА залежно від частоти обертів, кількості лопатей ротора та щільності зрошення робочої поверхні.

Методи. Досліди проводилися у НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Використовувалися водні розчини гліцерину (50%, 85%), паливні присадки С-150 та дистильована вода. Середній час перебування продукту в РПА визначався за обсягом утримуваної речовини та швидкістю потоку. Проведено кореляційний аналіз експериментальних даних для виявлення впливових факторів на теплообмін.

Результати. Установлено, що збільшення частоти обертання ротора призводить до збільшення середнього часу перебування продукту в РПА через зростання відцентрових сил і накопичення рідини у носовій хвилі перед лопатями. Підвищення щільності зрошення при незмінній частоті обертання ротора також збільшує об'єм рідини в роликах, сприяючи більшому переміщенню рідини в осьовому напрямку. Збільшення кількості шарнірних лопатей ротора посилює середню товщину плівки рідини та, відповідно, час перебування. Для узагальнення даних використано критерії Рейнольдса (Re), Фруда (Fr) та критерій часу перебування (K_t). Встановлено, що зі збільшенням Re час перебування зменшується, а зі збільшенням $Fr - K_t$ зростає. Отримано інтерполяційне рівняння, яке описує експериментальні дані з точністю 19%.

Висновки. Розрахунок параметрів РПА можливий на основі експериментальних даних і критеріальних рівнянь. Дослідження підтверджують вплив частоти обертання, кількості лопатей ротора та щільності зрошення на середній час перебування продукту в РПА. Посилення обертів ротора та кількості лопатей збільшує товщину плівки та час перебування. Підвищення щільності зрошення збільшує об'єм рідини та її осьове переміщення. Зростання Re незначно зменшує час перебування та K_t , водночас як зростання Fr різко збільшує K_t .

Ключові слова: роторний плівковий апарат (РПА), лопаті, час перебування продукту в РПА, випарювання, концентрація, термолабільні речовини, критерій Рейнольдса, критерій Фруда

Вступ. Багато масообмінних хіміко-технологічних процесів сучасних харчових, фармацевтичних і нафтохімічних галузей промисловості, пов'язаних із розділенням рідких сумішей або виділенням окремих компонентів із газового чи пароподібного середовища, здійснюється апаратами роторного типу. Зокрема, для випарювання термолабільних (чутливих до нагрівання), в'язких, пастоподібних розчинів і розчинів, що кристалізуються, завдяки інтенсивному теплообміну та короткочасності контакту з поверхнею нагріву у виробництві використовуються роторно-плівкові апарати (РПА). Однак такі апарати складні за конструкцією і мають високу вартість попри обмежену продуктивність через малу поверхню нагріву. Окрім того, локалізація значної потужності в потоці рідини через неузгодженість із відносно малим проміжком часу дії може призводити до пригорань компонентів оброблюваних розчинів тощо. Саме ці недоліки стримують широке впровадження РПА. Тому завданням проектування обладнання для сучасних масообмінних переходів є попередні пошукові дослідження найбільш ефективних апаратів, які дають змогу покращити якісні та кількісні показники цього процесу.

Масообмінні процеси, що здійснюються в газорідних системах, становлять значну частину хімічної технології. Вони переважно використовуються для розділення рідких сумішей або виділення окремих компонентів із газових або пароподібних середовищ. У сучасній харчовій, фармацевтичній, хімічній і нафтохімічній галузях промисловості спостерігається перехід від масообмінних апаратів колонного типу до апаратів із механічним підведенням енергії. Апарати роторного типу реалізують метод енергетичного впливу на хіміко-технологічні процеси, за якого міжфазна турбулентність забезпечується дією відцентрових сил [Врагов, 2015; Михайловський та ін., 2021; Cherevko et al., 2021].

Однією з особливостей РПА є короткочасний контакт рідини з робочою

поверхнею. Це зумовлено утримуванням рідини невеликого робочого об'єму, який порівняно з іншими апаратами менший у 10-15 разів [Antine et al., 2020; Han & Hoang, 2020; Cherevko et al., 2021; Zahorulko et al., 2021]. Про обмеження можливостей промислового застосування РПА можна судити зокрема за коротким проміжком часу (10-30 с) перебування на нагрівальній поверхні речовини, особливо такої термочутливої як, наприклад, плодово-ягідне пюре [Скрипников, 1991; Kцnig & Renner, 2019; Singla et al., 2020].

Точний теоретичний розрахунок хіміко-технологічних процесів і параметрів обладнання практично неможливий без попереднього експериментального визначення фізико-хімічних і теплофізичних властивостей середовища та взаємодіючих речовин, що доводить основоположник даного напрямку досліджень проф. А.П. Врагов [Врагов, 2015] та інші дослідники цієї школи [Бубликова, 2007; Пляцук та ін., 2013; Сидоренко, 2011]. Часто ця частина розрахунків створює чималі труднощі й потребує пильної уваги, щоб надалі не припуститися значних похибок у визначенні конструктивних розмірів обладнання [Врагов та ін., 2008; Galanakis et al.; 2021; Pap et al., 2021].

Отже, недостатня кількість даних про роботу РПА, особливо у режимі випарювання термолабільних розчинів способами механічної інтенсифікації теплообміну, потребує детальних досліджень.

Метою досліджень є обґрунтування показників і методу розрахунку середнього часу перебування продукту у РПА залежно від частоти обертів і кількості лопатей ротора та щільності зрошення робочої поверхні апарата.

Методи і матеріали. Досліди проводилися на кафедрі процесів та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» [Голова, 1993].

Використовувались робочі рідини наближені до нафтопродуктів за чутливістю до термічної обробки: водні розчини гліцерину (50%, 85%); паливні присадки

С-150 та дистильована вода (контроль). Паливна присадка — хімічна добавка в пальне, яка підвищує октанове число.

Час перебування речовини в апараті так званого проміжного типу вимірювався методом миттєвого відключення живлення, його розподілення за повторностями дослідів є близьким до рівномірного. Однак точне визначення часу потрібно проводити за допомогою функції розподілення, у дослідях застосовували більш зручний для практики інженерний розрахунок за обсягом утримуваної речовини VR, тобто розраховували *середній час* $\bar{\tau}$:

$$\bar{\tau} = \frac{VR}{V},$$

де: VR — обсяг (кількість) рухомої фази речовини, який необхідний для проведення процесу розділу фаз, м³;

V — швидкість потоку за об'ємної витрати, м³/с.

Проводився кореляційний аналіз отриманих експериментальних даних. Оцінювався зв'язок між факторами, що суттєво впливають на процес тепловіддачі в РПА. Незначні фактори впливу відсіювалися за методом випадкового балансу.

Результати. Розчини високов'язкі, пастоподібні та термолабільні випаровують у плівкових випарних апаратах за двома принципами дії:

- гравітаційною течією плівки обертовою поверхнею нагріву (конус, циліндр або спіраль), утвореної рухомим розчином під дією відцентрової сили;

- розмазуванням розчину роторними мішалками поверхнею теплообміну, що сприяє інтенсифікації процесу теплопередачі і, відповідно, випаровуванню розчинника.

До другої групи належать апарати, в яких процес відбувається в плівці, що створюється на внутрішній поверхні нерухомого корпусу обертовим ротором (РПА). За такою схемою виконана лабораторна установка (рис.1).

Основними елементами цих апаратів є корпус 1 з нагрівальною паровою сорочкою 2 для обігріву сухою насиченою па-

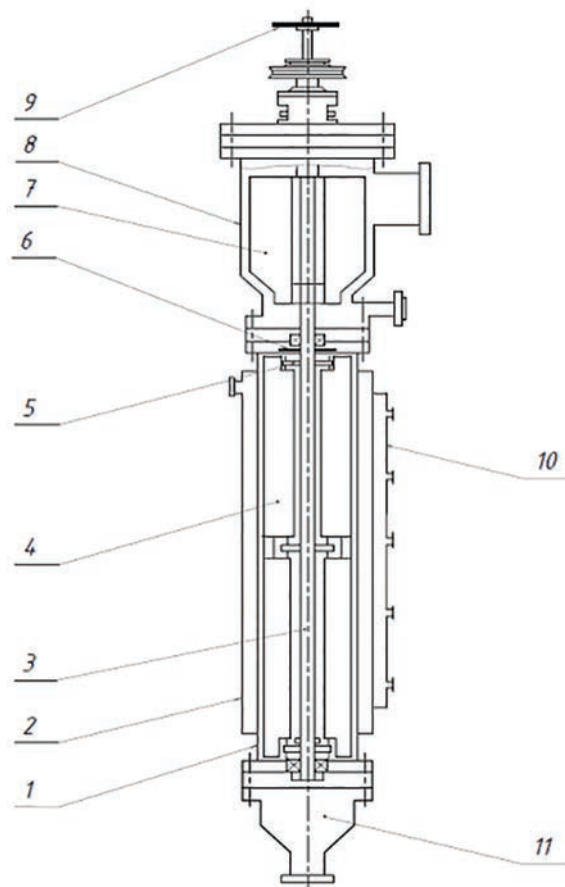


Рисунок 1 – Схема роторного плівкового апарата з шарнірним кріпленням лопатей: 1 – корпус; 2 – нагрівальна сорочка; 3 – вал ротора; 4 – лопаті; 5 – маточина; 6 – розподільче кільце; 7 – робоче колесо; 8 – сепаратор; 9 – датчик тахометра; 10 – термоелементи; 11 – днище

рою. В середині нагрівальної камери розміщений ротор 3 з лопатями 4.

Через проміжний підшипник корпус апарата з'єднаний із сепаратором 8 інерційного типу. Чотирилопатеве робоче колесо 7 сепаратора, змонтоване на одному валу з ротором 3, розподіляє розчин стінкою корпусу, він стікає у вигляді тонкої плівки під дією сили тяжіння. У ході течії розчин концентрується внаслідок випаровування розчинника. У міру випарювання розчинника на стінці корпусу утворюється пастоподібний або навіть сухий залишок розчиненої речовини, що знімається з поверхні, яка обігрівается лопатями 4. Шарнірно закріплений ротор апарата є розбірним. Він складається з вала, лопатей 4 від (2-х до 4-х) і трьох маточин

5. На кінцях лопатей приварені штифти для їхнього встановлення у гніздах маточин. Після складання лопаті вільно обертаються в обидва боки на кут 45° . На валу ротора над верхньою маточиною кріпиться розподільче кільце 6, призначене для рівномірного зрощення робочою рідиною внутрішньої поверхні корпуса апарата. Нижня частина корпуса закінчувалася конічним днищем 11. Швидкому видаленню продукту з апарата сприяє кут 120° при вершині конуса. Датчик тахометра 9 розміщувався на верхньому кінці валу. Для контролювання розподілу температури в плівці рідини за висотою апарата в його стінці встановлено 5

термоелементів на відстані 80 мм один від одного 10. Це дало змогу додатково дослідити локальну зміну коефіцієнта тепловіддачі за висотою апарата.

На відміну від апаратів із жорстким кріпленням лопатей ротора, де проміжок між лопаттю і стінкою апарата фіксований (0,4-1,5 мм), у дослідному апараті застосовувалися рухомі шарнірні лопаті, за яких товщина плівки визначається відцентровою силою і фізико-хімічними властивостями розчину.

Важливою особливістю роторних плівкових випарних апаратів є інтенсифікація процесу за рахунок його проведення в тонкій плівці, що переміщується лопатями 4 мішалки, закріплених на валу ротора 3 за допомогою розподільчого кільця 6. Типи роторних мішалок наведені на рис. 2.

Аналіз літературних джерел показав, що серед різноманіття виробничих хімі-

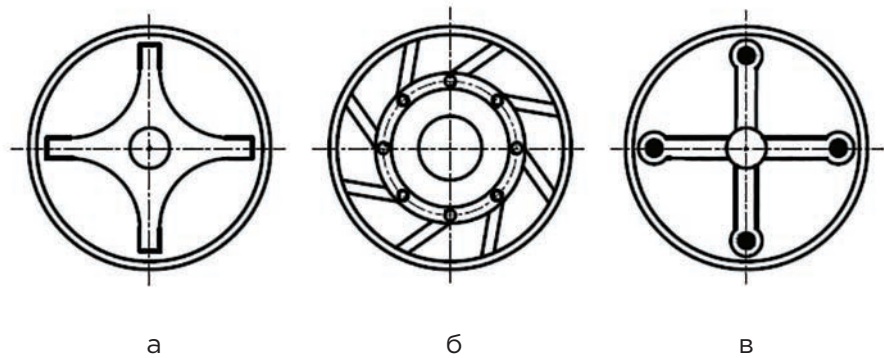


Рисунок 2 – Роторні мішалки: а – жорстка, б – з шарнірним кріпленням лопатей, в – з рухомими лопатями

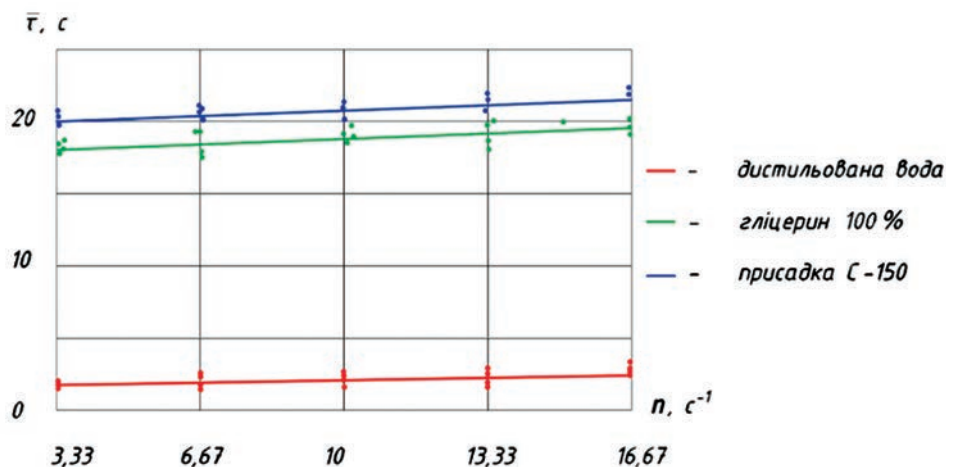


Рисунок 3 – Залежність середнього часу перебування τ в роторному плівковому апараті від частоти обертання ротора n

ко-технологічних процесів максимальний ефект від використання РПА досягається у таких процесах:

- концентрування високов'язких розчинів або випарювання до високої концентрації твердих речовин;
- процеси, що проходять у термолабільних середовищах;
- абсорбційне очищення вентиляційних викидів від шкідливих середовищ;
- швидкі хімічні реакції взаємодії газу та рідини;
- мокре уловлювання тонкодисперсного аерозолю та пилу;
- охолодження (нагрівання) та зволоження (осушення) газу рідиною;
- реконструкція підприємств із обмеженими виробничими площами.

Обробка експериментальних даних на ПК засвідчила таке. Середній час перебування продукту в апараті залежно від час-

тоти обертання ротора (рис. 3).

Встановлено, що зі збільшенням кількості обертів відбувається збільшення середнього часу перебування. Це пов'язано з тим, що зменшення проміжку між кромкою лопаті та корпусом апарату за рахунок збільшення відцентрових сил, що діють на лопать, призводить до збільшення маси рідини в носовій хвилі перед лопатями ротора.

Вплив щільності зрошення Γ_v на середній час перебування в апараті представлено на рис. 4.

Як видно з рисунка 4, збільшення щільності зрошення при незмінній частоті обертання ротора призводить до збільшення об'єму рідини в роликках, що дає можливість більшій масі рідини переміщатися в осьовому напрямку апарата.

Вплив кількості лопатей ротора на час перебування зображено на рис. 5.

Установлено, що збільшення кількості шарнірних лопатей призводить до збільшення середньої товщини плівки рідини, що аналогічно збільшенню частоти обертання ротора, за рахунок зростання тангенціальної складової швидкості рідини і, як наслідок, середній час перебування рідини в роторному плівковому апараті при цьому збільшується.

Для наближення процесів до реальних промислових систем результати дослідів прийнято подавати у вигляді критеріальних рівнянь на основі теорії подібності. Тобто, за умови течії рідини у плівці відношення сил інерції до сил в'язкості опи-

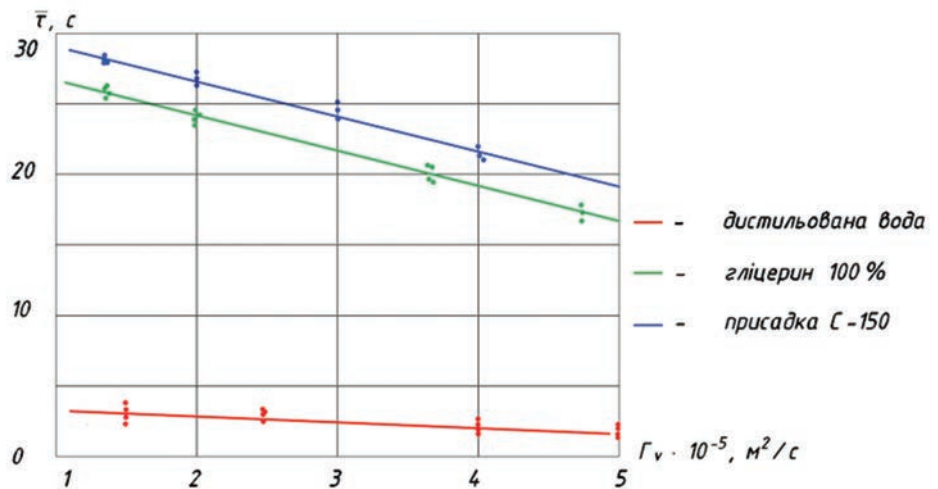


Рисунок 4 – Залежність середнього часу перебування τ від щільності зрошення Γ_v

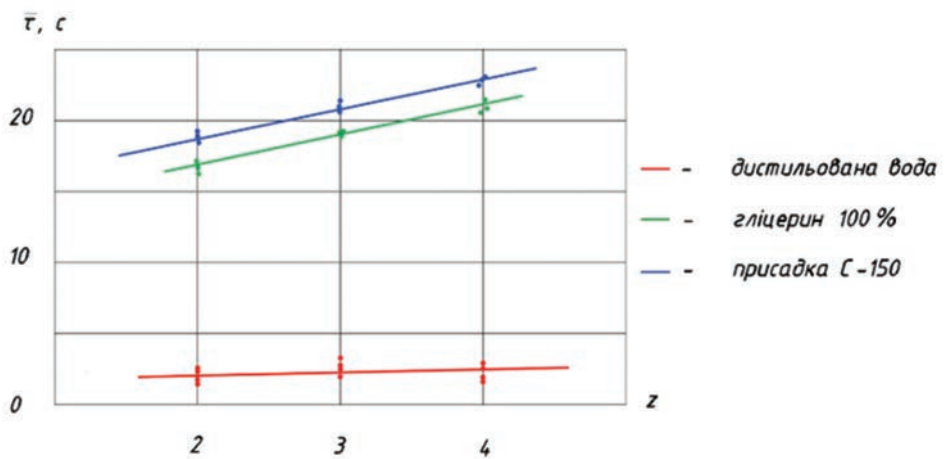


Рисунок 5 – Залежність середнього часу перебування τ від числа лопатей z

сує так званий плівковий критерій (число) Рейнольдса Re , який показує домінування однієї з цих сил у конкретному випадку [Врагов, 2015]:

$$Re = \frac{4\Gamma_v}{\nu} = \frac{4w\delta}{\nu}, \quad (2)$$

де: Γ_v – щільність зрошення, ($\text{м}^2/\text{с}$);
 w – середня швидкість рідини, ($\text{м}/\text{с}$);
 δ – середня товщина плівки, (мм);
 ν – кінематична в'язкість, ($\text{м}^2/\text{с}$).

Графік залежності середнього часу перебування рідини в роторному плівковому апараті від числа Рейнольдса представлений на рис. 6. Спостерігається тенденція до зменшення середнього часу перебування зі збільшенням числа Рейнольдса. Ця

залежність аналогічна впливу щільності зрощення на середній час перебування в РПА.

Для характеристики руху рідин і газів, особливо за значного впливу сил гравітації, використовувався критерій Фруда F_r – співвідношення між інерційними силами та силами тяжіння, що діють на елементарний об'єм рідини або газу. За течії рідини у плівці [Врагов, 2015]:

$$F_r = \frac{1}{36} \cdot \frac{g \cdot \delta^3}{\nu^2}, \quad (3)$$

де: g - прискорення сили тяжіння, (м/с²);

δ - середня товщина плівки, (мм);

ν - кінематична в'язкість, (м²/с).

Для характеристики середнього часу перебування рідини в роторному плівковому апараті використовувався критерій часу:

$$K_\tau = \frac{\bar{\tau} \cdot w}{l}, \quad (4)$$

де: $\bar{\tau}$ - середній час перебування в апараті, (с);

w - лінійна швидкість краю лопаті, (м/с);

l - довжина апарата, (м).

На рис. 7 наведені дані у вигляді зміни критерію часу K_τ при різних значеннях критерія Фруда, який застосовується для аналізу динамічної подібності у задачах гідроаеромеханіки за суттєвого впливу зовнішніх гравітаційних сил.

Очевидно, що при зростанні значень критерія Фруда збільшується K_τ .

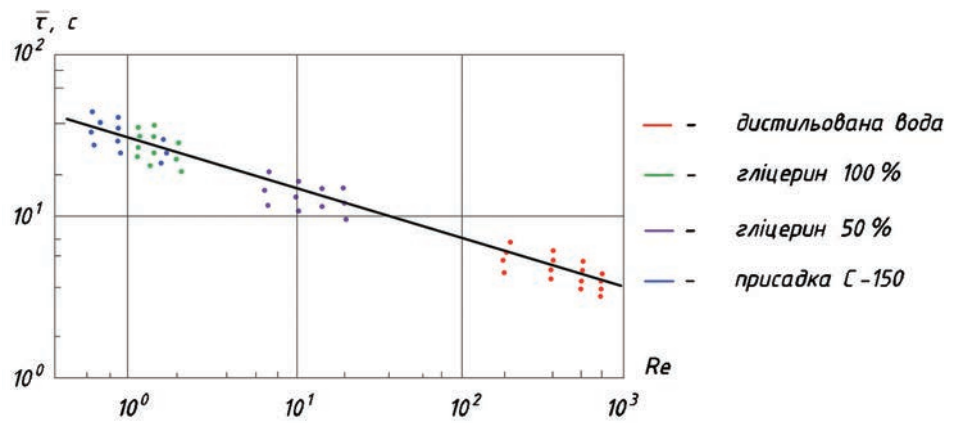


Рисунок 6 – Залежність середнього часу перебування в апараті $\bar{\tau}$ від числа Рейнольдса

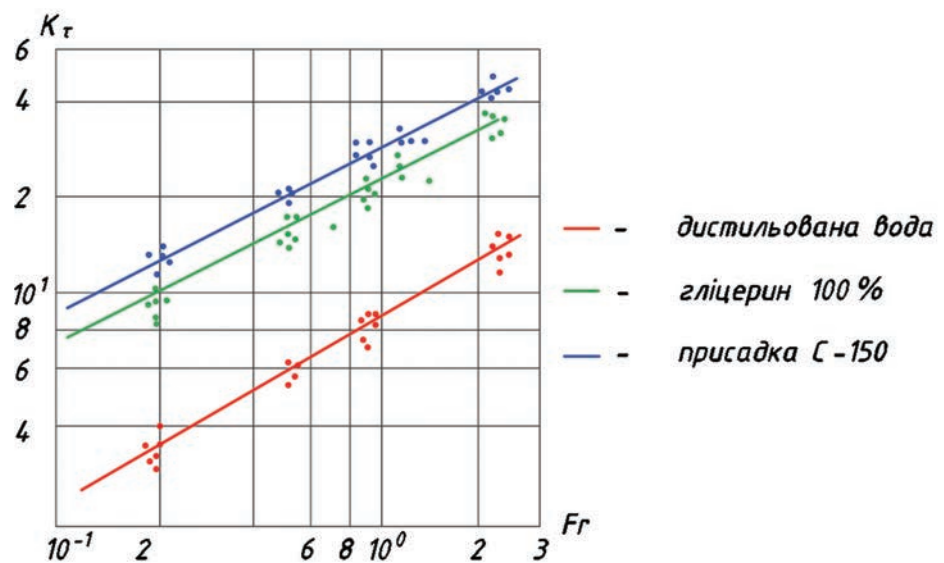


Рисунок 7 – Залежність K_τ від критерія Фруда Fr ($\bar{\tau}_p = 20^\circ C$)

Експериментальні дані описуються таким рівнянням:

$$K_\tau = c_1 \cdot F_r^{0,52}, \quad (5)$$

Дослідну залежність комплексного відношення $K_\tau / F_r^{0,52}$ від числа Рейнольдса наведено на рис. 8, де видно і зазначалось раніше, що зі зростанням числа Рейнольдса відбувається зменшення часу перебування в РПА і, відповідно, зменшується критерій часу K_τ .

На підставі обробки експериментальних даних на ПК отримано таку інтерполяційну залежність:

$$K_\tau = c_2 \cdot F_r^{0,52} \cdot Re^{-0,3}, \quad (6)$$

На рис. 9 наведено графік залежності від-

ношення $K_\tau/F_r^{0,52} \cdot Re^{-0,3}$ від числа лопатей ротора:

Отримані експериментальні дані з точністю 19% описуються таким інтерполяційним рівнянням:

$$K_\tau = 1,45 F_r^{0,52} \cdot Re^{-0,3} \cdot z^{0,31*}, \quad (7)$$

* рівняння отримано за умови варіювання числа Рейнольдса (плівкового) в межах $10^{-1} < Re < 10^3$ та числа Фруда (плівкового) — $10^{-1} < F_r < 3$.

Обговорення.

Представлене дослідження є важливим кроком до кращого розуміння та оптимізації роботи роторних плівкових апаратів (РПА), особливо в контексті випаровування термолабільних і високов'язких розчинів. Результати підтверджують складність гідродинамічних і теплообмінних процесів у РПА, що робить аналітичне розв'язання задачі вкрай важким і підкреслює необхідність емпіричних досліджень і критеріальних рівнянь для практичних розрахунків [Воронцов, Тананайко, 1972; Врагов, 2015].

Аналіз досліджень реальних виробничих хіміко-технологічних процесів промислових систем стосовно концентрування високов'язких розчинів або випарювання до високої концентрації твердих речовин і процеси, що відбуваються у термолабільних середовищах, зручно подавати у вигляді критеріальних рівнянь. При цьому за умови течії рідини у плівці РПА як специфічні додаткові характеристики застосовуються:

- плівковий критерій (число) Рейнольдса Re , який показує відношення (домінування) однієї з сил (інерції чи в'язко-

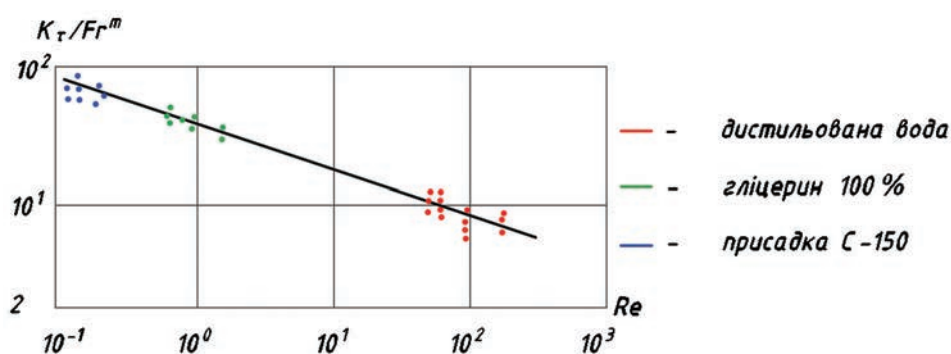


Рисунок 8 – Залежність комплексного відношення $K_\tau/F_r^{0,52}$ від числа Рейнольдса

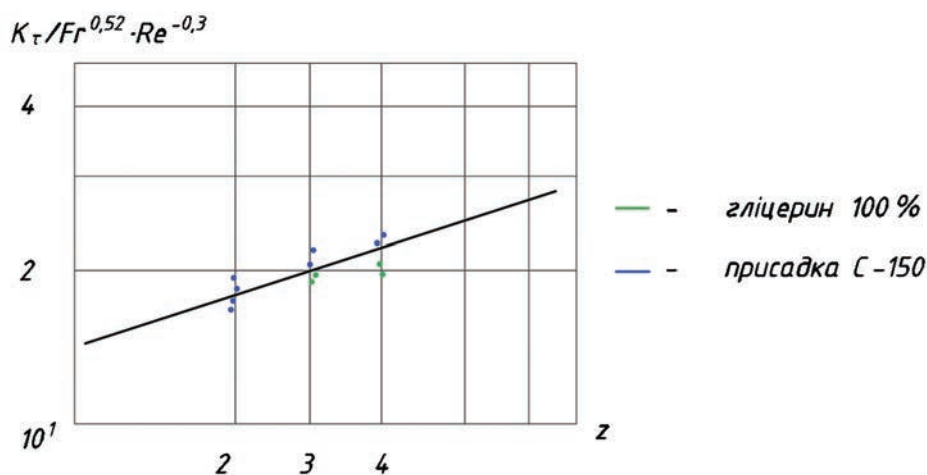


Рисунок 9 – Графік залежності відношення $K_\tau/F_r^{0,52} \cdot Re^{-0,3}$ від числа лопатей z

сті) в кожному конкретному випадку;

- критерій Фруда F_r , співвідношення між інерційними силами та силами тяжіння, що діють на елементарний об'єм рідини за значного впливу сил гравітації;

- часовий критерій k , який характеризує середній час перебування рідини в РПА, величина пропорційна лінійній швидкості краю лопаті w і обернено пропорційна поточній довжині апарата l .

Ключовим аспектом, на який вказують отримані дані, є взаємозв'язок між конструктивними параметрами РПА та середнім часом перебування продукту, що є критично важливим для процесів, де час контакту з нагрівальною поверхнею має бути мінімальним, як у випадку з термолабільними речовинами. Збільшення частоти обертання ротора, що, здавалося б, мало б прискорювати процес, призво-

дить до збільшення середнього часу перебування. Це пояснюється формуванням носової хвилі перед лопатями за рахунок зростання відцентрових сил, що збільшує об'єм рідини, яка утримується в апараті. Цей феномен потребує подальшого детального вивчення, можливо, з використанням методів CFD (Computational Fluid Dynamics) для візуалізації та кількісної оцінки розподілу потоків і товщини плівки в динаміці. Розуміння цього механізму дасть змогу точніше налаштовувати швидкість обертання для конкретних продуктів і технологічних завдань.

Вплив кількості лопатей ротора також є значущим: зі збільшенням числа шарнірних лопатей спостерігається зростання середньої товщини плівки та, як наслідок, середнього часу перебування. Це вказує на те, що оптимальна кількість лопатей буде залежати від реологічних властивостей рідини та бажаного часу контакту. Для високов'язких розчинів, де важливо забезпечити інтенсивне перемішування та тонкий шар, збільшення кількості лопатей може бути виправданим, незважаючи на потенційне збільшення часу перебування, оскільки це може поліпшити теплопередачу. Однак для термолабільних речовин, де короткий час перебування є пріоритетом, може знадобитися компроміс.

Взаємозв'язок зі щільністю зрошення демонструє, що її збільшення призводить до зростання об'єму рідини в роликах і, відповідно, до збільшення об'єму рідини, що переміщується в осьовому напрямку, впливаючи на час перебування. Це підкреслює важливість точного дозування подачі продукту в РПА для контролю над процесом.

Застосування критеріальних рівнянь, наприклад числа Рейнольдса (Re) та Фруда (F_r), а також часового критерію ($K\tau$), є доцільним для узагальнення експериментальних даних та їхнього масштабування до промислових умов. Тенденція до зменшення часу перебування зі збільшенням числа Рейнольдса є очікуваною, оскільки вищі значення Re вказують на більш турбулентний потік і, відповідно, швидше

протікання рідини. Зростання $K\tau$ зі збільшенням F_r свідчить про значний вплив гравітаційних сил на час перебування рідини в апараті. Отримане інтерполяційне рівняння (7) надає цінний інструмент для інженерних розрахунків та оптимізації конструкції РПА. Точність цього рівняння (19%) є прийнятною для інженерних цілей, однак вказує на те, що залишаються невизначені фактори, які потребують подальших досліджень.

Обмеження продуктивності РПА через малу поверхню нагріву та складність контролю часу перебування залишаються викликами. Майбутні дослідження можуть бути спрямовані на розробку РПА з адаптивними системами керування, які могли б динамічно регулювати швидкість обертання ротора та кількість лопатей для підтримки оптимального часу перебування та інтенсифікації тепломасообміну залежно від властивостей оброблюваної речовини та бажаних кінцевих характеристик продукту. Також перспективним напрямком є вивчення можливості інтеграції декількох роторних елементів або оптимізації геометрії нагрівальної поверхні для збільшення площі теплообміну без значного збільшення утримуваного об'єму.

Висновки. Однією з переваг роторних плівкових апаратів (РПА) є короткочасний контакт рідини з нагрівальною поверхнею. Це зумовлено невеликим утримуванним об'ємом робочої рідини, який порівняно з іншими аналогічними апаратами менший у 10-15 разів. Однак мала кількість оброблюваного продукту є загальним недоліком РПА, оскільки складно керувати часом перебування продукту і впливати вибірково на компоненти у процесі обробки.

Значна кількість і різноманіття факторів, що впливають на гідродинаміку і теплообмін в РПА, вказує на те, що аналітичне розв'язання задачі є складним, однак розраховувати РПА можна на основі експериментальних даних, емпіричних формул і критеріальних рівнянь.

Проведені експериментальні дослідження середнього часу перебування про-

дукту в РПА підтверджуються отриманими інтерполяційними рівняннями та дають змогу визначити вплив частоти обертання, кількості лопатей ротора та щільності зрошення робочої поверхні на середній час перебування $\bar{\tau}$ в РПА у заданому діапазоні роботи апарата. Узагальнені дані дослідів оцінки $\bar{\tau}$ з використанням наближених до нафтопродуктів за чутливістю до термічної обробки водних розчинів гліцерину (50%, 85%), паливних присадок С-150 та дистильованої води.

Установлено, що збільшення кількості шарнірних лопатей ротора та його обертів призводить до збільшення середньої товщини плівки рідини, та, як наслідок, до збільшення середнього часу перебування в апараті. Збільшення щільності зрошення при незмінній частоті обертання ротора призводить до збільшення об'єму рідини в роликах, що дає змогу більшій масі рідини переміщатися в осьовому напрямку апарата. Зі збільшенням числа Рейнольдса спостерігається несуттєве зменшення середнього часу в РПА та часового критерію K_r , який різко зростає при збільшенні критерія Фруда F_r .

Перелік літератури

Бубликова, Є. В. (2007). Закономірності гідродинаміки та масопередачі процесу ректифікації у відцентровому апараті. Автореферат дисертації кандидата технічних наук, 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології». Харків, 2007. 22 с.

Воронцов, Є.Г., Тананайко, Ю.М. Теплообмін у рідких плівках. — Київ, 1972. 196 с.

Врагов, А.П. (2015). Теплообмінні процеси та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв. Суми : СумДУ, 262 с.

Врагов, А. П., Михайловський, Я. Е., & Якушко, С. І. (2008). Матеріали до розрахунків процесів та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв. Суми: СумДУ, 170 с.

Голова, О.О. (1993). Гідродинаміка і

теплообмін при концентруванні нафтопродуктів у роторних плівкових апаратах. Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к.т.н., спец. 05.17.08 «Процеси і апарати хімічної технології». Київ, 24 с.

Михайловський, Я. Е., Артюхов, А. Є., & Юхименко, М. П. (2021). Тепло-ві і масообмінні процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв у системах «газ (пара) — рідина». Суми: Сумський державний університет, 391 с.

Пляцук, Л.Д., Шапорев, В.П. та ін. (2013). Основи гідродинаміки та масопереносу в роторних масообмінних апаратах. Суми: Сумський державний університет, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». 171 с.

Сидоренко, С.В. (2011). Гідродинаміка в диспергуючому контактному пристрої відцентрового масообмінного апарата. Дис. на здобуття наук. ступеня к.т.н. Суми, 165 с.

Скрипников, Ю.Г. (1991). Технологія переробки плодів і ягід. К.: Урожай, 272 с.

Antine, S., L'Horset, A.M., Heiden, P., Salazar, G. (2020). Experiential children's nutrition education: Growing strong bodies and healthy minds. *EXPLORE*, 16 (5), 340-341. <https://doi.org/10.1016/j.explore.2020.06.007>.

Cherevko, O., Mikhaylov, V., Zahorulko, A., Zagorulko, A., Gordienko, I. (2021). Development of a thermal-radiation single-drum roll dryer for concentrated food stuff. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1. 11 (109), 25-32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224990>.

Galanakis, C.M., Rizou, M., Aldawoud, T.M.S., Ucak, I., Rowan, N. J. (2021). Innovations and technology disruptions in the food sector within the COVID-19 pandemic and post-lockdown era. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.002>.

Han, B., Hoang, B. X. (2020). Opinions on the current pandemic of COVID-19: Use functional food to boost our immune functions. *Journal of Infection and Public Health*, 13 (12), 1811-1817. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2020.09.007>.

org/10.1016/j.jiph.2020.08.014.

König, L.M., Renner, B. (2019). Boosting healthy food choices by meal colour variety: results from two experiments and a just-in-time Ecological Momentary Intervention. *BMC Public Health*, 19 (1). <https://doi.org/10.1186/s12889-019-7306-z>.

Pap, N., Fidelis, M., Azevedo, L., do Carmo, M.A.V., Wang, D., Mocan, A. et. al. (2021). Berry polyphenols and human health: evidence of antioxidant, anti-inflammatory, microbiota modulation, and cell-protecting effects. *Current Opinion in Food Science*, 42, 167–186. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.06.003>.

Singla, G., Chaturvedi, K., & Sandhu, P. P. (2020). Status and recent trends in fresh-cut fruits and vegetables. *Fresh-Cut Fruits and Vegetables*, 17-49. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816184-5.00002-1>.

Zahorulko, A., Zagorulko, A., Cherevko, O., Dromenko, O., Solomon, A., Yakobchuk, R., Bondarenko, O., Nozdrina, N. (2021). Determination of the heat transfer coefficient of a rotary film evaporator with a heating film-forming element. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(8 (114)), P. 41-47. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247283>

References

Antine, S., L'Horset, A.M., Heiden, P., Salazar, G. (2020). Experiential children's nutrition education: Growing strong bodies and healthy minds. *EXPLORE*, 16 (5), 340-341. <https://doi.org/10.1016/j.explore.2020.06.007>.

Bublykova, E.V. (2007). Regularities of hydrodynamics and mass transfer of the rectification process in a centrifugal apparatus. *Kharkiv*, 22 с.

Cherevko, O., Mikhaylov, V., Zahorulko, A., Zagorulko, A., Gordienko, I. (2021). Development of a thermal-radiation single-drum roll dryer for concentrated food stuff. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1. 11 (109), 25-32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224990>.

Galanakis, C.M., Rizou, M., Aldawoud, T.M.S., Ucak, I., Rowan, N. J. (2021). Innovations and technology disruptions in the food sector within the COVID-19 pandemic and post-lockdown era. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.002>.

Golova, O.O. (1993). Hydrodynamics and heat transfer during the concentration of oil products in rotary film apparatus. PhD thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences, speciality 05.17.08 «Processes and devices of chemical technology». Kyiv, 24 с.

Han, B., Hoang, B. X. (2020). Opinions on the current pandemic of COVID-19: Use functional food to boost our immune functions. *Journal of Infection and Public Health*, 13 (12), 1811-1817. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2020.08.014>.

König, L.M., Renner, B. (2019). Boosting healthy food choices by meal colour variety: results from two experiments and a just-in-time Ecological Momentary Intervention. *BMC Public Health*, 19 (1). <https://doi.org/10.1186/s12889-019-7306-z>.

Mykhailovskyi, Ya. E., Artyukhov, A. Ye., & Yukhimencko, M. P. (2021). Thermal and mass transfer processes and equipment of chemical and oil refining industries in gas (steam) - liquid systems. Sumy: Sumy State University, 391 с.

Pap, N., Fidelis, M., Azevedo, L., do Carmo, M.A.V., Wang, D., Mocan, A. et. al. (2021). Berry polyphenols and human health: evidence of antioxidant, anti-inflammatory, microbiota modulation, and cell-protecting effects. *Current Opinion in Food Science*, 42, 167–186. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.06.003>.

Pliatsuk, L. D., Shaporiev, V. P., et al. (2013). Fundamentals of hydrodynamics and mass transfer in rotary mass transfer devices. Sumy: Sumy State University, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». 2013. 171 с.

Singla, G., Chaturvedi, K., & Sandhu, P. P. (2020). Status and recent trends in fresh-cut fruits and vegetables. *Fresh-Cut Fruits and Vegetables*, 17-49. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816184-5.00002-1>.

Skrypnikov, Yu. H. (1991). Technology of fruit and berry processing. K.: Urozhay, 272 c.

Sydorenko, S. V. (2011). Hydrodynamics in the dispersing contact device of a centrifugal mass transfer apparatus. dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. 165 c.

Vorontsov, E.G., Tananayko, Y.M. Heat transfer in liquid films. – Kyiv, 1972. 196 p.

Vragov, A.P. (2015). Heat exchange processes and equipment of chemical and gas and oil refining industries. Sumy: Sumy State University, 262 c.

Vragov, A.P., Mikhailovsky, Y.E.,

Yakushko, S.I. (2008). Materials for calculations of processes and equipment of chemical and gas and oil refining industries. Sumy: Sumy State University, 170 c.

Zahorulko, A., Zagorulko, A., Cherevko, O., Dromenko, O., Solomon, A., Yakobchuk, R., Bondarenko, O., Nozdrina, N. (2021). Determination of the heat transfer coefficient of a rotary film evaporator with a heating film-forming element. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(8 (114)), P. 41-47. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247283>

UDC 535.52:66.045

DEPENDENCE OF THE LIQUID EVAPORATION TIME ON THE DESIGN PARAMETERS OF THE ROTARY FILM APPARATUS

Volokha M., Doctor of Technical Sciences, Professor,

<https://orcid.org/0000-0002-0112-7324>, e-mail: volmp@i.ua

Golova O., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

<https://orcid.org/0000-0001-6984-8673>, e-mail: golova.olga@lil.kpi.ua

Vorobiov O., PhD candidate, Senior Lecturer,

<https://orcid.org/0000-0001-5314-1075>, e-mail: vorobyov.kpi@gmail.com

Lazarchuk-Vorobiova Y., postgraduate student,

<https://orcid.org/0000-0002-7866-3299>, e-mail: jullazarchuk@gmail.com,

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Summary

This work investigates the dependence of liquid evaporation time on the design parameters of a rotary film apparatus (RFA), crucial for the food, pharmaceutical, and petrochemical industries. RFAs are effective for thermolabile and viscous solutions due to intensive heat exchange and short contact with the heating surface. However, their widespread adoption is hindered by complex design, high cost, limited productivity, and the risk of scorching. The small working volume of RFAs (10-15 times smaller than their counterparts) is an advantage, but complicates the control of product residence time.

***This study** aims to substantiate indicators and a method for calculating the average product residence time in an RFA based on rotor speed, number of blades, and working surface irrigation density.*

***Methods.** Experiments were conducted at the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” using aqueous glycerol solutions (50%, 85%), S-150 fuel additives, and distilled water. The average product residence time in the RFA was determined by the volume of retained substance and flow rate. A correlation analysis of experimental data was performed to identify influential factors on heat transfer.*

***Results.** It was found that increasing the rotor speed leads to an increase in the average product residence time in the RFA due to increased centrifugal forces and liquid accumulation in the “nose wave” in front of the blades. Increasing irrigation density at constant rotor speed also increases the liquid volume in the rollers, facilitating greater axial liquid movement. Increasing the number of hinged rotor blades increases the average liquid film thickness and, consequently, the residence time. Reynolds (Re), Froude (Fr), and residence time ($K\tau$) criteria were used to generalize the data. It was established that with increasing Re , residence time decreases, while with increasing Fr , $K\tau$ increases. An interpolation equation was obtained that describes the experimental data with an accuracy of 19%.*

***Conclusions.** RFA parameter calculation is possible based on experimental data and critical equations. The study confirms the influence of rotor speed, number of rotor blades, and irrigation density on the average product residence time in the RFA. Increased rotor speed and number of blades increase film thickness and residence time. Increased irrigation density increases liquid volume and its axial movement. An increase in Re slightly decreases residence time and $K\tau$, while an increase in Fr sharply increases $K\tau$.*

***Keywords:** rotary film apparatus (RFA), blades, product residence time in RFA, evaporation, concentration, thermolabile substances, Reynolds number, Froude number.*