

На правах рукопису

Вакал Сергій Васильович

ГРАНУЛЮВАННЯ АЗОТНИХ ДОБРИВ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ  
РЕЖИМІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТАРІЛЧАСТОГО ГРАНУЛЯТОРА

05.17.08 - процеси і апарати хімічної технології

автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук



Харків - 1993

076 27.700

Робота виконана на кафедрі "Хімічна техніка та промислова екологія" Сумського фізико-технологічного інституту.

Науковий керівник: доктор технічних наук,  
професор Стрельцов Володимир  
Васильович

Провідна установа: Северодонецький державний інженерно-дослідницький і проектний інститут  
хімічних технологій "Хімтехнологія"

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Пономаренко Віктор Германович,  
кандидат технічних наук,  
доцент Сіренко Віктор Федорович

Захист відбудеться "24" 06 1993 г. о 13 год.  
на засіданні спеціалізованої вченої ради К 068.39.03 в Харківському політехнічному інституті /310002, м. Харків, МСП, вул. Фрунзе, 21/.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського політехнічного інституту.

Автореферат розісланий "13" 05 1993 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Г.Я.Якименко

ЛНБ України ім. В. Стефаніка  
00814123 (J)

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В зв'язку з загрозливим станом навколишнього середовища та здоров'я людини сільському господарству краще необхідні екологічно безпечні добрива, які дозволяють вирішувати питання підвищення їх агрономічної та економічної ефективності при одночасному зменшенні негативних наслідків їх використання. Одним з варіантів розв'язання цієї проблеми є розробка нової форми азотних добрив у вигляді гранул збільшеного діаметра. Попередні агрохімічні випробування показали ефективність запропонованої форми добрив при збільшенні діаметра гранул до  $12 \times 10^{-3}$  м.

Найбільш доцільним способом одержання достатньо крупних гранул буде їх гранулювання на тарільчастому грануляторі. Ці апарати мають ряд переваг в порівнянні з іншими грануляторами:

1. Забезпечують одержання макрогранул азотних добрив в одному апараті.

2. Дозволяють регулювати процес гранулоутворення та потужність гранулятора, що розширює діапазон застосування таких апаратів.

3. Давать змогу отримати гранульований продукт в широкому діапазоні діаметрів гранул.

Суттєве поліпшення фізико-механічних та споживчих властивостей макрогранул досягається проведенням процесу гранулювання на тарільчастому грануляторі, при температурах на 5-25 градусів нижче температури кристалізації речовини. Проте ці недостатньо вивчені гідродинаміка, тепломасообмін у шарі гранулятора і відсутній надійний метод розрахунку процесу гранулювання та тарільчастого гранулятора.

Дана робота спрямована на дослідження та розробку процесу гранулювання у високотемпературному режимі, а також його апаратне оформлення, і виконувалась згідно науково-технічної програми ВАСННД на 1991-1995 рр., завдання 5.2.

Ціль роботи: Розробка на основі теоретичних та експериментальних досліджень високотемпературного процесу гранулювання, конструкції тарільчастого гранулятора, фізичної та математичної моделей гранулювання на базі одержаних даних методу розрахунку тарільчастого гранулятора.

Наукова р-ина. Розроблена математична модель процесу гранулювання у високотемпературному режимі на тарільчастому грануляторі з урахуванням гранулометричного складу гранул шару, запропо-

вані залежності по визначенню структури шару та траєкторій руху гранул в шарі; експериментально досліджено тепломасообмін гранул та отримані залежності для розрахунку кінетичних характеристик процесу, поставлене та вирішене завдання оптимізації гідродинамічних параметрів шару гранулята, що рухається.

Розроблена методика розрахунку процесу гранулювання у високотемпературному режимі та тарілчастого гранулятора.

Практична цінність. За результатами роботи визначені оптимальні гідродинамічні та масообмінні параметри шару гранулята та тарелі в процесі гранулювання; розроблено метод розрахунку процесу гранулювання у високотемпературному режимі на тарілчастому грануляторі; запропоновано спосіб одержання макрогранул сечовини та конструкції тарілчастого гранулятора, виконаних на рівні винаходів.

Розроблені та передані проектному інституту вихідні дані на проєктування дослідно-промислової установки безаштового одержання аміачної селітри для Орлівського АК "Стирал". Будівництво установки планується закінчити у 1993 році. Отримані дослідні партії макрогранул аміачної селітри та сечовини пройшли 3-5 річні агрохімічні випробування в польових умовах та показали приріст врожаю сільськогосподарських культур до 20 %, зниження доз внесених добрив на 16-30 %, зниження витрат азоту на 10 % та зменшення складу нітратів в продуктах харчування на 20 %, а додатковий прибуток при застосуванні макрогранул сечовини під культуру рис складає більше 90 крб/га в цінах 1988 року.

Автор роботи вносить до захисту:

- фізичну та математичну моделі процесу гранулювання азотних добрив у високотемпературному режимі на тарілчастому грануляторі;
- результати теоретичних та експериментальних досліджень впливу конструкційних та режимних параметрів на процес одержання макрогранул;
- конструкцію та інженерний метод розрахунку тарілчастого гранулятора.

Апробація роботи. Питання, які розглянуто в дисертації, доповідалися на Всесоюзних і республіканських семінарах і нарадах, в тому числі: 7 Республіканській конференції "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств" /м.Дніпропетровськ, 1991 р./, 5 Всесоюзній конференції

"Механіка сыпучих материалів" /м.Одеса, 1991 р./, 4 OGOLNOPOLSKIE SYMPOZJUM. GRANULACJA. STAN TECHNIKI I PERSPEKTYWY. ROZWOJU PROCESOW I APARATURY, (PUKAWY, - 1991р).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 40 праць. Спосіб отримання макрогранул сечовини та конструкції гранулятора захищені трьома авторськими свідоцтвами.

Об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти глав, закінчення та додатків. Викладена на 136 стор. машинописного тексту, який містить 24 малюнки 3 таблиці. Бібліографія містить 142 праці вітчизняних та зарубіжних авторів.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми та викладені основні положення, які виносяться на захист.

У першому розділі на основі виконаного літературного аналізу розглянуті тенденції поліпшення фізико-механічних та споживчих властивостей розроблюваних гранул, а також технологічні схеми їх отримання та основне грануляційне обладнання. На основі аналізу сучасних способів гранулювання та конструкцій грануляторів запропонована методика попереднього вибору методу гранулювання, згідно з якою на першому етапі з деяких фізичних констант  $C_p$ ,  $\mu$ ,  $\lambda$  визначається за критерієм

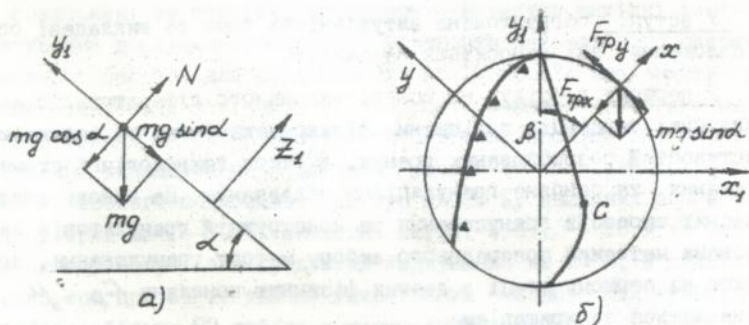
$$\mathcal{L} = \frac{C_p \mu}{\lambda} \quad (1)$$

найбільш доцільний метод гранулювання, враховуючи, що  $\mathcal{L} > 100$  відповідає рідкій формі доєдв;  $\mathcal{L} = 10 + 100$  відповідає приливанню;  $\mathcal{L} = 1 + 10$  - обкатуванню, а  $\mathcal{L} < 1$  - формуутворенню. На другому етапі по розробленій опитувальній блок-схемі уточнюється спосіб гранулювання, а на третьому етапі вибраний спосіб оцінюється з урахуванням термодинамічних характеристик методу гранулювання або фізико-хімічних властивостей гранульованих речовин. З урахуванням виконаного аналізу розроблена також класифікація грануляторів за видом впливу на гранульований матеріал, а введення поняття апаратурно-процесної одиниці /АПО/ стосовно грануляторів дозволило виконати їх структурний аналіз та визначити, що загальними АПО, що потребують вивчення, є об'єкт формування гранул та внутрішні пристрої гранулятора. Обґрунтовані та сформульовані і...

щевикладені цілі та завдання даної роботи.

У другому розділі розглядається механізм гранулоутворення та математична модель процесу грануляції у високотемпературному режимі. Проведення таких аналітичних досліджень пояснюється відсутністю в наш час залежностей, які адекватно описують структуру та гідродинаміку шару гранулята на тарелі.

В даній роботі розвинутий енергетичний підхід до опису динаміки шару, що рухається, в грануляторах обкатування стосовно до тарілкового гранулятора. Враховуючи класифікуючу дію тарелі, гранули в ній рухаються за замкненими траєкторіями, кожна з яких може бути умовно розділена на дві зони. В першій зоні частки рухаються разом з тареллю, а у другій, після досягнення гранулами верхньої критичної точки, ковзають по диску тарелі, яка обертається (мал. I).



Мал. I. Схема до визначення межі розподілу зон: а/положення частин в момент початку руху; б/ фактичний мінімум потенційної енергії шару та положення вільної поверхні шару і межі розподілу зон /▲ - експеримент, — - розрахунок/.

Саме в цій зоні відбувається вирощування гранул при нанесенні на них плаву. Раніше була висловлена гіпотеза про рівність потенційної енергії матеріалу, що знаходиться в шарі, який піднімається, першої зони та матеріалу в зупиненому грануляторі. Розв'язуючи це рівняння, одержимо залежність, що поєднує основні технологічні параметри роботи тарілкового гранулятора і теоретичні показники цієї роботи в оптимальному режимі

$$\cos \beta = \frac{1}{2} \left[ \frac{\omega_T^2}{g} R \frac{1}{\sin \alpha} + \frac{g}{\omega_T^2 R} \left( \sin \alpha - \frac{1}{f_p} \cos^2 \alpha \right) \right] \quad (2)$$

Межа розподілу зон при цьому до центру циркуляції кр.С має вигляд прямої лінії, а нижче - параболи /мал.І/.

Визначення траєкторії руху однієї гранули в другій зоні виконуємо, розглядаючи рух гранули на встановленому під кутом до горизонту диску тарелі, що обертається, як її переміщення в неінерційній системі відліку. У відповідності з принципом найменшої дії для випадку рівномірного обертання з кутовю швидкістю  $\omega_T$  системи координат, що не має поступового прискорення, запишемо та визначимо функцію Лангранжа, яка включає складові частини, що визначають кінетичну та потенційну енергії системи, дію відцентрової та Коріолісової сил. Розв'язуючи це рівняння, одержимо систему лінійних неоднорідних рівнянь 2-го порядку з постійними коефіцієнтами.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= -\frac{\mu c}{\omega_T m} \frac{dx}{dt} + x + 2 \frac{dy}{dt} - \frac{g}{\omega_T^2} \sin \delta \sin \tau \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= -\frac{\mu c}{\omega_T m} \frac{dy}{dt} + y - 2 \frac{dx}{dt} - \frac{g}{\omega_T^2} \sin \delta \cos \tau \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Яка може бути обчислена за допомогою ЕОМ при зведенні цієї системи до системи 4-х диференціальних рівнянь I-го порядку. Аналіз систем на сталість показав, що при виникненні збурюючих зусиль на гранулюючу частку, яка рухається за своєю траєкторією, характер несталості буде мати вигляд логарифмічної спіралі.

Механізм зростання гранули та процеси, які відбуваються в шарі при цьому, опишемо приймаючи такі допущення: 1. Частки мають сферичну форму. 2. Потрапивши на гранулу, краплі плаву утворюють на ній рівномірну плівку. 3. Діюче в плівці джерело тепла є рівномірно розподіленим. При співставлених витратах ретурю та плаву і температурах більш, ніж 100 °С плав на гранулі розтікається тонкою плівкою повністю з наступною кристалізацією, що дозволяє завдання визначення максимальної товщини плаву, що кристалізується, вирішувати за аналогією з завданням кристалізації плаву на зануреному в розплав тілі. Рішення знаходимо шляхом складання теплового балансу для однієї гранули та кристалізуючого на ній шару розплаву.

В загальному випадку на одиницю поверхні гранули подається та рівномірно розтікається плав масою  $dm$

$$dm = dm_p + dm_g \quad (4)$$

Кількість тепла, що відводиться від фронту кристалізації до охолодженої поверхні за елементарний відрізок часу  $d\tau$ , має вигляд

$$dQ_1 = dm_T \cdot L + dm_T c_T (t_n - t_{кр}) + dm_s c_s (t_n - t_{кр}) - dm_s q \quad (5)$$

Ентальпія вихідних гранул змінюється за рахунок тепла, що підводиться зовні при кристалізації та за рахунок тепла додаткового охолодження шару закристалізованого плаву

$$dQ_{\text{вих}} = dQ_1 + dQ_{\text{охол.}} \quad (6)$$

де:  $dQ_{\text{вих}} = dm_T c_T (t_{кр} - t_p) \quad (7)$

$$dQ_{\text{охол.}} = dm_T c_T (t_{кр} - t_{пр}) \quad (8)$$

Приймаючи до уваги гіперболічний вид розподілу температури в кулі та незначний вплив тепла охолодження шару закристалізованого плаву, внаслідок невисокого градієнту температур, характерного для високотемпературного процесу гранулювання, розв'яжемо це рівняння з визначенням максимальної товщини закристалізованого на гранулі плаву

$$\delta_{\text{max}} = z \left[ \sqrt[3]{1 + \frac{c_T \rho_T (t_{кр} - t_p)}{L \rho_T + c_{pp} \rho_p (t_n - t_{кр}) - k q \rho_T}} - 1 \right] \quad (9)$$

а також часу кристалізації

$$\tau = -Z \ln \frac{t_{кр} - t_{пр}}{t_{кр} - t_p} \quad \text{де } Z = \frac{z^3 \rho_T c_T \cdot a \cdot \delta}{3(z + \delta)^2 \lambda} \quad (10)$$

та температури гранул на виході із апарату

$$t_{кр} = t_{кр} - (t_{кр} - t_p) \cdot e^{-\frac{\tau}{Z}} \quad (11)$$

Розглядаючи рух гранули по спіральної траєкторії, застосуємо аналітичний метод розрахунку діаметру часток, маючи на увазі, що за один цикл підйом-скоочування на частці діаметром  $d$  нашаровується та кристалізується шар плаву товщиною  $\delta$ , а супутні процеси при цьому несуттєві. Збільшення діаметру гранули на величину  $\Delta d$  на шляху  $\Delta l$  можна записати через число обертів гранули навколо своєї осі:

$$N_o = \frac{\Delta l}{\pi d} \quad (12)$$

а рух гранули вздовж осі тарелі відносно борту визначиться

$$\Delta l = \frac{f \cdot R \cdot \omega \tau}{V_{oc}} \Delta H \quad (13)$$

де:  $f$  - коефіцієнт, який враховує прослизання шарів гранулята на тарелі.

Підставляючи це рівняння в попереднє та продиференціювавши його, отримуємо:

$$\rho'(d) d [\rho'(d)] = \left( \frac{2R \omega \tau \cdot f}{\pi} \right) \rho'(\delta) d\tau \quad (14)$$

де:  $\rho'(d)$  - масова густина розподілу часток за розмірами;  
 $\rho'(\delta)$  - густина розподілу за розмірами плівок, що напоровують-  
 ся.

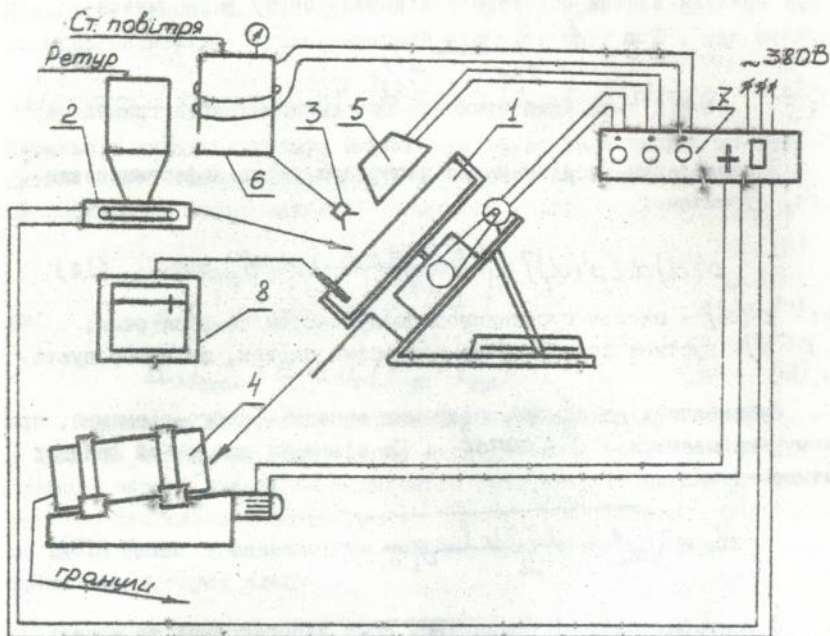
Зупиняючись на одному з окремих випадків цього рівняння, при якому приймається  $\delta = const$ . Це рівняння для  $i$ -ої фракції матиме вигляд

$$d_i = \sqrt{d_{i0}^2 + \frac{4R \omega \tau \cdot f}{\pi} \delta_i \tau} \quad (15)$$

В третьому розділі приведений опис лабораторної та модельної установок та методики проведення експериментів, подані результати досліджень, аналізу, розрахунків та їх обговорення.

Дослідження проводили на плаві сечовини та аміачної селітри з концентрацією плаву 92-99,5 %, з одержанням макрогранул наведених речовин в широкому діапазоні гранулометричного складу /1+15/x 10<sup>-3</sup>м.

Дослідження проводились на установці, схема якої приведена на мал. 2. Установа складається з тарільчастого гранулятора 1, стрічкового дозатора 2, форсунки для подачі плаву 3, класификатора 4, інфрачервоного нагрівача 5, підігрівача 6, блока управління 7 та блока контролю 8. Лабораторний та модельний гранулятори являють собою тарілку діаметром 0,4 та 0,5 м і висотою борту 0,065 та 0,08 м відповідно, яка встановлюється під кутом до горизонту і має регульовану швидкість обертання тарелі. подача та розподілення плаву на таріль здійснювалась в лабораторних умовах підравлічною форсункою, а в виробничих - пневматичною.



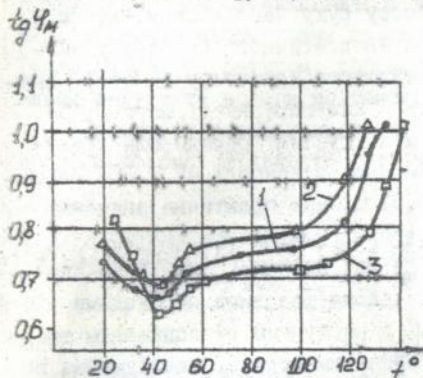
Мал. 2. Принципова схема експериментальної установки

Установку заповнювали ретуром вагов 2-3 кг, а потім послідовно вмикали привід тарелі I, дозатор 2 та подавали на шар матеріалу, що рухається, плав форсунков 3. Температуру шару гранулята підтримували на тарелі співвідношенням витрат ретур/плав або за допомогою інфрачервоного нагрівача 5. Зформовані гранули з гранулятора I поступали на класифікатор 4, де відбувається їх розподіл на фракції. Некондиційна дрібна фракція спрямовувалась в дозатор 2. Частина установок, які мають контакт з плавом та гранулами, виготовлені зі сталі І2ХІВНІОТ.

В першій частині експериментальних досліджень визначились фізико-механічні властивості гранул сечовини та аміачної селітри, одержаних на експериментальній установці з плаву різної концентрації. Проведені мікроскопічні дослідження макрогранул сечовини, одержаних з плавів різної концентрації та іншими способами гранулювання, показали справедливості запропонованої методики вибору

методу гранулювання і обґрунтування застосування тарілчастого гранулятора.

Введення рідкої фази в шар часток, що рухається, та підвищення температури їх зменшує рухливість гранул, змінює кут природного нахилу матеріалу, що впливає на динаміку гранул, які рухаються; цей вплив температури процесу на кут природного нахилу вивчали з різними фракціями сечовини /мал.3/.



Мал.3. Залежність кута природного нахилу від температури: 1-сечовина  $d = 1,23 \times 10^{-3} \text{ м}$ ; 2-сечовина  $d = 1,57 \times 10^{-3}$ ; 3-аміачна селітра  $d = 1,23 \times 10^{-3} \text{ м}$

Мінімум на кривій відповідає аномально низькому значенню кута природного нахилу і дорівнює  $0,3 T_{\text{м}}$ , при якій відбувається рекристалізація цих гранул. Обробка експериментальних даних на ЕОМ дозволила апроксимувати цю криву залежністю

$$\text{tg } \varphi_{\text{м}} = \frac{1}{A + B \cdot t} \quad (16)$$

де: А і В - постійні коефіцієнти, що залежать від матеріалу гранул.

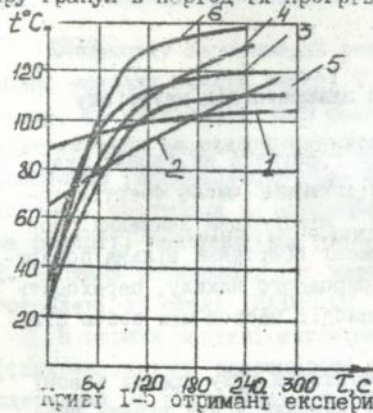
Вивчення гідродинаміки руху шару гранулята на тарелі вказує на зміну маси шару гранул при підвищенні числа обертів тарелі, яка має при  $\omega = 0,2 + 0,42 \text{ с}^{-1}$  мінімальне значення. Пояснюється це тим, що в початковий момент обертання вільна поверхня шару, що характеризується кутом природного нахилу, переходить у стан, де визначальним фактором взаємодії часток між собою стає коефіцієнт внутрішнього тертя.

Експериментальні дослідження траєкторій руху гранул в зоні скоочування по нахиленому диску тарелі вивчалися для різних значень кутової швидкості. Співставлення розрахункових траєкторій

гранул та експериментальних вказує на адекватність математичного опису динаміки руху гранулянта в тарільчастому грануляторі /мал.1/. За методом статистичних гіпотез було виявлено, що розрахунковий критерій Фішера не виходить за межі критичного.

В ході досліджень був виявлений особливий режим руху гранулянта на тарелі, при якому критерій Рейнольдса для гранул, що рухається, дорівнює  $1,5 \cdot 10^5$ . В цьому діапазоні критерію  $R_e$  відбувається аномальне зниження опору руху часток шару, що спричиняє до подолання частиною гранул енергетичного бар'єру у вигляді борту тарелі, а також до нестатеного характеру їх руху. Вказані значення критерію  $R_e$  досягають: для порізності шару  $0,15$ ;  $0,74$ , швидкість гранул  $0,25 \pm 0,9$  м/с, густині середовища гранулянта  $665,6$  кг/м<sup>3</sup>, коефіцієнту динамічної в'язкості  $47,7 \cdot 10^{-6}$  Па·с та діаметру гранул від  $0,001$  до  $0,01$  м, має практичне значення при конструюванні внутрішніх пристроїв гранулятора.

Процеси охолодження та затвердіння пливків розчинів та плавів на поверхні гранул проходять з двома фазовими переходами /випаровування та кристалізація/ з наступним охолодженням твердої фази до температури процесу. Експериментальні дослідження по вивченню тривалості нестационарного режиму прогрівання гранул ретурта показали, що цей час невеликий і при підході гранули в зону розпилення плаву температура її швидко збільшується, а потім стабілізується. Виконані дослідження по вивченню зміни температури шару гранул в період їх прогріву за час  $T$  подані на мал.4.



Мал. 4. Залежність температури шару гранул сечовини від часу та параметрів процесу: 1 -  $t_p - 90^\circ\text{C}$   $\alpha$   $40^\circ$ ; витрата плаву  $0,321$  кг/хв; 2 -  $t_p - 66^\circ\text{C}$ , витрата плаву  $0,568$  кг/хв; 3 -  $t_p - 25^\circ\text{C}$ , витрата плаву  $1,0$  кг/хв; 4 -  $t_p - 24^\circ\text{C}$ , витрата плаву  $0,927$  кг/хв; 5 -  $t_p - 28^\circ\text{C}$ , витрата плаву  $0,94$  кг/хв; 6 - розрахунок.

криві 1-5 отримані експериментально при різних початкових температурах шару, а крива 6 отримана розрахунком із застосуванням рівняння (II), де прийнято, що температура ретурта  $25^\circ\text{C}$ , а

температура шару 125 °С, діаметр гранули  $1.2 \times 10^{-3}$  м.

Експериментальні дані вказують на визначальне значення плаву та температури процесу гранулювання, а не початкової температури шару.

Аналіз теоретичних та експериментальних досліджень вказує на важливість такого параметру для високотемпературних режимів гранулювання як співвідношення витрат ретурну та плаву, порівняно з іншими параметрами процесу, а також зміст вологи в плаві. Тепло, прийняте ретуром, дорівнює теплоті, необхідній для нагрівання ретурну та вологи до температури процесу.

Виконуючи розрахунки на сто кілограмів плаву є рівняння відносно потрібної кількості ретурну матиме вигляд

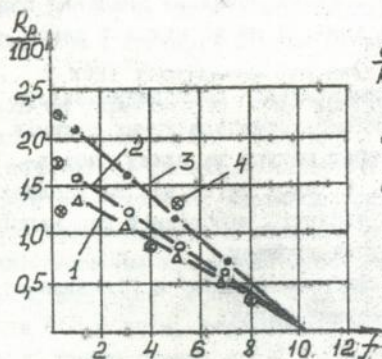
$$R_p = \frac{(100-k)C_p(t_n - t_{kp}) + kC_s(t_n - t_{kp}) + (100-k)L + (1-f)C_r'(t_r - t_p) + fC_s(t_r - t_p)}{1} \quad (17)$$

$$\times \frac{(100-k)C_r'(t_{kp} - t_r) - \frac{k-100f}{1-f}q + (k - \frac{k-100f}{1-f})C_s(t_{kp} + t_r)}{1}$$

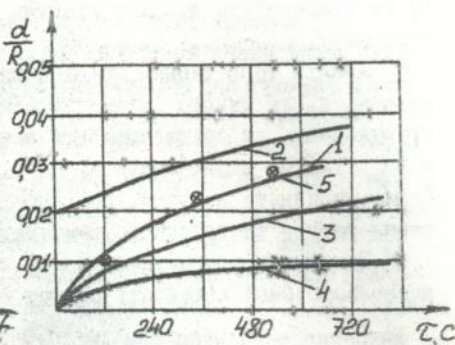
Розрахункові та експериментальні дані ведення процесу в автотермічному режимі подані на мал.5 і відображають достатньо точну їх відповідність. Вид графічних залежностей показує, що ведення процесу гранулювання із застосуванням висококонцентрованого плаву /більш 99 %/ потребує значни витрат ретурну.

Згідно з виконаними дослідженнями товщина плівки  $\delta$  в період зросту гранул при високій температурі шару може бути апроксимована рівнянням виду  $\delta = const$ , в прийнятій аналітичній моделі збільшення діаметра часток проходить безперервно. Але в умовах, що розглядаються, зростання гранул відбувається дискретно біля форсунки. Спостерігається також прослизання шарів гранулята відносно поверхні тарелі. Цим обґрунтовується зведення узагальнюючого коефіцієнту  $f$  в формулі (13), який уреховує всі ці фактори і дорівнює  $1 \times 10^{-3}$ . Результати теоретичних та експериментальних робіт по кінетиці зросту часток ретурну відображено на мал.6 Виходячи з характеру кривих, найбільш суттєво впливає на кінетику зросту шлях, що проходить гранула, який висловлюється через радіус тарелі. Оцінка супутніх процесів /стирання, подрібнювання тощо/ при гранулюванні у високотемпературному режимі дозволяє

зробити висновок про їх незначний вплив на процес гранулювання.



Мал.5. Залежність співвідношень витрати ретуру і плаву сечовини від вологості ретуру: 1 -  $t_p = 0^\circ\text{C}$ ; 2 -  $t_p = -25^\circ\text{C}$ ; 3 -  $t_p = 50^\circ\text{C}$ ; 4 - експеримент.



Мал.6. Криві зросту гранул сечовини: 1 -  $R = 0,25 \text{ м}$ ;  $\omega = 2 \text{ с}^{-1}$ ;  $d = 2 \times 10^{-3} \text{ м}$ ; 2 -  $R = 0,25 \text{ м}$ ;  $\omega = 2 \text{ с}^{-1}$ ;  $d = 5 \times 10^{-3} \text{ м}$ ; 3 -  $R = 1 \text{ м}$ ;  $\omega = 2 \text{ с}^{-1}$ ;  $d = 1 \times 10^{-3} \text{ м}$ ; 4 -  $R = 1,75 \text{ м}$ ;  $\omega = 1,88 \text{ с}^{-1}$ ;  $d = 1 \times 10^{-3} \text{ м}$ ; 5 - експеримент.

У четвертому розділі викладений інженерний метод розрахунку процесу гранулювання азотних добрив у високотемпературному режимі і тарілчастого гранулятора, розроблений на основі математичної моделі та одержаних експериментальних даних.

Для кращого урахування зміни параметрів роботи тарілчастого гранулятора при масштабному переході, використовуємо теорему про зміну кінетичної енергії системи, де за критерій масштабування пропонується приймати величини динамічних навантажень, діючих на гранули. При цьому зміна кінетичної енергії системи дорівнює роботі зовнішніх сил. Оскільки макрогранули мають достатньо великий діаметр, то більш коректно кінетичну енергію їх розглядати як складову з кінетичної енергії поступального руху зі швидкістю центру мас та з кінетичною енергією обертання навкруги центру мас гранули. Таким чином зв'язок значень основних технологічних параметрів для двох грануляторів запишеться

$$\sin \alpha_1 - \text{tg} \varphi_n \cos \alpha_2 - \frac{\omega_1^2 R_1}{g} \frac{7}{20} - \frac{R_2}{R_1} \left[ (\sin \alpha_2 - \text{tg} \varphi_n \cos \alpha_2) - \frac{7}{20} \frac{\omega_2^2 R_2}{g} \right] \quad (18)$$

Перевірка адекватності математичної моделі розробленого процесу одержання макрогранул азотних добрив у високотемпературному режимі здійснена в ході експериментів на модельній установці в це-

хах аміачної селітри та сечовини Іродненського ВО "Азот" та в цеху водотривкої аміачної селітри Іорлівського АК "Стирол".

Виконані ДІАН /м. Москва/ розрахунки очікуваного економічного ефекту для макрогранул сечовини, добрив із полімерним покриттям, та сечовини з інгібітором нітрифікації виявили, що макрогранули при однаковій агрономічній ефективності мають найменші експлуатаційні витрати та розрахункову вартість.

У п'ятому розділі розглядаються вимоги з позицій виробництва і сфери споживання, які зумовили вітчизняні агрохімічні випробування, що проводились протягом 3-5 років в сферній смузі Росії, Білорусі, на Україні, в Краснодарському краю, Середній Азії. За результатами випробувань були виявлені типи ґрунтів, сільськогосподарські культури та найбільш доцільний розмір гранул, що дорівнює  $(8+12) \times 10^{-3}$  м. Паралельно вивчалися агротехніка та агрохімія застосування макрогранул. Агрохімічні випробування показали, що макрогранули підвищують врожай сільгоспкультур на 10-20 % та коефіцієнт використання азоту на 10-15 % і зменшують дози добрив на 16-30 % та вміст нітратів в овочах майже на 20 %.

#### ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Базуючись на системному аналізі, запропонована методика попереднього вибору методу гранулювання, виходячи з властивостей матеріалу сировини та вимог до товарного продукту. Виконаний структурний аналіз сукупності конструктивних рішень грануляторів на основі апаратурно-процесних одиниць.

2. Розроблена математична модель високотемпературного процесу гранулювання на тарілчастому грануляторі. Одержані залежності, які описують динаміку руху гранул по робочій поверхні гранулятора, визначені тепло-фізичні та кінетичні характеристики процесу гранулоутворення.

3. В результаті виконаних експериментальних досліджень гранулювання азотних добрив у високотемпературному режимі на тарілчастому грануляторі визначені структури шару в апараті, динаміка руху гранул, оптимальні співвідношення витрат рекупу та плаву, вивчена залежність зміни кута природного нахилу продукту від його температури та виявлено аномально низьке значення кута при температурі, яка дорівнює  $0,3 T_{пл}$ .

4. Розроблена на рівні винаходів конструкція тарілчастого гранулятора та спосіб одержання макрогранул сечовини.

5. Запропонована методика та алгоритм інженерного методу розрахунку процесу гранулювання азотних добрив на тарілчастому грануляторі.

6. Результати досліджень використані при проектуванні установки безбаштового гранулювання аміачної селітри потужністю 40 тис.т/рік на Горлівському АК "Стирол".

7. Показана економічна ефективність екологічно доцільних азотних добрив збільшеного до  $8-12 / \times 10^{-3} \text{ м}$  гранулометричного складу, що дозволяє вирішувати проблеми, пов'язані з підвищенням врожайності та якості сільгоспродуктів і захисту навколишнього середовища. Прибуток при застосуванні макрогранул сечовини під рис в агрохімічних дослідках становить більше 90 крб/га в цінах 1988 року.

#### ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$C$  - питома теплоємність, Дж/кг.к;

$\mu$  - коефіцієнт динамічної в'язкості, Па.с;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопроводності, Вт/м.к;

$\omega$  - кутова швидкість,  $\text{с}^{-1}$ ;

$R$  - радіус тарелі, м;

$g$  - прискорення вільного падіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$\alpha$  - кут нахилу тарелі до горизонту, град;

$\beta$  - кут відриву гранули від борту тарелі, град;

$f_{\text{тр}}$  - коефіцієнт тертя;

$\tau$  - час, с;

$m$  - маса, кг;

$f$  - вологість  $r$  туру в долях одиниць;

$t$  - температура, к;

$\delta$  - товщина плівки плаву, м;

$L$  - питома теплота кристалізації, кДж/кг;

$q$  - питома теплота пароутворення, кДж/кг;

$\xi$  - радіус гранули, м;

$K$  - эм ст води в плаві, кг/100 кг плава;

$d$  - діаметр гранули, м;

$a$  - коефіцієнт гіперосоли;

$H$  - висота борту, м;

$V$  - швидкість руху центра маси гранул, м/с;

$\varphi$  - кут природного нахилу, град.

$R_e = \frac{V d \rho_c}{\mu_c}$  - критерій Рейнольдса,

Індекси:  $T$  - таріль;  $C$  - середовище;  $\rho$  - тислий ретур;  
 $np$  - процес;  $KP$  - кристалізація;  $п$  - плав;  $B$  - вода;  $max$  - максималне;  $CC$  - вздовж осі тарелі;  $M$  - матеріал.

По темі дисертації опубліковані такі роботи:

1. Андрищенко В.Д., Вакал С.В., Звягинцев Г.Л., Стрельцов В.В. О возможности получения гранул нитрата аммония пролонгированного действия: // Всесоюзное научно-техническое совещание "Пути совершенствования, интенсификация и повышение надежности аппаратов в основной химии": Тез. докл., Часть 3, - Сумы, - 1980, - С.21-22.

2. Звягинцев Г.Л., Стрельцов В.В., Вакал С.В., Плышевский С.В. Некоторые направления совершенствования техники производства минеральных удобрений // 3 Всесоюзная научная конференция "Современные машины и аппараты химических производств", Химтехника-83", Тез. докл., Часть I, - Навои, - 1983, - С.71-73.

3. Кононенко Н.П., Вакал С.В., Звягинцев Г.Л., Стрельцов В.В. Расчет фракционного состава минеральных удобрений, формируемых на тарельчатых грануляторах // Известия высших учебных заведений, "Химия и химическая технология", - 1985, - т.28, - вып. II, - С.119-121.

4. Вакал С.В., Кононенко Н.П., Звягинцев Г.Л., Стрельцов В.В. Конструктивный анализ элементов тарельчатых грануляторов с упорядоченной гидродинамикой потока материалов // Всесоюзная научная конференция "Повышение эффективности, совершенствования процессов и аппаратов химических производств. ЦАХТ-85": Тез. докл., - Часть 7, - Харьков, - 1985, - С.54-55.

5. Кононенко Н.П., Вакал С.В., Хохлов Л.А., Стрельцов В.В. Алгоритм предварительного выбора гранулирующих устройств // Всесоюзное совещание "Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии": Тез. докл., С. д.7, - Сумы, - 1986, - С.227-228.

6. Вакал С.В., Кононенко Н.П., Звягинцев Г.Л., Стрельцов В.В. Расчет технологических параметров тарельчатого гранулятора

при масштабном переходе // Всесоюзное совещание "Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии": Тез.докл. - Секц.7 - Сумы, - 1986, - С.234-235.

7. Кононенко Н.П., Вакал С.В., Холин Б.Г., Стрельцов В.В. Конструктивный и технологический расчет тарельчатого гранулятора // Известия высших учебных заведений, "Химия и химическая технология", - 1986, - т.29, - вы. I, - С.123-126.

8. Карпович Э.А., Кононенко Н.П., Вакал С.В. Гранулирование кормовых фосфатов // Химическая технология - й I, - 1987, - С.70-72.

9. А.с. СССР № 1362494 Тарельчатый гранулятор / Вакал С.В., Кононенко Н.П., Карпович Э.А., Стрельцов В.В., Звягинцев Г.Л./ Б.И. № 48, 1986.

10. Вакал С.В., Кононенко Н.П., Стрельцов В.В. Исследование угла естественного откоса гранул в зависимости от температуры процесса // 7 Республиканская конференция "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств": Тез.докл., Часть I. - Львов, - 1988, - С.27.

11. Карпович Э.А., Холин Б.Г., Кононенко Н.П., Вакал С.В. Получение макрогранул карбамида с покрытием и без покрытия // Химическая технология, - 1988, - № 6, - С.20-22.

12. Стрельцов В.В., Хохлов Л.А., Вакал С.В., Кононенко Н.П. Анализ конструкций грануляторов на основе системно-структурного подхода // Всесоюзная конференция "Современные машины и аппараты химических производств, Химтехн.-88": Тез.докл., Часть 3, - Чимкент, - 1988, - С.125-126.

13. Вакал С.В., Кононенко Н.П., Хохлов Л.А. Анализ структуры двужугого слоя в тарельчатом грануляторе // Всесоюзное совещание "Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии": Тез.докл., - Секц.3, - Сумы, - 1989, - С.3-4.

14. Кононенко Н.П., Вакал С.В., Карпович Э.А., Стрельцов В.В. Определение высоты борта тарельчатого гранулятора // Всесоюзное совещание "Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии": Тез.докл.-Секц.3, - Сумы, - 1989, - С.6-7.

15. Стрельцов В.В., Кононенко Н.П., Вакал С.В., Звягинцев Г.Л. Расшифровка кинетики параллельно идущих процессов при грануляции мелкозернистых материалов // Всесоюзное совещание "Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии": Тез.докл., Секц.3, - Сумы, - 1989, - С.8-9.

16. А.с. СССР № 1517995 Тарельчатый гранулятор / Вирченко В.М., Вакал С.В., Кононенко Н.П. / Б.И. № 40, 1989.

17. Вакал С.В., Кононенко Н.П. Тарельчатый способ получения супергранул карбамида // Инф.листок о передовом производственно-техническом опыте: - Харьков, МТЦНТИ, № 167-90, - 1990.

18. Карпович Э.А., Вакал С.В., Кононенко Н.П. Экологические аспекты разработки удобрений третьего поколения // Тез.докл. Научно-технической конференции преподавателей, сотрудников и студентов: - Сумы, СФТИ, - 1991 - С.104.

19. Хохлов Л.А., Шандыба А.Б., Вакал С.В., Кононенко Н.П. Динамика окатывания гранул на тарельчатом грануляторе // 5 Всесоюзная научная конференция "Механика сыпучих материалов": Тез. докл., - Одесса, - 1991, - С.226.

20. Холин В.Г., Шандыба А.Б., Вакал С.В., Кононенко Н.П. О связи между технологическими характеристиками тарельчатых грануляторов // 5 Всесоюзная научная конференция "Механика сыпучих материалов": Тез. докл., - Одесса, - 1991, - С.227.

21. Карпович Э.А., Вакал С.В., Кононенко Н.П. Моделирование процесса теплообмена в аппаратах окатывания // 7 Республиканская конференция "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств": Тез. докл., - Днепропетровск, - 1991, - С.175-176.

22. CHOLIN B.G., KARPOVIC' E.A., CHOCHLOV L.A., VAKAL S.V., KONONENKO N.P. OTRZYMYWANIE I ZASTOSOWANIE NOWYCH FORM GRANULOWANYCH NAWOZOW MINERALNYCH // IV OGOLNOPOLSKIE SYMPOZJUM „GRANULACJA. STAN TECHNIKI I PERSPEKTYWY ROZWOJU PROCESOW I APARATURY, „CIJAWY' 91, -p. 10A/1 - 10A/13.

23. А.с. СССР № 1728232 Способ получения гранулированного карбамида / Холин В.Г., Карпович Э.А., Хохлов Л.А., Вакал С.В., Кононенко Н.П., Олевский В.М., Иванов М.Е., Линдин В.М., Короткий И.П., Путьато А.В., Капцинель Д.М., Казанцев О.Ф. / Б.И. № 15, 1992.

Ab 27.409

**Ab 27.409**