

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Михайловський Яків Емануїлович

УДК 66.021.3

**ДИНАМІКА ПРОЦЕСУ
КРИСТАЛІЗАЦІЇ В ЦИЛІНДРОКОНІЧНОМУ
КЛАСИФІКУЮЧОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ**

Спеціальність 05.05.13 - Машина та апарати хімічних вироб-
ництв

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 1999

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі хімічної техніки та промислової екології (ХТПЕ) Сумського державного університету. Міністерство освіти України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
Врагов Анатолій Петрович
професор кафедри ХТПЕ СумДУ

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Стрельцов Володимир Васильович
професор кафедри прикладної екології і
безпеки життєдіяльності СумДУ;

- доктор технічних наук, професор
Радченко Леонід Борисович
професор кафедри машини та апарати хімічних та нафтопереробних вироб-
ництв
Національного технічного університе-
ту
України “КПІ”

Провідна установа – Інститут технічної теплофізики НАНУ,
Київ

Захист відбудеться 26 лютого 1999 р. о 16 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 у Сумському державному університеті (244007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус А, ауд. 215)

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету (244007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2)

Автореферат розісланий 22 січня 1999 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
В.Г.Неня

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Використання класифікуючих кристалізаторів з псевдозрідженим шаром є одним з шляхів вирішення задач підвищення якості, зменшення енерговитрат та інтенсифікації у процесах отримання неорганічних солей і мінеральних добрив. Кристалізатори цього виду, працюють в безперервному режимі, забезпечують отримання хімічно чистого, крупнокристалічного продукту однорідного гранулометричного складу, дозволяють регулювати швидкість циркуляції розчину, швидкість зросту кристалів, продуктивність, що поширює застосування таких кристалізаторів і дає можливість автоматизувати технологічні процеси.

Для розширення позитивних можливостей класифікуючих кристалізаторів в промисловості використовують циліндроконічні класифікуючі кристалізатори (ЦККК), що дозволяє збільшити об'ємну продуктивність, розширити діапазон розмірів зростаючих зерен, зменшити винос малих часток в циркуляційний цикл. Але в літературі майже відсутня методика розрахунків ЦККК з урахуванням зміни параметрів змуленого шару зерен та з урахуванням динаміки потоків в апаратах перемінного перетину.

Тому дослідження та узагальнення закономірностей гідродинамічних і масообмінних процесів в ЦККК, розробка інженерного методу розрахунку з використанням ЕОМ на основі оптимізації параметрів процесу в класифікованому змуленому шарі з урахуванням динаміки потоків представляють актуальну науково-технічну задачу, яка має також важливе на-родногосподарське значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація відповідає науковому напрямку кафедри ХТПЕ СумДУ у відповідності з координаційними планами найважливіших НДР Мінвузу СРСР на 1986-1990 р. р. з напрямку

кристалізації з розчинів і газової фази, а також координаційним планом АН СРСР на 1986-1990 р. р. по проблемі 2.27.2.13.6 “Розробка теоретичних основ і апаратури кристалізаційних методів очист-ки в розчинах”.

Мета роботи. Розробка динамічної моделі процесу гідравлічної класифікації та зросту кристалів при кристалізації в циліндроконічному апараті; визначення оптимальних параметрів змуленого шару кристалів при їх взаємодії з висхідним потоком пересиченого розчину в ЦККК; аналіз просто-риво-часового розподілу локальних параметрів змуленого шару по висоті циліндроконічного кристаловирощувача; розробка методики розрахунку промислових ЦККК з використанням комп'ютера.

Задачі досліджень:

- розробка динамічної моделі процесу гідродинамічної та масообмінної взаємодії дисперсної фази з пересиченим розчином в умовах зміни локальних параметрів змуленого шару по висоті ЦККК;

- експериментальне дослідження гідродинамічних і масообмінних параметрів змуленого шару зерен в конічних апаратах;

- розробка методики розрахунку, програми розрахунку ЦККК з використанням ЕОМ;

- аналіз зміни локальних гідродинамічних і масообмінних параметрів процесу кристалізації по висоті ЦККК з урахуванням зміни вхідних параметрів і геометричних характеристик конічної секції.

Наукова новизна. Розроблена динамічна модель процесу гідравлічної класифікації та зросту кристалів при кристалізації в циліндроконічному апараті; проведено аналіз просторово-часового розподілу локальних параметрів змуленого шару по висоті циліндроконічного кристаловирощувача; вирішена задача оптимізації гідродинамічних умов кристалізації в циліндроконічному псевдозрідженому шарі з урахуванням

розмірів зерен.

Практичне значення отриманих результатів. На основі проведених до-сліджень визначені оптимальні параметри змуленого шару кристалів при їх стислій взаємодії з висхідним потоком пересиченого розчину; розроблено метод інженерного розрахунку ЦККК на задану продуктивність та роз-мір продукційних кристалів при оптимальних режимах його роботи; роз-роблена програма розрахунку циліндроконічного кристаловирощувача та графічного подання розподілу параметрів змуленого шару по висоті апа-рату з використанням ЕОМ, яка дає можливість за нетривалий час прора-хувати велику кількість варіантів циліндроконічних кристаловирощувачів на задані початкові параметри і обрати з них оптимальний.

Особистий внесок дисертанта. В ході підготовки дисертації пошукувач особисто створив експериментальний стенд для дослідження кристалізації в змуленому шарі; підготував і провів експерименти по гідродинаміці та масообміну в циліндроконічному апараті з гідрозмуленим шаром; опрацював, проаналізував та узагальнив результати проведених досліджень.

В публікаціях, в яких відображені основні результати дисертації та які написані у співавторстві з науковим керівником, автору належать: в [1]- розробка алгоритму та блок-схеми програми розрахунку параметрів зму-леного шару в конічній секції класифікуючого кристалізатора; в [2]- ви-значення умов гідросепарації та класифікації кристалів у класифікуючому кристалізаторі; в [4]- розробка програм інженерного розрахунку ЦККК з використанням ЕОМ; в [5]- розробка динамічної моделі процесу гідрав-лічної класифікації та зросту кристалів при кристалізації в циліндроконіч-ному апараті; в [7]- аналіз просторово-часового розподілу локальних параметрів змуленого шару по висоті циліндроконічного кристаловирощувача.

Автор висловлює щиро вдячність науковому керівнику за плідні ідеї, поради і підтримку, що стали важливою складовою в підготовці дисертаційної роботи.

Апробація роботи. Основні наукові положення та результати роботи доповідались на 9-й Міжнародній конференції ПАМК-9 (Одеса, 1996 р.) та науково-технічних конференціях викладачів, співробітників та студентів СумДУ (Суми, 1995-1998 р.р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в таких працях: статті в тематичних збірниках і наукових журналах-3; в матеріалах конференцій-2; в тезах конференцій-4; матеріали дисертації використані у звітах по НДР.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків по роботі, списку використаних джерел (110 найменувань) та додатків. Загальний об'єм роботи 150 сторінок, у тому числі 12 рисунків (на 13 сторінках), 7 таблиць (на 15 сторінках) та додатки (на 21 сторінках).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі відмічені позитивні особливості класифікуючих кристалізато-рів циліндроконічної форми, а саме: можливість функціонування змулено-го шару кристалів більш широкого, ніж у циліндричних апаратах, грану-лометричного складу; одержання однорідного крупнокристалічного про-дукту, сепарація дрібних кристалів; освітлення циркулюючого розчину та зниження подрібнення зернин у циркуляційному циклі. Показана актуаль-ність, наукове та практичне значення теми дисертації, викладені основні положення, що виносяться на захист.

У першому розділі розглянуті основні закономірності гідродинаміки та масопереносу в апаратах з гідрозмуленим шаром твердих часток, подано принцип роботи та зроблено огляд існуючих методів розрахунку кристалі-заторів з псевдозрідженим шаром кристалів, а також відмічені

переваги класифікуючих кристалізаторів з циліндроконічним корпусом.

При розгляді кристалізації в класифікуючому кристалізаторі на основі практики експлуатації та опублікованих даних виявлено, що на роботу апарата впливають гідродинамічні фактори і кінетичні характеристики процесу масообміну в системі кристали-розчин, а також геометрична форма кристаловирощувача.

Гідродинаміці псевдозріджених шарів у циліндричному апараті при-свячена значна кількість робіт. У вітчизняній літературі для опису розширення змулених шарів при однорідному псевдозрідженні широке використання має полумпіричне рівняння Тодеса з співавторами, яке зручне для розрахунків у всьому інтервалі існування змуленого шару, але воно не дозволяє аналізувати ступінь розширення змуленого шару при перемінному діаметрі часток та зміні поперечного перетину апарата. Іншим експериментально отриманим і широко використовуваним рівнянням є співвідношення Річардсона-Закі, яке найбільш точно описує розширення шарів твердих монодисперсних часток при псевдозрідженні рідиною в перехідному режимі обтікання зерен в циліндричних апаратах, проте при цьому треба попередньо визначити швидкість вільного осідання та режим осідання зернин.

Масообмін між висхідним потоком псевдозріджуючого середовища і шаром твердих часток також є предметом вивчення багатьох дослідників. Із-за обмеженої кількості експериментальних даних описати одним критеріальним рівнянням процес масообміну в системі кристали-розчин для різних речовин нині неможливо. Для визначення кінетичних характеристик при масообміні в дисперсних системах часто

використовується рівняння Аксельруда¹, отримане для ізольованої сферичної частки, обтікаємої рівномірним потоком рідини. При аналізі літературних даних подані різні підходи у виборі оптимальних параметрів змуленого шару при кристалізації.

Для циліндроконічних апаратів є невизначеними параметри змуленого шару в зв'язку зі зміною поперечного перетину апарата, діаметра зерен і умов їх обтікання.

Особливістю роботи ЦККК є те, що з нижньої циліндричної секції відводяться крупні продукційні кристали, в середній конічній секції вирощуються кристали проміжних розмірів, а у верхній циліндричній секції витають кристали мінімального розміру, порівняного з розміром зернин, що виносяться у циркуляційний цикл. При цьому в змуленім шарі процеси гідравлічної класифікації та зросту кристалів протікають одночасно в умовах змінної швидкості розчину по висоті апарата. Із-за недостатчі даних для визначення локальних параметрів змуленого полідисперсного шару часток точний математичний опис цих процесів без якихось припущень залишається невирішеною задачею. Тому важливе значення має розробка інженерних методів розрахунку ЦККК з використанням спрощених математичних моделей.

На основі проведеного аналізу стану проблеми сформульована мета і поставлені задачі дисертаційної роботи.

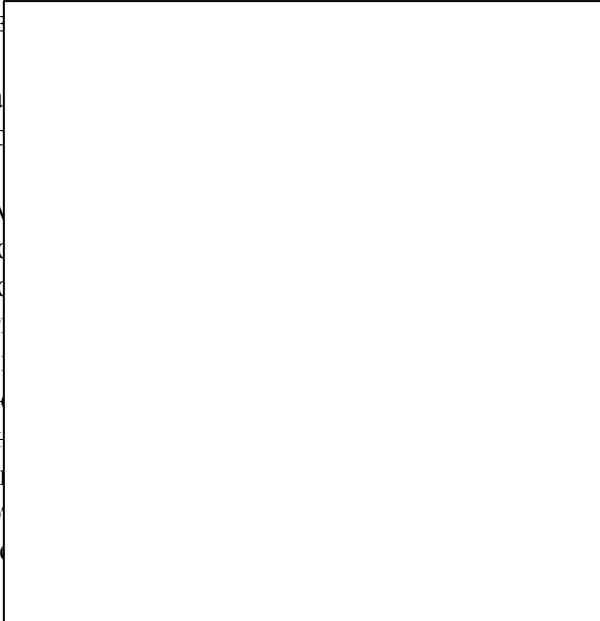
У другому розділі подана динамічна модель процесу гідрокласифікації та зросту кристалів у циліндроконічному апараті, розрахункова схема яко-го приведена на рис. 1.

Динамічна модель розроблена при таких припущеннях:

1) процес протікає в ізотермічних умовах при незмінних властивостях взаємодіючих фаз;

¹ Аксельруд Г.А. Массообмен в системе твердое тело - жидкость. Львов: ЛГУ, 1970.-188 с.

2) роз
3) в
перетіка
нижчерс
4) в
розміра
в діапаз
5) ф
залежит
6) ло
повністю
гідродиф
7) кри
зростаю
пересиче
Весь



вання;
асток, що
шарів у
рікація за
их часток
ться і не
гі апарата
ернин та
роступні та
средньому
кристалів

розглядається складеним з окремих, вузьких монофракцій, розташованих одна понад од-ною з поступово меншим розміром зернин від продукційних кристалів d_k , що відводяться з нижньої циліндричної секції, до мінімальних d_y , що витають у верхній циліндричній секції. При цьому в умовах сталого режиму гідрокласифікації кристалів за розмірами у змуленому шарі кожна моно-фракція зернин характеризується максимальним d_{ni} , середнім d_i та міні-мальним d_{si} розміром витаючих кристалів, а також середніми локальними значеннями гідродинамічних (w_{si} , ε_i , h_i , Ar_i , Re_i) та масообмінних (ΔC_{cp} , β_{Fi} , β_{Vi} , F_i , V_i , M_i , Nu_{Di} , Pr_D) параметрів.

Гідродинаміка розширення змуленого шару монодисперсних часток в циліндричних апаратах найкраще описується емпіричним рівнянням Рі-чардсона-Закі, поданим у критеріальній формі

$$Re = Re_g \cdot \varepsilon^Z, \quad (1)$$

в якому показник z визначається по формулі²

$$z = 5,2 \cdot Ar^{-0,06}, \quad (2)$$

яка дозволяє розраховувати локальні параметри монодисперсних шарів, псевдозріджених у циліндричних апаратах. Формула (2) узагальнює значення величини z , які укладаються в зоні групування даних згідно рівнянням, отриманими Річардсоном-Закі, Дементьєвим та Харінім для перехідного режиму обтікання часток в діапазоні чисел $36 \leq Ar \leq 10^5$.

Для розрахунку робочої швидкості рідини при перехідному режимі обтікання часток використовується рівняння

$$Re = A \cdot Ar^a \cdot \varepsilon^z, \quad (3)$$

де A і a - коефіцієнт і показник, залежні від числа Ar .

На початку перехідної зони ($36 \leq Ar \leq 2500$; $2 \leq Re_e \leq 40$) обтікання продовжує носити безвідривний характер, властивий ламінарному режиму, $A=0,105$, $a=0,78$. В зоні, прилеглий до турбулентного режиму ($2500 \leq Ar \leq 10^5$; $40 \leq Re_e \leq 500$), обтікання характеризується наявністю зворотно-вихорових течій, $A=0,335$, $a=0,63$.

Задаючи модуль дисперсності монофракції зернин $m_d \leq 1,2$ та замінюючи дільницю кінчної секції, в якій розташовується окрема монофракція, на рівновеликий циліндр, розглянуто характер взаємодії часток монофракції з потоком, як взаємодію монодисперсного змуленого шару кристалів з висхідним у циліндричному апараті потоком розчину, при цьому залишаються справедливими співвідношення (1)-(3).

Використовуючи рівняння нерозривності потоку, формули (1)-(3) і здійснюючи перетворення, отримані рівняння, які

² Врагов А.П./ ЖПХ, 1987, т.60, №9, с. 2007-2019.

дозволяють розрахувати змінення локальної порізності класифікованого полідисперсного змуленого шару кристалів в циліндроконічному апараті з кутом розкриття конуса $8^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ і діаметром нижньої циліндричної секції D_1 в залежності від діапазону розмірів витаючих в апараті часток d_i/d_1 , порізності ε_i продукційної монофракції та висоти h_i розташування перетину локального об'єму зерен

$$\varepsilon_i = \varepsilon_1 \left(\frac{d_i}{d_1} \right)^{0,18} \left[\frac{\left(\frac{d_1}{d_i} \right)^c}{\left(1 + 2 \cdot \frac{h_i}{D_1} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^{0,3846}} \right]^{\left(\frac{d_i}{d_1} \right)^{0,18} Ar_1^{0,06}}, \quad (4)$$

де c - показник, залежний від режиму обтікання зернин: при $36 \leq Ar_i \dots Ar_1 \leq 2500$, $c=0,258$; при $2500 \leq Ar_i \dots Ar_1 \leq 10^5$, $c=0,17$.

Порізність та умови масопереносу в продукційній монофракції визначаються таким чином, щоб швидкість відносного руху фаз у стислих умовах досягла максимуму

$$\varepsilon_1 = \frac{z_1 - 1}{z_1} = 1 - 0,1923 \cdot Ar_1^{0,06}. \quad (5)$$

В розділі подана номограма для розрахунку діаметра відносимих часток в циліндроконічних апаратах з гідрозмуленим шаром.

Для опису масообміну при кристалізації в змуленому шарі кристалів використовується дифузійна однопараметрична модель, яка дозволяє оцінити змінення концентрації розчину по висоті змуленого шару кристалів в залежності від швидкості руху розчину, коефіцієнта масовіддачі та питомої поверхні зернин (їх діаметра та порізності шару), при цьому

$$\ln\left(\frac{\Delta C_{\text{вх}}}{\Delta C_{\text{вих}}}\right) = \frac{\beta_F \cdot f_{\text{уд}} \cdot H}{u}. \quad (6)$$

З рівняння (6) видно, що змінення концентрації розчину по висоті зму-леного шару носить експоненційний характер.

Для розрахунку коефіцієнта масовіддачі у змуленому шарі кристалів використовується критеріальне рівняння Аксельруда¹

$$Nu_{Di} = (0,65 \div 0,9) \cdot Re_i^{0,5} \cdot Pr_D^{0,33}, \quad (7)$$

на основі якого, використовуючи основне рівняння масообміну, формули (1)-(3) та здійснивши перетворення, отримана³ залежність об'ємного ко-ефіцієнта масовіддачі від умов протікання процесу

$$\beta_{Vi} = \frac{B \cdot E \cdot \varepsilon_i^{2,6 \cdot Ar_i^{-0,06}} \cdot (1 - \varepsilon_i)}{Ar_i^b}, \quad (8)$$

де B та b - коефіцієнт і показник, залежні від числа Ar_i : при $36 \leq Ar_i \leq 2500$, $B=7,12$, $b=0,28$; при $2500 \leq Ar_i \leq 10^5$, $B=12,73$, $b=0,35$; E - комплекс постійних для даної системи параметрів фізико-хімічних властивостей фаз, $E = \psi \cdot [D_x^2 \cdot (\rho_T - \rho)^2 \cdot \rho]^{0,33} / \mu$.

Враховуючи, що в класифікуючих кристалізаторах кристали зростають в умовах, наближених до чистого зросту, було складено балансове рівняння по кількості кристалів, осідаючих по мірі зросту з вищерозташованих шарів у нижчерозташовані

$$N = \frac{6 \cdot G_K}{\pi \cdot d_K^3 \cdot \rho_T} = \frac{6 \cdot M_1}{\pi \cdot d_1^3 \cdot \rho_T} = \frac{6 \cdot M_2}{\pi \cdot d_2^3 \cdot \rho_T} = \dots = \frac{6 \cdot M_i}{\pi \cdot d_i^3 \cdot \rho_T}, \quad (9)$$

³ Врагов А.П./ ЖПХ, 1988, т.61, №4, с. 794-799.

на основі якого були отримані залежності для визначення робочого об'єму кристаловирощувача класифікуючого кристалізатора

$$V = \sum_I^n V_i = \frac{G_k}{\Delta C_{cp}} \cdot \sum_I^n \frac{m_i}{\beta_{Vi}} \quad (10)$$

та загальної маси кристалів, що містяться в ньому

$$M = \sum_I^n M_i = \frac{G_k \cdot \rho_T}{\Delta C_{cp}} \cdot \sum_I^n \frac{(1 - \varepsilon_i) \cdot m_i}{\beta_{Vi}}. \quad (11)$$

У третьому розділі подано опис лабораторного обладнання, методики проведення експериментів, приведені результати експериментальних до-сліджень, їх обробка та аналіз.

Об'єктами дослідження слугували суміші скляного грануляту, псевдо-зріджені водою, а також монофракції кристалів алюмо-амонійного галуноу, псевдозріджені насиченими розчинами.

Дослідження проводились на стенді, поданому на рис. 2. Обладнання включає в себе змінний циліндроконічний кристаловирощувач 1, кристалізатор-насичувач 2, занурювальні насоси 3 і 6, теплообмінники 4 і 5, по-судину з живильним розчином 7, ротаметри P_1 та P_2 , термометри T_1 , T_2 та T_3 і термостат, який на рис. 2 не показаний. Апарати 1 і 2 виготовлені з ор-ганічного скла.

ту
р-
га
ю
ту
лі

Кристалізатор-насичувач 2 призначався для того, щоб виключити зміну рушійної сили процесу, бо змулений шар в кристаловирощувачі 1 не забезпечував повного зняття пересичення.

В першій частині експериментальних досліджень вирішувалась задача аналізу та дослідної перевірки гідродинамічних залежностей по розширенню рідинних змулених моно - та полідисперсних зернистих шарів. Для цього на експериментальному обладнанні були проведені досліді по рідинному псевдозрідженню зернистих шарів. В процесі проведення дослідів варіювали по показанням ротаметра P_1 витрату циркуляційного розчину, реєстрували показання термометрів T_1 і T_2 і заміряли висоту змуленого шару в кристаловирощувачі 1 по мірній шкалі на стінці апарата.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що середнє розходження між експериментальними та розрахунковими значеннями величин u_i та ε_i не перевищує $\pm 5\%$ при максимальному розходженні в межах $\pm 8\%$.

Встановлений взаємозв'язок (4) між параметрами продукційної моно-фракції кристалів (d_1, Ar_1, ε_1), локальними параметрами змуленого шару (d_i, Ar_i, ε_i) та геометричними параметрами кристаловирощувача (D_1, α, h_i) дозволяє врахувати вплив гідродинамічних факторів на інтенсивність масообміну в змуленому шарі з урахуванням режиму обтікання часток та фізико-хімічних властивостей взаємодіючих фаз.

У другій частині експериментальних досліджень вивчався масообмін в системі змулені кристали - пересичений розчин. В кристаловирощувач 1 завантажували наважку кристалів заданого розміру масою $0,1 \div 0,25$ кг та подавали через ротаметр P_2 живильний розчин відомої концентрації в кристаловирощувач 1 та охолоджуючу воду в теплообмінник 4. В процесі проведення дослідів заміряли висоту змуленого

шару в кристаловирошчу-вачі 1, регулювали пересичення, змінюючи співвідношення витрат цирку-ляційного та живильного розчинів по показанням ротаметрів P_1 і P_2 , реєстрували показання термометрів T_1 - T_3 . Після закінчення досліду, який три-вав 10÷15 хв., одночасно припиняли подачу живильного розчину та охо-лоджуючої води. За допомогою сифона з кристаловирошчувача вивантажу-вали кристалічну суспензію та фільтрували її, після чого кристали вису-шували в сушильній шафі та визначали приріст маси речовини.

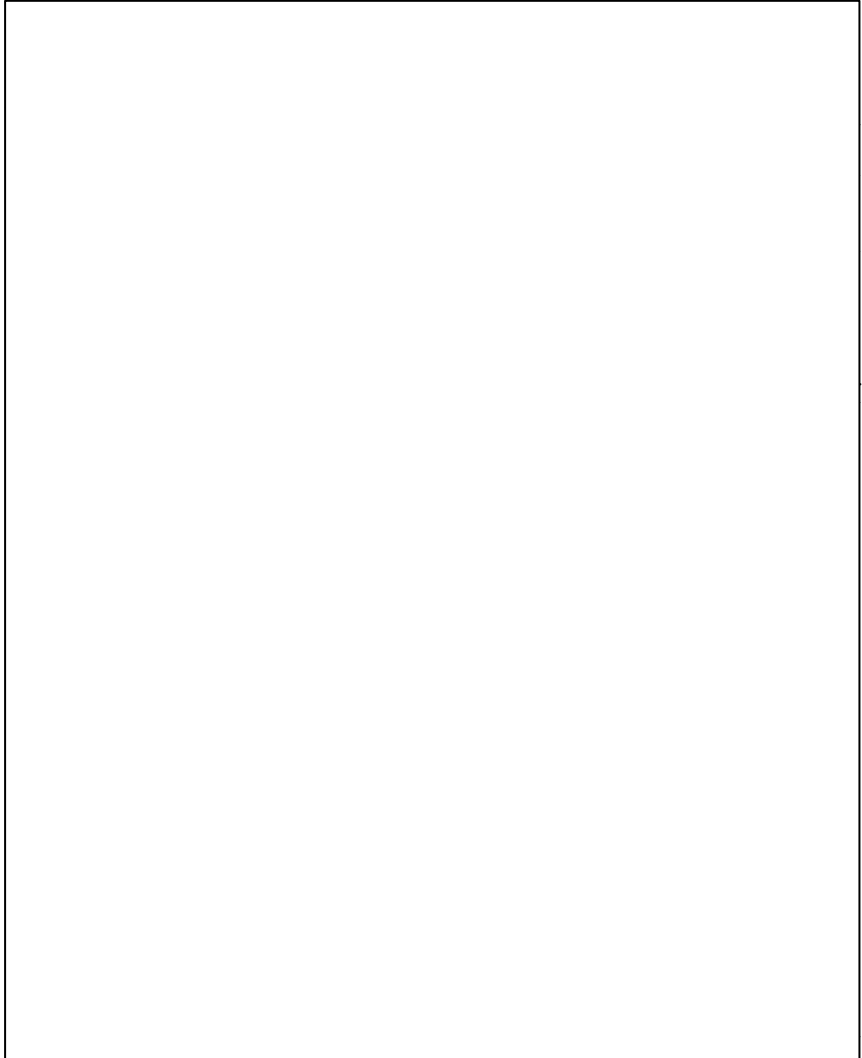
На рис. 3 подано порівняння експериментальних та розрахункових значень об'ємного коефіцієнта масопередачі по висоті конічної секції при різних режимах псевдозрідження, які визначаються еквівалентним розмі-ром зернин, швидкістю розчину на вході в конічну секцію і стислими умо-вами обті-кання зерен.

Експериментальні дані оброблялись у формі рівняння (8), при цьому виявлено, що середнє розходження між експериментальними та розрахун-ковими значеннями величини β_V не перевищує $\pm 5\%$ при максимальному розходженні в межах $\pm 8\%$.

На основі аналізу результатів експерименту та розрахунку були зроб-лені такі висновки: 1) розширення змуленого шару дисперсних часток з модулем дисперсності $m_D \leq 1,2$ має такий же характер, що і розширення шару монодисперсних часток; 2) в конічному апараті по висоті шару змі-нюється як локальна порозність, так і швидкість потоку рідини, причому ця зміна залежить, в основному, від кута розкриття конуса та порозності шару для крупних зернин на вході в конічну секцію; 3) на інтенсивність масообміну між кристалами та висхідним потоком пересиченого розчину основний вплив справляють гідродинамічні умови у змуленому шарі.

В четвертому розділі викладається інженерний метод розрахунку та подано аналіз розподілу параметрів змуленого

класифікованого шару кристалів по висоті ЦККК.



ІВМ-РС та приведена у додатку.

В розділі подана блок-схема розрахунку параметрів змуленого класифікованого шару кристалів у циліндроконічному апараті.

В наведеному аналізі виконано⁴ на ЕОМ розрахунок параметрів змученого шару кристалів та їх розподілу в ЦККК продуктивністю $G_k=9000$ кг/г для отримання сульфату амонія з розміром зернин $d_k=3,0$ мм при граничному пересиченні розчину на вході в шар $\Delta C_{ex}=4,2$ кг/м³. Параметри властивостей взаємодіючих фаз слідує: температура процесу $t=60$ °С, густина кристалів $\rho_T=1770$ кг/м³, густина розчину $\rho=1253$ кг/м³, в'язкість розчину $\mu=1,8 \cdot 10^{-3}$ Па·с, коефіцієнт дифузії солі в розчині $D_x=1,785 \cdot 10^{-3}$ м²/с, коефіцієнт форми кристалів $\psi=1,18$. В розрахунках варіювався діаметр нижньої циліндричної секції, кут розкриття конуса, порозність продукційних кристалів.

На рис. 4 і 5 подані профілі зміни локальної порозності (а) та локального об'ємного коефіцієнта масопередачі (б) змученого шару кристалів по висоті кристаловирощувача в залежності від порозності продукційної монофракції та від кута розкриття конуса. На рис. 4 (а) додатково нанесені лінії та числа, відповідні постійним відношенням діаметрів d_i/d_k . Локальна порозність змученого шару в цілому зростає по висоті апарата, причому тим сильніше, чим менше кут розкриття конуса. Проте при кутах розкриття конуса $\alpha \geq 16^\circ$ в нижній частині конічної секції спостерігається деяке зниження локальної порозності для зернин з відношенням діаметрів $d_i/d_k \geq 0,75$ і воно проявляється сильніше в секціях з більшим кутом розкриття конуса. Локальна порозність змученого шару зернин швидко зростає у верхній частині конічної секції при відношенні $d_i/d_k \leq 0,65$. При кутах розкриття конуса $12^\circ \leq \alpha \leq 16^\circ$ локальна порозність змученого шару майже не змінюється в діапазоні відношень $0,95 \geq d_i/d_k \geq 0,75$.



діапазон розмірів витаючих кристалів. При збільшенні порозності продукційних кристалів збільшується час перебування розчину в шарі.

Локальний об'ємний коефіцієнт масопередачі зростає по висоті апарата майже незалежно від кута розкриття конуса. Досягнувши максимальної величини при порозностях $\varepsilon_i = 0,85 \div 0,88$, він потім різко знижується внаслідок швидкого зменшення об'ємної концентрації часток у верхній циліндричній секції апарата. Максимуми значень об'ємного коефіцієнта масопередачі зростають зі збільшенням кута розкриття конуса. При збільшенні порозності змуленого шару продукційних кристалів об'ємний коефіцієнт масопередачі трохи знижується.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$\Delta C_{вх}$, $\Delta C_{вих}$, $\Delta C_{ср}$ - пересичення розчину на вході в шар, на



M_i , M - маса кристалів i -ої монофракції та загальна маса солі,

kg ;

n - кількість монофракцій змуленого шару кристалів;

u_i - швидкість руху розчину в локальному перетині, m/s ;

V_i, V - об'єм i -ої монофракції та загальний об'єм змуленого шару, m^3 ;

w_{ei} - швидкість витання кристалів окремої монофракції, m/s ;

α - кут між твірними конічної секції, градус;

β_F - поверхневий коефіцієнт масопередачі, $kg/(m^2 \cdot s \cdot kg/m^3)$;

β_V - об'ємний коефіцієнт масопередачі, $kg/(m^3 \cdot s \cdot kg/m^3)$;

$\varepsilon_l, \varepsilon_i$ - локальна порозність змуленого шару зерен продукційної та окремої монофракції, відповідно;

μ - динамічна в'язкість розчину, $Pa \cdot s$;

ρ_T, ρ - густина кристалів та розчину, відповідно, kg/m^3 ;

Ar_i - критерій Архімеда, $Ar_i = d_i^3 \cdot g \cdot \rho \cdot (\rho_T - \rho) / \mu^2$;

Nu_{Di} - дифузійний критерій Нуссельта, $Nu_{Di} = \beta_F \cdot d_i / D_x$;

Pr_D - дифузійний критерій Прандтля, $Pr_D = \mu / (\rho \cdot D_x)$;

Re_i - критерій Рейнольдса, $Re_i = u_i \cdot d_i \cdot \rho / \mu$;

Re_{ei} - критерій Рейнольдса, який базується на швидкості витання кристалів окремої монофракції, $Re_{ei} = w_{ei} \cdot d_i \cdot \rho / \mu$.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена динамічна модель процесу гідрокласифікації та зросту кристалів у циліндроконічному апараті з урахуванням зміни грануломет-ричного складу часток у змуленому шарі, а також фізико-хімічних властивостей взаємодіючих фаз і геометричних параметрів кристаловирощувача.

2. Отримані рівняння, які дозволяють розрахувати зміну локальних гід-родинамічних та масообмінних параметрів класифікованого полідисперс-ного змуленого шару кристалів у циліндроконічному апараті.

3. Виконано аналіз формування гранулометричного складу, об'єму і маси кристалів в ЦККК з урахуванням фізико-

хімічних властивостей сис-теми, геометричних параметрів системи та початкових проектних даних.

4. Виконані експериментальні дослідження підтвердили адекватність розробленої математичної моделі з урахуванням зміни локальних гідроди-намічних та масообмінних параметрів при кристалізації солей в ЦККК.

5. Показано, що зміна порозності змуленого шару кристалів по висоті циліндроконічного кристаловирощувача залежить від гідродинамічних умов у змуленому шарі, параметрів продукційної монофракції та геометрії кристаловирощувача.

6. Показано, що зміна об'ємного коефіцієнта масопередачі по висоті циліндроконічного кристаловирощувача залежить від фізико-хімічних властивостей системи, параметрів продукційної монофракції та гідродинамічних умов у змуленому шарі і практично не залежить від кута розкриття конуса в діапазоні $0,6 \leq \varepsilon_i \leq 0,7$.

7. Розроблені алгоритм, програма розрахунку на ЕОМ, а також інже-нерний метод розрахунку ЦККК з урахуванням фізико-хімічних властивостей системи, розміру продукційних кристалів і продуктивності апарата. Методика дозволяє за нетривалий час прорахувати на ЕОМ велику кількість варіантів розмірів циліндроконічних кристаловирощувачів та вибрати оптимальний варіант.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ВИКЛАДЕНИЙ В ПУБЛІКАЦІЯХ:

1. Врагов А.П., Михайловский Я.Э. Расчет цилиндрического кристаллизатора с использованием ЭВМ / Химическое машиностроение: расчет, конструирование, технология. Тематический сборник науч. труд.- К.: УМК ВО, 1992, с. 4-11.

2. Врагов А.П., Михайловский Я.Э. Номограмма для

расчета диаметра уносимых частиц в цилиндроконических аппаратах с гидровзвешенным слоем / Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников и студентов. Сумы, 1995, с. 130.

3. Михайловский Я.Э. К оценке условий гидросепарации и классификации кристаллов в классифицирующем кристаллизаторе / Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников и студентов. Сумы, 1995, с. 131.

4. Врагов А.П., Михайловский Я.Э. Компьютерное проектирование цилиндроконических классифицирующих кристаллизаторов / Праці IX міжнародної конференції "Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв". "Моделювання апаратів в умовах спільно протікаючих гідромеханічних, хімічних, теплових та масообмінних процесів". Частина 5. Одеса, 1996, с. 49.

5. Врагов А.П., Михайловский Я.Э. Динамическая модель процесса кристаллизации солей из растворов в классифицирующем кристаллизаторе / Праці IX міжнародної конференції "Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв". "Моделювання апаратів в умовах спільно протікаючих гідромеханічних, хімічних, теплових та масообмінних процесів". Частина 5. Одеса, 1996, с. 50.

6. Михайловский Я.Э. Математическая модель процесса гидроклассификации суспензии по размерам зерен в коническом аппарате / Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов. Сумы, 1997, с. 96.

7. Врагов А.П., Михайловский Я.Э. Распределение параметров гидровзвешенного слоя кристаллов по высоте цилиндроконического классифицирующего кристаллизатора / ЖПХ, 1997, т.70, №10, с. 1686-1693.

8. Михайловский Я.Э. Оценка параметров взвешенного слоя кристаллов по высоте цилиндрикоконического кристаллорастителя / Вісник СумДУ №2(10), 1998, с. 133-139.

9. Михайловский Я.Э. Особенности расчета цилиндрикоконического классифицирующего кристаллизатора с использованием ЭВМ / Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов. Сумы, 1998, с. 58.

АНОТАЦІЯ

Михайловський Я.Е. Динаміка процесу кристалізації в циліндроконічному класифікуючому кристалізаторі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.13-машини та апарати хімічних виробництв, Сумський державний університет, Суми, 1999 р.

Захищається 9 наукових праць, які містять результати експериментальних і теоретичних досліджень гідродинаміки та масообміну при кристалізації неорганічних солей в циліндроконічному класифікуючому кристалізаторі з псевдозрідженим шаром кристалів. Розроблена динамічна модель процесу гідрокласифікації та зросту кристалів у циліндроконічному апараті з урахуванням зміни гранулометричного складу частин у змуленому шарі. Отримані, проаналізовані та експериментально перевірені рівняння, які дозволяють розраховувати зміну локальних гідродинамічних і масообмінних параметрів класифікованого змуленого шару кристалів у циліндроконічному кристаловирощувачі. Проведена оцінка розподілу локальних параметрів змуленого шару кристалів по висоті апарата, що дозволяє більш обґрунтовано проектувати класифікуючі кристалізатори. Розроблений інженерний метод розрахунку циліндроконічного класифікуючого кристалізатора, його алгоритм і програма реалізації на ЕОМ.

Ключові слова: змулений шар, гідродинаміка, динамічна

модель, кристаллізація з розчинів, масоперенос, циліндроконічний класифікуючий кристалізатор.

АННОТАЦІЯ

Михайловский Я.С. Динамика процесса кристаллизации в цилиндроконическом классифицирующем кристаллизаторе. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.13 - машины и аппараты химических производств, Сумский государственный университет, Сумы, 1999 г.

Защищается 9 научных работ, которые содержат результаты экспериментальных и теоретических исследований гидродинамики и массообмена при кристаллизации неорганических солей в цилиндроконическом классифицирующем кристаллизаторе со взвешенным слоем кристаллов.

В диссертационной работе исследованы: закономерности гидродинамики и массопереноса в аппаратах с гидровзвешенным слоем кристаллов; особенности и преимущества цилиндроконических классифицирующих кристаллизаторов; гидродинамические и массообменные закономерности функционирования взвешенного слоя, условия сепарации, классификации и роста кристаллов в цилиндроконических классифицирующих кристаллизаторах; динамика псевдооживленного слоя кристаллов в цилиндроконическом кристаллорастителе при массовой кристаллизации солей из растворов в классифицирующих кристаллизаторах.

Разработана динамическая модель процесса гидроклассификации и послойного роста кристаллов в цилиндроконическом классифицирующем кристаллизаторе в процессе противоточного взаимодействия жидкой и дисперсной фазы с учетом изменения гранулометрического состава частиц во взвешенном слое.

Решена задача оптимизации гидродинамической обстановки при кристаллизации в цилиндроконическом псевдооживленном слое кристаллов с учетом размеров зерен. Определены оптимальные параметры взвешенного слоя кристаллов при их взаимодействии с восходящим потоком пересыщенного раствора в цилиндроконическом классифицирующем кристаллизаторе.

На основе разработанной математической модели получены профили распределения локальной порозности псевдооживленного слоя и объемного коэффициента массопередачи по высоте цилиндроконического кристаллорастителя в зависимости от диаметра получаемых кристаллов, физико-химических свойств системы взвешенные кристаллы – пересыщенный раствор, а также от геометрических характеристик цилиндроконического кристаллорастителя. Получены, проанализированы и экспериментально проверены уравнения, позволяющие рассчитать изменение локальных гидродинамических и массообменных параметров классифицированного взвешенного слоя кристаллов в цилиндроконическом классифицирующем кристаллизаторе с учетом изменения входных параметров и угла раскрытия конуса.

Проведены анализ и опытная проверка гидродинамических зависимостей по расширению взвешенных пересыщенным раствором моно- и полидисперсных зернистых слоев. Экспериментально изучен массообмен в системе взвешенные кристаллы – пересыщенный раствор. Экспериментальные исследования гидродинамики и массообмена в коническом аппарате подтвердили правомерность разработанной математической модели.

Проведена оценка пространственно-временного распределения локальных гидродинамических и массообменных параметров взвешенного классифицированного слоя кристаллов по высоте цилиндроконического кристаллорастителя.

теля, что позволяет более обоснованно проектировать класси-фицирующие кристаллизаторы.

Разработан инженерный метод расчета основных конструктивных размеров цилиндрикоконического классифицирующего кристаллизатора и параметров процесса на заданную производительность и размер продукционных кристаллов при оптимальных режимах его работы. Разработаны алгоритм и программа инженерных расчетов цилиндрикоконических классифицирующих кристаллизаторов с использованием компьютерной техники. Программа реализована на персональном компьютере типа IBM-PC и дает возможность за непродолжительное время просчитать большое количество вариантов цилиндрикоконических кристаллорастителей на заданные исходные параметры и выбрать из них оптимальный.

Разработаны практические рекомендации по конструированию кристаллорастителей. Сравнение рассчитанных с помощью разработанной программы размеров классифицирующих кристаллизаторов с используемыми в промышленности дало удовлетворительное согласование.

Ключевые слова: взвешенный слой, гидродинамика, динамическая модель, кристаллизация из растворов, массоперенос, цилиндрикоконический классифицирующий кристаллизатор.

SUMMARY

Michailovsky Y.E. The dynamics of the process of crystallization in the cy-lindroconical classified crystallizer.

Dissertation for degree competition of technical science candidate on speciality 05.05.13 - machines and apparatus of chemical productions, Sumy State University, Sumy, 1999.

9 scientific papers, which contain the results of experimental and theoretical reseach of hydrodynamics and masstransfer under crystallization of inorganic salts in the cylindroconical classified crystallizer with fluidized bed of crystals are under defence. The

dynamic model of the process of hydroclassification and the growth of crystals in the cylindroconical apparatus taking into consideration the changes of granulometrical composition of the particles in the fluidized bed was designed. The equations, which allowed to calculate the changing of the local hydrodynamic and mass transfer parameters of the classified fluidized bed of the crystals in the cylindroconical crystallizer were obtained, analyzed and experimentally checked. The evaluation of the distribution of the local parameters of the fluidized bed of the crystals according to the height of the apparatus was carried out, which allows to design classified crystallizers more basically. The engineering method of calculation of the cylindroconical classified crystallizer, its algorithm and the programme of its realization on ECM was designed.

Key words: fluidized bed, hydrodynamics, dynamic model, crystallization from solutions, mass transfer, cylindroconical classified crystallizer.

Підписано до друку _____ р. Формат 60×84 1/16
Обсяг 1.0 друк. арк. Тираж 100 прим.

Надруковано в Сумському державному університеті

м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2