

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису
УДК 66.015.23: 66.065.096.5:
66.065.52 (088.8)

ВРАГОВ Анатолій Петрович

**ГІДРОДИНАМІКА І МАСОПЕРЕДАЧА
ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ СОЛЕЙ ІЗ
РОЗЧИНІВ В КЛАСИФІКУЮЧИХ
КРИСТАЛІЗАТОРАХ**

Спеціальність 05.17.08 - Процеси і апарати
хімічної технології.

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук

Київ — 1993

4027704
Робота виконана в Сумському фізико-технологічному інституті

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
І.Г. Слейнік
доктор технічних наук, професор
М.І. Павлішев
доктор технічних наук, професор,
академік АН ТУ В.Г. Пономаренко

Ведуча організація: Державний науково-дослідний і
проектний інститут хімічних
технологій "Хімітехнологія",
м. Северодонецьк Луганської обл.

Захист відбудеться " 11 " жовтня 1993 р. о 14³⁰ годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 068.14.06 при
Київському політехнічному інституті за адресою: 252056,
м. Київ - 56, проспект Перемоги, 37, політехнічний інститут,
корпус 2І, аудиторія 2І2.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці інституту.

Автореферат розісланий " 8 " липня 1993 р.

Вчений секретар
спеціалізованої
вченої ради, професор

Вокрич В.Я. Круглицька

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00815187 (U)

АНОТАЦІЯ

Виконано комплекс розрахунково-теоретичних, аналітичних та експериментальних досліджень процесу масової кристалізації сблєй із розчинів в класифікуючих кристалізаторах з метою узагальнення основних закономірностей процесів гідродинаміки та масопередачі в стислих умовах взаємодіючих фаз, розробки методики розрахунку кристаловирощувачів і створення нових конструкцій класифікуючих кристалізаторів охолоджуючого і випарюючого типів.

Досліджені та уточнені деякі фізико-хімічні та гідродинамічні властивості висококонцентрованих і пересичених водно-солевих розчинів, одержані розрахункові залежності для визначення густини і динамічної в'язкості висококонцентрованих розчинів 12 солей.

На основі досліджень гідродинаміки псевдозрідженого шару кристалів у перехідному режимі обтікання зерен виявлені умови гідравлічної сепарації та класифікації кристалів в залежності від відношення діаметрів часток, порізності шару основної монофракції і режиму обтікання зерен. Одержані розрахункові залежності для визначення локальних параметрів псевдозрідженого класифікованого шару кристалів в циліндричних та циліндрокопічних вирощувачах. З урахуванням локальної порізності шару і масової частки окремих монофракцій кристалів вираховується загальна висота змуленого шару кристалів.

На основі виконаних досліджень закономірностей масопередачі в класифікованій суспензії одержані розрахункові залежності для визначення локальних поверхневого та об'ємного коефіцієнтів масопередачі в залежності від локальної порізності змуленого шару, діаметра і режиму обтікання зерен, фізико-хімічних і дифузійних властивостей взаємодіючих фаз. Виконана оптимізація гідродинамічних та масопереносних локальних параметрів процесу росту кристалів в залежності від діаметра зерен і режиму їх обтікання.

Розроблена методика інженерного розрахунку класифікуючих кристалізаторів в урахуванням модуля полідисперсності витавчих кристалів, оптимальних параметрів процесу для продукційної монофракції, розроблені алгоритми і програми розрахунку циліндричних та циліндро-конічних кристаловирощувачів з використанням ЕОМ.

Виділені і реалізовані в нових, розроблених автором конструкціях класифікуючих кристалізаторів основні принципи інтенсифікації і оптимізації процесів росту і гідравлічної класифікації кристалів. Окремі конструкції розроблених класифікуючих кристалізаторів впроваджені в промисловість з реальним економічним ефектом.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Серед поширеної групи кристалізаційного обладнання для проведення процесів масової кристалізації солей із розчинів, одним із ефективних і перспективних видів є класифікуючі кристалізатори, які дозволяють одержувати крупнокристалічний продукт однорідного гранулометричного складу з високими показниками якості і споживчих властивостей. Відмічаючи значні наукові і практичні досягнення в розробці теорії процесів масової кристалізації і вдосконаленні кристалізаційної техніки, які узагальнені в працях вітчизняних і зарубіжних вчених, треба зазначити, що не було проведено комплексного дослідження і узагальнення закономірностей функціонування класифікованого змуленого шару, умов сепарації, класифікації і росту кристалів в кристаловирощувачах класифікуючих кристалізаторів. Відсутність узагальнюючої науково-технічної інформації по теорії процесу, відсутність достатньо обґрунтованої методики розрахунку класифікуючих кристалізаторів стримує розробку, розрахунок і впровадження в промисловість нових видів цієї ефективної техніки. Тому розробка теоретичних основ, дослідження і узагальнення закономірностей процесів гідродинаміки і масопередачі в класифікуючих кристалізаторах, розробка методики технологічного і конструктивного розрахунку апаратів на основі принципів оптимізації локальних параметрів процесу у класифікованому псевдорозрідженому шарі становлять актуальну науково-технічну проблему, яка має також важливе народно-господарське значення в підвищенні якості вироблених кристалічних продуктів, в інтенсифікації і вдосконаленні технології виробництва мінеральних солей і добрив, а також продукції малотонажної хімії.

Робота над даною тематикою виконувалась відповідно з:

- координаційним планом найважливіших НДР вузів по процесах і апаратах хімічних виробництв і кібернетики хіміко-технологічних процесів на 1983-88 р.р. з проблеми 4.10 /додаток до приказу Мінвузу СРСР № I від 3.01.1983 р./;

- координаційним планом АН СРСР на 1986-1990 р. по теоретичних основах хімічної технології - проблема 2.27.2.13.6 "Розробка теоретичних основ і апаратури кристалізаційних методів очистки в розчинах";

- координаційним планом найважливіших НДР Мінвузу СРСР на 1986-1990 р.р. з напрямку кристалізації із розчинів і газової фази;

- тематичними завданнями підприємств Міністерства по виробництву мінеральних добрив і Міністерства хімічної промисловості.

Мета роботи полягає в розрахунково-теоретичному і експериментальному дослідженні, а також узагальненні закономірностей гідродина-

міки та масопередачі при кристалізації солей із розчинів в псевдозрідженому класифікованому шарі кристалів; виявлення кінетичних локальних характеристик і оптимальних параметрів процесу в залежності від гідродинамічного режиму обтікання зерен, масообмінних та фізико-хімічних характеристик взаємодіючих фаз; розробка методики інженерного розрахунку і оптимізація робочого об'єму циліндричних і циліндро-конічних кристаловирощувачів, розробка алгоритмів і програм розрахунку апаратів на ЕОМ; розробка нових прогресивних конструкцій класифікуючих кристалізаторів, в яких використані основні принципи інтенсифікації та оптимізації процесів росту і гідравлічної класифікації і які дозволяють отримувати крупнокристалічні продукти однорідного гранулометричного складу з високими показниками якості; реалізація результатів досліджень і розробок апаратури промисловості.

Наукова новизна. На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень одержані наступні наукові результати:

- розроблена математична модель гідродинамічної взаємодії витаючих кристалів з висхідним потоком розчину у перехідному режимі обтіканні зерен для циліндричних і циліндро-конічних апаратів;
- сформульовані і виявлені основні умови осадження, класифікації, сепарації і виносу кристалів в псевдозрідженому шарі, одержані залежності для кількісних розрахунків локальних гідродинамічних параметрів класифікованого змуленого шару кристалів у циліндричних і циліндро-конічних апаратах, одержано рівняння для розрахунку оптимальної порізності, при якій досягається максимальний ефект взаємодії фаз;
- одержані рівняння для розрахунку основних характеристик псевдозрідженого шару, які однозначно зв'язують параметри системи з режимом обтікання зерен, ступенем розширення змуленого шару, а також фізико-хімічними властивостями взаємодіючих фаз;
- розроблені номограми для експресного розрахунку локальних параметрів окремих монофракцій зерен для циліндричних і циліндро-конічних апаратів в залежності від параметрів продукційної монофракції;
- розроблена математична модель масообмінної взаємодії витаючих кристалів з потоком пересиченого розчину, одержані рівняння для розрахунку локальних значень поверхневого і об'ємного коефіцієнтів масопередачі з урахуванням порізності і гідродинамічних характеристик змуленого шару;
- сформульовано, експериментально установлене і вивчене явище досягнення максимальної об'ємної інтенсивності масопередачі в змуленому шарі зерен в залежності від його порізності, діаметра зерен і режиму їх обтікання;
- одержані залежності для кількісних розрахунків локальних коефі-

- цієнтів масопередачі з урахуванням оптимальної порізності шару;
- запропоновані критеріальні рівняння для розрахунку поверхневих коефіцієнтів масопередачі в стиснених умовах змуленого шару з урахуванням ступеню його розширення і режиму обтікання зерен;
- розроблена математична модель формування гранулометричного складу, об'єму і маси змуленого шару кристалів у циліндричних і циліндро-конічних кристаловирощувачах для заданих параметрів роботи апарата у безперервному режимі;
- сформульовані і розроблені основні методи інтенсифікації і оптимізації процесів гідравлічної класифікації і росту кристалів в псевдозрідженому шарі, які забезпечують одержання крупнокристалічних продуктів однорідного гранулометричного складу;
- досліджені і взагаленені розрахунковими залежностями деякі властивості висококонцентрованих водно-сольових розчинів 12 солей /динамічна в'язкість і густина/.

Практична цінність. На базі проведених наукових досліджень одержані наступні практичні результати:

- розроблена методика інженерного розрахунку кристалізаційних установок і класифікуючих кристалізаторів на задану потужність і бажаний розмір продукційних кристалів, результати розроблених методик включені в навчальний посібник, використовувалися в практиці промислового проектування, а також в навчальному процесі для курсового і дипломного проектування;
- розроблені алгоритми і програми розрахунків на ЕОМ циліндричних і циліндро-конічних кристаловирощувачів;
- розроблені нові конструкції одно- і двохступеневих класифікуючих кристалізаторів охолоджуючого і випарюючого типів, в яких використані методи інтенсифікації процесів росту кристалів;
- впроваджені в промисловість на підприємствах кр'їн СНГ класифікуючі кристалізатори випарюючого типу для одержання сульфату амонію із капролактамових дугів з реальним економічним ефектом. Одержана на цьому обладнанні продукція атестована вищою категорією якості;
- кристалізаційні установки з класифікуючими кристалізаторами охолоджуючого типу впроваджені на підприємствах для одержання мінеральних солей і хімічних реактивів.

Економічний ефект від використання результатів дослідження в промисловості становить більше 800 тис. крб. за рік /в цінах до 1990 р./, деякі роботи знаходяться в стадії впровадження.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались на наступних нарадах і конференціях: Всесоюзній науково-технічній нараді по

дослідженню процесів тепло- і масообміну в киплячому шарі / м. Іваново, 1969 р./; 4-й і 7-й Республіканських науково-технічних конференціях "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств" / м. Харків, 1976 р., м. Львів, 1988 р./; Всесоюзній науковій Конференції "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств" - ПАХТ-85 / м. Харків, 1985 р./; 1-й Всесоюзній конференції по створенню і впровадженню сучасних апаратів з активними гідродинамічними режимами / м. Москва, 1977 р./; 1 - 4-й Всесоюзних науково-технічних нарадах "Пути совершенствования, интенсификации и повышения надежности аппаратов в основной химии" / м. Суми, 1980, 1982, 1986, 1989 р.р./; Всесоюзній конференції по росту кристалів / м. Харків, 1982 р./; Всесоюзній конференції "Современные проблемы химической технологии" / м. Красноярськ, 1986 р./; Всесоюзних наукових конференціях "Современные машины и аппараты химических производств" - "Химтехника - 83" / м. Ташкент, 1983 р./, "Химтехника - 88" / м. Чимкент, 1988 р./; 3-й і 4-й Всесоюзних конференціях по масовій кристалізації і кристалізаційним методам розділення сумішей / м. Черкаси, 1985 р., м. Іваново, 1990 р./.

Діюча модель "Кристалізаційна установка безперервної дії", як приклад нової техніки, демонструвалась на ВДНГ УРСР у 1983 р. і відзначена дипломом 2-го ступеня.

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи викладений в 76 наукових працях, в тому числі - 1 навчальний посібник, 51 журнальних статей і тез доповідей, 16 авторських свідоцтв на винаходи, 6 звітів по закінчених НДР, зареєстрованих у ВДНГ, в яких автор був науковим керівником.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, шести розділів, загальних висновків, списку літератури з 253 найменувань та додатків. Основний зміст роботи викладений на 240 сторінках машинописного тексту, включає 80 рис., таблиць та блок-схем алгоритмів розрахунків. Загальний об'єм роботи 366 сторінок.

ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі коротко розглянуті основні питання стану теоретичних основ процесів масової кристалізації солей із розчинів у змуленому шарі кристалів, які включають етапи одержання пересиченого розчину з контрольованим рівнем перенасичення, утворення стійких зародків, а також колективного росту кристалів. Проведено аналіз роботи діючих у промисловості класифікуючих кристалізаторів, розглянуті типові конструкції цих апаратів охолоджуючого і випарю-

ьчого типу, відмічені недоліки в роботі апаратів, вказано на недостатність науково-технічної інформації по розрахунку і проектуванню цього виду техніки, на відсутність достатньо обґрунтованих методик розрахунку класифікуючих кристалізаторів.

Особливістю сучасних процесів масової кристалізації солей із розчинів є використання активних гідродинамічних режимів взаємодії розчину з дисперсною фазою, перехід на безперервні способи виробництва, використання апаратури великої одиначної потужності і об'єму, вдосконалення технології і апаратурного оформлення стадій виробництва, справляючих вирішальний вплив на матеріальні і енергетичні втрати, на якість і споживчі властивості готової продукції.

Масова кристалізація солей із розчинів в класифікуючих кристалізаторах є багатостадійним процесом, який включає етапи одержання пересиченого розчину з контрольованим рівнем пересичення, утворення стійких зародків і їх подальший ріст до розмірів кристалів потрібного ступеню дисперсності із заданою інтенсивністю.

Для промислової реалізації процесів одержання крупнокристалічних солей із розчинів в класифікованому змуленому шарі кристалів одержане в апаратурно-процесних одиницях кристалізаційної установи пересичення розчину не повинне перевищувати граничного рівня, визначаемого по рівнянню Сіновієца для розчинів, які не включають в собі твердої фази, або по залежності Пономаренка з співавторами для розчинів з витаючими частками твердої фази. Рівень досягаемого перенасичення розчину в присутності твердої фази знижується, при цьому також знижується швидкість гомогенного зародкутворення, що є важливою передумовою для одержання крупнокристалічних продуктів. В розділі коротко розглянуті найважливіші властивості кристалізату і концентрованих водно-сольових розчинів, які в найбільшій мірі впливають на гідродинаміку і масопередачу у псевдозрідженому шарі кристалів, відмічається нестача даних і відсутність розрахункових рівнянь для визначення густини і в'язкості висококонцентрованих розчинів в залежності від концентрації і температури.

Аналізуючи опубліковані дані по гідродинамічній взаємодії фаз у псевдозрідженому шарі, відмічається, що параметри змуленого шару визначаються по середньому розміру витаючих в апараті частинок, а розрахункова порізність змуленого шару задається довільно в діапазоні $\xi = 0,65-0,75$, що в кінцевому результаті призводить до перевищення робочого об'єму апарата в 2-3 рази в порівнянні з оптимальним. Найбільш достовірною і часто використовуємою в розрахунках гідродинаміки вважається формула Тодеса і співавторів

Для моделювання і розрахунку локальних гідродинамічних параметрів змуленого шару кристалів в класифікуючому кристалізаторі формула Тодеса не підходить навіть для циліндричних апаратів і зовсім неприемлива для циліндро-конічних кристаловирощувачів.

Аналізуючи роботи по масопередачі в псевдозрідженому шарі, відмічається, що на швидкість росту кристалів впливають інтенсивність відносного руху взаємодіючих фаз, пересичення і температура розчину, розмір часток і маса витаючих кристалів, природа і фізико-хімічні властивості розчинника і кристалізуємої солі. Швидкість кристалізації більшості неорганічних солей із розчинів з помірно в'язкістю лімітується дифузійно-конвективною стадією. Узагальнення експериментальних даних по масопередачі дається в критеріальній формі, при цьому відмічається, що в розрахункових залежностях стиснені умови взаємодії фаз не виражені в явній формі, що затруднює їх використання.

На основі аналізу робіт по розрахунку і проектуванню класифікуючих кристалізаторів відмічається, що наявні методики не враховують в комплексі усі впливаючі на роботу апарату фактори, а саме: не враховується зміна локальних параметрів кристалів по висоті апарата, не враховується ефект класифікації кристалів, зміна локальних об'ємних коефіцієнтів масопередачі по висоті кристаловирощувача.

Таким чином, на основі аналізу стану проблеми кристалізації солей із розчинів в класифікуючих кристалізаторах, виявлені задачі дослідження і сформульована мета роботи, викладена в її загальній характеристиці.

В другому розділі подані результати досліджень деяких властивостей висококонцентрованих водно-сольових розчинів, зокрема досліджені і узагальнені дані по густині і динамічній в'язкості, приведено опис інтерферометричного методу визначення складу концентрованих розчинів і використання його для визначення граничного пересичення нерозмішуваних розчинів. Суть запропонованого методу інтерферометричного визначення складу концентрованих розчинів полягає в тому, що об'єктом порівняння використані менш концентровані водні розчини досліджуємої солі, при цьому експериментально було виявлено, що показники шкали приладу в залежності від температури розчину залишається сталою величиною в інтервалі температур від $8-10^{\circ}\text{C}$ вище температури насичення розчину до температури на $3-5^{\circ}\text{C}$ нижче її, тобто для двох розчинів однієї солі різної концентрації показники заломлення в залежності від температури не змінюються до початку фазового переходу, в той же час показання шкали приладу змінюються в залежності від концентрації досліджуемого розчину.

На базі побудованих проградуйованих графіків з використанням розчинів порівняння різної концентрації і ковчет різної довжини концентрацію розчинів визначали з точністю 0,02-0,05 % мас. при загальній концентрації розчиненої солі в розчині в межах 24-46 % мас.

Інтерферометричний метод аналізу розчинів дозволив також визначити граничне перенасичення деяких розчинів в статичних умовах по температурі утрати сталості коефіцієнту заломлення. Для нерозмішуваних розчинів нітрату калію, сульфату амонію, нітриту натрію в інтервалі температур 20-40 °C граничне перенасичення складає 10-15 г/літр, в той час як для розмішуваних розчинів в призначенні незначної кількості витаючих кристалів воно складає 3-5 г/літр.

Для розчинів нітриту натрію і алюмо-амонійного гадуну проведені дослідження граничного пересичення в умовах їх розмішування і поступового охолодження в герметичній колбі, при цьому виявлено, що абсолютне пересичення розчинів в даних умовах було нижчим, чим в нерозмішуваних в ковчетах при однаковій швидкості охолодження розчинів.

З метою уточнення густини насичених розчинів деяких солей і експресного визначення їх складу були проведені досліди по вивченню характеру зміни густини в залежності від концентрації і температури. Одержані дані були узагальнені з граничним відхиленням до ± 3 кг/м³ наступним рівнянням

$$\rho_p = A + Bx - Ct, \quad / 1 /$$

де A, B, C - коефіцієнти, які враховують властивості розчиненої солі; x - концентрація розчину, % мас. В приведеній таблиці дані значення коефіцієнтів для 12 солей і межі дії рівняння /1/.

Для використання в практичних розрахунках потрібні дані по динамічній в'язкості концентрованих і насичених розчинів, в зв'язку з чим були проведені експериментальні і аналітичні дослідження. Результати досліджень були узагальнені на ЕОМ рівнянням

$$\mu_p = A_0 \mu_0 \exp [(B_0/T) + C_0 L], \quad / 2 /$$

де μ_0 - в'язкість води при температурі розчину; A_0, B_0, C_0 - константи, які залежать від властивостей розчиненої солі; L - молярна концентрація розчину. В таблиці приведені значення констант для 14 солей і межі дії рівняння /2/.

В третьому розділі розглянуті, досліджені і узагальнені закономірності гідродинаміки класифікованого псевдозрідженого шару кристалів у кристаловирощувачах класифікуючих кристалізаторів, проаналізовані і кількісно описані умови сепарації і класифікації кристалів змушеному шарі, одержані рівняння для визначення локальних параметрів класифікованої кристалічної суспензії в циліндричних і циліндро-

конічних апаратах на основі модуля дисперсності і параметрів змуленого шару продукційної монофракції кристалів.

В розділі аналізується стан класифікованої суспензії в висхідному потоці розчину. Під дією інерційних, масових і в'язкістних сил створюються умови, при яких тверді частинки розділені рідинним шарком і набувають можливості перебувати в об'ємі змуленого шару. Енергія, яка віддається потоком, витрачається на розширення і підтримання зерен в підвищеному стані, на подолання сил тертя і опору середовища. Використовуючи модель взаємопроникаючого, протитечійного стислого руху фаз в змуленому шарі, складена система диференціальних рівнянь кількості руху по фазах з урахуванням сил опору

$$\epsilon \rho_c \left(\frac{\partial u_c}{\partial t} + u_c \frac{\partial u_c}{\partial h} \right) = -\epsilon \frac{\partial p}{\partial h} + \epsilon \rho_c g - n f_T, \quad / 3 /$$

$$(1-\epsilon) \rho_u \left(\frac{\partial u_u}{\partial t} + u_u \frac{\partial u_u}{\partial h} \right) = -(1-\epsilon) \frac{\partial p}{\partial h} - (1-\epsilon) \rho_u g + n f_T, \quad / 4 /$$

$$f_T = \zeta(\epsilon) \frac{\pi d_u}{4} \cdot \frac{\rho_c}{2} \cdot u_{отн}^2, \quad / 5 /$$

де $\zeta(\epsilon)$ - коефіцієнт опору в стислих умовах, $\zeta(\epsilon) = \zeta_0 / \epsilon^k$; k - показник стислості, який залежить від форми і розміру частинки.

Для стислого руху фаз в однорідному шарі монодисперсних кульових частинок система рівнянь вирішується і приводиться до формули

$$\zeta(\epsilon) u_{отн}^2 = \frac{4}{3} \rho_c d_u \epsilon (\rho_u - \rho_c) g, \quad / 6 /$$

яка в критеріальній формі має вигляд

$$\zeta(\epsilon) Re^2 = \frac{4}{3} Ar \cdot \epsilon^3, \quad / 7 /$$

З урахуванням величини $\zeta(\epsilon)$ одержане рівняння

$$\zeta_0 Re^2 = \frac{4}{3} Ar \cdot \epsilon^{(3+k)} \quad / 8 /$$

яке описує закон розширення монодисперсного змуленого шару твердої фази в висхідному потоці рідини. Враховуючи залежність коефіцієнта ζ_0 від режиму обтікання частинок, рівняння /8/ представлено в узагальненому виді

$$Re = A Ar \cdot \epsilon^Z, \quad / 9 /$$

де Z - показник стислості, враховуючий режим обтікання зерен і фізико-хімічні властивості взаємодіючих фаз; A - коефіцієнт, який залежить від режиму обтікання частинок.

Рівняння /9/ можна використати в практичних розрахунках при визначенні коефіцієнту A і показника Z .

На основі проведеного аналізу знайдено, що в змуленому шарі кристалів щільністю $\rho_u = 1200-3000 \text{ кг/м}^3$ з розміром зерен $0,3-3,0 \text{ мм}$, псевдозріджених насиченими розчинами, в більшості випадків гідродинамічна взаємодія фаз характеризується перехідним режимом обті-

кання зерен, обмеженим діапазоном чисел Архімеда $36 < Ar < 10^5$.

В результаті порівняльного аналізу опублікованих даних по визначенню коефіцієнту опору середовища в умовах вільного і стисненого осадження зерен в перехідному режимі їх обтікання було встановлено, що на початковій ділянці перехідного режиму в діапазоні чисел Рейнольдса $2 < Re < 40$ переважають сили в'язкісного тертя, а на основній ділянці перехідного режиму в діапазоні чисел $40 < Re < 500$ переважаючими стають інерційні сили, при яких проявляється вплив зворотно-вихрових течій. За уточненими даними рекомендовано вираховувати коефіцієнт опору з більшою точністю по наступним рівнянням: для діапазону чисел Архімеда $36 < Ar < 2500$ і відповідно чисел Рейнольдса $2 < Re < 40$

$$\zeta_0 = 24 / Re^{0,72} \quad /I0/$$

для діапазонів чисел $2500 < Ar < 10^5$ і $40 < Re < 500$

$$\zeta_0 = 7,5 / Re^{0,413} \quad /II/$$

Рівняння /I0/ і /II/ задовільно корелюються з експериментальними даними інших досліджень, при цьому середнє відхилення розрахованих значень відносно експериментальних не перевищує $\pm 3,8\%$.

Враховуючи значення коефіцієнту опору, одержані критеріальні рівняння для розрахунків швидкості вільного осадження частинок для виділених ділянок перехідного режиму їх обтікання і котрі мають вигляд:

для діапазону чисел $36 < Ar < 2500$ і $2 < Re < 40$

$$Re_0 = 0,105 Ar^{0,78} \quad /I2/$$

для діапазонів чисел $2500 < Ar < 10^5$ і $40 < Re < 500$

$$Re_0 = 0,335 Ar^{0,63} \quad /I3/$$

Результати багаточисельних експериментальних досліджень по розширенню псевдозрідженого шару твердих частинок в умовах однорідного змушеного шару в літературі узагальнені рівнянням

$$u = u_0 \varepsilon^Z \quad /I4/$$

яке зв'язує швидкість розчину в вільному поперечному січenni апарату з швидкістю вільного осадження зерен і порізністю змушеного шару.

В результаті аналізу опублікованих в літературі і на основі обробки одержаних експериментальних даних по розширенню псевдозріджених моно- і полідисперсних частинок для перехідної області обтікання зерен в діапазоні чисел Архімеда $36 < Ar < 10^5$ нами знайдено, що показник ступеню в рівняннях /9/ і /I4/ з достатньою точністю можна вирахувати по залежності

$$Z = 5,2 / Ar^{0,06} \quad /I5/$$

З урахуванням формули /I5/ критеріальна залежність /9/ приймає

слідуючий вигляд: для діапазону чисел Архімеда $36 < Ar < 2500$

$$Re = 0,105 Ar^{0,78} \varepsilon^{5,2/Ar^{0,06}} \quad /16/$$

для діапазону чисел Архімеда $2500 < Ar < 10^5$

$$Re = 0,335 Ar^{0,63} \varepsilon^{5,2/Ar^{0,06}} \quad /17/$$

Вирішуючи рівняння /16/-/17/ відносно робочої швидкості розчину в вільному поперечному січенні циліндричного апарату, а також відносно порізності однорідного змуленого шару для монофракції зерен знайдено: для діапазону чисел $36 < Ar < 2500$

$$U = 0,623 d_k^{1,34} (\rho_k - \rho_p)^{0,78} \varepsilon^{5,2/Ar^{0,06}} / \rho_p^{0,22} \mu_p^{0,56} \quad /18/$$

$$\varepsilon = [1,542 Re^{0,192} / Ar^{0,15}] Ar^{0,06} \quad /19/$$

для діапазону чисел $2500 < Ar < 10^5$

$$U = 1,412 d_k^{0,89} (\rho_k - \rho_p)^{0,63} \varepsilon^{5,2/Ar^{0,06}} / \rho_p^{0,37} \mu_p^{0,26} \quad /20/$$

$$\varepsilon = [1,234 Re^{0,192} / Ar^{0,12}] Ar^{0,06} \quad /21/$$

Рівняння /16/-/21/ дозволяють розрахувати локальні параметри змуленого класифікованого шару окремих монофракцій кристалів з залежності від розміру зерен і режиму їх обтікання.

Аналізуючи змулений зернистий шар як проточну систему, складену із зерен середнього розміру d_1, d_2, d_3 , через яку рухається розчин, зроблені наступні припущення: а/ основною, переважно представленою в шарі є монофракція зерен середнього діаметра d_1 , порізність змуленого шару цієї монофракції відповідно ε_1 ; б/ в міжзерновому просторі основної фракції розподілені частинки менших розмірів, при цьому їх об'ємна концентрація незначна і не впливає на порізність ε_1 ; в/ під впливом лінійних сил частинки в змуленому шарі рухаються без зіткнень і взаємно не впливають одна на одну.

Сепарація частинок діаметром d_2 , а тим більше діаметром d_3 , із змуленого шару відбувається у тому випадку, коли дійсна локальна швидкість розчину між зернами перевищує швидкість вільного осадження зерен менших розмірів, при цьому є справедливою умова

$$U_{cl} = U_{cl} - U_{os} \geq 0. \quad /22/$$

Для течії розчину через зернистий шар із заданою порізністю дійсна швидкість середовища в міжзерновому просторі дорівнює

$$U_{cl} = U / \varepsilon_1. \quad /23/$$

Замінивши в одержаній залежності швидкість розчину через рівняння /24/ знайшли

$$U_{cl} = U_{os} \varepsilon_1^{-1} \quad /24/$$

Відносна швидкість руху розчину до відношення до швидкості віль-

ного осадження зерен виражається залежністю

$$U_{отн} = U_{ш1} - U = U_{о1} \varepsilon_1^{(z_1-1)} - U_{о1} \varepsilon_1^z = U_{о1} (1 - \varepsilon_1) \varepsilon_1^{(z_1-1)} \quad /25/$$

Виразивши рівняння /25/ через відношення швидкостей

$$U_{отн} / U_{о1} = (1 - \varepsilon_1) \varepsilon_1^{(z_1-1)} \quad /26/$$

знавши першу похідну відносно ε і прирівнявши її нулю, знайшли оптимальну порізність змученого шару, при якій швидкість відносного руху фаз в стиснених умовах досягає максимальної величини

$$\varepsilon_{опт} = (z-1)/z. \quad /27/$$

З урахуванням знайденої по рівнянню /15/ величини Z для перехідного режиму обтікання зерен одержано

$$\varepsilon_{опт} = 1 - 0,1923 Ar_1^{0,06} \quad /28/$$

Розглянувши відносну швидкість вільного осадження зерен різного розміру в висхідному потоці для перехідного режиму їх обтікання, одержана залежність, враховуюча відношення діаметрів частинок

$$U_{оi} = U_{о1} (d_i/d_1)^p \quad /29/$$

де p - показник, величина якого залежить від режиму обтікання зерен, для діапазону чисел $36 < Ar < 2500$ $p = 1,34$, для діапазону чисел Архімеда $2500 < Ar < 10^5$ $p = 0,89$.

На основі аналізу сил, діючих на окремі кульові частинки різних розмірів в міжзерновому просторі змученого шару основної фракції зерен в стислих умовах їх обтікання, одержано рівняння

$$U_v = U_{о1} [\varepsilon_1^{(z_1-1)} - (d_i/d_1)^p] \geq 0, \quad /30/$$

яке формулює умови сепарації і класифікації кристалів в змученому шарі в перехідному режимі їх обтікання.

Якщо в змученому шарі основної монофракції знаходяться частинки менших розмірів, то використовуючи рівняння /30/ можна вирахувати розміри часток, які сепаруються в верхні зони змученого шару.

З урахуванням величини показників Z і p , для діапазону чисел $36 < (Ar_1 \dots Ar_i) < 2500$ рівняння /30/ має вигляд

$$U_v / U_{о1} = \left\{ \varepsilon_1^{[(5,2/Ar_1^{0,06})-1]} - (d_i/d_1)^{1,34} \right\} \geq 0, \quad /31/$$

розв'язавши яке для граничного випадку, коли рівняння у фігурних дужках наближається до нуля, знайдений максимальний діаметр зерен, які сепаруються в конкретних гідродинамічних умовах

$$d_{im} = d_1 \varepsilon_1^{[(3,68/Ar_1^{0,06})-0,746]} \quad /32/$$

Аналогічно, для діапазону чисел $2500 < (Ar_1 \dots Ar_i) < 10^5$ одержані рівняння відповідно

$$U_v / U_{о1} = \left\{ \varepsilon_1^{[(5,2/Ar_1^{0,06})-1]} - (d_i/d_1)^{0,89} \right\} \geq 0, \quad /33/$$

$$d_{im} = d_1 \varepsilon_1^{[(5,85/Ar_1^{0,06})-1,12]} \quad /34/$$

Для випадків, коли діаметр зерен, що сепаруються, охоплюється діапазоном чисел $36 < Ar_1 < 2500$, а основна монофракція зерен охоплюється діапазоном чисел $2500 < Ar_1 < 10^5$, то з урахуванням рівняння /12/, одержано

$$U_4/U_{01} = \left\{ \varepsilon_1^{[(5,2/Ar_1^{0,06})-1]} - 0,31(d_1/d_1)^{1,39} Ar_1^{0,15} \right\} \geq 0, \quad /35/$$

$$d_{im} = 2,39 d_1 \varepsilon_1^{[(3,88/Ar_1^{0,06})-0,746]} / Ar_1^{0,12} \quad /36/$$

На рис. 1 подано графік, який дозволяє виявити умови сепарації зерен в залежності від порізності змученого шару, числа Архімеда для основної монофракції зерен і відношення діаметрів (d_1/d_1) .

Умовою виносу зерен діаметром d_y із циліндричного апарату є рівняння $U = U_{0y} = U_{01} \varepsilon_1^{z_1}$, використовуючи яке разом з рівнянням /29/, знайдені діаметри частинок, які виносяться із апарату:

для діапазону чисел $36 < (Ar_y \dots Ar_1) < 2500$

$$d_y = d_1 \varepsilon_1^{3,88/Ar_1^{0,06}} \quad /37/$$

для діапазону чисел $2500 < (Ar_y \dots Ar_1) < 10^5$

$$d_y = d_1 \varepsilon_1^{5,85/Ar_1^{0,06}} \quad /38/$$

Для випадків, коли діаметр зерен, які виносяться, охоплюється діапазоном чисел $36 < Ar_y < 2500$, а діаметр основної фракції кристалів охоплюється діапазоном чисел $2500 < Ar_1 < 10^5$, одержано

$$d_y = 2,39 d_1 \varepsilon_1^{3,88/Ar_1^{0,06}} / Ar_1^{0,12} \quad /39/$$

На рис. 2 подані результати розрахунків по рівняннях /32/, /34/, /36/ і /37/-/39/, при цьому видно, що по мірі збільшення порізності змученого шару основної фракції кристалів діаметри відсепарованих і виносимих зерен наближаються до діаметра крупних зерен, тобто із збільшенням порізності шару основної продукційної фракції зерен збільшується інтенсивність сепарації і класифікації дрібних кристалів, підвищується однорідність гранулометричного складу продукційної фракції витак їх кристалів.

В умовах сталого режиму гідралічної класифікації за розмірами частинок для кожної монофракції зерен з розмірами d_1, d_2, \dots, d_i , устанавляється відповідно локальні порізності змученого шару $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i$, при цьому враховано, що для практично незмінних при кристалізації властивостей розчину, залишається справедливою залежність $Ar_i = Ar_1 (d_i/d_1)^3$.

Для циліндричного апарату швидкість розчину у вільному січечні по висоті з лишається незмінною, при цьому для різних фракцій зерен справедливе відношення $U = U_{01} \varepsilon_1^{z_1} = U_{0i} \varepsilon_i^{z_i}$, із якого витікає

$$U_{01}/U_{0i} = \varepsilon_i^{z_i}/\varepsilon_1^{z_1} \quad /40/$$

Розв'язавши рівняння /40/ відносно локальної порізності, одер-

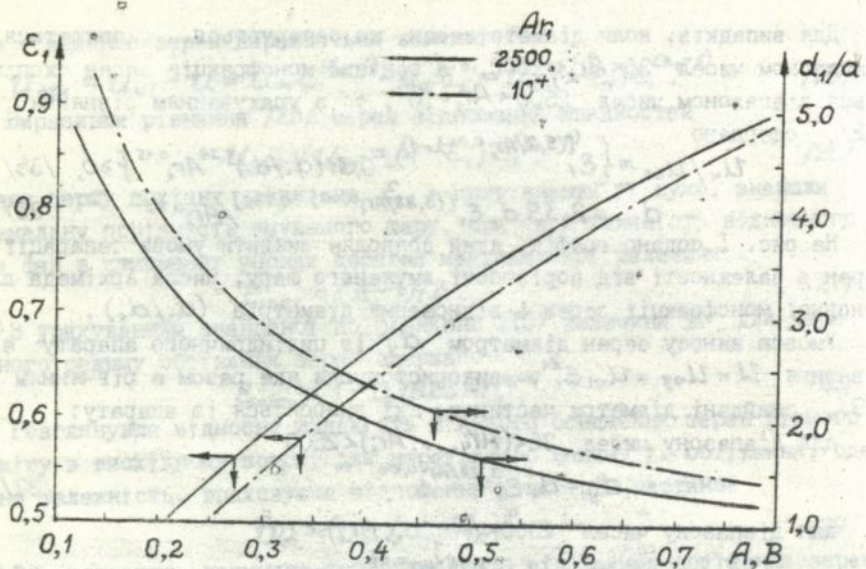


Рис. 1. До розрахунків умов сепарації кристалів у змуленому шарі що рівняням /31/ і /35/ : А - значення комплексу ϵ_1 $[(5,2/Ar_1^{0,06}) - 1]$; В - значення комплексу $(d_i/d_1)^{1,34}$

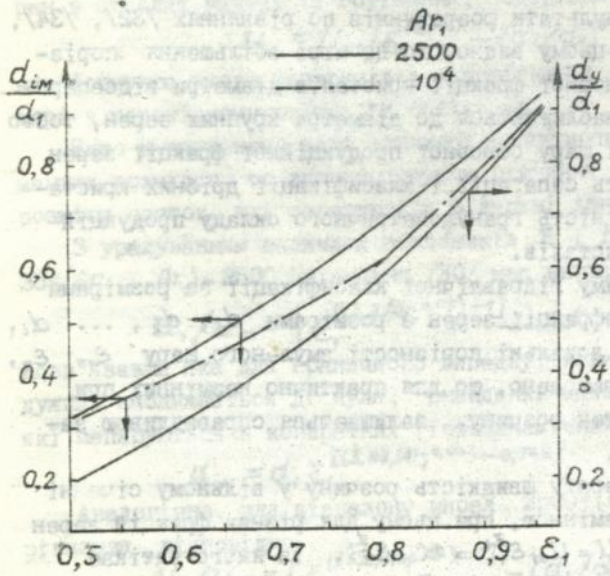


Рис. 2. Залежність діаметрів сепарованих (d_{in}) і унесених (d_y) частинок від параметрів змуленого шару основної монофракції кристалів

хали залежності: для діапазону чисел Архімеда $36 < (Ar_1 \dots Ar_n) < 2500$

$$\varepsilon_i = [\varepsilon_1 (d_1/d_i)^{0,258} Ar_1^{0,06}] (d_i/d_1)^{0,18} \quad /41/$$

для діапазону чисел $2500 < (Ar_1 \dots Ar_n) < 10^5$

$$\varepsilon_i = [\varepsilon_1 (d_1/d_i)^{0,171} Ar_1^{0,06}] (d_i/d_1)^{0,18} \quad /42/$$

Для випадків, коли монофракція змучених шарів відсепарованих кристалів охоплюється діапазоном чисел $36 < Ar_1 < 2500$, а продукційна монофракція кристалів характеризується діапазоном чисел $2500 < Ar_1 < 10^5$, знайдено

$$\varepsilon_i = \left\{ \varepsilon_1 \left[1,25 (d_1/d_i)^{0,258} / Ar_1^{0,029} \right] Ar_1^{0,06} \right\} (d_i/d_1)^{0,18} \quad /43/$$

За результатами виконаних на ЕОМ розрахунків побудована номограма, яка дозволяє експресно розраховувати роботу швидкість розчину, локальну порізність змучених шарів окремих монофракцій зерен, а також діаметр зерен, винесених потоком розчину із апарату в залежності від параметрів змученого шару продукційної монофракції кристалів.

Одержані рівняння були експериментально перевірені на штучно приготуваних сумішах частинок з підфарбованими проміжними монофракціями зерен. Досліди підтвердили, що в умовах псевдозрідженого шару при рівномірному розподілі розчину по січню апарату спостерігається класифікація частинок із чітко вираженою межею між монофракціями.

Методичний підхід і одержані вище залежності були використані для розрахунків параметрів змученого шару кристалів, псевдозріджених у циліндро-конічному кристаловирושувачі.

Течія висхідного потоку розчину в конічній секції апарату з кутом розкриття конусу $\alpha < 20^\circ$ (рис. 3) продовжує носити безвідливний характер. Використовуючи рівняння нерозривності потоку для краплинної рідини, виразимо залежність між швидкостями потоку на вході в конічну секцію і в проміжному січню конусу, яка в безрозмірній формі має вигляд

$$(u_1/u_i) = (S_i/S_1) = [1 + 2h_i \operatorname{tg}(\alpha/2)/D_i]^2 \quad /44/$$

Якщо в конічній секції псевдозріджена монодисперсна фракція кристалів, то швидкість висхідного потоку розчину в січнях 1-1 і 2-2 може бути виражена через рівняння /44/, при цьому відповідно $U_1 = U_0 \varepsilon_1^{5,2/Ar_1^{0,06}}$ і $U_i = U_0 \varepsilon_i^{5,2/Ar_1^{0,06}}$, а відношення швидкостей дорівнює

$$u_1/u_i = (\varepsilon_1/\varepsilon_i)^{5,2/Ar_1^{0,06}} \quad /45/$$

Порівнюючи рівняння /44/ і /45/, а також вирішуючи тотожність відносно локальної порізності змученого шару ε_i , одержали

$$\varepsilon_i = \varepsilon_1 / [1 + 2h_i \operatorname{tg}(\alpha/2)/D_i]^{0,385 Ar_1^{0,06}} \quad /46/$$

На рис. 4 показано зміну локальної порізності і в січнях конічної секції з залежності від відношення (h_i/D_i) , кута розкриття на-

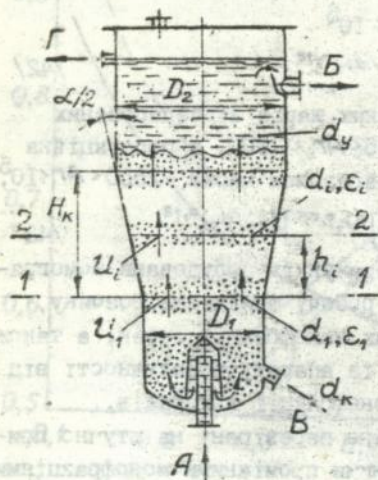


Рис. 3.

Розрахункова схема параметрів класифікованого змуленого шару кристалів в циліндро-конічному кристалосируювачі: А - подача розчину; Б - відведення розчину на циркуляцію; В - відведення кристалічної суспензії; Г - відведення надлишку розчину.

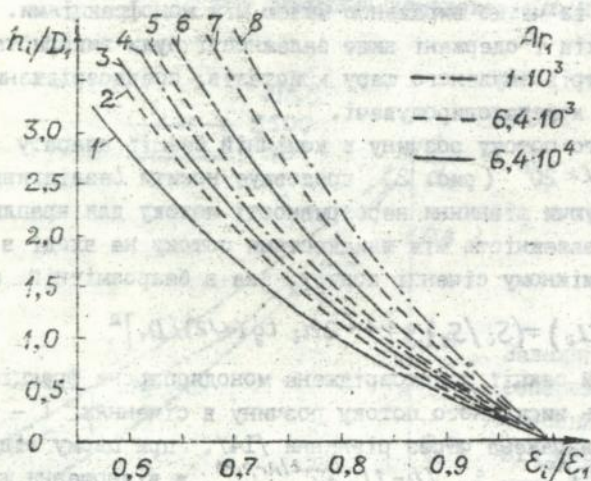


Рис. 4. Зміна локальної порівняності монодисперсного змуленого шару кристалів у залежності від параметрів продукційної фракції (d_1, ϵ_1, Ar_1), відношення геометричних розмірів (h_i/D_1) і кута розкриття конуса (α): 20° - 1, 2, 4; 16° - 3, 5; 12° - 6, 7, 8.

нуса і числа Архімеда для монофракції кристалів.

Рівняння /46/ дозволяє знайти висоту кінчної секції і діаметр розташованої вище циліндричної секції, якщо задана або умовами роботи апарату обмежена порізність змуленого шару $\varepsilon_i = \varepsilon_0$ в зоні переходу суспензії з кінчної секції в циліндричну.

У промисловій практиці в циліндро-конічних виробувачах функціонує змулений шар полідисперсних кристалів.

Для змуленого шару частинок діаметром d_1 , псевдозріджених на вході в кінчну секцію в січenni 1 - 1 (рис. 3), швидкість потоку розчину дорівнює $U_1 = U_{01} \varepsilon_1^{5,2/Ar_1^{0,06}}$, а для змуленого шару частинок діаметром d_i , псевдозріджених в січenni 2 - 2 кінчної секції, відповідно дорівнює $U_i = U_{0i} \varepsilon_i^{5,2/Ar_i^{0,06}}$. Відношення швидкостей розчину

$$(U_1/U_i) = (U_{01} \varepsilon_1^{5,2/Ar_1^{0,06}}) / (U_{0i} \varepsilon_i^{5,2/Ar_i^{0,06}}) \quad /47/$$

Прирівнюючи залежності /44/ і /47/, одержимо

$$(U_{01}/U_{0i}) (\varepsilon_1^{5,2/Ar_1^{0,06}} / \varepsilon_i^{5,2/Ar_i^{0,06}}) = [1 + 2h_i \operatorname{tg}(\alpha/2) / D_1]^2 \quad /48/$$

Враховуючи рівняння /29/, підставляючи його в залежність /48/ і розв'язуючи її відносно локальної порізності ε_i , для діапазону чисел Архімеда $36 < (Ar_1 \dots Ar_i) < 2500$ знайшли

$$\varepsilon_i = \left\{ \varepsilon_1 \left[\left(\frac{d_1/d_i}{1 + \frac{2h_i}{D_1} \operatorname{tg}(\alpha/2)} \right)^{0,385} Ar_1^{0,06} \right]^{(d_1/d_i)^{0,18}} \right\} \quad /49/$$

Рівняння /49/ дозволяє визначити діаметр частинок, які виносяться із кінчної секції при заданій її висоті. Приймаючи $\varepsilon_i = 1,0$ і $h_i = H_k$, і розв'язуючи рівняння /49/ відносно $d_i = d_y$, одержали

$$d_y = d_1 \varepsilon_1^{3,85/Ar_1^{0,06}} / \left[1 + 2H_k \operatorname{tg}(\alpha/2) / D_1 \right]^{1,42} \quad /50/$$

Рівняння /49/ дозволяє також знайти висоту кінчної секції, якщо відомі діаметр витарчих частинок d_i і порізність $\varepsilon_i = \varepsilon_0$ для змуленого шару на ділянці переходу суспензії із кінчної секції в циліндричну, при цьому одержали

$$H_k = \frac{D_1}{2 \operatorname{tg}(\alpha/2)} \left\{ \left[\left(\frac{d_1/d_i}{\varepsilon_0^{(d_1/d_i)^{0,18}}} \right)^{2,6/Ar_1^{0,06}} \right] - 1 \right\} \quad /51/$$

Відповідним чином для діапазону чисел Архімеда $2500 < (Ar_1 \dots Ar_i) < 10^5$ знайдено

$$\varepsilon_i = \left\{ \varepsilon_1 \left[\left(\frac{d_1/d_i}{1 + \frac{2h_i}{D_1} \operatorname{tg}(\alpha/2)} \right)^{0,385} Ar_1^{0,06} \right]^{(d_1/d_i)^{0,18}} \right\} \quad /52/$$

$$d_y = d_1 \varepsilon_1^{5,85/Ar_1^{0,06}} / \left[1 + 2H_k \operatorname{tg}(\alpha/2) / D_1 \right]^{2,25} \quad /53/$$

Нарешті, якщо в кінчній секції апарату функціонує змулений шар частинок, охоплених діапазоном чисел $36 < (Ar_1 \dots Ar_i) < 2500$, а на вході в кінчну секцію функціонує продуктивна монофракційна кристалізація, охоплена діапазоном чисел $2500 < Ar_1 < 10^5$, то за допомогою аналогічних викладених вище перетворень, одержали

ДНБ ім. В. Станіславського
АН України

$$\varepsilon_i = \left\{ \varepsilon_i \left[\frac{1,25 (d_i/d_i)^{0,258}}{Ar_i^{0,029} (1+2h_i \operatorname{tg}(\alpha/2)/D_i)^{0,385}} \right]^{Ar_i^{0,06}} (d_i/d_i)^{0,18} \right\} \quad /54/$$

$$d_y = 2,39 d_i \varepsilon_i^{3,88/Ar_i^{0,06}/Ar_i^{0,12}} [1+2h_i \operatorname{tg}(\alpha/2)/D_i]^{1,49} \quad /55/$$

Значимо, що розрахункові рівняння для визначення величин ε_i і d_y для конічних секцій відрізняються від подібних рівнянь для циліндричних секцій присутністю в знаменнику параметричного комплексу $\delta = [1+2h_i \operatorname{tg}(\alpha/2)/D_i]^{\delta}$, який знижує лужні величини.

З урахуванням відзначеного зроблено висновок, що в конічних секціях кристаловирощувачів процеси сепарації і класифікації кристалів загальмовані і протікають в умовах більшої стислості змуленого шару.

В дисертації подані розроблені автором номограми, котрі дозволяють експресно розраховувати параметри змуленого шару кристалів, псевдозріджених у конічній секції кристаловирощувача, а також знаходити діаметр частинок, які виносяться із апарату.

В четвертому розділі викладені результати досліджень і їх узагальнення по інтенсивності масопередачі у змуленому класифікованому шарі кристалів. На базі об'ємного коефіцієнта масопередачі, з урахуванням локальної порізності змуленого шару, діаметра зерен, режиму їх обтікання і фізико-хімічних властивостей взаємодіючих фаз виконана оптимізація параметрів процесу кристалізації і робочого об'єму кристаловирощувача. Розроблені математичні моделі масообміну у взаємодії кристалів з потоком розчину з урахуванням локальних характеристик змуленого шару кристалів, а також математична модель формування гранулометричного складу, об'єму і маси змуленого класифікованого шару кристалів в кристаловирощувачах класифікуючих кристалізаторів в залежності від потужності апарату і заданого розміру продукційних кристалів.

Аналізуючи процес масопередачі в виділеному елементарному об'ємі змуленого шару монодисперсних частинок середнього діаметра d_i і середньої порізності ε_i для сталого процесу масопередачі сдержане рівняння в диференціальній формі

$$\frac{dC_h}{(C_h - C_p)} = \frac{\beta_{vi}}{\varepsilon_i U_i} dh, \quad /56/$$

яке в загальному виді не вирішується із-за невідомості закономірностей зміни розчинності солі і локального пересичення розчину, а також зміни локальних значень порізності і об'ємних коефіцієнтів масопередачі. Якщо для деякого об'єму змуленого шару монодисперсних кристалів прийняти лінійний закон зміни дірчої і рівнесвної концентрації, то інтегруючи рівняння /56/ можна знайти висоту змуленого шару окремої монофракції зерен

$$h_i = \frac{\varepsilon_i U_i}{\beta_{vi}} \ln(\Delta C_{ni} / \Delta C_{ni}) \quad /57/$$

і її об'єм

$$V_{vi} = \frac{\varepsilon_i u_i}{\beta_{vi}} S \ln (\Delta C_{ni} / \Delta C_{ni}). \quad /58/$$

Тоді загальний об'єм змуленого класифікованого шару з декількома монофракціями вихідних кристалів знаходиться по залежності

$$V_{vc} = \sum_i^n V_{vi} = \sum_i^n [\varepsilon_i u_i S \ln (\Delta C_{ni} / \Delta C_{ni}) / \beta_{vi}]. \quad /59/$$

Для розрахунків робочого об'єму класифікуючого кристалізатора потрібні експериментальні дані відносно значень локальних об'ємних коефіцієнтів масопередачі в залежності від локальної порізності змуленого шару і середнього діаметра вихідних кристалів.

Об'ємний коефіцієнт масопередачі для кристалів деяких солей був знайдений експериментально в залежності від впливаючих факторів - швидкості потоку розчину, діаметра зерен і порізності змуленого шару. Для інших досліджених солей він був розрахований в залежності від експериментально знайдених коефіцієнтів масопередачі на поверхню кристалів - поверхневого коефіцієнту - згідно рівняння

$$\beta_{vi} = \Delta M_i / \Delta C_{cp} \cdot V_{vi} = 6 \psi \beta_{pi} (1 - \varepsilon_i) / d_{ni}. \quad /60/$$

На рис. 5 і 6 представлені експериментальні дані по кристалізації алюмо-амонійног галуноу, подібні дані одержали і для інших солей.

Аналіз одержаних результатів показав, що об'ємний коефіцієнт масопередачі має більш високі значення для кристалів меншого розміру і досягає максимального значення в інтервалі порізностей змуленого шару $\varepsilon = 0,6 \dots 0,72$, а потім знижується особливо помітно при порізностях $\varepsilon > 0,75$. Встановлено, що для крупних частинок об'ємний коефіцієнт масопередачі в меншій мірі залежить від порізності змуленого шару в порівнянні з дрібними частинками. Збільшення об'ємного коефіцієнту масопередачі при порізностях $\varepsilon = 0,6 - 0,7$ є результатом досягнення найбільшої гідродинамічної взаємодії фаз, при якій наступає повне розкриття поверхні зростаючих кристалів, а рух розчину і частинок, безперервна зміна їх взаємного розташування зменшують товщину дифузійного підшарку, що в кінцевому результаті забезпечує інтенсивну масопередачу в одиниці об'єму. При більш високих порізностях змуленого шару знижується відносна швидкість руху фаз, хоча поверхневий коефіцієнт продовжує зростати, в той же час зменшення об'ємної концентрації зерен і поверхні фазового контакту в одиниці об'єму змуленого шару призводить до зниження ефективності кристаловиротувача.

Одержані результати були узагальнені критеріальними рівняннями.

Швидкість масопередачі між висхідним потоком пересиченого розчину і змуленим шаром кристалів для дифузійно-контрольованих процесів визначається гідродинамічними умовами взаємодії фаз та їх фізико-хімічними властивостями. Експериментальні дані традиційно корелюються

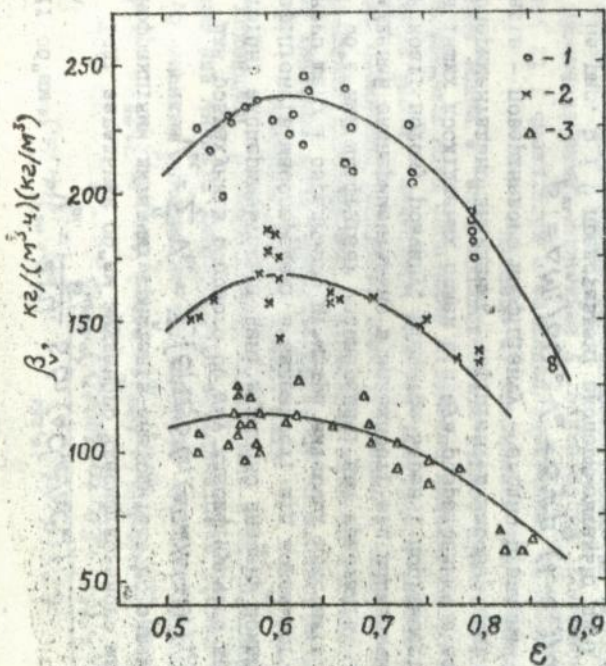


Рис. 5. Залежність об'ємного коефіцієнта масопередачі (β_v) при кристалізації алімо-амонійного галуни від порізності змуленого шару і діаметрів витаючих кристалів: 1 - 0,62; 2 - 0,89; 3 - 1,4 мм.

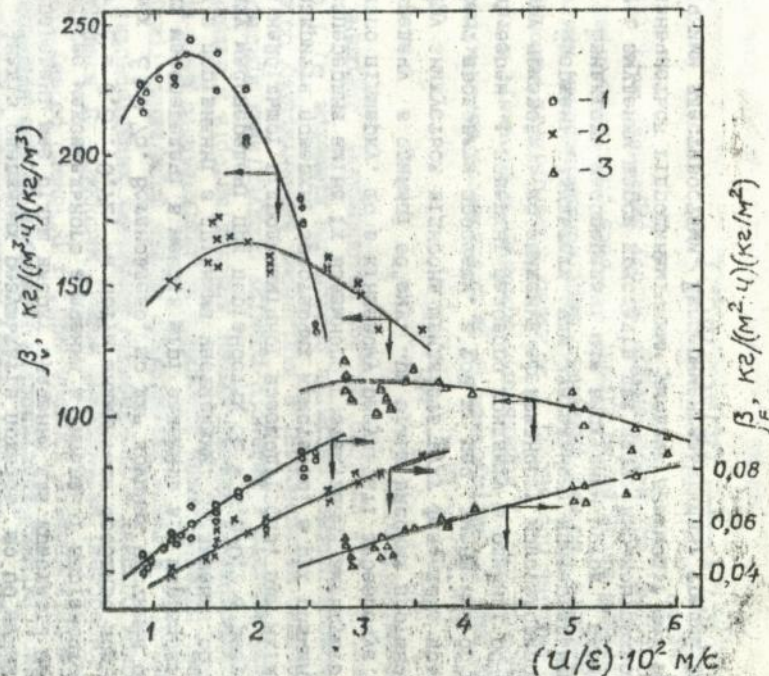


Рис. 6. Залежність об'ємного (β_v) і поверхневого (β_s) коефіцієнтів масопередачі при кристалізації алімо-амонійного галуни від швидкості руху розчину і діаметрів витаючих кристалів: 1 - 0,62; 2 - 0,89; 3 - 1,4 мм.

критеріальними рівняннями виду $Nu_d = f(Re, \varepsilon, Pr_d)$ і $Nu_d = f'(Re, (1-\varepsilon), Pr_d)$, але у багатьох випадках розкид даних досягає $\pm 50\%$.

В літературі відоме рівняння Аксельруда

$$Nu_d = (0,65 - 0,9) Pr_d^{0,5} Pr_d^{0,33}, \quad /61/$$

яке дозволяє знайти швидкість масопередачі для вільно витаючих частинок, це ж рівняння іноді використовують і для визначення коефіцієнтів масопередачі в стиснених умовах змуленого шару частинок.

Враховуючи, що для умов стисненої взаємодії фаз в змуленому шарі справедливі рівняння $Re = Re_0 \varepsilon^2$, виразивши число Рейнольдса через залежності /16/-/17 і з урахуванням середнього значення коефіцієнту рівняння /61/ приведено до виду: для діапазону чисел Архімеда $36 < Ar < 2500$

$$Nu_d = 0,26 Ar^{0,35} Pr_d^{0,33} \varepsilon^{2,6/Ar^{0,06}}, \quad /62/$$

для діапазону чисел Архімеда $2500 < Ar < 10^5$

$$Nu_d = 0,463 Ar^{0,315} Pr_d^{0,33} \varepsilon^{2,6/Ar^{0,06}}, \quad /63/$$

Експериментальні дані для декількох систем кристи-и-розчин були нанесені на графік $(Nu_d/Pr_d^{0,33}) = f(Ar, \varepsilon)$ - рис. 7. при цьому була досягнута добра відповідність експериментальних і розрахункових величин, розкид даних у середньому не перевищував $\pm 6,9\%$ для всієї області перехідного режиму обтікання кр. сталів.

Використовуючи залежності /62/-/63/ і виразивши числа Архімеда і Прандтля дифузійного через параметри фізико-хімічних властивостей, були одержані функціональні залежності для розрахунків поверхневого коефіцієнту масопередачі: для діапазону чисел $36 < Ar < 2500$

$$\beta_F = 0,63 d_k^{0,17} \rho_k^{0,06} (\rho_k - \rho_p)^{0,29} D_x^{0,67} \varepsilon^{2,6/Ar^{0,06}} / \mu_p^{0,45}, \quad /64/$$

для діапазону чисел $2500 < Ar < 10^5$

$$\beta_F = 0,855 (\rho_k - \rho_p)^{0,315} D_x^{0,67} \varepsilon^{2,6/Ar^{0,06}} / d_k^{0,05} \mu_p^{0,30}. \quad /65/$$

Хоч поверхневий коефіцієнт масопередачі і характеризує інтенсивність взаємодії витаючих кристалів з текучим розчином, він все ж не дозволяє визначити оптимальні параметри процесу масопередачі в змуленому шарі з урахуванням гідродинамічних обставин.

Мірою оптимальності процесу прийнято максимальне значення об'ємного коефіцієнту масопередачі з урахуванням стиснених умов взаємодії фаз, порівності змуленого шару і режиму обтікання зерен.

Виразивши об'ємний коефіцієнт масопередачі через поверхневий коефіцієнт, діаметр зерен і число Архімеда, одержали рівняння для розрахунків локальних об'ємних коефіцієнтів масопередачі: для діапазону чисел Архімеда $36 < Ar < 2500$

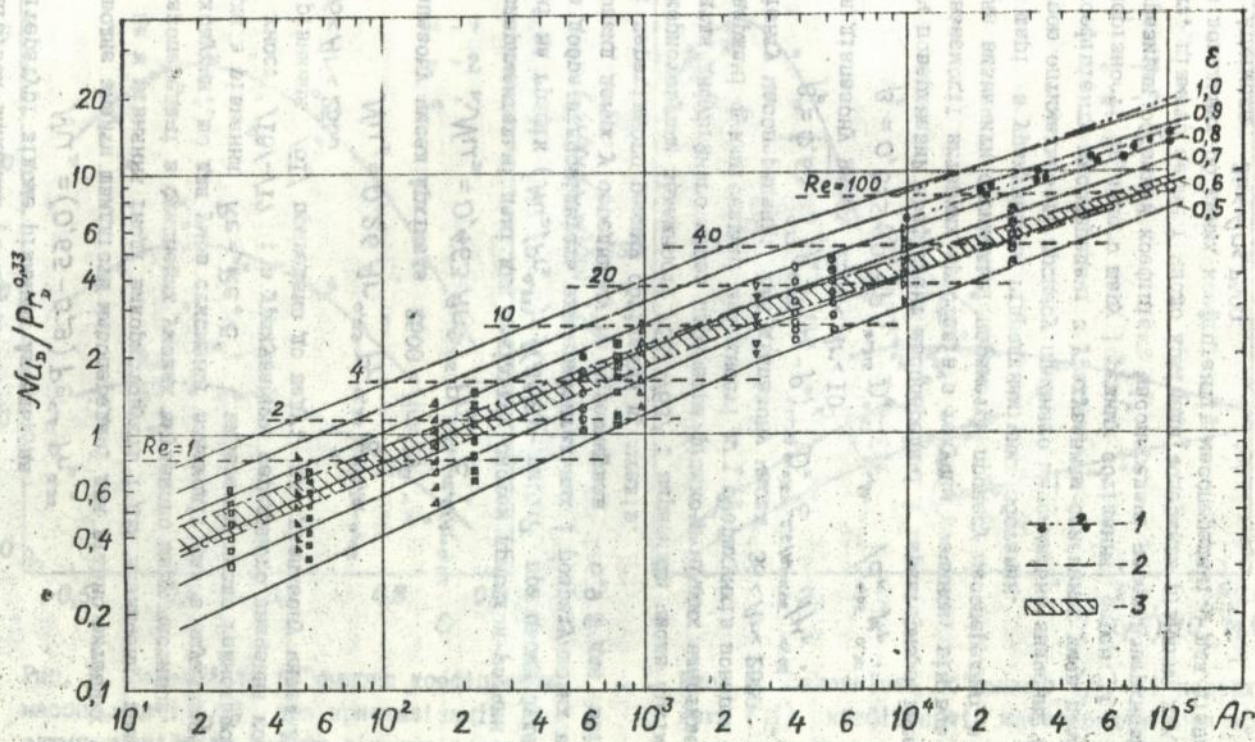


Рис. 7. Узагальнення і порівняння експериментальних даних і розрахункових залежностей по масо-передачі в змуленому шарі кристалів: 1 - по залежності і експериментальним даним Аксельруда; 2 - по рівнянням (62)-(63) і експериментальним даним; 3 - область оптимальних значень об'ємних

$$\beta_v^4 = 7,12 E (1-\varepsilon) \varepsilon^{2,6/Ar^{0,06}} / Ar^{0,22} \quad /66/$$

для діапазону чисел Архімеда $2500 < Ar < 10^5$

$$\beta_v = 12,73 E (1-\varepsilon) \varepsilon^{2,6/Ar^{0,06}} / Ar^{0,35} \quad /67/$$

Дослідження функції /66/-/67/ на екстремум дозволило знайти граничні оптимальні значення порізності змуленого шару в залежності від числа Архімеда, які для процесу масопередачі в перехідному режимі обтікання кристалів знаходяться по рівнянню

$$\varepsilon_{opt} = 2,6 / (2,6 + Ar^{0,06}) \quad /68/$$

Підставленням функції /68/ в рівняння /66/-/67/, одержані функціональні залежності для розрахунку оптимального об'ємного коефіцієнту масопередачі, орієнтованого на продукційну монофракцію зерен.

Результати проведених досліджень узагальнені на графіковий - рис. 7 - в координатах $(Nu_2 / Pr_2^{0,32}) = f(Ar, \varepsilon)$, особливістю якого являється те, що інтенсивність масопередачі в змуленому шарі описується сімейством кривих, кожна із котрих залежить від порізності змуленого шару, числа Архімеда і режиму обтікання зерен. На графіковий виділена область оптимальних значень коефіцієнтів масопередачі.

П'ятий розділ присвячений розробці методики інженерного розрахунку, розробці блок-схем, алгоритмів і програм розрахунку на ЕОМ циліндричних і циліндро-конічних кристаловирощувачів класифікуючих кристалізаторів.

Основною задачею розрахунку класифікуючого кристалізатора являється визначення параметрів процесу, забезпечуючих стаціонарне функціонування змуленого шару кристалів в умовах їх гідравлічної класифікації, а також досягнення оптимальних умов для росту кристалів.

У залежності від продуктивності апарату, вимог до гранулометричного складу і розмірів зерен продукційних кристалів, з урахуванням фізико-хімічних властивостей кристалізуємої солі кристаловирощувачі класифікуючих кристалізаторів проектують циліндричної або циліндро-конічної форми. Циліндричні кристаловирощувачі забезпечують одержання продукту більш однорідного гранулометричного складу з розміром зерен 0,8-1,5 мм. Циліндро-конічні кристаловирощувачі використовуються в установках великої одиничної потужності, діапазон витяжених кристалів в них більший і досягає 0,3-3,0 мм, середній розмір одержуваних продукційних кристалів дорівнює 2,0 - 3,0 мм.

В дисертації розроблений пофракційний метод розрахунку параметрів процесу кристалізації, при цьому зроблені припущення, що в умовах гідравлічної класифікації обидві взаємодіючі фази рухаються назустріч одна одній в режимі ідеального витіснення. допускається також, що ут-

ворені в процесі кристалізації зародкові кристали циркулюють у циркуляційному циклі, при цьому частина з них розчиняється або уловлюється, а частина підростає до розміру частинок, здатних затриматись у верхній секції кристаловирощувача, в подальшому вони приймають участь у рості в об'ємі змуленого шару кристалів.

В основу розрахунків об'єму змуленого шару кристалів і формування гранулометричного складу кристалічної суспензії в кристаловирощувачі взяті продуктивність апарату і середній діаметр продукційних кристалів, а також баланс числа часинок, які по мірі росту перетікають із верхніх зон змуленого шару у нижче розташовані.

Гранулометричний склад класифікованого кристалічної суспензії, витаючої в об'ємі кристаловирощувача, являє собою безперервну функцію розподілу в діапазоні розмірів зерен від діаметра унесених в циркуляційний цикл частинок до діаметру вивантажуваних із апарату продукційних кристалів. Тому, по аналогії з методом, який використовується в ситовому аналізі, весь об'єм змуленого шару кристалів, починаючи з продукційної фракції, розділений на окремі монофракції з розміром зерен в монофракції від d_{ni} до d_{si} , при цьому модуль дисперсності зерен для монофракції дорівнює $(d_{ni}/d_{si}) = \sqrt[20]{10}$.

Тоді число монофракцій змулених шарів для діапазону витаючих в апараті кристалів, з урахуванням прийнятого модуля, дорівнює

$$n = \ln(d_n/d_y) / \ln \sqrt[20]{10} = 8,686 \ln(d_n/d_y). \quad /69/$$

Середній розмір зерен окремої монофракції взятий як середньгеометрична величина із максимального і мінімального діаметрів частинок і дорівнює $d_{ci} = \sqrt{d_{ni} \cdot d_{si}}$.

Виразивши максимальний діаметр зерен на нижній межі змуленого шару i -тої монофракції через діаметр продукційних кристалів, знайдено $d_{ni} = d_n / (\sqrt[20]{10})^{i-1}$, а мінімальний розмір зерен тієї ж монофракції на верхній межі відповідно дорівнює $d_{si} = d_n / (\sqrt[20]{10})^i$.

В умовах стаціонарного процесу кристалізації число перетікаючих по мірі росту кристалів із верхніх зон змуленого шару в розташовані нижче шари залишається незмінним в лобому поперечному сеченні по висоті апарату, при цьому справедлива залежність

$$N = \frac{6g_n}{\pi d_n^3 \rho_n} = \frac{6M_i}{\pi d_i^3 \rho_n} = \dots = \frac{6M_3}{\pi d_3^3 \rho_n}. \quad /70/$$

Одночасно, в період перебування кристалів межах змуленого шару однієї окремої монофракції, зерен, приріст їх власної маси дорівнює

$$\Delta M_i = \frac{\pi}{6} (d_{ni}^3 - d_{si}^3) \rho_n. \quad N = g_n (d_{ni}^3 - d_{si}^3) / d_n^3. \quad /71/$$

Відношення $(d_{ni}^3 - d_{si}^3) / d_n^3$ має смисл масової частки викриста-

лізованої солі в межах об'єму розглянутої монофракції кристалів.

Маса викристалізованої солі пов'язана з об'ємом змуленого шару і масою всіх зерен в даній монофракції залежністю

$$\Delta M_i = \beta_{vi} \cdot \Delta C_{cp} \cdot V_{vi} = \beta_{vi} \cdot \Delta C_{cp} \cdot M_{vi} / ((1 - \varepsilon_i) \rho_k) \quad /72/$$

Порівнюючи залежності /71/, /72/ і вирішуючи їх сумісно, знайдені об'єм змуленого шару окремої монофракції кристалів

$$V_{vi} = \frac{g_k}{\Delta C_{cp} \cdot \beta_{vi}} \left[(d_{ni}^3 - d_{vi}^3) / d_k^3 \right], \quad /73/$$

а також маса всіх кристалів, виходячих в об'ємі змуленого шару даної монофракції зерен

$$M_{vi} = \frac{g_k (1 - \varepsilon_i) \rho_k}{\Delta C_{cp} \cdot \beta_{vi}} \left[(d_{ni}^3 - d_{vi}^3) / d_k^3 \right]. \quad /74/$$

Повний робочий об'єм змуленого шару кристалів в циліндричному кристаловирощувачі дорівнює

$$V_{ac} = \sum_i^n V_{vi} = \frac{g_k}{\Delta C_{cp} \cdot d_k^3} \sum_i^n [(d_{ni}^3 - d_{vi}^3) / \beta_{vi}], \quad /75/$$

а загальна маса кристалів в робочому об'ємі кристаловирощувача

$$M_k = \sum_i^n M_{vi} = \frac{g_k \cdot \rho_k}{\Delta C_{cp} \cdot d_k^3} \sum_i^n [(1 - \varepsilon_i) (d_{ni}^3 - d_{vi}^3) / \beta_{vi}]. \quad /76/$$

Особливістю розробленого методу розрахунків кристаловирощувача являється також те, що об'єм і маса змуленого шару продукційної монофракції кристалів розраховані за оптимальними параметрами для цієї монофракції, в якій викристалізовується основна маса солі.

Розроблені блок-схема, алгоритми і програма розрахунків на ЕОМ параметрів процесу кристалізації і робочого об'єму циліндричного кристаловирощувача, які представлені в дисертації.

Проектний розрахунок циліндро-конічного кристаловирощувача проводиться аналогічним методом, але пов'язаний з переборюванням труднощів, обумовлених більш швидкою зміною параметрів змуленого шару кристалів в конічній секції і складністю визначення висоти і об'єму змуленого шару окремої монофракції кристалів.

Для одержання цільового продукту однорідного гранулометричного складу доцільно нижню секцію проектувати циліндричною і в ній розміщувати до половини об'єму змуленого шару продукційної монофракції кристалів, решта об'єму змуленого шару розміщується в конічній секції з частковим виходом його у верхню циліндричну секцію.

Визначення параметрів і об'єму змуленого шару окремих монофракцій кристалів в конічній секції проводиться для середнього діаметра зерен методом послідовного приближення на основі параметрів змуленого шару у вхідному січєнні конусу і масової частки викрис-

талізованої солі, для прискорення розрахунків розроблена підпрограма. В дисертації приведені блок-схеми, алгоритми і програми розрахунків на ЕОМ циліндро-конічного кристаловирощувача.

У шостому розділі на основі загальних закономірностей процесу кристалізації і з урахуванням особливостей процесу у класифікаційно-змуденому шарі кристалів сформульовані основні принципи інтенсифікації гідродинаміки і масопередачі, які базуються на такі основні положення:

- при установленому режимі гідравлічної класифікації кристалів утруднюється ріст дрібнокристалічних фракцій внаслідок виносу останніх з зони з низьким залишковим переиченням розчину. Для вирівнювання полів швидкостей і пересичення розчину по висоті апарату використаний принцип вертикального секціонування по зонах росту з урахуванням модуля полідисперсності кристалів;

- для забезпечення інтенсивного масообміну між витаючими кристалами і потоком розчину необхідно забезпечити потрібну локальну порізність змуденого шару. Регулювання величини порізності шару і інтенсивності гідравлічної взаємодії між фазами досягається зміною швидкості висхідного потоку, регулюванням режиму циркуляції розчину, зміною площі поперечного з'ичення апарату;

- інтенсивний ріст кристалів можливий в умовах оптимального пересичення розчину при практично відсутньому спонтанному утворенні зародків. Регулювання рівня пересичення і швидкості його утворення досягається за рахунок зміни кратності циркуляції розчину і швидкості його охолодження - для охолоджувальних - або швидкості випарювання розчинника - для випарюючих - систем;

- регулювання і підвищення рівня пересиченості розчину, поступаючого в змудені шари проміжних і дрібнокристалічних фракцій кристалів, реалізується за допомогою додаткового переохолодження розчину у вбудованих між секціями додаткових теплообмінних пристроїв (для апаратів охолоджуючого типу), або за допомогою локального відбору і подачі в змудений шар частини пересиченого розчину (для випарюючих апаратів);

- принцип прискореного вирощування кристалів проміжних фракцій передбачає створення оптимальних умов для росту дрібних кристалів, відбір дрібнокристалічних фракцій із зони їх підвищеного накопичення з низьким рівнем пересичення розчину і подачі їх на дозрівання в зони з підвищеним рівнем пересичення розчину, а також організації циркуляції дрібнокристалічних фракцій між зонами росту кристалів з низьким і високим рівнем пересиченості розчину;

- принцип достатньої поверхні фазового контакту потребує підтримки в апараті стабільного об'єму змученого шару кристалів, який забезпечить практично повне використання пересиченості розчину при мінімальній швидкості утворення зародків по гетерогенному механізму.

Сформульовані принципи інтенсифікації процесу кристалізації солей реалізовані в розроблених нових конструкціях класифікуючих кристалізаторів, захищених авторськими свідоцтвами. Розроблені конструкції кристалізаторів розподілені на дві групи по способу одержання пересиченого розчину, а саме: на класифікуючі кристалізатори охолоджуючого і класифікуючі кристалізатори випарюючого типів. По конструктивному признаку розроблені апарати одно-, дво- і багатосекційні, по технологічному признаку - з зовнішніми і внутрішніми циркуляційними контурами по розчину і по кристалічній суспензії.

В розділі розглянуті нові, захищені авторськими свідоцтвами, способи одержання кристалічних речовин з покращеними показниками якості і споживчих властивостей.

У розділі приводяться технологічні схеми і коротко освітлюються результати дослідно-промислових випробувань двухсекційних класифікуючих кристалізаторів для одержання нітрату калію і алюмо-амонійного галуну. Впроваджене у виробництво алюмо-амонійного галуну кристалізаційна установка безперервної дії забезпечила реальний економічний ефект за рахунок приросту потужності і покращення якості готової продукції. Приведена принципова технологічна схема кристалізаційної установки з випарюючим класифікуючим кристалізатором, розробленим в співдружності з спеціалістами Кемеровської філії ДІАП і впровадженім на декількох заводах у цехах переробки відходів виробництва капролактаму у кристалічний сульфат амонію. Економічний ефект від впровадження одного агрегату складає більше 50 тис. крб. в масштабі цін 1988 р., всього впроваджено 12 агрегатів.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Виконано комплекс розрахунково-теоретичних, експериментальних і аналітичних досліджень процесу масової кристалізації солей із розчинів в класифікованому змученому шарі кристалів, направлений на узагальнення закономірностей процесу, створення, розробку і розрахунок нових зразків класифікуючих кристалізаторів, використання яких у промисловості дозволяє виробляти крупнокристалічні солі і добрива однорідного гранулометричного складу з покращеними показниками якості і споживчих властивостей.

2. Досліджені, уточнені і узагальнені деякі властивості висококонцентрованих і пересичених водно-сольових розчинів, одержані

розрахункові рівняння для визначення густини і динамічної в'язкості висококонцентрованих і насичених розчинів в залежності від їх концентрації і температури. Відповідно до висококонцентрованих розчинів розроблена і експериментально перевірена методика інтерферометричного аналізу для визначення їх складу і величини граничного пересичення розчину.

3. На основі досліджень закономірностей гідродинаміки змуленого шару кристалів в циліндричних і циліндро-конічних апаратах:

- сформульовані і виявлені умови гідравлічної сепарації і класифікації кристалів при стисненій взаємодії фаз, визначений діапазон розмірів зерен, витягуючих в апаратах в залежності від параметрів змуленого шару продукційної монофракції кристалів;

- одержане рівняння для розрахунку оптимальної порізності змуленого шару, при якій досягається максимальний ефект взаємодії фаз;

- одержані розрахункові залежності для визначення локальних параметрів окремих монофракцій зерен змуленого шару по висоті циліндричних і циліндро-конічних кристаловирощувачів в залежності від параметрів змуленого шару продукційної монофракції кристалів;

- одержані критеріальні рівняння для розрахунків гідродинамічних параметрів змуленого шару з урахуванням його порізності, діаметра і режиму обтікання зерен і фізико-хімічних властивостей фаз;

- розроблені номографічні методи експресного розрахунку параметрів класифікованого змуленого шару окремих монофракцій зерен.

4. На основі проведених досліджень закономірностей масопередачі у класифікованому змуленому шарі кристалів встановлено:

- масова кристалізація досліджених неорганічних солей в найменувань із розчинів з помірною в'язкістю (до 15 сП) і в температурному діапазоні 20-45 °С лімітується дифузно-конвективною стадією;

- при пересиченнях розчину в діапазоні 3-5 кг/м³ і достатній масі зерен у змуленому шарі здебільшого проходить чистий ріст кристалів без помітних слідів гомогенного зародкоутворення,

- розроблена математична модель масообмінної взаємодії витягуючих кристалів з потоком пересиченого розчину, на базі якої одержані рівняння для розрахунків локальних значень поверхневого і об'ємно-ко коефіцієнтів масопередачі з урахуванням локальних гідродинамічних характеристик змуленого шару кристалів;

- сформульоване, експериментально досліджене і узагальнене розрахунковим рівнянням явище досягнення максимальної об'ємної інтенсивності масопередачі в змуленому шарі монодисперсних зерен в залежності від діаметра зерен і режиму їх обтікання, причому, із

збільшенням діаметру зерен оптимальна порізність зменшується;

4. Одержані критеріальні рівняння для розрахунків інтенсивності масопереносу на поверхню зерен в залежності від порізності змученого шару, а також режим обтікання зерен на базі чисел Архімеда, виділена область оптимальної об'ємної взаємодії фаз.

5. Розроблена математична модель формування гранулометричного складу, об'єму і маси змученого класифікованого шару кристалів в циліндричних і циліндро-конічних кристаловирощувачах з урахуванням модуля дисперсності, балансу числа перетікаючих кристалів, заданих продуктивності кристалізатора і діаметра продукційних кристалів.

6. Розроблена методика пофракційного розрахунку класифікуючих кристалізаторів, розроблені алгоритми і програми розрахунків на ЕОМ циліндричних і циліндро-конічних кристаловирощувачів з оптимізацією робочого об'єму апарата по продукційних кристалах.

7. Сформульовані основні принципи і методи інтенсифікації і оптимізації процесів гідравлічної класифікації і росту кристалів в класифікуючих кристалізаторах, які забезпечують одержання крупнокристалічних продуктів однорідного гранулометричного складу, в числі яких визначальними являються:

- підтримання оптимального рівня пересиченості розчину, при якому забезпечується інтенсивний ріст кристалів при практично відсутньому спонтанному утворенні зародків;
- регулювання і підвищення рівня пересиченості розчину по висоті кристаловирощувача за рахунок додаткового переохолодження розчину або часткової локальної подачі розчину в змучений шар;
- вертикальне секціонування апарату по зонах росту і оптимізація швидкості висхідного потоку розчину за рахунок зміни поперечного січення апарату по висоті;
- відбір дрібнокристалічних фракцій із зон їх підвищеного накопичування з низьким рівнем пересичення розчину і подача їх на дощування в зону з підвищеним рівнем пересичення розчину.

8. Розроблені нові, захищені авторськими свідоцтвами конструкції класифікуючих кристалізаторів охолоджувального і випарюючого типів, в яких використані основні методи інтенсифікації і оптимізації процесів гідравлічної класифікації і росту кристалів.

9. Розроблені нові, захищені авторськими свідоцтвами способи кристалізації деяких солей із розчинів з метою одержання крупнокристалічних продуктів з покращеними показниками якості.

10. Окремі конструкції розроблених класифікуючих кристалізаторів охолоджуючого і випарюючого типів перевірені в дослідно-проми-

словому масштабі і впроваджені в промисловість з реальним економічним ефектом, який складає більше 800 тис. крб. на рік в цінах до 1989 р.

ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ΔC_{cp} - середнє пересичення розчину, кг/м³; d_k, d_v, d_i - діаметри зерен або кристалів продукційної і проміжної монофракції; D_1, D_2 - діаметр нижньої і верхньої циліндричних секцій апарату; D_i - діаметр конічної секції в локальному поперечному січенні; D_x - коефіцієнт дифузії солі в розчині; E - комплекс параметрів фізико-хімічних властивостей системи кристали-розчин., $E = \psi [D_x^2 (\rho_k - \rho_r)^2 \rho_r]^{0,33} / \mu_r$; F - поверхня масообміну; g - прискорення вільного падіння; g_k - масова продуктивність кристалізатора, кг/с; h_{ci} - висота січення середньої зони змуленого шару; h_c - висота змуленого шару i -тої монофракції; H_k - висота конічної секції апарату; M_{vi}, M_k - маса кристалів у змуленому шарі окремої монофракції зерен і повна для апарату, відповідно; ΔM - маса викристалізованої солі, кг/с; N - число зростаючих кристалів, шт/с; S, S_i - площа поперечного січення апарату; t, T - температура; U, U_i, U_c - швидкості розчину середовища в локальному січенні апарату в вільних і стислих умовах, відповідно; U_o, U_v, U_{vi} - швидкості твердих частинок в локальному січенні в вільних і стислих умовах, відповідно; V_{vi}, V_{ac} - об'єм змуленого шару i -тої монофракції зерен і повний для всього апарату, відповідно; α - кут розкриття конусу; β_F - коефіцієнт масопередачі на поверхню кристалів (поверхневий); β_{vi} - коефіцієнт масопередачі в 1 м³ змуленого шару (об'ємний); ϵ_i, ϵ_c - порізність продукційної фракції кристалів і локальна порізність в січенні змуленого шару, відповідно; φ_o - коефіцієнт гідравлічного опору в вільному потоці; μ_r - динамічна в'язкість розчину; ρ_r, ρ_c - густина розчину, середовища кг/м³; ρ_k, ρ_v - щільність кристалів, частинок кг/м³; ψ - коефіцієнт форми частинок.

К р и т е р і ї : Ar - Архімеда, $Ar = d_k^3 g \rho_r (\rho_k - \rho_r) / \mu_r^2$; Re - Рейнольдса, $Re = U d_k \rho_r / \mu_r$; Nu_D - Нусельта дифузійний $Nu_D = \beta_F d_k / D_x$; Pr_D - Прандтля дифузійний, $Pr_D = \mu_r / \rho_r \cdot D_x$.

І н д е к с и : v - верхній; vc - зм'ячений шар; i - істинне значення; k - кристал; l - перемінне значення, індекс; m - максимальне значення; n - нижній; o - вільне осадження; opt - оптимальне значення; y - винос; ψ - частинка.

Основний зміст дисертації викладений в наступних наукових працях:

1. Врагов А.П. Кинетика массообмена при кристаллизации в псевдоожигенном слое. / Массообменные процессы химической технологии. Сборник статей. Вып. 4. Л.: Химия, 1969. - С. 158-159.
2. Врагов А.П. Кинетика кристаллизации сульфата аммония в псевдоожигенном слое. / Исследование процессов тепло- и массообмена в кипящем слое. Сбор. крат. докл. Всесоюз. совещ. Иваново, 1969. - С. 69.
3. Врагов А.П. Гидродинамика расширения слоя кристаллов, псевдоожигенных насыщенными растворами. / Химия и химическая технология. Сборник науч. трудов № 18. Кемерово: КузПИ, 1969. - С. 81-87.
4. Врагов А.П., Ишкин И.П., Цельм Н.К. Кинетика кристаллизации нитрата калия в псевдоожигенном слое. Теорет. основы хим. технологии. Т. 4, № 9, 1970, с. 357-366.
5. А.С. № 202873 СССР, МПК В 01D, 12 C2. Многосекционный кристаллизатор / Врагов А.П., Махов А.М., опубл. БИ № 20, 1967.
6. А.С. № 239222 СССР, МПК В 01D, 12 C2. Многосекционный кристаллизатор / Врагов А.П., опубл. БИ № 11, 1969.
7. А.С. № 247228 СССР, МПК В 01D, 12 C2. Классифицирующий кристаллизатор / Врагов А.П., опубл. БИ № 22, 1969.
8. А.С. № 289661 СССР, МКИ³ В 01D, 9/02. Классифицирующий кристаллизатор / Врагов А.П., опубл. БИ № 41, 1983.
9. А.С. № 375079 СССР, МКИ³ В 01D, 9/02. Классифицирующий кристаллизатор / Врагов А.П., опубл. БИ № 16, 1973.
10. Лебедева Н.Н., Врагов А.П. Изучение плотности и вязкости водных растворов алюмоаммонийных квасцов. Журн. прикл. химии. Т. 54, № 11. Л.: Наука, 1981. - С. 2557-2559.
11. Врагов А.П., Приймак В.П. Инкубатор для крупных кристаллов. Журн. "Изобретатель и рационализатор", № 8, 1981, с. 20.
12. Врагов А.П. Интенсификация процесса кристаллизации солей из растворов в классифицирующих кристаллизаторах. // Пути совершенствования интенсификации и повышения надежности аппаратов в основной химии. Материалы 2-го Всесоюз. научно-техн. совещания. Т. I. Сумы, 1982. - С. 212-215.
13. Врагов А.П. Интенсивность массообмена и чистота получаемых кристаллов при кристаллизации из растворов во взвешенном слое. / Состояние и перспективы развития методов получения монокристаллов. Тезисы докладов 2-ой Всесоюз. конференции. Харьков, 1982, с. 41.
14. Врагов А.П. Опытные-промышленные испытания классифицирующего кристаллизатора / Современ. машины и аппараты хим. пр-ств "Химтехника - 83". Тезисы докладов третьей Всесоюзной конференции, секц. I. Ташкент, 1983, с. 55-56.

15. А.С. № 1042768 СССР, МКИ³ в ОИД, 9/02. Классифицирующий испарительный кристаллизатор / Врагов А.П., Аминов В.С., Будыко Б.В., Етушенко А.И., опубли. БИ № 35, 1983.

16. Врагов А.П., Лебедева Н.Н. О возможности расчета вязкости концентрированных водных растворов неорганических солей. Журн. прикл. химии. Т. 57, № 5. Л.: Наука, 1984. - С.981-986.

17. Врагов А.П. Кристаллизационная установка непрерывного действия. / Информационный листок о научно-техническом достижении №84-96. Харьков, ЦНТИ, 1984, 4 с.

18. Врагов А.П. Интенсификация процесса роста кристаллов в классифицирующих кристаллизаторах на основе принципа вертикального секционирования / Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов хим. пр-ств "ПАХТ-85". Тезисы докл. Всесоюзной научной конференции, ч. 4. Харьков, ХПИ, 1985. - С.53-54.

19. Врагов А.П. Классифицирующий испарительный кристаллизатор для использования в крупнотоннажных производствах / Тезисы докладов 3-ей Всесоюзной конференции по массовой кристаллизации и кристаллизационным методам разделения смесей. Черкассы, 1985. - С.103-104.

20. Врагов А.П. Опытные-промышленные испытания кристаллизационной установки непрерывного действия с классифицирующим кристаллизатором. Хим. промышленность, № 12, 1985. - С.740-742.

21. А.С. № 1180038 СССР, МКИ³ в ОИД, 9/02, 9/00. Способ непрерывной кристаллизации солей из растворов / Врагов А.П. БИ № 35, 1985.

22. Врагов А.П., Шевченко А.С. Массообмен при кристаллизации ААК во взвешенном слое / Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии. Тезисы докладов Всесоюзного совещания. Секция 2. Сумы, 1986. - С. 49.

23. Врагов А.П., Шевченко А.С. Влияние порозности на скорость кристаллизации во взвешенном слое. Там же, с. 52-53.

24. Врагов А.П. К расчету порозности монодисперсного слоя частиц при однородном псевдооживлении в цилиндроконическом аппарате. Там же, с. 50-51.

25. Врагов А.П. Гидравлическая классификация и сепарация кристаллов во взвешенном слое в цилиндрических кристаллорастителях / Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии. Тезисы докл. Всесоюз. совещан. Секция 5-6. Сумы, 1986. - С. III-112.

26. Врагов А.П., Лебедева Н.Н. Исследование плотности, вязкости и предельных пересыщений растворов нитрата натрия. Известия ВУЗов "Химия и хим. технология", т. 29, № 6. Иваново, 1986. - С.114-116.

27. Врагов А.П. Повышение эффективности работы классифицирующих кристаллизаторов / Новые процессы и аппараты химической технологии. Расширенные тезисы докладов Всесоюзной конферен. "Современные проблемы хим. технологии". Т. I. Красноярск, 1986. - С.292-294.

28. Врагов А.П. Расчет параметров взвешенного слоя кристаллов в цилиндрических кристаллорастителях классифицирующих кристаллизаторов. / Процессы в дисперсных средах. Межвузовский сборник научных трудов. Иваново, ИХТИ, 1986. - С. 62-65.

29. Врагов А.П., Шевченко А.С. Гидродинамика расширения полидисперсного взвешенного слоя в восходящем потоке жидкости. Депонированная рукопись. УкрНИИТИ № 366 - Ук 87. 20 с.

30. Врагов А.П. К расчету скорости восходящего потока раствора во взвешенном слое кристаллов. Журнал прикл. химии. Т. 60, № 9. Л.: Наука, 1987. - С. 2007-2013.

31. Врагов А.П. Расчет режимов гидравлической классификации и сепарации кристаллов во взвешенном слое в цилиндрических аппаратах. Журнал прикл. химии. Т. 60, № 9. Л.: Наука, 1987. - С.2013-2019.

32. Врагов А.П., Шевченко А.С. О влиянии гидродинамических факторов на скорость роста кристаллов в монодисперсном взвешенном слое. Депонированная рукопись. УкрНИИТИ, № 3344 Ук - 87. 10 с.

33. Врагов А.П. К расчету оптимальных параметров процесса массообмена при кристаллизации солей из растворов. Журнал прикл. химии. Т. 61, № 4. Л.:Наука, 1988. - С. 794-799.

34. Врагов А.П. Проектирование и расчет кристаллизационных установок с классифицирующими кристаллизаторами. УМК ВО, Киев, 1988. 84с.

35. Врагов А.П. Расчет оптимальных параметров процесса кристаллизации солей из растворов во взвешенном слое и разработка прогрессивных конструкций классифицирующих кристаллизаторов / Современные машины и аппараты химических производств "Химтехника - 88", секция 3. Чимкент, 1988, с. 199-204.

36. А.С. № 1389802 СССР, МКИ³ В 01D, 9/02. Классифицирующий кристаллизатор / Врагов А.П., Шевченко А.С., опубл. БИ № 15, 1988.

37. А.С. № 1433951 СССР, МКИ³ С/О 5/В 7/00. Способ получения кормового диаммонийфосфата / Врагов А.П., Кичигин Д.Ф., Лабазик В.С., Курбатов А.Н. Заявл. 28.04.1986г., опубл. БИ № 40, 1988.

38. Врагов А.П. Расчет параметров взвешенного слоя дисперсной фазы, псевдооживенной в цилиндрикоконическом аппарате. Журнал прикл. химии. Т. 62, № 3. Л.: Наука, 1989, с. 563-569.

39. Врагов А.П. Расчет параметров процесса кристаллизации и объема взвешенного слоя кристаллов в классифицирующем кристаллизаторе. Журнал прикл. химии. Т. 62, № 6. Л.: Наука, 1989. С. 1284-1290.

40. Врагов А.П. Алгоритм и программа расчета на ЭВМ цилиндрического классифицирующего кристаллизатора. / Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии. Тезисы докладов Всесоюзного совещания. Секция I. Сумы, 1989, с. 121-122.

41. Врагов А.П. К оценке условий сепарации и осаждения кристаллов в классифицирующем кристаллизаторе. Там же, с. 113

42. Врагов А.П. Механизм и условия сепарации кристаллов в гидровзвешенном слое. / Процессы в зернистых средах. Межвузовский сборн. научных трудов. Иваново, ИХТИ, 1989, с. 125-132.

43. Врагов А.П. Номографический метод расчета параметров взвешенного слоя кристаллов в классифицирующем кристаллизаторе. Химическая промышленность, № 5, 1990, с. 304-306.

44. Врагов А.П. Расчет и оптимизация параметров процесса кристаллизации и размеров цилиндрического классифицирующего кристаллизатора // Тезисы докладов 4-ой Всесоюзной конференции по массовой кристаллизации и кристаллизационным методам разделения смесей. Иваново, ИХТИ, 1990, с. 99.

45. Врагов А.П. Распределение параметров гидровзвешенного слоя по высоте классифицирующего кристаллизатора. Там же, с. 123.

46. Врагов А.П. Динамика роста кристаллов при кристаллизации в гидровзвешенном классифицированном слое. / Гетерогенные процессы химической технологии. Кинетика, динамика, явления переноса. Межвузов. сборник научных трудов. Иваново, ИХТИ, 1990. С. 120-126.

47. Врагов А.П. Анализ распределения параметров взвешенного слоя кристаллов по высоте классифицирующего кристаллизатора. Журнал прикладной химии. Т. 64, № 7, 1991. С. 1408-1414.

48. Врагов А.П., Михайловский Я.Э. Расчет цилиндрикоконического кристаллорастворителя классифицирующего кристаллизатора. с использованием ЭВМ // Химическое машиностроение: расчет, конструирование, технология. Киев, УМК ВО, 1992. С. 4-11.

49. Врагов А.П. О расчете коэффициента межфазового массообмена в гидровзвешенном слое дисперсной фазы. Журнал прикладной химии. Т. 65, № 10. Л.: Наука, 1992. - С.2232-2239

Врагов

Для нотаток

Друк. ЗО "Електрон" " " 06.93 р. Заказ №447 г. 100 экз.

466016

AB 27.764