

УДК 664.

Л.П. Рева, д-р тех. наук
О.О. Петруша
Національний університет
харчових технологій
В.О. Мірошник,
канд. техн. наук
Національний університет
біоресурсів і риродокористування
України

**ДОСЛІДЖЕННЯ
ГІДРОДИНАМІЧНОЇ СТРУКТУРИ
ОСНОВНОГО ПОТОКУ
(ДИФУЗІЙНОГО СОКУ)
У ВЕРТИКАЛЬНОМУ
ПЕРЕДДЕФЕКТОРІ
НА ОСНОВІ СЕКЦІЙНОЇ МОДЕЛІ
ІЗ СЕКЦІЯМИ ПОВНОГО
ЗМІШУВАННЯ**

Під час проведення процесу очищення дифузійного соку, а саме попередньої дефекації, одним із важливих показників є гідродинамічна структура потоків у апараті, що суттєво впливає на технологічні аспекти процесу. На базі фізичної моделі вертикального прогресивного протитечійного переддефектора було досліджено функції розподілу часу перебування частинок основного потоку в апараті, які стали основою для створення математичної секційної моделі, що адекватно описує експериментальні дані для основного потоку переддефектора.

***Ключові слова:** гідродинамічна структура, статистичні характеристики, моделювання, секційна модель.*

В хімічній технології для створення нового технологічного процесу, а також інтенсифікації існуючого і ефективного апаратурного його оформлення треба, перш за все, виконати умови:

1. досягнення максимальної швидкості процесу;
2. забезпечення майже однакового часу перебування елементів потоку у апараті, що відповідатиме заданому ступеню перетворення цільового компонента.

Одним із визначальних етапів очищення в бурякоцукровому виробництві є процес попередньої дефекації, що передбачає оброблення дифузійного соку невеликою кількістю вапна для досягнення максимального ефекту осадження розчинних нецукрів (коагуляцією ВМС — білків та пектинів і осадженням аніонів кислот у формі малорозчинних солей кальцію). Окрім цього утворений переддефекаційний осад повинен бути досить стійким в жорстких умовах гарячого ступеня комбінованої основної дефекації в сучасній типовій схемі.

Процес переддефекації ще нерідко проводиться в односекційних апаратах типу ПР, в яких має місце значний байпас (проскок частини недостатньо обробленого вапном дифузійного соку), а також застійні зони, що перешкоджають досягненню заданого ступеня осадження розчинних нецукрів дифузійного соку.

Другим варіантом є прогресивна протитечійна переддефекація дифузійного соку за принципом Брігель-Мюллера у горизонтальному секціонованому апараті, в якому підтримується поступове наростання рН та лужності соку по секціях за рахунок рециркуляції підлуженого соку від останньої секції до першої.

Кращим варіантом апаратурного оформлення попередньої прогресивної протитечійної переддефекації за принципом Брігель-Мюллера можна вважати вертикальний переддефектор РЗ-ППА [1], який у порівнянні з горизонтальним апаратом Брігель-Мюллера, має суттєві переваги: значно меншу поверхню контакту

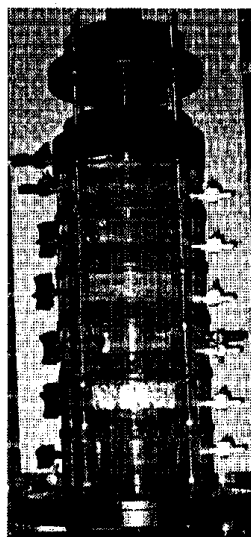
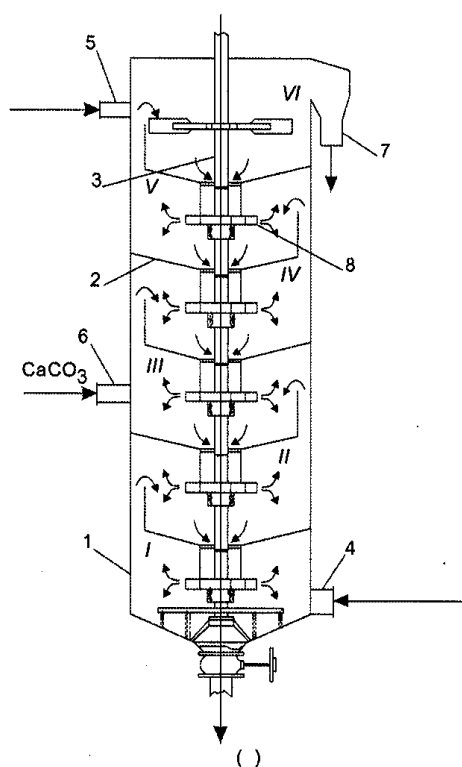
© Л.П. Рева, О.О. Петруша, В.О. Мірошник, 2012

соку з повітрям (лише в останній секції), конструкції перегородок, рухомих заслінок та насосних турбінки надають можливість організації раціонального протитечійного руху потоків і оперативного регулювання зміни рН та лужності по секціям апарата, відсутність байпаса частково обробленого дифузійного соку, що має місце в самій нижній частині горизонтального переддефекатора.

Окрім переваг (відносно горизонтального переддефекатора) вертикальний апарат все ж має деякі конструктивні недоліки: дещо невдале конструктивне рішення рухомих заслінок на верхніх кромках всмоктувальних патрубків, в результаті чого в кожній секції апарата між верхньою частиною всмоктувального патрубка та поверхнею конусної перегородки можуть мати місце застійні зони, що будуть сприяти неконтрольованому перебуванню деякої частини підлуженого соку з уже утвореним переддефекаційним осадом. Дещо невдалим є варіант рухомої заслінки, яка складається із двох напівдисків, що ускладнює промислову експлуатацію та проведення ремонтних робіт.

Тому було змінено форму заслінок на п-подібну форму, що здійснюють зворотно поступальний рух для регулювання площі перетину вхідних отворів всмоктувальних патрубків, до того ж їх закріплено на нижній кромці конусних перегородок, що значно знижує можливість утворення застійних зон. Такі зміни сприяють більш контрольованому руху потоків в апараті та забезпеченню раціонального наростання рН та лужності соку по секціям для досягнення високих якісних та седиментаційно-фільтрувальних показників соку.

Загальний вигляд удосконаленого вертикального прогресивного протитечійного переддефекатора [2] представлений на *рис. 1.а*. Він складається з вертикальної ємності 1 (з патрубками для підведення дифузійного соку 4, вапняного реагенту 5, осаду карбонату кальцію 6 та відведення переддефекованого соку 7), яка поділена конічними



()

перегородками 2 на шість секцій. У центрі ємності змонтовано вал 3 на якому, в кожній секції, закріплені турбінки 8, що виконують одночасно функції, як насоси для рециркуляції необхідного об'єму підлуженого соку із вище розміщеної секції в нижчу, так і мішалки для швидкого змішування рециркульованого соку з соком основного потоку, що надходить в секцію через сегментний канал. Дифузійний сік через патрубок 4 надходить в нижню частину апарату, заповнюючи I секцію. Через сегментний канал у конусній перегородці сік із I секції надходить у II секцію і т.д. до

Рис. 1. Удосконалений вертикальний апарат попередньої прогресивної протитечійної обробки дифузійного соку вапняним реагентом (а) [2] та його фізична модель (б) [3].

останньої. Через патрубок 5 в останню секцію подається вапняне молоко у необхідній кількості для забезпечення $pH_{\text{опт}}$ і $J_{\text{опт}}$ переддефекованого соку. При відкритті рухомою заслінкою рециркуляційного каналу із останньої секції частина соку за допомогою турбінки 8 повертається з VI в секцію V де змішується з менш лужним соком, що надходить з IV секції, в результаті чого pH соку в V секції підвищується по відношенню до IV секції, і т.д. Таким чином, за рахунок протитечійного повернення більш лужного соку із верхньої секції в нижню забезпечується прогресивне підвищення pH та лужності соку в секціях апарату знизу вверх.

Для проведення досліджень структури потоків у вертикальному прогресивному протитечійному переддефекаторі була виготовлена його фізична модель (з кранами відбору проб із секцій) (рис. 1.б), що розраховувалась у відповідності із промисловим апаратом виробничою потужністю 3000 т буряків на добу [3].

Фізичне моделювання лабораторної моделі вертикального переддефекатора базувалось на практичній однаковості основних критеріїв подібності: критерію гідродинамічної подібності Рейнольдса (що визначає характер руху рідкої фази) та критерію Пекле (що характеризує повздовжнє перемішування в системі) у фізичній моделі та промислового переддефекатора.

Теоретичний аналіз структури потоків у вертикальному переддефекаторі дає можливість виділити два визначальні гідродинамічні потоки: основний потік — дифузійний сік, що рухається знизу вверх від першої секції до останньої, проходячи прогресивну обробку вапняним молоком, та рециркуляційний лужний потік, що рухається протитечійно від останньої до першої секції переддефекатора.

Тому на першому етапі було поставлено завдання дослідити основний потік (дифузійного соку), що рухається знизу вверх по висоті апарата. Для цього у фізичній моделі переддефекатора заслінки на циркуляційних каналах повністю закривались і таким чином виключався рециркуляційний потік, а турбінки у секціях виконували роль лише перемішуючих пристроїв. За такого варіанту установка працювала в режимі секційної моделі із реакторів змішування.

Були отримані експериментальні функції розподілу часу перебування та розраховані щільності розподілу часу перебування частинок потоку у фізичній секційній моделі з різною кількістю секцій і імпульсним введенням індикатора — барвника понсо 4R (рис. 2).

Як видно із рис. 2. зі збільшенням кількості секцій щільність розподілу часу перебування елементів основного потоку у секційній моделі наближається до щільності розподілу для реактора ідеального витіснення.

На базі отриманих щільностей розподілу часу перебування частинок потоків у секційному апараті були розраховані основні статистичні характеристики з

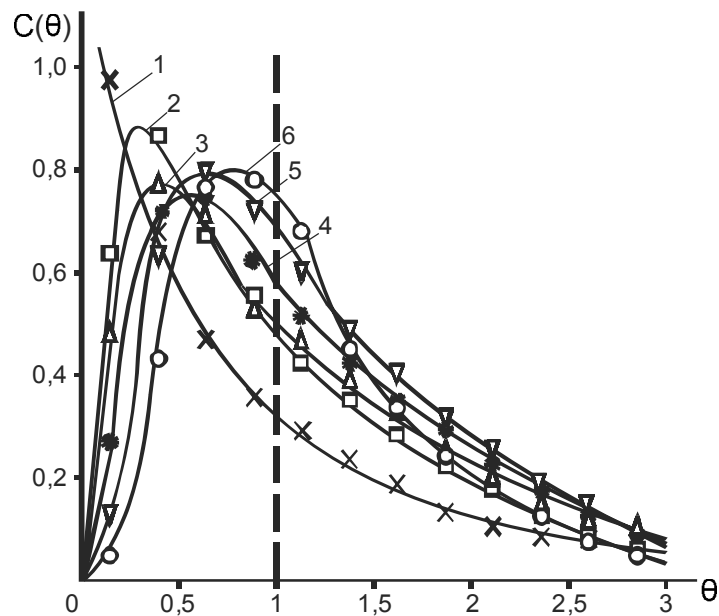


Рис. 2. Щільності розподілу часу перебування елементів рідкого потоку в секційній моделі з різною кількістю секцій (1, 2, 3, 4, 5 і 6 — відповідно для 1-о, 2-х, 3-х, 4-х, 5-ти і 6-ти — секційної моделі)

використанням прикладного програмного забезпечення, а саме MathCad Professional. Однією з важливих характеристик є перший момент розподілу за експериментальними кривими відгуку, що відповідає реальному середньому часу перебування елементів потоку в апараті $\bar{\tau}_m$ і розраховується за формулою:

$$\bar{\tau}_m = \frac{\int_0^{\infty} \tau \cdot C_{инд}(\tau) \cdot d\tau}{\int_0^{\infty} C_{инд}(\tau) \cdot d\tau}, \text{ хв.} \quad (1)$$

де $C_{инд}$ — концентрація індикатора в пробі, г/дм³; τ — час відбору проби від початку імпульсного введення індикатора, хв.

По експериментальним даним можна також визначити дисперсію часу перебування σ^2 за формулою:

$$\sigma^2(\bar{\tau}) = \frac{\int_0^{\infty} \tau^2 \cdot C_{инд}(\tau) \cdot d\tau}{\bar{\tau}^2 \cdot \int_0^{\infty} C_{инд}(\tau) \cdot d\tau} - 1. \quad (2)$$

де $\bar{\tau} = \frac{V}{u}$ — середній час в хв, розрахований за об'ємом секційної моделі V та витратам u основного потоку (дифузійного соку). Дисперсія часу перебування характеризує відхилення даних відносно середнього значення. Чим більша величина дисперсії, тим більше проявляється повздовжнє перемішування у апараті (так значення величини становить: для реактора витіснення $\sigma^2 = 0$, а для змішування $\sigma^2 = 1$).

Повздовжнє перемішування в секційній моделі із різною кількістю секцій характеризується коефіцієнтом повздовжнього перемішування D і, відповідно, критерієм Пекле повздовжнього перемішування Pe :

$$Pe = \frac{u \cdot l}{D} \quad (3)$$

де u — лінійна швидкість потоку; l — лінійний розмір; D — коефіцієнт повздовжнього перемішування. Найбільш розповсюдженим є метод ідентифікації критерію Пекле, що базується на розрахунку ймовірнісних характеристик [4].

Статистичні характеристики для секційної моделі з різною кількістю секцій подані у таблиці.

Таблиця. Статистичні характеристики основного потоку в секційній моделі переддефекатора з різною кількістю секцій

Кількість секцій в секційній моделі	$\bar{\tau}_m$, хв.	θ	σ^2	D , м ² /хв	Pe
1	5,5	0,37	0,8	0,015	2,013
2	7,0	0,47	0,6	0,006	4,803
3	8,0	0,53	0,5	0,004	6,67
4	8,6	0,57	0,4	0,0037	8,118
5	9,6	0,64	0,3	0,0026	11,243
6	11,0	0,73	0,1	0,002	12,807

де $\bar{\tau}_m$ — середній час перебування елементів потоку в апараті, розрахований за першим моментом розподілу (1), хв.; θ — безрозмірний середній час перебування; y^2 — дисперсія часу перебування, D — коефіцієнт повздовжнього перемішування, м²/хв.; Pe — критерій Пекле.

Аналізуючи розраховані статистичні характеристики, можна стверджувати, що розподіл часу перебування в основному потоку у секційній моделі переддефекатора із шести секцій наближається до розподілу у реакторі ідеального витіснення (и максимум кривої наближається до одиниці). При цьому дисперсія часу перебування в секційній моделі від однієї до шести секцій зменшується від 0,8 до 0,1. Розрахований середній час перебування за першим моментом зі збільшенням кількості секцій до шести наближається до середнього =15 хв, що відповідає $n=1$ (рис. 2.). Про це також свідчить зменшення коефіцієнту повздовжнього перемішування D від 0,015 до 0,002 м²/хв. Лише значення критерію Пекле для 6-ти секційної моделі підвищується до ~ 13 одиниць, що не відповідає реактору ідеального витіснення, а характеризує проміжний стан потоку в секційному апараті між реактором ідеального змішування та витіснення.

Секційна модель зручна для динамічного моделювання режиму хімічного реактора і розглядається, як модель для описання проміжного режиму між режимом ідеального змішування та ідеального витіснення. Математичний опис секційної моделі із n -секцій змішування обчислюється за рівнянням [4]:

$$C_n = C_0 \cdot \frac{1}{(n-1)!} \cdot \left(\frac{\tau \cdot n}{\bar{\tau}} \right)^{n-1} \cdot \exp\left(-\frac{\tau \cdot n}{\bar{\tau}} \right) \quad (4)$$

де C_0, C_n — концентрація індикатора відповідно на вході та виході з апарату, г/дм³; n — кількість секцій в ньому.

Отримані функції розподілу часу перебування елементів потоку у фізичній моделі та розраховані їх статистичні характеристики стали базою для створення гідродинамічної моделі потоку на основі секційної моделі, що адекватно описує експериментальні дані для основного потоку переддефекатора. Так врахування критерію Пекле в математичній моделі (4) наближає опис гідродинамічної структури основного потоку до гідродинамічної структури основного потоку у фізичній моделі реактора. Зокрема критерій повздовжнього перемішування обчислений за ймовірнісними характеристиками, враховується в складовій n (кількості секцій), що розраховується:

$$n = \frac{Pe}{2} \quad (5)$$

Аналізуючи графічно (рис. 3.) вигляд та характер співпадання кривих щільностей розподілу, отриманих експериментально 1 та згідно секційної моделі (4) крива 2, можемо стверджувати, що математичний опис секційної моделі (4) з достатньою точністю характеризує гідродинамічну структуру основного потоку фізичній моделі вертикального переддефекатора.

Окрім графічного аналізу слід також підтвердити адекватність використаної секційної моделі для опису гідродинамічної структури основного потоку у вертикальному переддефекаторі, використовуючи критерій Стьюдента t . Максимальне розраховане значення критерію Стьюдента для розподілу часу перебування елементів потоку у 6-ти секційній моделі склало $t_p = 0,77$, табличне ж значення критерію Стьюдента за рівнем значущості $\alpha = 0,05$ становить $t_{кр} = 2,07$. Оскільки виконується умова адекватності $t_p < t_{кр}$, це розрахунково підтверджує, що обрана математична секційна модель адекватно описує гідродинамічну структуру основного потоку у фізичній моделі вертикального прогресивного протитечійному переддефекатора.

Ще одним методом оцінки гідродинамічної структури основного потоку у фізичній моделі секційного переддефекатора є порівняння кривої щільності розподілу часу перебування елементів потоку в апараті із щільністю нормального розподілу по закону Гауса за правилом 3 σ (рис. 4.).

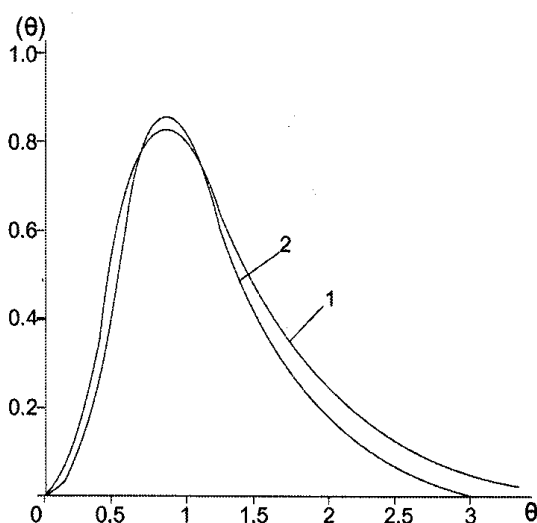


Рис. 3. Криві щільностей розподілу безрозмірного часу перебування елементів основного потоку в 6-ти секційній моделі переддефекатора: 1 — отримана експериментально; 2 — за математичним описом секційної моделі (4)

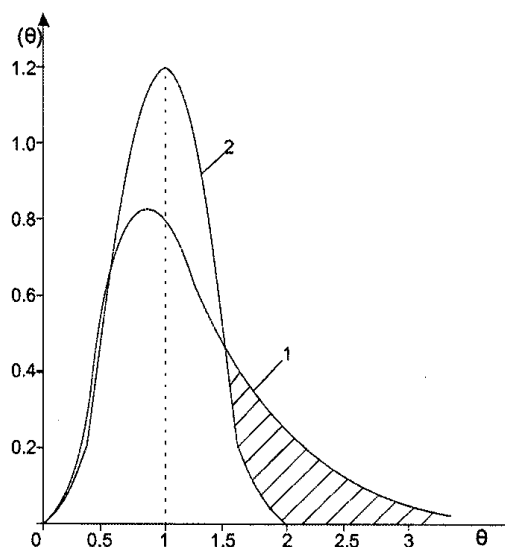


Рис. 4. Криві щільності розподілу безрозмірного часу перебування елементів основного потоку у фізичній моделі секційного переддефекатора: 1 — отримана експериментально і 2 — для нормального розподілу за законом Гауса

Із *рис.4.* чітко видно, що рух основного потоку практично виключає наявність байпасу в секційній моделі оскільки ліві гілки кривих майже співпадають, але все ж не повністю ліквідовані застійні зони в апараті, про що свідчить деякий хвіст правій частини експериментальної кривої щільності (кількісно це показано заштрихованою площею між вказаними кривими) [5].

Висновок. Проведено дослідження гідродинамічної структури основного потоку у фізичній моделі вертикального прогресивного протитечієного переддефекатора. Отримані функції розподілу часу перебування стали базою для розрахунку основних статистичних характеристик і критерію Пекле повздовжнього перемішування, а також для створення гідродинамічної моделі потоку на основі секційної моделі із секціями повного змішування, що адекватно описує експериментальні дані для основного потоку фізичної моделі переддефекатора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Рева Л.П., Пышняк В.В., Малюк В.Ф. Устройство для предварительной прогрессивной дефекации диффузионного сока. А.с. № 536229, БИ № 43, 1976.
2. Рева Л.П., Мірошник В.О., Петруша О.О., Апарат для попередньої прогресивної протитечієної обробки дифузійного соку вапняним реагентом, ПУ №50226, Бюл. № 10, 2010.
3. Рева Л.П., Петруша О.О., Мірошник В.О., Створення фізичної моделі вертикального прогресивного протитечієного переддефекатора для підвищення ефективності процесу перед дефекації // Наукові праці НУХТ, 2011 № 37—38, с. 121—126
4. Холоднов В.А. Системный анализ и принятие решений. Математическое моделирование гидродинамической структуры однофазных потоков в химических реакторах. Учебное пособие / В.А. Холоднов, В.П. Решетиловский, Е.С. Боровинская, В.П. Андреева, СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2009. — 35 с.

5. Гидродинамика непрерывнодействующих аппаратов очистки диффузионного сока. Шостаковский В., Рева Л.П., Шостаковский А.В., Мирошник В.О. // Сахар, 5, 2009, с. 42—47.

*Л.П. Рева, О.О. Петруша,
В.О. Мирошник*

Исследование гидродинамической структуры основного потока (диффузионного сока) в вертикальном преддефекторе на основе секционной модели с секциями полного смешения

Во время проведения процесса очистки диффузионного сока, а именно предварительной дефекации, одним из важных показателей является гидродинамическая структура потоков в аппарате, что существенно влияет на технологические аспекты процесса. На базе физической модели вертикального прогрессивного противоточного преддефектора были исследованы функции распределения времени пребывания частиц основного потока в аппарате, которые стали основой для создания математической секционной модели, которая адекватно описывает экспериментальные данные для основного потока преддефектора.

Ключевые слова: гидродинамическая структура, статистические характеристики, моделирование, секционная модель.

*L. Reva, O. Petrusha,
V. Miroshnyk*

Research of hydrodynamic mainstream (diffusion juice) in vertical predefecation tank based on sectional models with sections of complete mixing

One of the important stages of diffusion juice refining – preliminary predefecation – is hydrodynamic structure of flows in the apparatus. It significantly influences the technological aspects of the process. The distribution functions of time of stay of the particles in the main flow apparatus are investigated in the basis of physical model of vertical progressive predefecator. They are the basis for creation for mathematical sectional model that adequately describes the experimental data for the main stream predefecator.

Key words: hydrodynamic structure, statistical features, performance, modelling, sectional model

e-mail: sciences, petrushaoo@ukr.net

Надійшла до редколегії 29.06.2011 р.