

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ГАЙДАЙ СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 628.5:66.002.8

**ГІДРОДИНАМІКА У ГРАНУЛЯТОРАХ ІЗ ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ
ПРИ ОДЕРЖАННІ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ**

05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Корнієнко Ярослав Микитович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри машин та апаратів
хімічних і нафтопереробних виробництв

Офіційні опоненти

доктор технічних наук, професор
Нагурський Олег Антонович,
Національний університет "Львівська політехніка"
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри цивільної безпеки

доктор технічних наук, професор
Петрова Жанна Олександрівна,
Інститут технічної теплофізики
Національної академії наук України,
головний науковий співробітник відділу
нестационарного тепломасопереносу
в процесах сушіння

Захист відбудеться «27» грудня 2018 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги 37, корп. 19, ауд. 201/1.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги 37.

Автореферат розісланий «26» листопада 2018 року

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05



О.І. Іваненко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На території України зосереджено до 15 % світових запасів родючих ґрунтів, проте порушення науково обґрунтованих норм землекористування призводить до їх виснаження. Отже, створення органо-мінеральних добрив нового покоління, які б містили мінеральні поживні речовини, органічні та стимулюючі домішки у співвідношеннях, які визначаються агроекологічними умовами регіону їх застосування, сприятиме впровадженню принципів раціонального землекористування.

В КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблено спосіб та технологію одержання гранульованих органо-мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі із застосуванням барботажного гідродинамічного режиму. Процес супроводжувався утворенням застійних зон у камері гранулятора та на робочих поверхнях газорозподільного пристрою (ГРП), що суттєво зменшувало продуктивність апарату по видаленню вологи, стійкість кінетики процесу та надійність роботи апарату.

Таким чином, встановлення закономірностей взаємодії газового теплоносія із зернистим матеріалом при неоднорідному струменево-пульсаційному псевдозрідженні у автоколивальному режимі, який забезпечує інтенсивне перемішування зернистого матеріалу в об'ємі шару, зменшує ризик утворення застійних зон на робочих поверхнях ГРП з одночасним підвищенням ефективності процесу масообміну підтверджує актуальність теми дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано на кафедрі машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до наукових планів фундаментальних і прикладних досліджень Міністерства освіти і науки України у межах держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розробка високоефективного процесу та технологічних засад одержання екологічно чистих азотно-кальцієво-гуміново-сірковмісних добрив» (№ ДР 0112U001580); «Розроблення енергоефективного процесу одержання гуміново-органомінеральних добрив» (№ ДР 0115U004609); «Неоднорідне псевдозрідження в дисперсних системах» (№ ДР 0118U003568).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу гранулювання органо-мінеральних добрив шляхом застосування неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі та розрахунку промислового апарата. Для досягнення поставленої мети сформульовані такі задачі дослідження:

- сформулювати фізичну модель процесу одержання органо-мінеральних добрив із пошаровим механізмом гранулювання при зневодненні рідких систем у псевдозрідженому шарі та обґрунтувати спосіб взаємодії теплоносія із твердими частинками при неоднорідному псевдозрідженні в автоколивальному режимі;
- обрати математичну модель міжфазової взаємодії зернистого матеріалу та газу при неоднорідному псевдозрідженні;
- розробити методику проведення експериментальних досліджень гідродинамічних режимів псевдозрідження та сформулювати вимоги до конструкції

камери гранулятора та ГРП для реалізації неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі;

- створити експериментальну установку для експериментального визначення конструктивних особливостей ГРП та камери гранулятора, які забезпечують реалізацію неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у стійкому автоколивальному режимі без утворення застійних зон на робочих поверхнях ГРП;

- обґрунтувати методику дослідження кінетики процесу грануляції та експериментально перевірити вплив струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі на ефективність процесу одержання органо-мінеральних добрив із пошаровою структурою;

- сформулювати конструктивно-технологічні принципи створення камери промислового гранулятора для реалізації автоколивального режиму псевдозрідження при гранулюванні рідких систем та розробити методику розрахунку гранулятора блочно-модульного типу.

Об'єкт дослідження – процес гранулювання багатшарових органо-мінеральних твердих композитів із заданими властивостями.

Предмет дослідження – гідродинамічні режими неоднорідного псевдозрідження та кінетика процесу гранулювання.

Методи дослідження. Системні теоретико-експериментальні дослідження, фізичне та математичне моделювання процесів, фізико-хімічні аналізи, оцінка кількісних та якісних параметрів процесів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- науково обґрунтовано принципи взаємодії суцільної газової фази з зернистим матеріалом при струменево-пульсаційному псевдозрідженні в автоколивальному режимі, що супроводжується активним об'ємним перемішуванням матеріалу шляхом переміщення в надшаровий простір більше 40 % від маси початкового шару без застосування зовнішніх механізмів;

- вперше встановлено закономірності переходу струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальний режим при відношенні висоти пробою газового факела z_{ϕ} до висоти шару $z_{\phi}/H_0 = 0,33$ із частотою пульсацій $f < 2$ Гц;

- вперше експериментально визначено динаміку зміни локальних порозностей шару в окремих зонах камери гранулятора та частоту пульсацій при автоколивальному режимі для зернистого матеріалу із $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм;

- експериментально доведено, що запропоновані критерії оцінки якості гідродинаміки в автоколивальному режимі ($i_{я} \rightarrow 1,0$) дозволять обрати параметри при яких практично усувається ризик утворення застійних зон на робочих поверхнях ГРП, що дозволить запобігти оплавленню матеріалу при використанні теплоносія із температурою, що значно перевищує температуру плавлення окремих компонентів при грануляції рідких систем;

- експериментально підтверджено, що застосування струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі забезпечило збільшення інтенсивності видалення вологи при гранулюванні робочих рідких систем, щонайменше, в 1,5 рази у порівнянні з барботажним режимом при

коефіцієнті грануляції $\psi \geq 90$ % та одержанням гранульованого продукту із заданими властивостями.

Практичне значення одержаних результатів. У роботі експериментально одержано залежності для розрахунку циклічної зміни порозності шару в камері гранулятора при зміні еквівалентного діаметру твердих частинок у діапазоні $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм та числа псевдозрідження K_w .

Розроблено нову методику реалізації струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі у промисловому апараті. Визначено конструктивно-технологічні параметри камери гранулятора, що дозволяють реалізувати струменево-пульсаційне неоднорідне псевдозрідження в автоколивальному режимі та умови масштабування для промислового апарату. Розроблено конструкцію промислового модульного апарату продуктивністю 500кг/год по гранульованому продукту з використанням розробленого способу реалізації струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі.

Результати роботи впроваджено на ПП «АгроЗАР» та в навчальному процесі кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Всі застосовані технічні рішення захищені 10 патентами України на корисну модель.

Особистий внесок здобувача полягає у тому, що автором самостійно проведено аналіз джерел літератури щодо процесів зневоднення та грануляції рідких гетерогенних систем у псевдозрідженому шарі, а також гідродинамічних умов реалізації процесу за наявності фазових переходів у системі "тверде тіло-газ-рідина" [1-3, 12, 16] та сформульовано науково-технічні задачі; обрано математичну модель та методи її розв'язання [5, 6, 29], проведено аналіз результатів математичного моделювання та визначено раціональні режими проведення процесу гранулювання [4, 7, 8, 20-26, 30]; обґрунтовано критерії оцінки якості гідродинамічного режиму псевдозрідження [27, 28, 31]; автором самостійно розроблено сучасну методику проведення експериментальних досліджень із застосуванням комп'ютеризованих систем вимірювання, проведено експериментальні дослідження [5, 6, 9, 20-27]; визначено конструктивні параметри камери гранулятора [10, 11, 13, 14, 17, 18], спорядженої оригінальною конструкцією ГРП [9, 15, 19] та направляючою вставкою [14], яка забезпечує реалізацію струменево-пульсаційного псевдозрідження; оброблено та узагальнено одержані результати; встановлено експериментальні залежності для визначення динаміки зміни порозності шару; розроблено методику оцінки якості неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі [27, 28, 31]; сформульовано основні положення та висновки; розроблено рекомендації щодо практичного застосування результатів експериментальних досліджень та методики розрахунку промислового апарату.

Формулювання фізичної моделі процесу, аналіз та узагальнення результатів досліджень здійснено спільно з науковим керівником д.т.н., проф. Я. М. Корнієнком.

Апробація результатів досліджень. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та отримали схвальні відгуки на VIII, IX, XI та XII міжнародних науково-практичних конференціях студентів, аспірантів і молодих

вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання» (Київ, Україна, 2015, 2016 та 2017); V міжнародній науковій конференції «Інноваційні енерготехнології» (Одеса, Україна, 2015).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 31 друковану працю, з них 3 монографії, 5 статей у наукових фахових виданнях України, з яких 3 індексуються в міжнародних наукометричних базах даних і системах, 10 патентів України на корисну модель, 10 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій, 3 статті у інших виданнях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел літератури та додатків. Загальний обсяг складає 253 сторінки. Обсяг основного тексту становить 159 сторінок, з яких площа 14 сторінок повністю зайнята таблицями і рисунками. Робота містить 4 таблиці і 111 рисунків, список використаних джерел літератури складається із 132 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено зв'язок з науковими програмами, планами, сформульована мета та задачі досліджень, наведені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок автора та апробацію результатів досліджень.

У першому розділі, відповідно до парадигми сталого розвитку, визначено необхідність створення органо-мінеральних добрив, що містять мінеральні та стимулюючі речовини із сировини, що є відходами хімічної та харчової промисловостей. Обґрунтовано вибір техніки псевдозрідження при грануляції рідких гетерогенних систем. Розглянуто проблеми реалізації стійкого якісного активного гідродинамічного режиму в грануляторах із псевдозрідженим шаром та встановлено методи інтенсифікації процесу. Проведено аналіз математичного моделювання гідродинаміки псевдозрідженого шару в системі газ-тверде тіло.

Дослідженням гідродинаміки у апаратах із псевдозрідженим шаром присвячені роботи таких відомих вчених: О. М. Тодеса, І. Ф. Девідсона, Д. Харісона, О. А. Нагурського, В. М. Марчевського, Н. Б. Рашковської, Й. Квіперса, Д. Гелдарта, К. Матура, Л. Н. Овчіннікова та інших. Вагомий внесок у вивчення закономірностей неоднорідного гідродинамічного режиму псевдозрідження при взаємодії газового потоку із твердими частинками внесли Д. Гідаспов, В. Г. Тупоногов.

За результатами огляду джерел літератури сформульовано мету та задачі досліджень.

У другому розділі сформульовано принципи взаємодії газового теплоносія та зернистого матеріалу в апараті з псевдозрідженим шаром, які спрямовано на підвищення ефективності процесу грануляції органо-мінеральних твердих композитів із пошаровою структурою та надійності роботи апарата шляхом реалізації неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі.

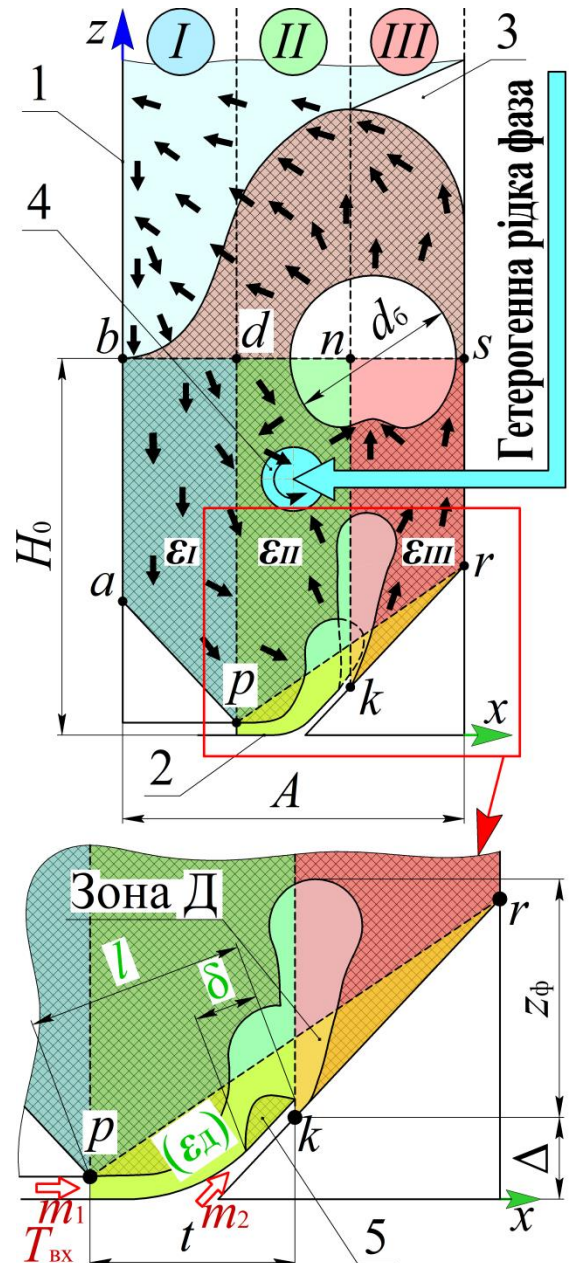
Особливість цього гідродинамічного режиму полягає у тому, що до камери гранулятора, спорядженої газорозподільним пристроєм (ГРП) щілинного типу 2 (у нижній частині), зріджувальний агент вводиться через дві щілини – точки p і k , рисунок 1, у горизонтальному (m_1) та вертикальному (m_2) напрямках відповідно.

Відстань між щілинами t визначається горизонтальною далекобійністю газового струменя $x_{гор}$, а форма робочої поверхні пластини ГРП повинна відповідати його конфігурації. Це обумовлює необхідність розташування другої щілини (точка k) на висоті Δ відносно першої щілини (точка p). У точці k відбувається злиття двох струменів у автоколивальному режимі, що призводить до утворення об'єднаного струменя із висотою пробою z_{ϕ} . Умовні площини, проведені через точки p і k , ділять камеру апарату на три зони однакової ширини $A/3$.

Попередніми дослідженнями встановлено, що висота нерухомого шару $H_0 = 0,32$ м (визначена експериментально при гранулюванні з умов масообміну) втричі більша за висоту пробою газового факела $z_{\phi}/H_0 \leq 0,33$. Тому, на вершині факелу починає циклічно утворюватися газова бульбашка, яка при виході з шару спричинює інерційний пульсаційний викид зернистого матеріалу в надшаровий простір зони II та III. Після контакту із направляючою вставкою 3 тверді частинки переміщуються в зону I, після чого прискорено повертаються до початкового об'єму шару – кінець циклу.

У випадку, коли енергії горизонтального струменя в точці p , рисунок 1, що рухається над робочою поверхнею ГРП буде недостатньою – у зоні Д утворюється застійна зона, яка вкрай негативно впливає на надійність роботи апарату і, відповідно, на кінетику гранулювання. У зв'язку з цим якість гідродинаміки при неоднорідному псевдозрідженні запропоновано визначати значенням порозності в зоні Д – $\epsilon_{Дi} \geq [\epsilon_{Д}] = 0,85$ та довжини малорухомої зони матеріалу на поверхні ГРП $\delta \rightarrow 0$.

Для оцінки гідродинаміки використано метод Тагуті, який дозволяє розрахувати функцію втрати якості гідродинаміки:



- 1 – камера гранулятора;
- 2 – ГРП щілинного типу;
- 3 – направляюча вставка;
- 4 – механічний диспергатор;
- 5 – малорухомі гранули

Рисунок 1 – Модель взаємодії фаз при неоднорідному струменево-пульсаційному псевдозрідженні

$$L_D = K_1 \left([\varepsilon_D] - \varepsilon_{D_i} \right)^2 + K_2 \left(\frac{[\delta] - \delta_i}{l} \right)^2, \quad (1)$$

де K_1 та K_2 – вагові коефіцієнти ($K_1 = 0,3$ та $K_2 = 0,7$); $[\varepsilon_D] = 0,85$ – задане значення порозності шару в зоні Д; $[\delta] = 0,01l$, м; l – довжина хорди пластини ГРП, м.

Враховуючи циклічний автоколивальний характер неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження, запропоновано визначати індекс динамічної якості гідродинаміки як відношення $\tau_{я}$ – часу в циклі протягом якого забезпечується значення функції втрат якості $L_D \leq 0,1$ до загального часу циклу пульсації $\tau_{ц}$: $i_{я} = \tau_{я}/\tau_{ц}$.

Особливість методу полягає в тому, що порозність шару визначалася відносно початкового об'єму шару *absrkrp*, рисунок 2, по зонах. Очевидно, що при швидкості теплоносія в щілинах ГРП, яка забезпечує $i_{я} \rightarrow 1,0$, порозність по зонах буде $\varepsilon_{III(\min)} > \varepsilon_{II(\min)} > \varepsilon_I = \varepsilon_0$, що пов'язано з особливостями формування газових струменів.

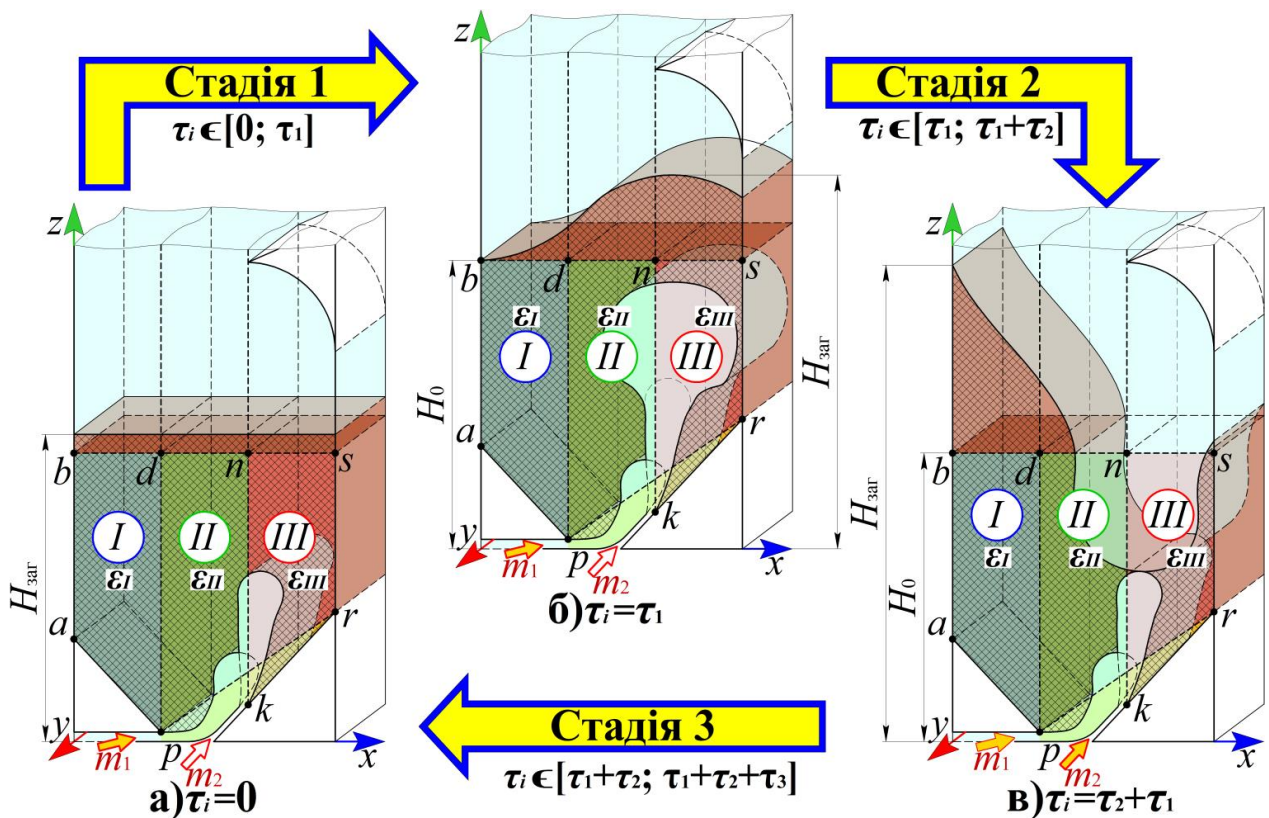


Рисунок 2 – Фізична модель неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі

Так, на першій стадії циклу за час τ_1 на висоті $z_{\phi} + \Delta$ відбувається утворення газової бульбашки, рисунок 2 б, та досягнення її критичного розміру. Друга стадія (τ_2) – пульсаційний викид значної маси зернистого матеріалу із зон III і II в надшаровий простір та його переміщення до зони I, рисунок 2 в, одною або декількома бульбашками, доки залишкова висота зернистого матеріалу в зоні III $H_{зал.(III)} \leq z_{\phi} + \Delta$. Далі відбувається інтенсивне переміщення шару зернистого матеріалу із надшарового простору зони I в утворенні пустоти у зонах II та III і система

повертається до початкового стану рівноваги, рисунок 2 а, при протитечійному русі твердої та газової фаз (стадія 3) – (τ_3). Тобто, тривалість одного циклу пульсацій складає, с: $\tau_{\text{ц}} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$.

Такий гідродинамічний режим характеризується нелінійною зміною висоти шару до $(1,7...2,0)H_0$ у зоні I та неоднорідністю його порозності (у фіксованому об'ємі *absrkrp*), яка у зоні I залишається постійною $\varepsilon_I = \varepsilon_0 = 0,4$ а в зонах II та III може циклічно змінюватися від $\varepsilon_{II(\text{min})}$ до $\varepsilon_{II(\text{max})} = 1,5\varepsilon_0$ та від $\varepsilon_{III(\text{min})}$ до $\varepsilon_{III(\text{max})} = 2\varepsilon_0$.

Для опису неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі використано підхід, запропонований у роботах В. Г. Тупоногова з використанням рівнянь збереження імпульсу фаз:

$$\rho_T \varepsilon_T \left[\frac{\partial \vec{w}_T}{\partial \tau} + (\vec{w}_T \cdot \nabla) \vec{w}_T \right] + \rho_G \varepsilon_G \left[\frac{\partial \vec{w}_G}{\partial \tau} + (\vec{w}_G \cdot \nabla) \vec{w}_G \right] = -\nabla p - [\rho_T \varepsilon_T + \rho_G \varepsilon_G] \vec{g}, \quad (2)$$

та запропонованим В. Г. Тупоноговим припущенням щодо вираження лівої частини через швидкість переміщення центру мас (Ц.М.) шару $w_{\text{ц.м.}}$ по осі z:

$$H \rho_T (1 - \varepsilon_T) \frac{\partial w_{\text{ц.м.}}}{\partial \tau} = \Delta P_{\text{заг.}} - H \rho_T (1 - \varepsilon_T) g. \quad (3)$$

Із рівняння (4) В. Г. Тупоноговим було отримано рівняння, яке описує нелінійний характер зміни висоти шару у вигляді:

$$\frac{d^2 H}{d\tau_i^2} = \frac{\Delta P_{\text{заг.}}}{\rho_T (1 - \varepsilon_T) H} - g. \quad (4)$$

Але загальний перепад тиску $\Delta P_{\text{заг.}}$ з урахуванням фізичної моделі частково розраховувався за методом Д. Гідаспова:

$$\Delta P_{\text{заг.}} = \Delta P_{\text{імпульсу}} + \sum \Delta P_{\text{тертя}} + \Delta P_{\text{гідрост.}} \quad (5)$$

де $\Delta P_{\text{гідрост}}$ – гідростатична складова, яка на відміну від методики Д. Гідаспова, визначається з урахуванням залишкової маси матеріалу у фіксованому об'ємі гранулятора, кг:

$$\Delta P_{\text{гідрост}} = M_{\text{зал}} g / F_a = (M_0 - \Delta M) g / F_a. \quad (6)$$

де M_0 – загальна маса шару; ΔM – маса матеріалу, винесеного за межі початкового шару висотою $H_0 = 0,32$ м, F_a – площа поперечного перерізу камери гранулятора, м².

Втрати тиску пов'язані з наданням імпульсу $\Delta P_{\text{імпульсу}}$, подоланням сил тертя $\sum \Delta P_{\text{тертя}}$ визначаються відповідно до методики Д. Гідаспова за рівняннями:

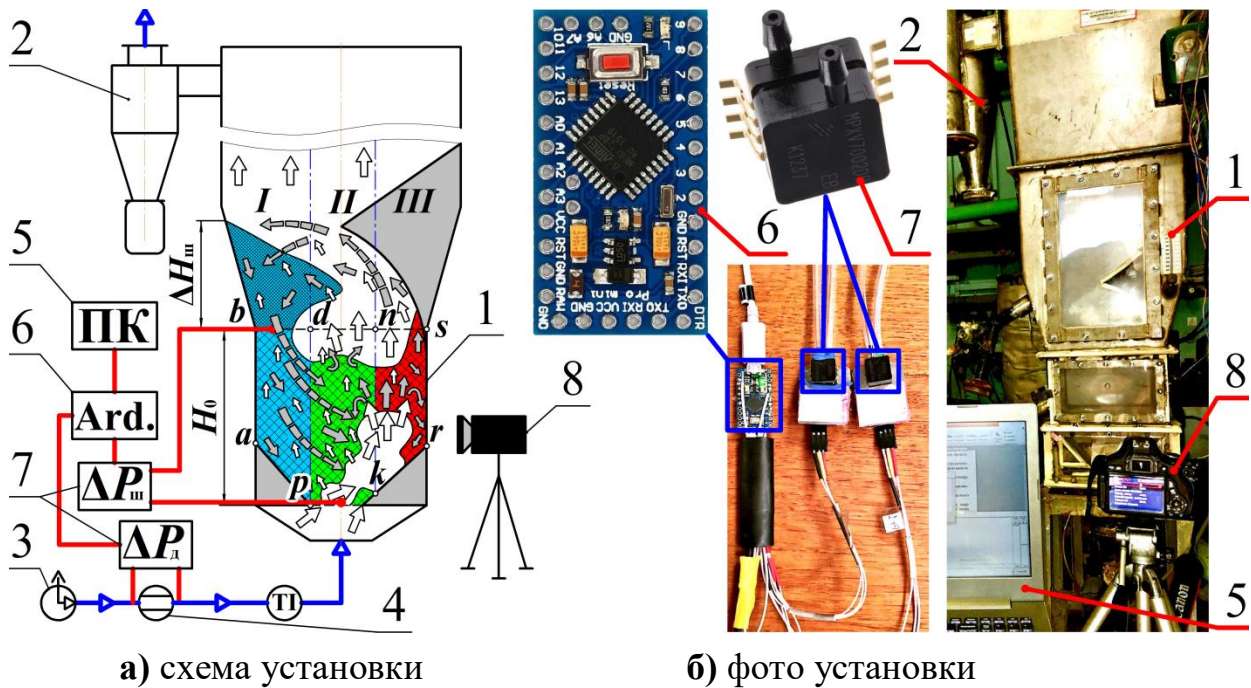
$$\Delta P_{\text{імпульсу}} = \frac{1}{2} [\rho_{\text{T}} \varepsilon_{\text{T}} w_{\text{T}}^2 + \rho_{\text{Г}} \varepsilon_{\text{Г}} w_{\text{Г}}^2]; \quad (7)$$

$$\sum \Delta P_{\text{тертя}} = \Delta P_{\text{т.г.}} + \Delta P_{\text{т.т.}} \quad (8)$$

Для розрахунку складових рівнянь (5-8) необхідно експериментально визначити динаміку зміни порозності шару загальної порозності шару $\varepsilon_{\text{Г}}$ та у кожній із зон: $\varepsilon_{\text{I}} = f(\tau)$, $\varepsilon_{\text{II}} = f(\tau)$ та $\varepsilon_{\text{III}} = f(\tau)$.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень гідродинаміки псевдозрідженого шару та встановлено закономірності переходу неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в якісний автоколивальний режим.

Дослідження гідродинаміки проводились на експериментальній установці із розмірами камери гранулятора $A \times B \times H = 0,3 \times 0,11 \times 1,5$ м, рисунок 3.



а) схема установки
 б) фото установки
 1 – камера гранулятора; 2 – циклон; 3 – газодувка; 4 – діафрагма; 5 – комп'ютер;
 6 – *Arduino Pro Mini*; 7 – перетворювачі малих тисків; 8 – відеокамера

Рисунок 3 – Установка для дослідження гідродинаміки псевдозрідженого шару

Експериментально визначено конструкцію ГРП із загальним коефіцієнтом живого перерізу $\varphi = 4,9\%$, яка забезпечує виконання положень фізичної моделі.

У якості зернистого матеріалу використовувався сфероподібний гранульований сульфат амонію (С.А.) із домішками органічних компонентів ($1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм), густиною $\rho_{\text{T}} = 1450 \pm 10$ кг/м³. Початкова висота шару визначена з попередніх досліджень: $H_0 = 0,32$ м. Температура зріджувального агента на вході в гранулятор – $T_{\text{вх}} = 20$ °С. Перепад тиску в фіксованому об'ємі шару $absrkrp$, рисунок 3, вимірювався перетворювачами малих тисків (*MPXV7007DP*) і з точністю

$\pm 0,1$ Па та частотою 63 заміри в секунду, під'єднаних до комп'ютера через контроллер *Arduino Pro Mini*.

Визначення умов переходу неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальний режим із забезпеченням заданої динамічної якості гідродинаміки $i_y \rightarrow 1,0$ при $z_{\phi}/H_0 \leq 0,33$ проводилось шляхом аналізу фото-відео фіксацій для шару зернистого матеріалу з еквівалентним діаметром $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм та залежності $\Delta P_{\text{ш}} = f(w_{\Gamma(\text{прив})}; K_w; w_{\text{щ}})$. Наведено криву псевдозрідження для шару із $d_e = 4,0$ мм, рисунок 4, при висоті нерухомого шару $H_0 = 0,32$ м, що відповідає гідростатичному тиску шару, з урахуванням конфігурації камери гранулятора – $\Delta P_{\text{гідрост}(0)} = 2389$ Па.

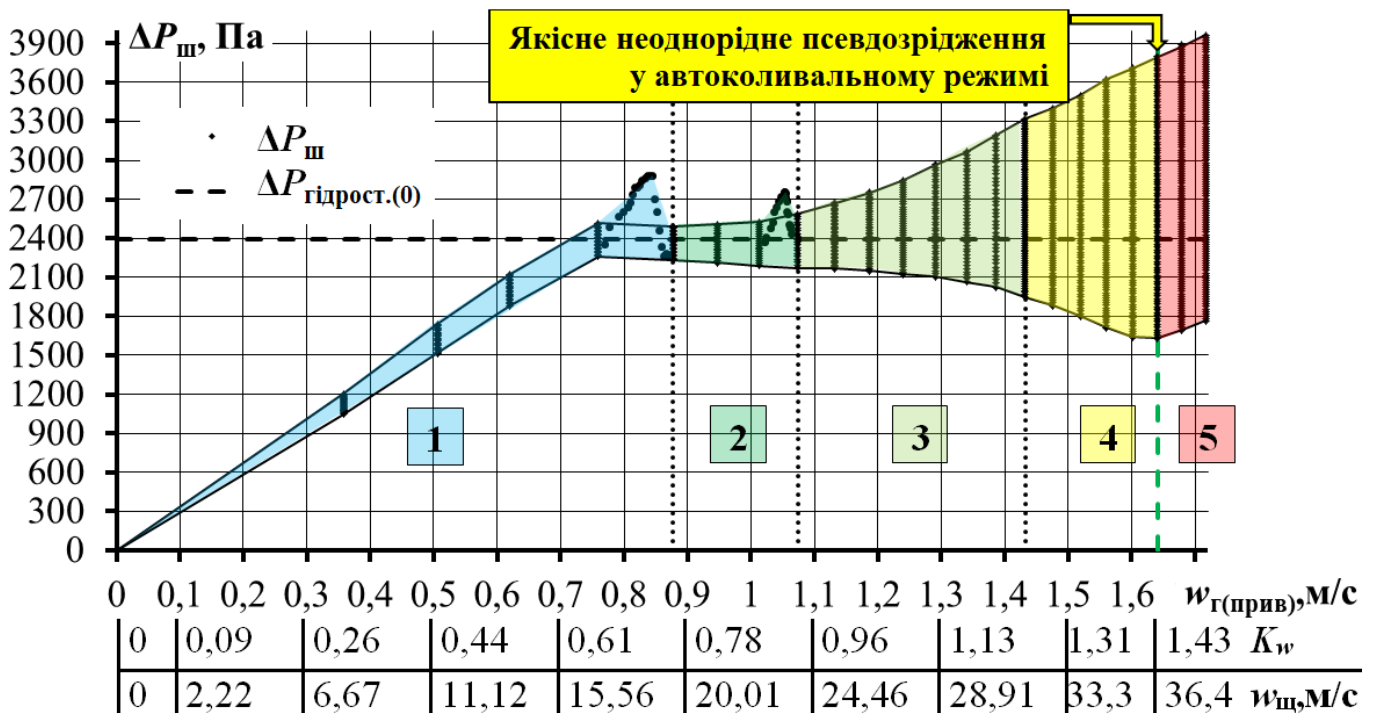


Рисунок 4 – Крива псевдозрідження ($d_e = 4,0$ мм)

За результатами досліджень встановлено, що при запропонованому двоканальному асиметричному введенні зріджувального агента виражені пульсації шару у барботажному режимі починаються при $w_{\Gamma(\text{прив})} = 0,88 \dots 1,08$ м/с ($K_w = 0,76 \dots 0,9$) з індексом динамічної якості гідродинаміки $i_y \rightarrow 0$. При збільшенні $w_{\Gamma(\text{прив})} = 1,08 \dots 1,43$ м/с ($K_w = 0,9 \dots 1,25$) реалізується струменево-пульсаційне псевдозрідження у автоколивальному режимі з $i_y \leq 0,35$ та індексом перемішування $J_{\Delta P} = \Delta P_{\text{амп}} / \Delta P_{\text{гідрост}} = 0,08 \dots 0,36$ – область 3, рисунок 4. При підвищенні $w_{\Gamma(\text{прив})}$ до 1,64 м/с та K_w до 1,43: $i_y \rightarrow 1,0$, а $J_{\Delta P} \rightarrow 0,54$ – область 4, рисунок 4 та 5.

Ці параметри визначають задовільну якість автоколивального режиму псевдозрідження, який забезпечує перенесення до 54 % маси шару та мінімізує ризик утворення малорухомих зон матеріалу на робочих поверхнях ГРП.

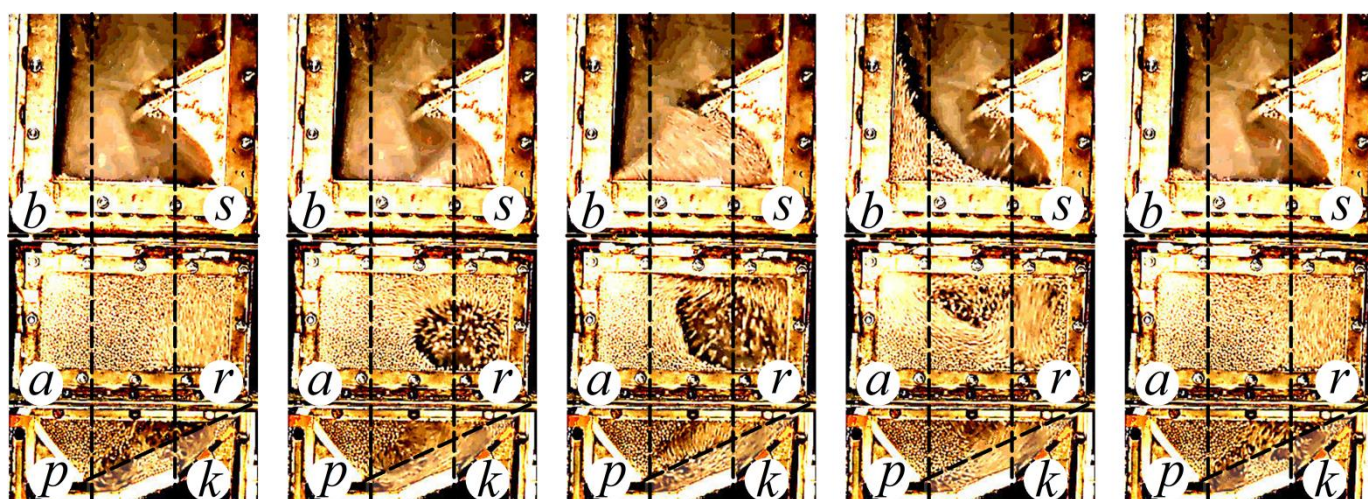
За результатами фото-відео аналізу гідродинаміки струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі для шару зернистого матеріалу із $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм встановлено орієнтовну тривалість кожної зі стадій циклу

пульсацій, с: $\tau_1 = 0,25\tau_{ц}$, $\tau_2 = 0,5\tau_{ц}$ і $\tau_3 = 0,25\tau_{ц}$ та визначено динаміку зміни порозності шару, зокрема для $d_e = 4,0$ мм при $w_{г(прив)} = 1,64$ м/с та $K_w = 1,43$, рисунок 6.

Узагальнення експериментальних досліджень динаміки зміни порозності $\varepsilon_{г} = f(\tau)$ у фіксованому об'ємі зон апарату проведено у вигляді рівняння, яке із коефіцієнтом кореляції $R \geq 0,98$ описує одержані результати:

$$\varepsilon_{г}(\tau_i) = \varepsilon_{г(\min)} + A + A \sin\left(\frac{2\pi}{T}(\tau_i - \tau_{ц}(n-1)) - K_{здв}\right), \quad (9)$$

де $\varepsilon_{г(\min)}$, $\varepsilon_{г(\max)}$ – відповідно мінімальне (при $\tau = 0$) та максимальне (при $\tau = 0,75\tau_{ц}$) значення порозності шару, отримані дослідним шляхом; $A = (\varepsilon_{г(\max)} - \varepsilon_{г(\min)})/2$ – амплітуда коливань; T – період коливань, с: $T = 1,5\tau_{ц}$ – для стадій циклу 1 та 2 ($\tau_i = 0 \dots 0,75\tau_{ц}$); $T = 0,5\tau_{ц}$ – для стадії 3 ($\tau_i = 0,75\tau_{ц} \dots \tau_{ц}$); n – порядковий номер пульсації, одиниць; $K_{здв} = 5\pi/10$ – величина здвигу фази пульсації.



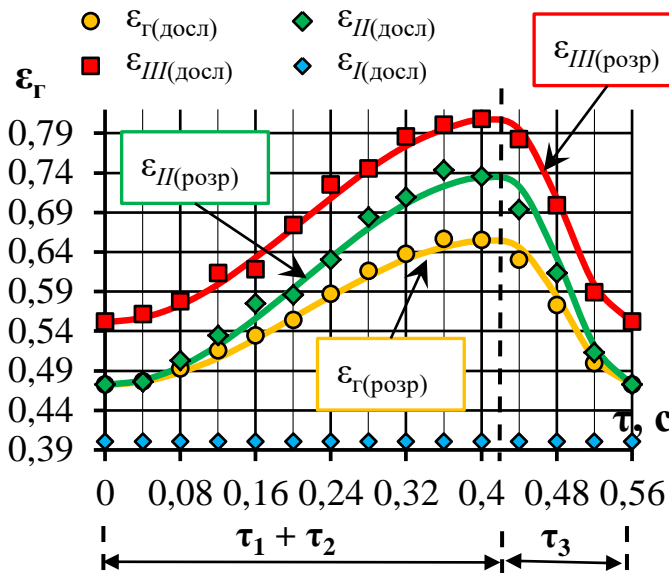
а) $\tau = 0,00$ с б) $\tau = 0,12$ с в) $\tau = 0,20$ с г) $\tau = 0,40$ с д) $\tau = 0,56$ с

Рисунок 5 – Фотофіксації стану шару зернистого матеріалу в камері гранулятора ($d_e = 4,0$ мм; $K_w = 1,43$; $w_{г(прив)} = 1,64$ м/с)

Така неоднорідність локальних порозностей у виділеному об'ємі шару супроводжується пульсаційною зміною загального опору шару $\Delta P_{ш}$, динаміка зміни якого має синусоїдальний характер із частотою $f = 1,79$ Гц при $d_e = 4,0$ мм та $K_w = 1,43$, рисунок 7. Розрахункові значення $\Delta P_{ш} = f(\tau)$ за рівнянням (5) адекватно описують експериментальні дані із коефіцієнтом кореляції $R \geq 0,94$.

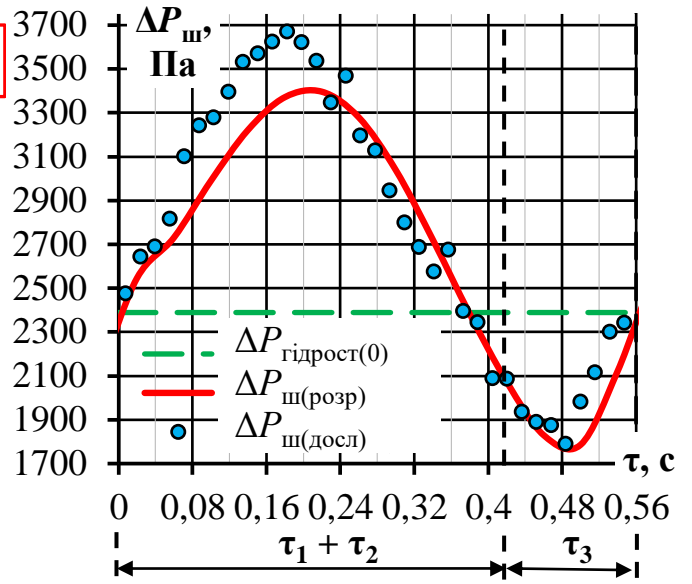
Відповідно, циклічний характер має і динаміка зміни загальної висоти шару, яка в кінці другої стадії досягає $H_{зар} = 2H_0$, рисунок 8. Розрахункові та експериментальні значення $H_{зар}/H_0 = f(\tau)$ мають хорошу збіжність із коефіцієнтом кореляції $R \geq 0,97$.

Дослідним шляхом встановлено, що при $K_w = 1,43$ порозність шару в зоні Д знаходиться в межах $0,79 \leq \varepsilon_{д} \leq 0,92$, рисунок 9, що забезпечує $i_{я} \rightarrow 1,0$ при $L_{д} \leq 0,1$.



$R(\varepsilon_I) = 0,994; R(\varepsilon_{II}) = 0,99; R(\varepsilon_{III}) = 0,995$

Рисунок 6 – Динаміка зміни $\varepsilon_r = f(\tau)$



$R = 0,96$

Рисунок 7 – Динаміка зміни $\Delta P_{ш} = f(\tau)$

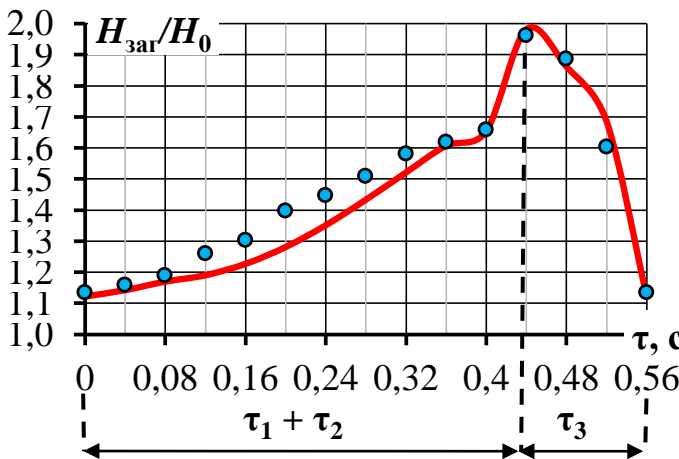


Рисунок 8 – Динаміка зміни $H_{заг}/H_0 = f(\tau): R \geq 0,9866$

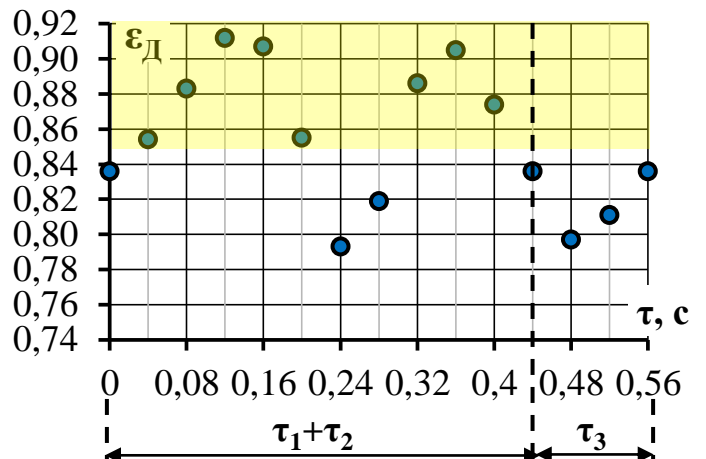


Рисунок 9 – Динаміка зміни $\varepsilon_D = f(\tau)$

Узагальнення результатів експериментальних досліджень гідродинаміки неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозріднення в автоколівальному режимі при застосуванні розробленої конструкції ГРП із коефіцієнтом живого перерізу $\varphi = 4,9\%$ для шару зернистого матеріалу з питомою поверхнею шару зернистого матеріалу $2400 \geq a \geq 900 \text{ м}^2/\text{м}^3$ (відповідно до значень $1,5 \leq d_e \leq 4,0 \text{ мм}$), висотою нерухомого шару $H_0 = 0,32 \text{ м}$ при забезпеченні $0,35 \leq i_{я} \leq 1,0$ та $0,36 \leq J_{\Delta P} \leq 0,54$ проведено у вигляді залежностей числа псевдозріднення $K_w = f(aH_0/\varphi)$, частоти пульсацій $f = f(aH_0/\varphi; K_w)$ та індексу динамічної якості гідродинаміки $i_{я} = f(aH_0/\varphi; K_w)$:

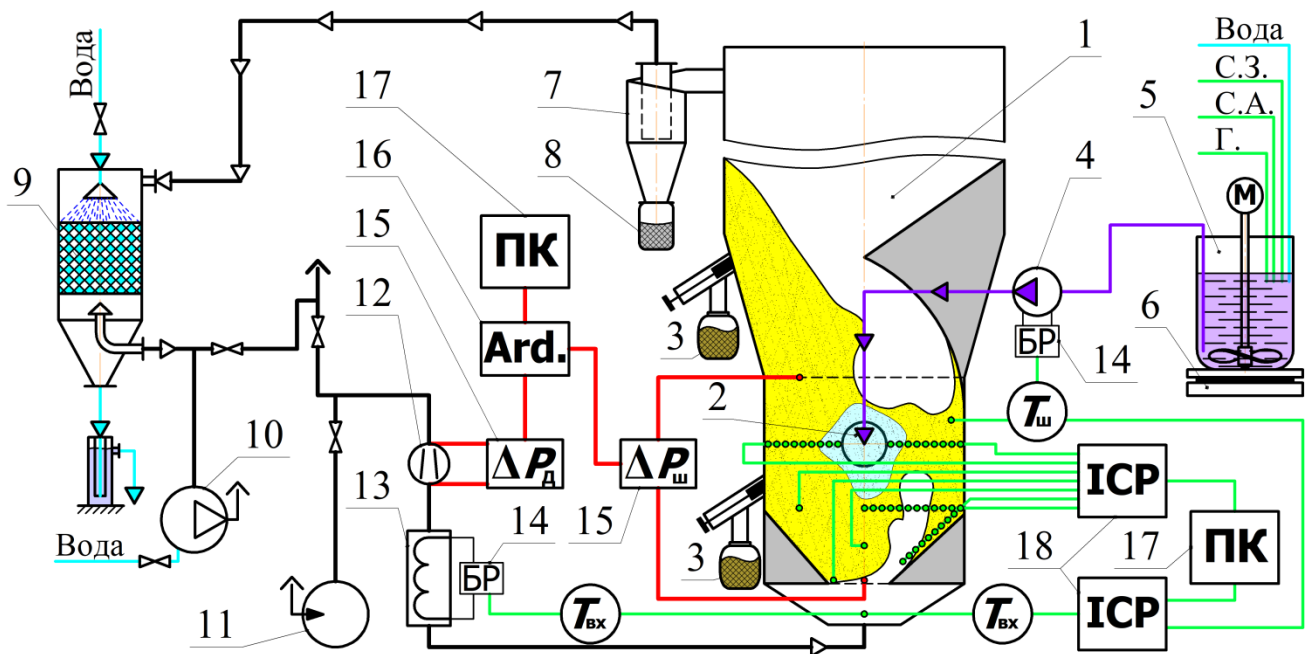
$$K_{w(\min)} = -0,41 \ln\left(\frac{100aH_0}{\varphi}\right) - 0,68; \quad K_{w(\max)} = -0,553 \ln\left(\frac{100aH_0}{\varphi}\right) - 1,174 \quad (10)$$

$$f = 0,4523 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right)^{-0,077} K_w + 1,3106e^{-48,87 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right)} \quad (11)$$

$$i_{\text{я}} = \left(298,16 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right) + 0,9187 \right) K_w - 237,4 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right) + 2,003 \quad (12)$$

Математична модель адекватно описує неоднорідне струменево-пульсаційне псевдозрідження в автоколивальному режимі при заданій якості, що супроводжується нелінійною зміною загальної висоти шару і в комплексі з одержаними експериментальними залежностями може бути використана для розрахунку промислового гранулятора.

У **четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень кінетики процесу гранулювання органо-мінеральних добрив при застосуванні неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі. Досліди проводились на експериментальній установці, рисунок 10, у якій камера гранулятора ($A \times B \times H = 0,3 \times 0,11 \times 1,5$ м) виконана відповідно до поставлених вимог у розділі 2.



- 1 – гранулятор; 2 – диспергатор; 3 – ємності для готового продукту; 4 – насос; 5 – мішалка; 6 – ваги; 7 – циклон; 8 – ємність для пилу; 9 – скруббер; 10 – вакуум-насос; 11 – газодувка; 12 – діафрагма; 13 – калорифер; 14 – блок регулювання; 15 – перетворювачі тисків (MPXV7007DP); 16 – контроллер (Arduino Pro Mini); 17 – комп'ютер; 18 – контроллер температур (ICP-7018)

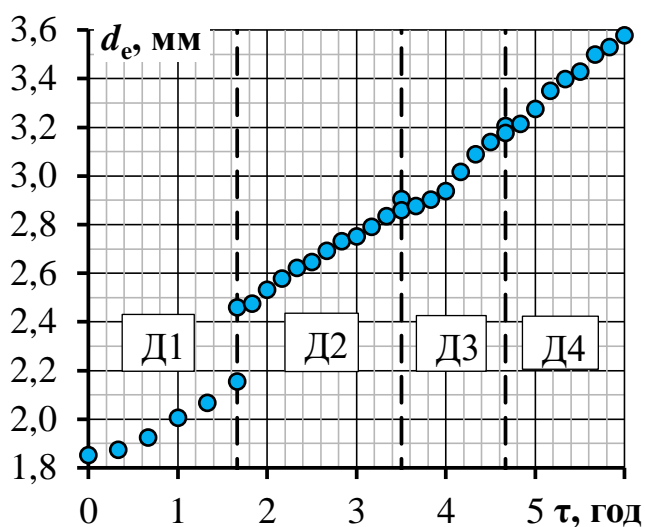
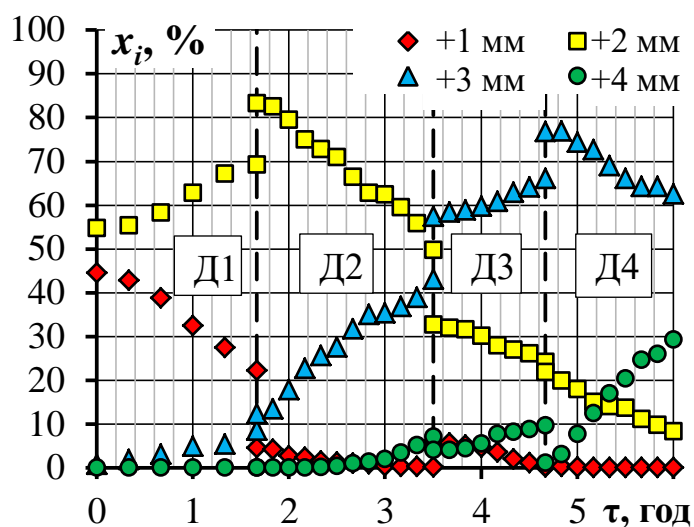
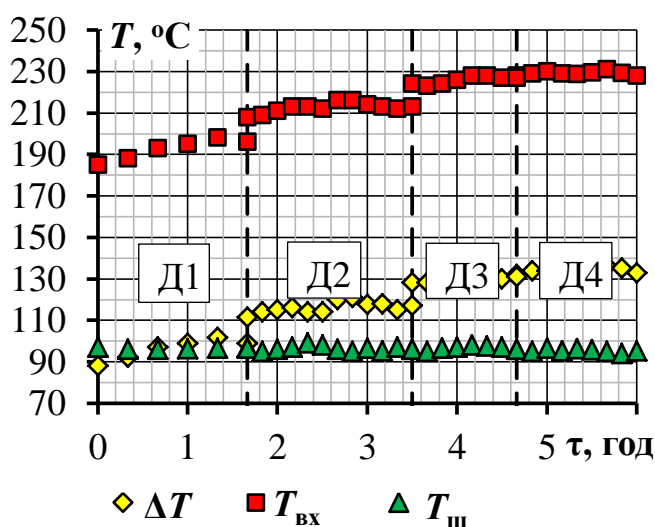
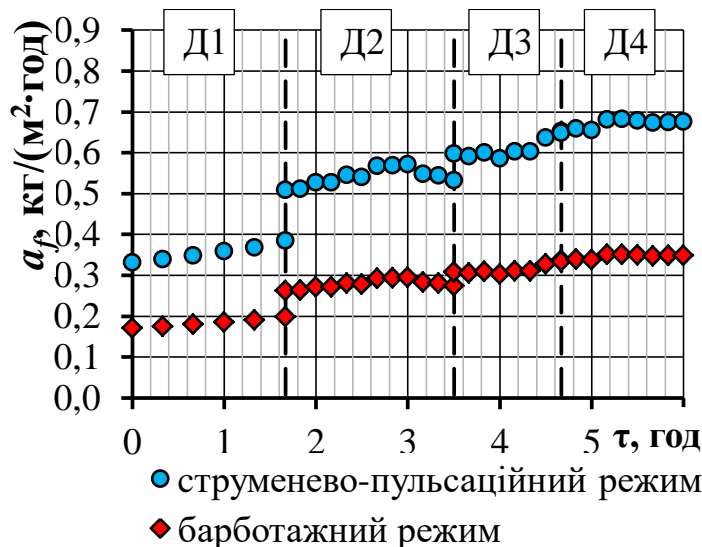
Рисунок 10 – Схема пілотної установки

У якості початкових центрів грануляції використовувалися органо-мінеральні добрива із $d_e = 1,85$ мм. Протягом проведення дослідів початкова висота нерухомого шару підтримувалася постійною шляхом вивантаження гранульованого продукту і становила $H_0 = 0,32$ м, що відповідає масі шару $M_{\text{ш}} = 7,83$ кг та гідростатичному

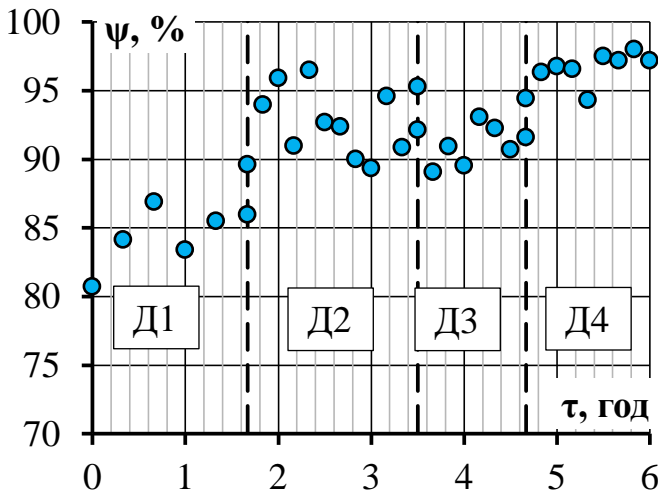
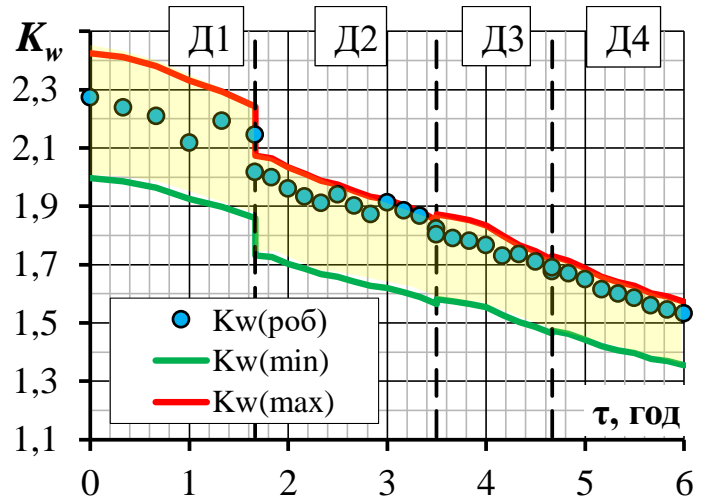
тиску $\Delta P_{\text{гідрост}(0)} = 2389$ Па. Рідка гетерогенна фаза диспергувалася всередину шару за допомогою механічного диспергатора. На замовлення фірми «ЕсоPlant» та ПП «АгроЗар» до її складу входили такі сухі компоненти: соняшникова зола (С.З.) – 52,5 %(мас), сульфат амонію (С.А.) – 43 %(мас), бентоніт (Б.) – 3 %(мас), гумінові речовини (Г.) – 1,5 %(мас). Вміст води у дослідах 1 і 2 становив 60 %(мас), у дослідах 3 та 4 – 50 %(мас).

Стійкість кінетики грануляції підтверджується стійкою динамікою росту еквівалентного діаметра частинок у шарі, рисунок 11, із послідовним переходом гранул від меншої до більшої за розмірами фракції, рисунок 12, що підтверджує пошаровий механізм грануляції без утворення агломератів. Температура шару підтримувалася в заданих межах $T_{\text{ш}} = 95 \pm 2$ °С, рисунок 13.

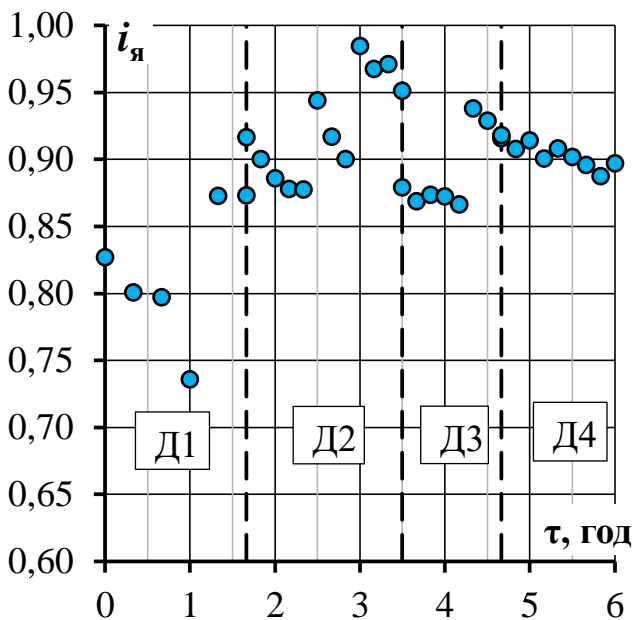
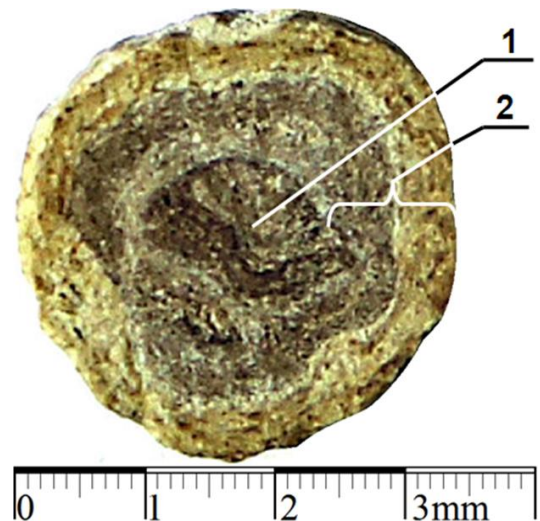
При цьому середнє питоме навантаження шару за вологою a_f в 1,5...1,94 рази перевищують показники при застосуванні барботажного режиму, рисунок 14, із досягненням коефіцієнта грануляції $\psi = 80...98$ %, рисунок 15, що підтверджує стійкість кінетики процесу.

Рисунок 11 – Динаміка зміни $d_e = f(\tau)$ Рисунок 12 – Динаміка зміни $x_i = f(\tau)$ Рисунок 13 – Динаміка зміни $T_i = f(\tau)$ Рисунок 14 – Динаміка зміни $a_f = f(\tau)$

Досліди проводилися при значеннях числа псевдозрідження K_w , рисунок 16, у перерахунку до нормальних умов у діапазоні ($K_{w(max)}$) та $K_{w(min)}$). Встановлено, що навіть при розрахункових значеннях індексу динамічної якості гідродинаміки $0,8 \leq i_a \leq 0,98$, рисунок 17, забезпечується відсутність оплавлення гранул на робочих поверхнях ГРП після проведення ряду дослідів.

Рисунок 15 – Динаміка зміни $\psi = f(\tau)$ Рисунок 16 – Динаміка зміни $K_w = f(\tau)$

Гранульований продукт гуміново-калійно-азотно-кальціє-сірковмісне добриво з мікродомішками магнію та фосфору, рисунок 18, складу $[Г]:[К]:[S]:[N]:[Ca]:[Mg]:[P]=[1,5]:[21,5]:[13,8]:[9,1]:[4,6]:[3,2]:[1,8]$ має сфероподібну форму з пошаровою структурою, завдяки якій досягається рівномірність розподілення компонентів по всьому об'єму гранули з $2,0 \leq d_e \leq 4,0$ мм. Міцність гранул для фракції +2,0...+4,0 мм становить 12...16 Н на гранулу, що в 1,2...1,6 рази перевищує нормативний показник. Світових аналогів таких добрив не знайдено.

Рисунок 17 – Динаміка зміни $i_a = f(\tau)$ 

1 – центр грануляції;
2 – композитні мікросфари
Рисунок 18 – Зріз гранули $d_e = 3,4$ мм

При одержанні органо-мінеральних добрив одночасно проводилося визначення конфігурації температурного поля посередині камери гранулятора ($y = B/2 = 55$ мм) із використанням інформаційно-вимірювального комплексу. Наведено накладання конфігурації температурного поля на фотофіксацію якісної гідродинаміки неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі при $d_e \leq 4,0$ мм, рисунок 19.

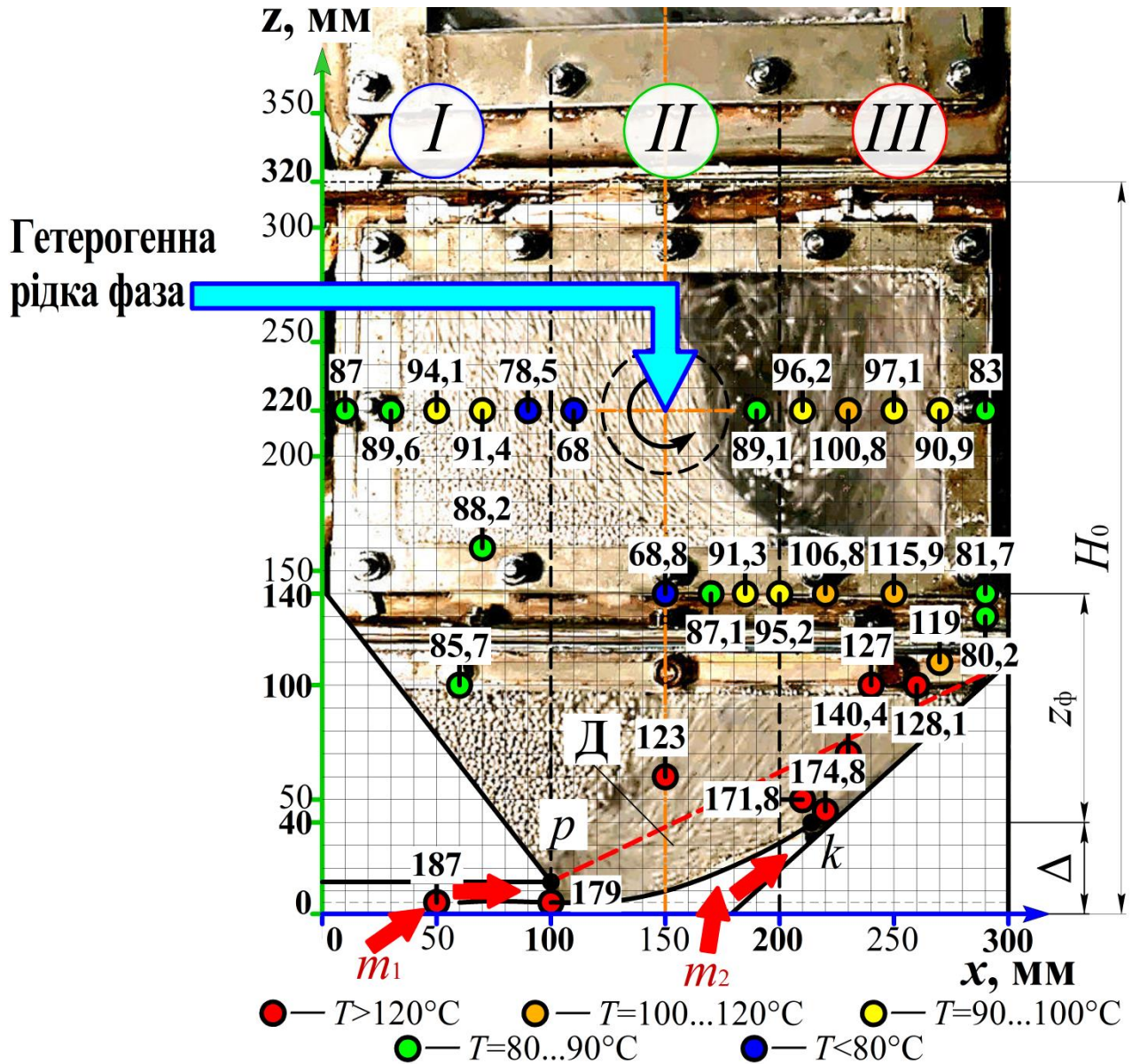


Рисунок 19 – Накладання температурного поля на гідродинаміку неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі на третій стадії циклу при $d_e \leq 4,0$ мм та $H_0 = 320$ мм ($T_{\text{вх}} = 230 \pm 5^\circ\text{C}$)

Регулювання подачі рідкої фази в шар зернистого матеріалу здійснювалося за показами термопари $T_{\text{ш}} = 95 \pm 3^\circ\text{C}$ ($x = 250$ мм; $y = 30$ мм; $z = 250$ мм).

Наведені результати показують наявність високих температур $T = 174 \dots 179^\circ\text{C}$ на робочій поверхні ГРП в зоні Д. У висхідній зоні, де відбувається формування газової бульбашки та пульсаційний викид матеріалу в надшаровий простір –

$T = 80,2...115,9$ °С. Температура шару в цих зонах мало змінюється при неоднорідному струменево-пульсаційному псевдозрідженні у автоколивальному режимі із $i_{я} \rightarrow 1,0$. Вкінці 2-ї стадії гідродинамічного циклу зафіксовано збільшення геометричних розмірів бульбашки, що має більшу миттєву температуру, ніж значення, при якому регулюється $T_i > T_{ш}$. При такому автоколивальному режимі ця конфігурація динамічно змінюється із частотою $f = 1/\tau_{ц} = 1,67$ Гц.

Візуальний огляд робочих поверхонь ГРП підтвердив відсутність будь-яких зон оплавлення матеріалу, що підтверджує доцільність застосування запропонованого способу оцінки якості гідродинаміки.

За результатами проведених експериментальних досліджень процесу зневоднення та грануляції типових комплексних гетерогенних систем встановлено, що застосування струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі дозволяє, щонайменше, в 1,5 рази підвищити ефективність масообмінних процесів при збереженні стійкої кінетики процесу із коефіцієнтом грануляції $\psi \geq 90$ % та одержувати готовий продукт із заданими властивостями при високому рівні надійності роботи апарату.

У п'ятому розділі наведено впровадження результатів експериментальних досліджень у конструктивно-технологічні засади моделювання промислового гранулятора модульного (блочного) типу та визначення геометричних розмірів камери апарату одиничного модуля, в якому реалізується неоднорідне струменево-пульсаційне псевдозрідження у автоколивальному режимі.

Обґрунтовано технологічну схему промислової установки для одержання органо-мінеральних добрив продуктивністю 500 кг/год по гранульованому продукту із заданими властивостями та удосконалено методику і алгоритм розрахунку промислового гранулятора.

Застосування неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі без застосування додаткових механічних пристроїв дозволяє значно підвищити ефективність процесів тепло-масообміну при одержанні твердих композитів шляхом зневоднення рідких гетерогенних систем, які містять компоненти органічного та мінерального походження.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі – підвищення ефективності процесу одержання інноваційних гранульованих органо-мінеральних добрив, необхідних для впровадження принципів раціонального землекористування шляхом застосування неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі.

1. Обґрунтовано спосіб взаємодії газового середовища із зернистим матеріалом в апараті із псевдозрідженим шаром, при якому реалізується неоднорідний струменево-пульсаційний автоколивальний режим із циклічним імпульсним перенесенням у надшаровий простір більше 45 % від маси шару із частотою 1,47...3,3 Гц та її активним поверненням до початкового об'єму у випадку, коли висота пробною газового струменя $z_{ф}$ втричі менша висоти шару матеріалу H_0 .

2. Експериментально визначено конструктивні параметри камери гранулятора, спорядженої оригінальною конструкцією ГРП та направляючою вставкою, яка забезпечує реалізацію струменево-пульсаційного псевдозрідження у різних режимах.

3. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено, що перехід струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальний режим із забезпеченням заданої якості при запропонованому способі введення зріджувального агента, коли відношення висоти пробою газового факела до висоти шару $z_{\phi}/H_0 \leq 0,33$, досягається при значенні приведеної швидкості газу в щілинах ГРП $w_{щ} \geq 30$ м/с за нормальних. Одержано залежності для визначення впливу числа псевдозрідження на частоту пульсацій та індекс динамічної якості гідродинаміки для шару із $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм.

4. Оцінку гідродинаміки в автоколивальному режимі неоднорідного псевдозрідження запропоновано проводити за індексом динамічної якості гідродинаміки $i_{я}$, який дозволяє визначити технологічні параметри, при яких мінімізується ризик утворення застійних зон на робочих поверхнях ГРП. При грануляції це дає змогу застосовувати теплоносії, температура якого значно перевищує температуру плавлення окремих термолабільних компонентів рідкої фази, яка подається на зневоднення до гранулятора.

5. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено, що застосування неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі при зневодненні рідких систем, що містять соняшникову золу, сульфат амонію та гумінові речовини, забезпечує стійку кінетику процесу з коефіцієнтом грануляції $\psi \geq 90$ % та підтверджує інтенсивність видалення вологи, щонайменше, в 1,5 рази більше, ніж при барботажному із одночасним забезпеченням відсутності зон оплавлення на робочих поверхнях ГРП при температурі зріджувального агента на вході $T_{вх} = 230$ °С.

6. Одержане гранульоване органо-мінеральне добриво має сфероподібну форму та пошарову мікроструктуру, завдяки цьому досягається рівномірне розподілення по всьому об'ємі гранули поживних речовин: К (21,5 %), N (9 %), Ca (3,2 %), S (13,8 %) при наявності домішок Mg (3,2 %) та P (1,8 %) із заданою кількістю гумінових речовин Г (1,5 %). Міцність гранул становить 11...16 Н на гранулу, що в 1,1...1,6 рази перевищує діючий норматив. Результати досліджень можуть бути використані для розроблення засад інноваційної технології одержання органо-мінеральних добрив нового покоління з вітчизняної сировини.

7. За результатами досліджень розроблено методику моделювання гідродинаміки неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі для промислового апарату та алгоритм його розрахунку.

8. Результати роботи впроваджені на ПП «АгроЗар» та в навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Корнієнко Я. М. Підвищення ефективності процесу одержання гранульованих гуміново-мінеральних добрив / Я. М. Корнієнко, С. С. Гайдай, О. В. Мартинюк // НТУУ «КПІ». – Київ: НТУУ «КПІ». – 2014. – 349 С. *Особистий внесок здобувача: аналіз джерел літератури щодо гідродинамічних умов реалізації процесу за наявності фазових переходів у системі "тверде тіло-газ-рідина", обґрунтування фізичної моделі процесу та умов її реалізації, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів.*
2. Корнієнко Я. М. Процес зневоднення композитних рідких систем в псевдозрідженому шарі із застосуванням механічного диспергатора / Я. М. Корнієнко, Д. С. Семененко, О. В. Мартинюк, С. С. Гайдай // НТУУ «КПІ». – Київ: НТУУ «КПІ». – 2015. – 167 С. *Особистий внесок здобувача: аналіз джерел літератури щодо процесів зневоднення та грануляції рідких гетерогенних систем у псевдозрідженому шарі, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів.*
3. Корнієнко Я. М. Процес одержання модифікованих гранульованих гуміново-мінеральних добрив / Я. М. Корнієнко, А. М. Любека, С. С. Гайдай // КПІ ім. Ігоря. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2017. – 210 С. *Особистий внесок здобувача: аналіз джерел літератури щодо процесів зневоднення та грануляції рідких гетерогенних систем у системі "тверде тіло-газ-рідина", проведення досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів.*

Статті у фахових виданнях:

4. Kornienko Y. Kinetic laws of the process of obtaining complex humic-organic-mineral fertilizers in the fluidized bed granulator / Y. Kornienko, S. Hayday, A. Liubeka, O. Martynyuk // Ukrainian Food Journal. – 2016. – Vol. 5. – Issue 1. – PP. 144-154. (Входить до наукометричних баз Index Copernicus, EBSCO, Ulrichs Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI, Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, InfoBase Index). *Особистий внесок здобувача: обґрунтування фізичної моделі процесу гранулювання та умов його реалізації, проведення досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів.*
5. Korniyenko Y. Modelling of pulsating mode of fluidization when obtaining organic-mineral fertilizers / Y. Korniyenko, S. Haidai, A. Liubeka, S. Turko, O. Martynyuk // Ukrainian Food Journal. – 2016. – Vol. 5. – Issue 4. – PP. 781-794. (Входить до наукометричних баз Index Copernicus, EBSCO, Ulrichs Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI, Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, InfoBase Index, CASSI). *Особистий внесок здобувача: обґрунтування фізичної та математичної моделі взаємодії газової та твердої фази, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз одержаних результатів.*
6. Kornienko Y. Non-uniform fluidization in auto-oscillating mode / Y. Kornienko, S. Haidai // Ukrainian Food Journal. – 2017. – Vol. 6. – Issue 3. – PP. 562-576. (Входить до наукометричних баз Index Copernicus, EBSCO, Ulrichs

Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI, Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, InfoBase Index, CASSI). *Особистий внесок здобувача: обґрунтування та розв'язання математичної моделі процесу, розроблення сучасної методики проведення експериментальних досліджень із застосуванням комп'ютеризованих систем вимірювання, проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення одержаних результатів.*

7. Корнієнко Я. М. Гранульовані гуміново-органомінеральні добрива. Спосіб одержання / Я. М. Корнієнко, С. С. Гайдай, О. В. Мартинюк, А. М. Любека // Хімічна промисловість України. – 2015. – №1. – С. 44-48. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування способу одержання гранульованих органомінеральних добрив, проведення експериментальних досліджень, аналіз одержаних результатів.*

8. Корнієнко Я. М. Кінетика процесу створення органомінерально-гумінових добрив / Я. М. Корнієнко, С. С. Гайдай, О. В. Мартинюк, О. В. Куріньовський, А. М. Любека // Наукові праці ОНАХТ. Технічні науки. – 2015. – Вип. 47. – том 1. – С. 167-170. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, визначення кінетичних закономірностей процесу гранулювання.*

Патенти на корисну модель:

9. Патент № 95432 Україна МПК (2006.01) B01J 8/44. Газорозподільний пристрій апарата псевдозрідженого шару / Любека А. М., Корнієнко Я. М., Мартинюк О. В., Гайдай С. С.; Заявл. 26.06.2014; Опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24/2014. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструктивних особливостей ГРП.*

10. Патент № 95430 Україна МПК (2006.01) B01J 8/44. Камера апарата псевдозрідженого шару / Гайдай С. С., Корнієнко Я. М., Мартинюк О. В., Любека А. М.; Заявл. 26.06.2014; Опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24/2014. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструктивних особливостей та геометричних параметрів камери гранулятора.*

11. Патент № 95431 Україна МПК (2006.01) B01J 8/44. Секція апарата псевдозрідженого шару / Любека А. М., Корнієнко Я. М., Мартинюк О. В., Гайдай С. С.; Заявл. 26.06.2014, Опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24/2014. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструктивних особливостей та геометричних параметрів секції апарата псевдозрідженого шару.*

12. Патент № 100309 Україна МПК (2015.01) C05G 1/00. Спосіб виготовлення гранульованого органомінерального добрива / Любека А. М., Корнієнко Я. М., Гайдай С. С., Мартинюк О.В.; Заявл. 12.12.2014; Опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14/2015. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування способу виготовлення гранульованого органомінерального добрива.*

13. Патент № 106422 Україна МПК (2006.01) B01J 8/44. Апарат псевдозрідженого шару / Куріньовський О. В., Корнієнко Я. М., Гайдай С. С., Любека А. М., Мартинюк О. В.; Заявл. 29.10.2015; Опубл. 25.04.2016,

Бюл. № 8/2016. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструктивних параметрів конструкції апарата псевдозрідженого шару.*

14. Патент № 107903 Україна МПК (2006.01) B01J 8/44. Секція апарата псевдозрідженого шару / Турко С. О., Корнієнко Я. М., **Гайдай С. С.**, Мартинюк О. В., Любека А. М.; Заявл. 24.12.2015; Опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12/2016. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування особливостей конструкції секції апарата псевдозрідженого шару із направляючою вставкою.*

15. Патент № 109509 Україна МПК (2006.01) B01J 8/44. Газорозподільний пристрій апарата псевдозрідженого шару / Турко С. О., Корнієнко Я. М., **Гайдай С. С.**, Мартинюк О. В., Любека А. М.; Заявл. 04.03.2016; Опубл. 25.08.2016, Бюл. № 16/2016. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструктивних особливостей та геометричних параметрів газорозподільного пристрою апарата псевдозрідженого шару.*

16. Патент № 120841 Україна МПК (2017.01) C05G 3/00. Спосіб виготовлення гранульованого органо-мінерального гумінового добрива / Корнієнко Я. М., **Гайдай С. С.**, Любека А. М., Мартинюк О. В.; Заявл. 10.04.2017; Опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22/2017. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування способу виготовлення гранульованого органо-мінерального добрива.*

17. Патент № 122623 Україна МПК (2006.01) B01J 8/18. Механічний диспергатор із зовнішніми кільцями / Любека А. М., Корнієнко Я. М., Манастирний М. М., **Гайдай С. С.**, Мартинюк О. В.; Заявл. 10.04.2017; Опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2/2018. *Особистий внесок здобувача: участь у експериментальних дослідженнях роботи механічного диспергатора.*

18. Патент № 122624 Україна МПК (2006.01) B01J 8/44. Механічний диспергатор / Манастирний М. М., Любека А. М., Корнієнко Я. М., Любека А. М., **Гайдай С. С.**, Мартинюк О. В.; Заявл. 10.04.2017; Опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2/2018. *Особистий внесок здобувача: участь у експериментальних дослідженнях.*

Тези доповідей у збірках матеріалів конференцій:

19. Корнієнко Я. М. Підвищення ефективності псевдозрідження при застосуванні газорозподільного пристрою щілинного типу / Я. М. Корнієнко, **С. С. Гайдай**, О. В. Мартинюк, А. М. Любека // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: VIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 19-20 квітня 2015 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2015. – С. 7-9. *Особистий внесок здобувача: експериментальне визначення впливу особливостей газорозподільного пристрою щілинного типу на ефективність псевдозрідження.*

20. Корнієнко Я. М. Процес гранулоутворення гуміново-органомінеральних добрив / А. М. Любека, Я. М. Корнієнко, **С. С. Гайдай**, Р. В. Сачок // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: VIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 19-20 квітня 2015 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2015. – С. 12-14. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення результатів.*

21. Корнієнко Я. М. Закономірності утворення органо-мінерально-гумінових добрив / О. В. Куріньовський, Я. М. Корнієнко, Р. В. Сачок, С. С. Гайдай, О. В. Мартинюк, А. М. Любека // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: VIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 19-20 квітня 2015 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2015. – С. 29-31. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення одержаних результатів встановлення закономірностей процесу.*

22. Корнієнко Я. М. Кінетика процесу створення органо-мінерально-гумінових добрив / Я. М. Корнієнко, Р. В. Сачок, С. С. Гайдай, О. В. Мартинюк, О. В. Куріньовський, А. М. Любека // Інноваційні енерготехнології: V міжнародна науково-практична конференція, 2015 р: збірник тез доповідей. – Одеса. – 2015. – С. 48-51. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення результатів, визначення закономірностей процесу.*

23. Корнієнко Я. М. Закономірності утворення органо-мінерально-гумінових добрив / О. В. Куріньовський, Я. М. Корнієнко, Р. В. Сачок, С. С. Гайдай, А. М. Любека, О. В. Мартинюк // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: IX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 24-26 листопада 2015 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2015. – С. 5-8. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень.*

24. Корнієнко Я. М. Стабілізація дисперсного складу при різних механізмах росту гранул при зневодненні рідких систем в псевдозрідженому шарі / О. В. Куріньовський, Я. М. Корнієнко, Р. В. Сачок, С. С. Гайдай, А. М. Любека, О. В. Мартинюк // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: IX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 24-26 листопада 2015 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2015. – С. 9-13. *Особистий внесок здобувача: проведення досліджень, обробка та узагальнення їх результатів.*

25. Корнієнко Я. М. Розробка способу стабілізації дисперсного складу при зневодненні висококонцентрованих рідких систем в псевдозрідженому шарі / О. В. Куріньовський, Я. М. Корнієнко, Р. В. Сачок, С. С. Гайдай, А. М. Любека, О. В. Мартинюк // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: IX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 24-26 листопада 2015 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2015. – С. 14-16. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування моделі стабілізації дисперсного складу.*

26. Корнієнко Я. М. Апроксимація функції масового розподілу гранул за розмірами при грануляції рідких систем у псевдозрідженому шарі / О. В. Куріньовський, Я. М. Корнієнко, Р. В. Сачок, С. С. Гайдай, А. М. Любека, О. В. Мартинюк // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: IX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 18-19 квітня 2016 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2016. – С. 6-9. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, узагальнення одержаних результатів.*

27. Корнієнко Я. М. Оцінка якості режиму псевдозрідження для високих

шарів / С. О. Турко, Я. М. Корнієнко, С. С. Гайдай // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: XI міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 18-19 квітня 2016 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2017. – С. 29-31. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування оцінки якості режиму псевдозрідження, проведення експериментальних досліджень.*

28. Корнієнко Я. М. Критерій оцінки якості неоднорідного псевдозрідження / С. О. Турко, Я. М. Корнієнко, С. С. Гайдай // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: XII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 18-19 квітня 2017 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2017. – С. 6-8. *Особистий внесок здобувача: визначення та обґрунтування критеріїв оцінки якості неоднорідного псевдозрідження, проведення досліджень, узагальнення результатів.*

Статті у інших виданнях:

29. Корнієнко Я. М. Гідродинаміка струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження з направленою циркуляцією / Я. М. Корнієнко, С. С. Гайдай, А. М. Любека, С. О. Турко // Міжнародний науковий журнал. – 2016. – №5. – том 2. – С. 101-106. (Міжнародне видання. Входить до наукометричних баз РИНЦ, ОАІ, ResearchBib, SIS, TEI, EIJ, RePEc, InfoBase Index, IIOR, CiteFactor, Open J-Gate). *Особистий внесок здобувача: обґрунтування фізичної та математичної моделі струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі та умов його реалізації, проведення експериментальних досліджень.*

30. Корнієнко Я. М. Моделювання процесу грануляції гетерогенних рідких систем у псевдозрідженому шарі / Я. М. Корнієнко, С. С. Гайдай, О. В. Куріньовський, А. М. Любека, О. В. Мартинюк // Хімічна промисловість України. – 2016. – №1. – С. 44-50. *Особистий внесок здобувача: визначення основних факторів, що впливають на процес грануляції та формулювання його фізичної моделі.*

31. Корнієнко Я. М. Критерій оцінки якості неоднорідного псевдозрідження / Я. М. Корнієнко, С. С. Гайдай, С. О. Турко, Б. І. Дуда // Хімічна промисловість України. – 2017. – №1. – С. 52-56. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування та визначення критеріїв оцінки якості струменево-пульсаційного псевдозрідження.*

АНОТАЦІЯ

Гайдай С.С. Гідродинаміка у грануляторах із псевдозрідженим шаром при одержанні органо-мінеральних добрив. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2018.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі – підвищення ефективності процесу одержання інноваційних гранульованих органо-мінеральних добрив необхідних для впровадження принципів раціонального

землекористування шляхом застосування неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі.

Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено, що застосування неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі при зневодненні та грануляції складних рідких гетерогенних систем суттєво підвищує інтенсивність дифузійно-контрольованих процесів при збереженні стійкої кінетики процесу.

Експериментально визначено умови введення газового агента в шар зернистого матеріалу та конструктивні параметри камери гранулятора при яких реалізується неоднорідне струменево-пульсаційне псевдозрідження в автоколивальному режимі для випадку, коли висота пробою газового струменя в тричі менша початкової висоти шару зернистого матеріалу. Експериментально доведено, що запропоновані критерії оцінки якості гідродинаміки в автоколивальному режимі дозволяють обрати параметри при яких практично усувається ризик утворення застійних зон на робочих поверхнях ГРП. Це дозволяє запобігти оплавленню матеріалу при використанні теплоносія із температурою, що в 1,5..2 рази перевищує температуру плавлення окремих термолабільних компонентів рідкої фази, яка подається на зневоднення до гранулятора. Запропоновано методику розрахунку промислового гранулятора із псевдозрідженим шаром.

Ключові слова: органо-мінеральні добрива, грануляція, неоднорідне псевдозрідження, автоколивальний режим, рідка гетерогенна система.

ANNOTATION

Haidai S. Hydrodynamics in fluidized bed granulators when obtaining organic-mineral fertilizers. – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

The dissertation for the scientific degree of candidate of technical sciences (for the Ph.D.), specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine. Kyiv, 2018.

The dissertation is dedicated to solving the important scientific and technical problem – increasing of efficiency of the process of obtaining innovative granular organic-mineral fertilizers that are necessary for the implementation of the principles of rational land use through the application of non-uniform fluidization in auto-oscillating mode.

The efficiency of application of non-uniform fluidization in an auto-oscillating mode in the process of dehydration and granulation of liquid heterogeneous systems is theoretically substantiated and experimentally proved. The regularities of the transition of the bubbling hydrodynamic mode of fluidization to the non-uniform auto-oscillating and rational limits of its existence are established.

In the work are proposed the criteria for assessing the quality of hydrodynamics in the auto-oscillating mode of jet-pulsed fluidization in the form of a function of loss of a hydrodynamics quality and the index of dynamic quality of hydrodynamics, which allows to determine the technological parameters, which minimizes the risk of formation of stagnant zones on the work surfaces of the gas distributing device, which increases the

stability of granulation processes with the use of heat carrier with a temperature of more than 300 °C.

The conditions of existence of an auto-oscillating mode of jet-pulsating fluidization, which provide the index of dynamic quality of hydrodynamics $i_{quality} \geq 0,85$ for solid particles in the range of values of equivalent diameter $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ mm are determined. The functional dependence of influence of the hydrodynamic mode of heat carrier movement in the slits of the gas distributing device, the number of fluidization and the dispersion of a bed of granular material on the dynamic quality of hydrodynamics is established. The generalization of an experimental data is carried out in the form of functional dependences of the frequency of pulsations of granular material bed and the index of mixing of a fluidized bed on the number of fluidization and the dispersion of bed from $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ mm in the application of non-uniform jet-pulsating fluidization in an auto-oscillating mode with the ratio of a height of the torch of a jet z_ϕ to a height of the fixed bed $H_0 - z_\phi/H_0 < 0,5$.

The verification of the reliability of physical and mathematical models was carried out at the pilot plant during the study of the kinetics of the process of granulation of organic-mineral fertilizers based on ammonium sulfate, sunflower ash and humic impurities. The results of the experimental studies have shown that the use of the non-uniform fluidization in an auto-oscillating mode allows to increase the specific load of the bed's surface over moisture in 1,5 times compared to the bubbling regime with granulation coefficients $\psi \geq 90$ %. The obtained granular product is with spheroidal shape with a layered structure with an equivalent diameter of 2,5 mm and a strength of 16 N per granule, which is in 1,6 times bigger than the current standard. At the same time, the total height of a bed was pulsatingly increasing in 1,7 ... 2,0 times, relative to the height of the fixed initial bed H_0 with the corresponding proportional increase of potential energy. At the same time, the coefficient of the bed of material displacement in one cycle is reached to 70 % and the index of dynamic quality of hydrodynamics is $i_{quality} \geq 0,85$. Reliability of the developed method for assessing the quality of the hydrodynamic mode of fluidization is confirmed by the absence of stagnant zones of solid particles on the working surfaces of the gas distributing device when applied the heat carrier with a temperature up to 300 °C in a real processes of granulation.

Key words: organic-mineral fertilizers, granulation, non-uniform fluidization, auto oscillation, liquid heterogeneous system.