

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

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

спеціальність 05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології

Гайдай Сергій Сергійович

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Корнієнко Ярослав Микитович



Актуальність

Агропромисловий комплекс (АПК) за останні роки склав більше 30 % фінансових надходжень до бюджету України. Його базовою галуззю є продукція рослинництва, виробництво якої за останні 9 років зросло на 34 %, а експорт – на 54 %.

Порушення науково обґрунтованих норм землекористування при інтенсивній експлуатації сільськогосподарських угідь та дефіцит калію і фосфору призводить до їх стрімкого виснаження та, особливо, зменшення вмісту гумусу.

Одним із заходів, що забезпечує протидію цим негативним факторам є створення нового покоління гранульованих органо-мінеральних добрив (ОМД) які містили б поживні мінеральні, розкислюючі компоненти та гумінові речовини у співвідношеннях, які визначаються агрокліматичними та екологічними умовами регіону їх застосування. Особливою вимогою до гранульованого продукту є рівномірне розподілення по всьому об'єму гумінових речовин, вміст яких не перевищує 2 %.

Попередніми дослідженнями встановлено, що досягнення цієї умови можливе за рахунок застосування техніки псевдозрідження при зневодненні та грануляції рідких систем. При цьому відбувається суміщення низки технологічних стадій в одному апараті із тепловим ККД більше 50%.

Ґрунтовні дослідження барботажного та фонтануючого режимів псевдозрідження проводились О. М. Тодесом, І. Ф. Девідсоном, Д. Харісоном, Я. Куні, К. Матуром, С. С. Забродським, Й. Квіперсом, О. А. Нагурським, В. М. Марчевським, Н. Б. Рашковською, Д. Гелдартом, Л. Н. Овчінніковим, Д. Гідасповим, А. С. Гинсбург та іншими. Однак, інформація щодо пульсуючого режиму псевдозрідження і його застосування при грануляції у літературі практично відсутня. Тому дослідження пульсуючого режиму псевдозрідження з метою його застосування для інтенсифікації процесів перенесення при одержанні органо-мінеральних добрив є актуальним.

Мета: підвищення ефективності процесу гранулювання органо-мінеральних добрив шляхом застосування неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі та розрахунок промислового апарата.

Об'єкт дослідження: процес грануляції багат шарових органо-мінеральних твердих композитів із заданими властивостями.

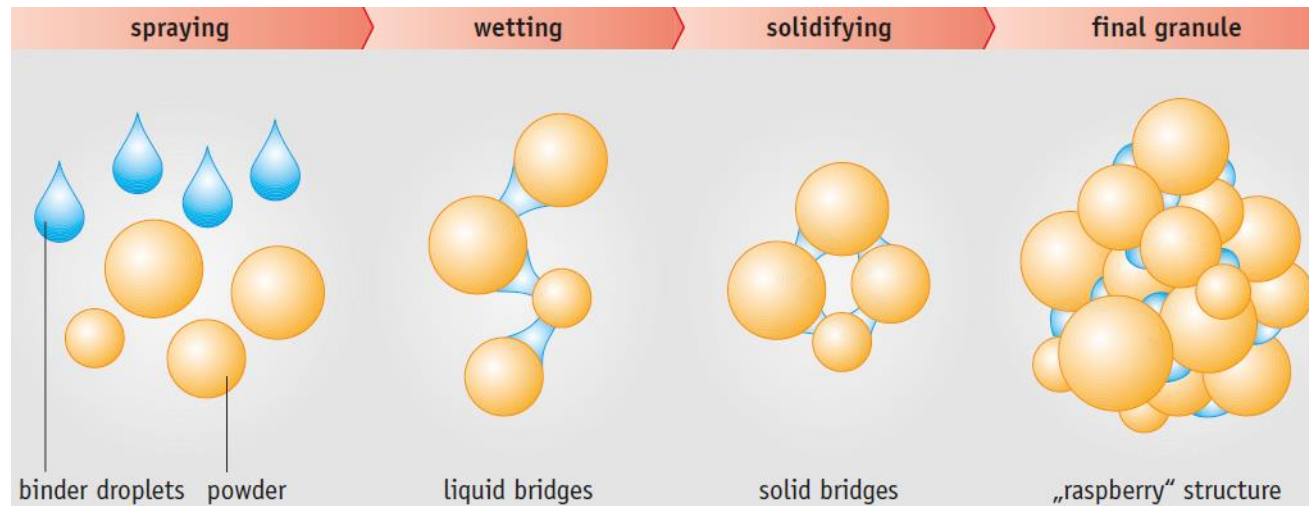
Предмет дослідження: гідродинамічні режими неоднорідного псевдозрідження та кінетика процесу грануляції.

Задачі дослідження:

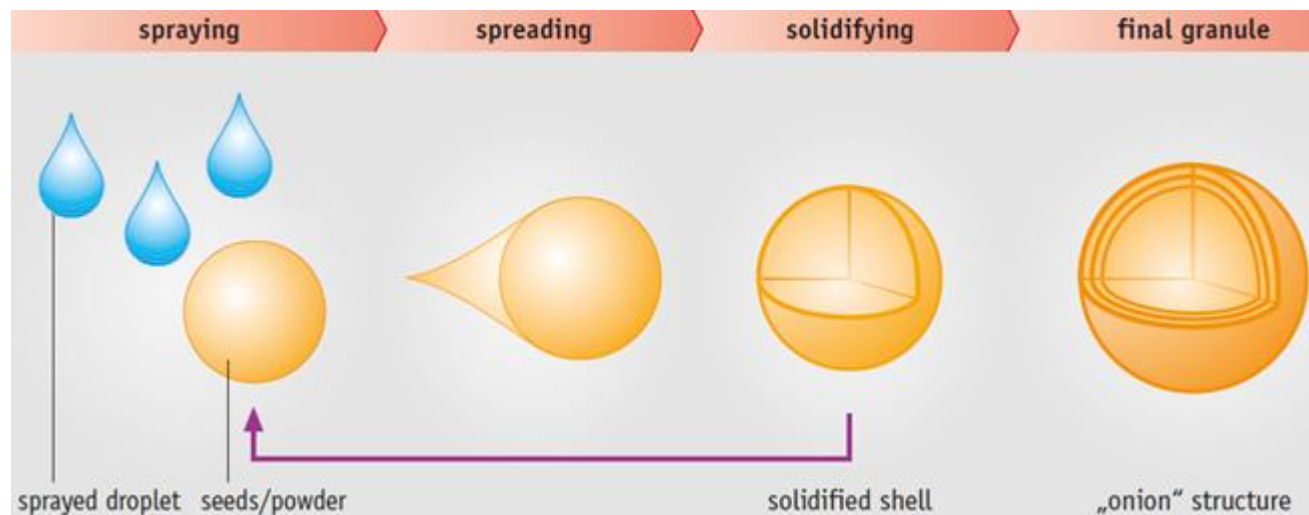
1. Сформулювати фізичну модель процесу одержання органо-мінеральних добрив із пошаровим механізмом гранулювання при зневодненні рідких систем у псевдозрідженому шарі та обґрунтувати спосіб взаємодії теплоносія із твердими частинками при неоднорідному псевдозрідженні в автоколивальному режимі.
2. Обрати математичну модель міжфазової взаємодії зернистого матеріалу та газу при неоднорідному псевдозрідженні.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

1. 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.
2. Вперше встановлено закономірності переходу струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальний режим при висоті пробією газового факела z_{ϕ} втричі меншій висоти нерухомого шару $z_{\phi}/H_0 = 0,33$.
3. Вперше експериментально визначено динаміку зміни локальних порозностей шару в окремих зонах камери гранулятора та частоту пульсацій при автоколивальному режимі для зернистого матеріалу із d_e в діапазоні базових значень ($1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм).
4. Експериментально доведено, що запропоновані критерії оцінки якості гідродинаміки в автоколивальному режимі ($i_{\text{я}} \rightarrow 1,0$) 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.
5. Експериментально підтверджено, що застосування струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі забезпечило збільшення інтенсивності видалення вологи при гранулюванні рідких систем, щонайменше, в 1,5 рази у порівнянні з барботажем при коефіцієнті грануляції $\psi \geq 90$ % та одержанням гранульованого продукту із заданими властивостями.

Механізми грануляції рідких систем у псевдозрідженому шарі (*Spray granulation*)



1) Агломерація



2) Нашарування

Рівномірність
розподілення компонентів
по всьому об'ємі;

Сфероподібна форма;

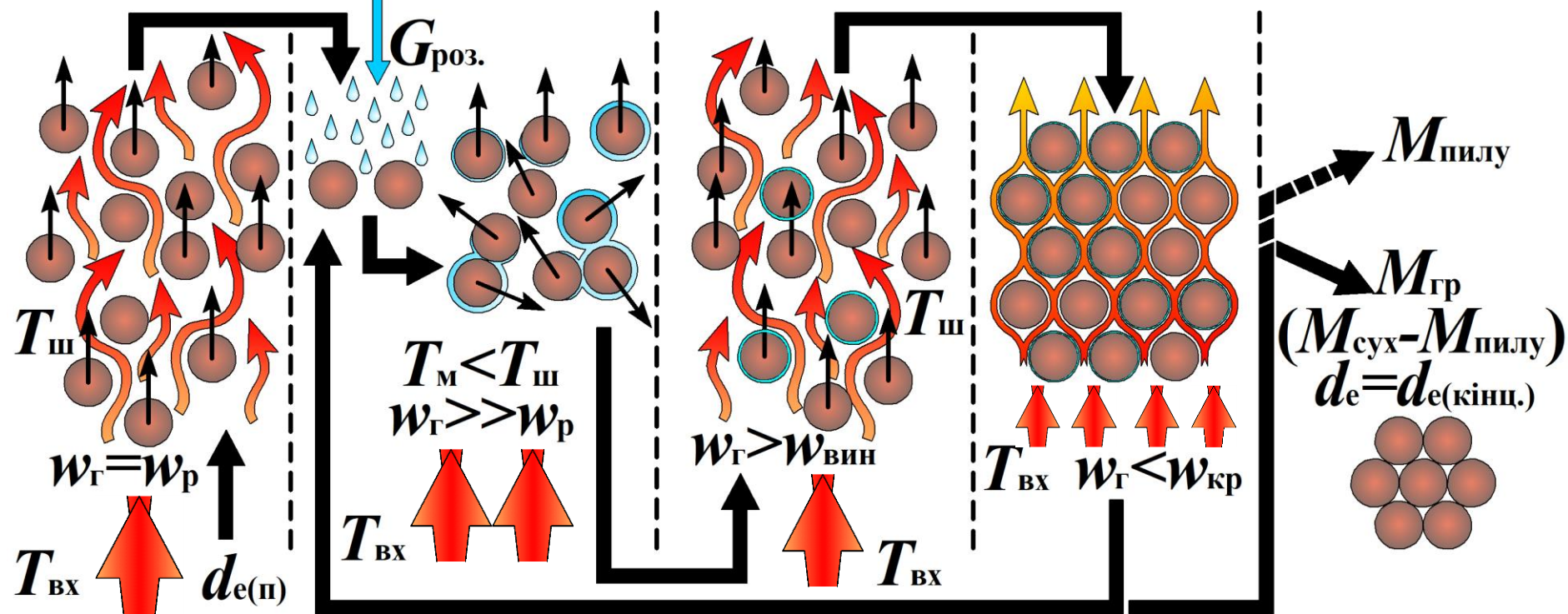
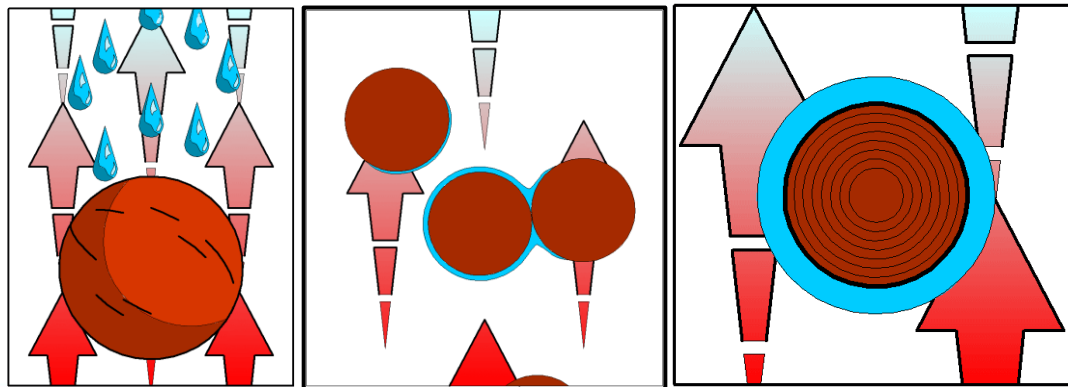
$[\sigma] > 10$ Н на гранулу;

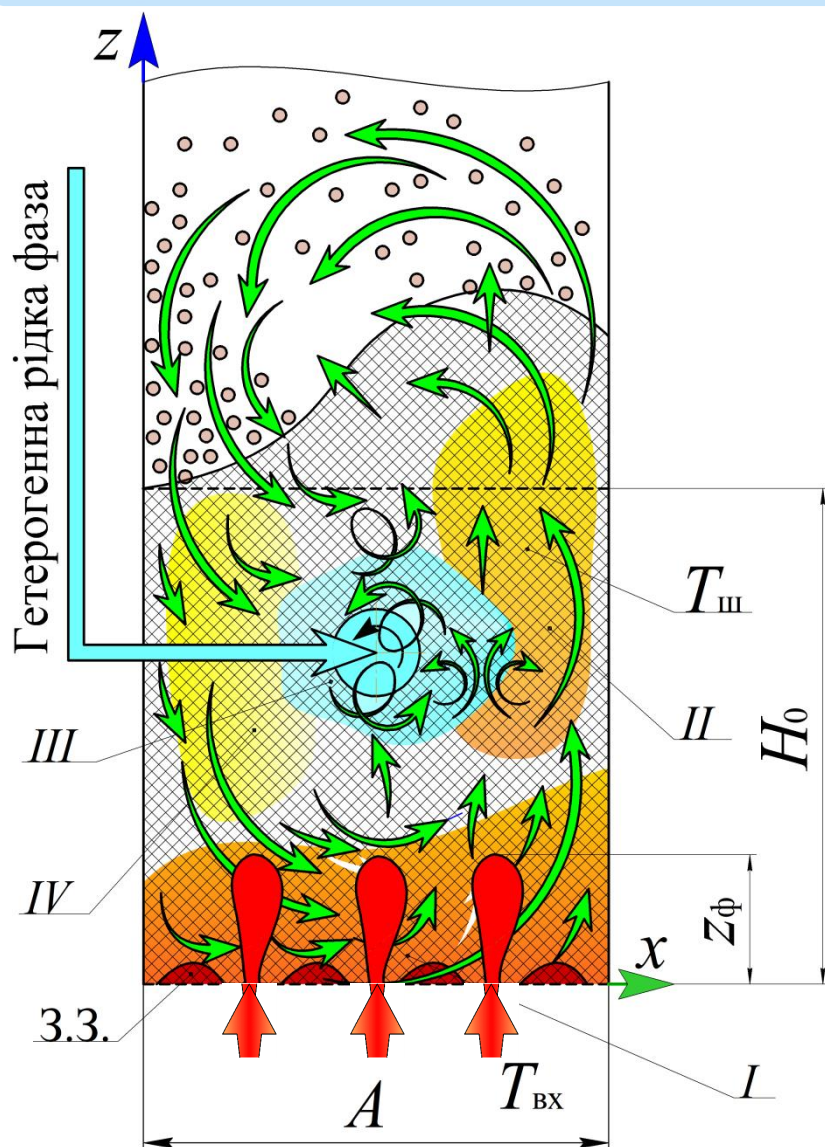
Заданий дисперсний
склад

Обґрунтування моделі процесу одержання гранульованих органо-мінеральних добрив із пошаровою структурою

6

Рідка фаза
($A+B+C$)





I – зона інтенсивного Т.О.; *II* – зона висхідного потоку;
III – зона зрошення; *IV* – зона низхідного руху (релаксації);
 3.3. – малорухома зона

1. Схема проходження зернистого матеріалу через технологічні зони в апараті

Умови реалізації процесу:

$$M = \beta \Delta P_{\text{M.O.}}^* F_{\text{M.O.}} \quad (1) \quad \Delta P_{\text{M.O.}}^* = P_{\text{нас.}}^* - P_{\text{роб.}} \quad (2)$$

$$F_{\text{M.O.}} = \frac{M}{\beta \Delta P^*} \quad (3) \quad F_{\text{M.O.}} = \frac{6 \Delta P_{\text{шару}} S_a}{D_e \rho_{\text{TB}} g} \quad (4)$$

$$\Delta P_{\text{шару}} = H_0 (1 - \varepsilon_0) \rho_{\text{TB}} g \quad (5)$$

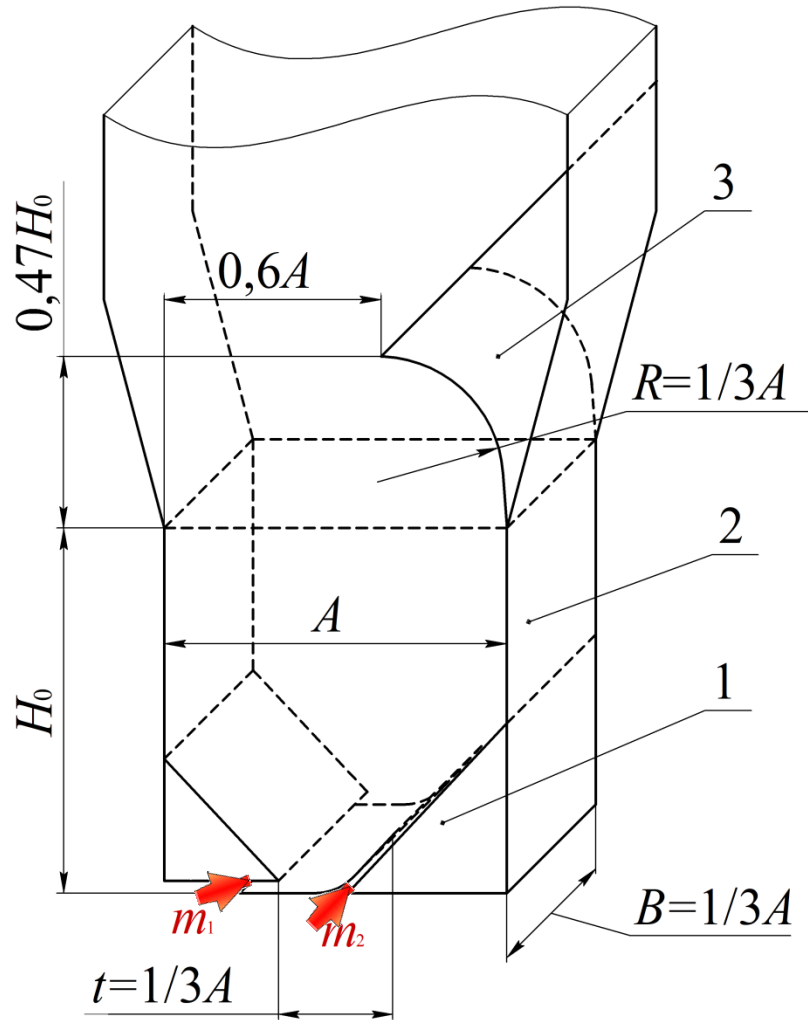
$$H_0 = \frac{F_{\text{M.O.}} D_e}{6 S_a (1 - \varepsilon_0)} \quad (6)$$

Особливість: $\frac{z_{\phi}}{H_0} \approx 0,33 \quad (7)$

Для реалізації процесу грануляції згідно запропонованої фізичної моделі **гідродинаміка в камері гранулятора повинна забезпечити:**

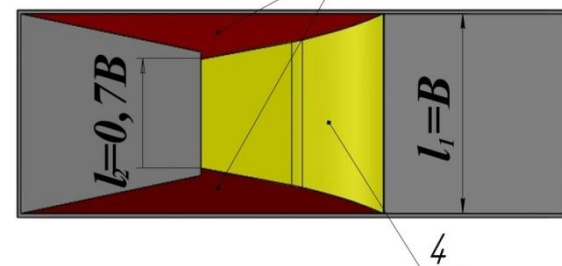
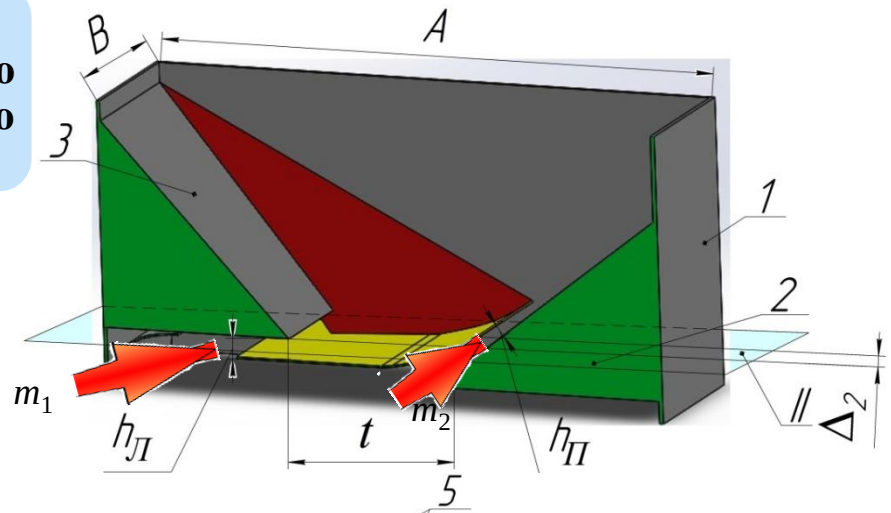
1. Усунення застійних зон та оплавлення гранул на поверхні ГРП;
2. Активне об'ємне перемішування зернистого матеріалу з проходженням через технологічні зони в камері гранулятора;
3. Інтенсифікацію процесів тепло-масообміну при грануляції рідких гетерогенних систем.

Конструкція камери гранулятора та газорозподільного пристрою (ГРП) щілинного типу для реалізації струменево-пульсаційного псевдозрідження



1 – ГРП; 2 – камера гранулятора;
3 – направляюча вставка

1. Конструкція камери гранулятора

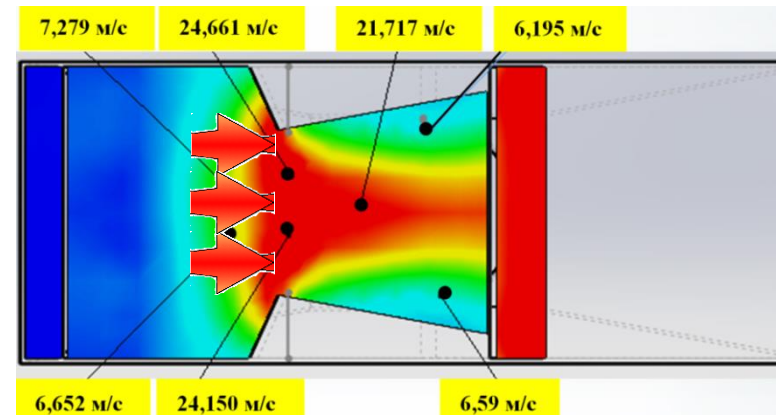
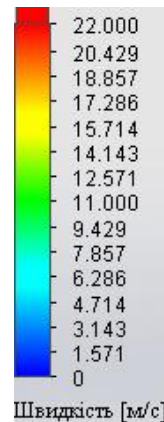


$$f_{m1} : f_{m2} = 1,4 : 1$$

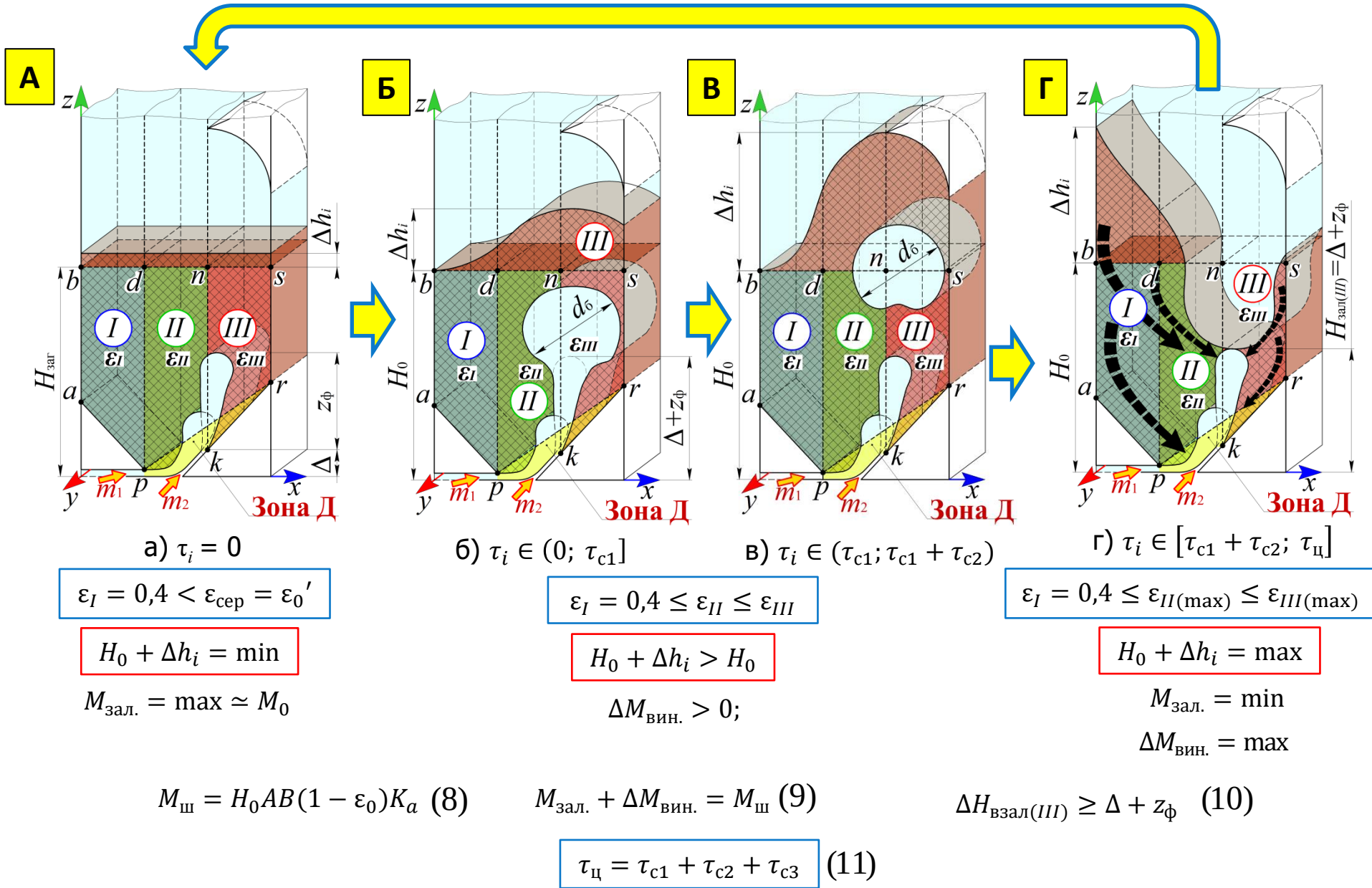
$$\varphi_2 = 4,9\%$$

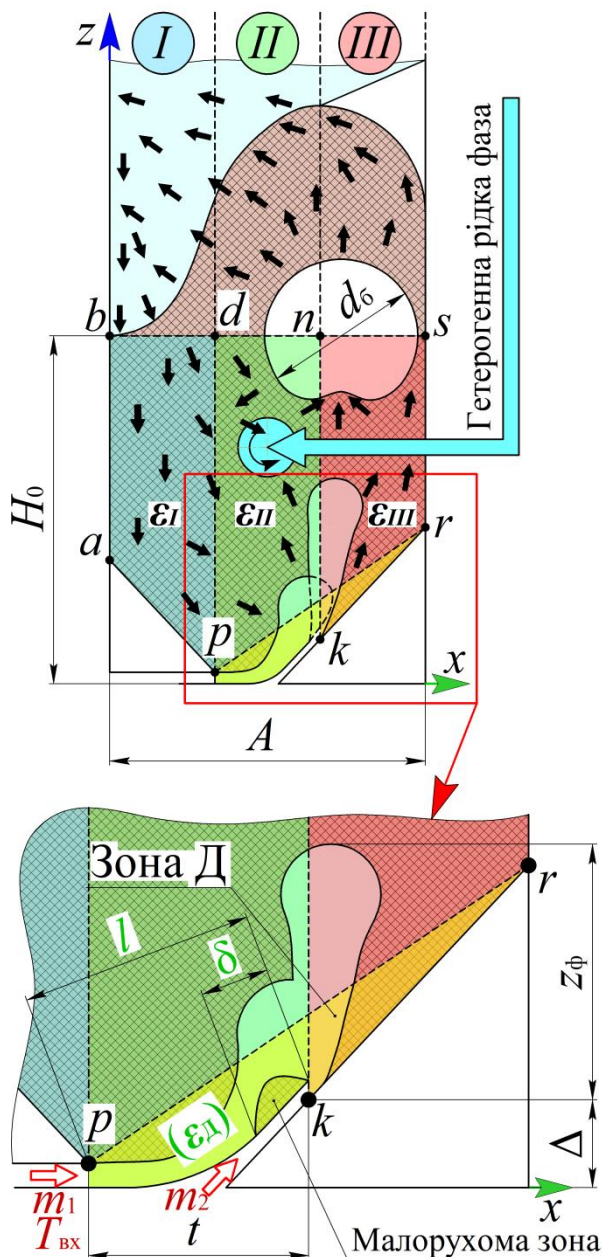
$$\xi_2 = 1,82$$

2. Конструкція ГРП щілинного типу



3. Епюра швидкостей зріджувального агента в зоні ГРП при $V=0,03736 \text{ м}^3/\text{с}$, $T_{\text{вх}}=20 \text{ }^\circ\text{C}$ (SolidWorks), $w_{\text{щ}} \gg w_{\text{прив}}$

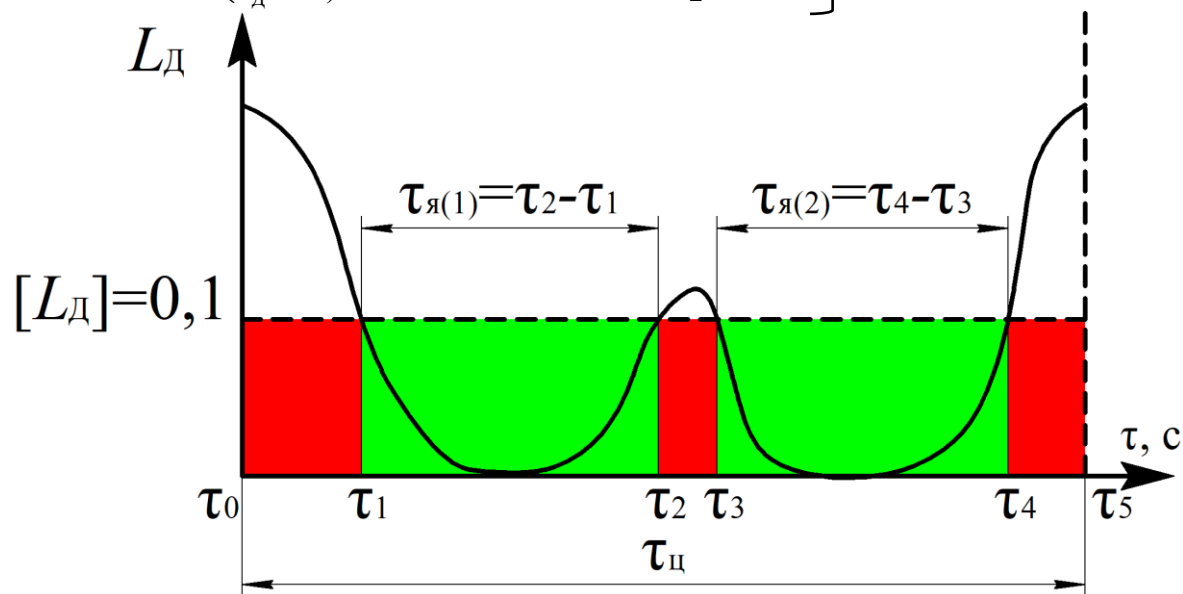




Функція втрат якості:

$$L_D = K_1 ([\varepsilon_D] - \varepsilon_D)^2 + K_2 \left(\frac{\delta - [\delta]}{l} \right)^2 \quad (12)$$

$$\left. \begin{array}{l} [\varepsilon_D] = 0,85; \\ (\varepsilon_D \rightarrow 1) \end{array} \right\} \begin{array}{l} [\delta] = 0,01l; \\ K_1 = 0,3; \\ K_2 = 0,7 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} [\varepsilon_D] = 0,85; \\ (\varepsilon_D \rightarrow 1) \end{array}} \right\} \text{Експериментально визначені значення}$$



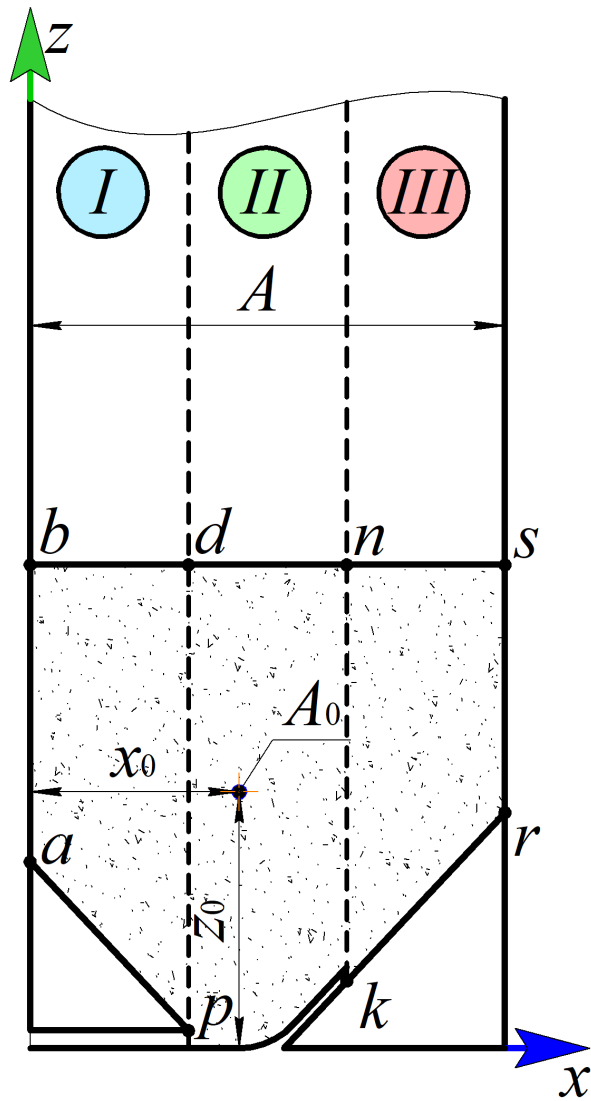
Прийнято задовільною вважати якість при: $L_D \leq [L_D] = 0,1 \quad (13)$

Індекс динамічної якості гідродинаміки, с:

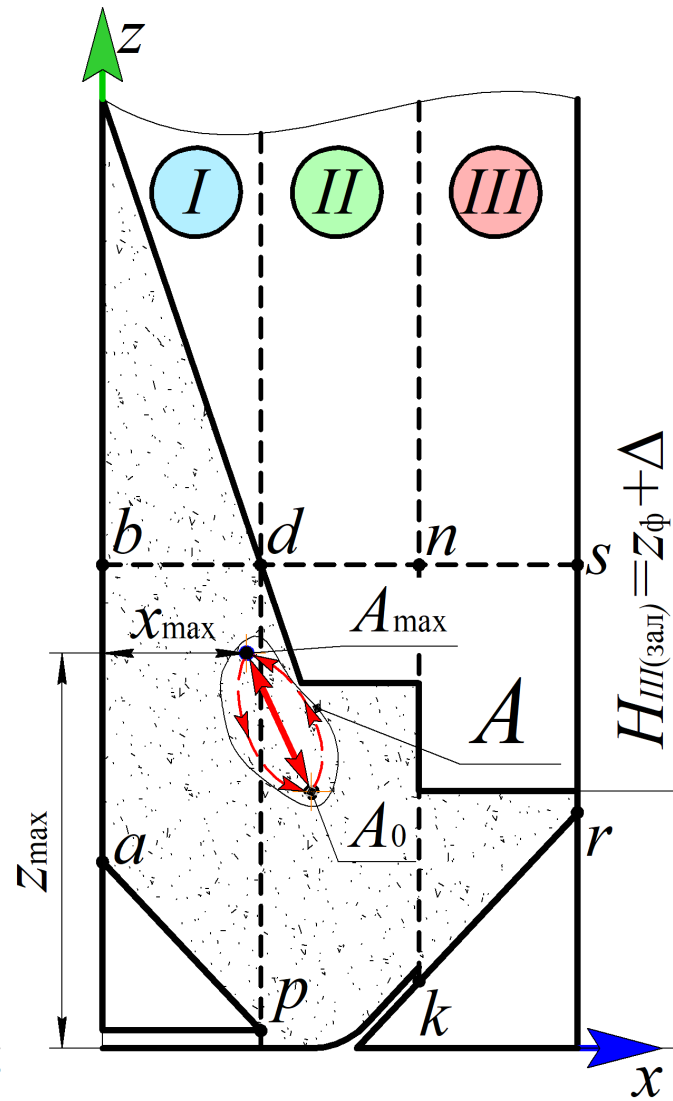
$$i_{я} = \tau_{я} / \tau_{ц} = 1,0 \quad (14)$$

Загальний час циклу при $L_D \leq [L_D] = 0,1$, с: $\tau_{я} = \sum \tau_{я(i)} \quad (15)$

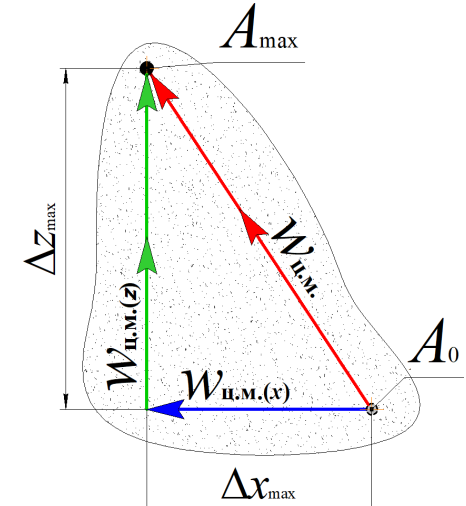
Тривалість повного циклу пульсації, с: $\tau_{ц} = \tau_{c1} + \tau_{c2} + \tau_{c3} \quad (16)$



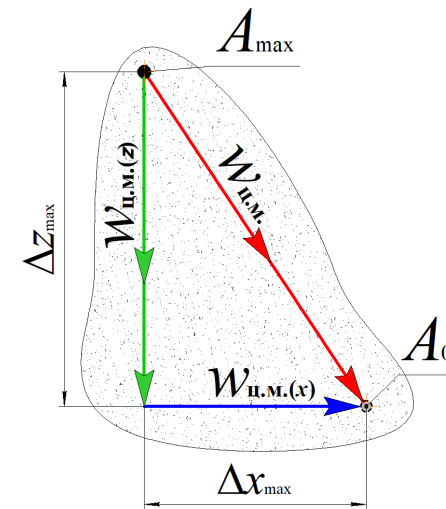
а) $\tau_i = 0$



б) $\tau_i = \tau_{c1} + \tau_{c2}$



Б) $\tau_i = \tau_{c1} + \tau_{c2}$



Г) $\tau_i = \tau_{c1} + \tau_{c2} + \tau_{c3}$

Математична модель неоднорідного псевдозрідження

$$\rho_T \varepsilon_T \left[\frac{\partial \vec{w}_T}{\partial \tau} + (\vec{w}_T \cdot \nabla) \vec{w}_T \right] + \rho_T \varepsilon_T \left[\frac{\partial \vec{w}_T}{\partial \tau} + (\vec{w}_T \cdot \nabla) \vec{w}_T \right] = -\nabla p - [\rho_T \varepsilon_T + \rho_T \varepsilon_T] \vec{g} \quad (17)$$

$$H \rho_T (1 - \varepsilon_T) \frac{\partial w_{\text{цм.}}}{\partial \tau} = \Delta P_{\text{заг.}} - H \rho_T (1 - \varepsilon_T) g \quad (18)$$

$$\frac{d^2 H}{d\tau_i^2} = \frac{\Delta P_{\text{заг.}}}{\rho_T (1 - \varepsilon_T) H} - g \quad (19)$$

$$\Delta P_{\text{заг.}} = \Delta P_{\text{імпульсу}} + \sum \Delta P_{\text{тертя}} + \Delta P_{\text{гідрост}} \quad (20)$$

$$\Delta P_{\text{імпульсу}} = \frac{1}{2} [\rho_T \varepsilon_T w_T^2 + \rho_T \varepsilon_T w_G^2] \quad (21)$$

$$\Delta P_{\text{гідрост.}} = \frac{M_{\text{зал.}} g}{F_a K_a} \quad (22)$$

$$\sum \Delta P_{\text{тертя}} = \Delta P_{\text{т.г.}} + \Delta P_{\text{т.т.}} \quad (23)$$

$$\Delta P_{\text{т.г.}} = 2 f_{\text{г}} \varepsilon_{\text{г}} \rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 H_0 \frac{1}{D_{\text{а(пр)}}} \quad (24)$$

$$\Delta P_{\text{т.т.}} = 5,7 \cdot 10^{-2} \frac{1}{D_{\text{а(пр)}}} \varepsilon_{\text{г}} \rho_{\text{г}} w_{\text{г(кр)}} \theta H_0 \sqrt{g D_{\text{а(пр)}}} \quad (25)$$

$$\theta = \frac{\varepsilon_{\text{г}} \rho_{\text{г}} w_{\text{г}}}{\varepsilon_{\text{г}} \rho_{\text{г}} w_{\text{г}}} \quad (26)$$

$$\varepsilon_{\text{г}} + \varepsilon_{\text{т}} = 1,0 \quad (27)$$

$$H_0' = \frac{H_0 (1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon_0')} \quad (28)$$

$$M_0' = ABHK_a (1 - \varepsilon_0') \quad (29)$$

$$K_a = 0,875$$

$$\Delta P_{\text{гідрост(0)}} = H_0 \rho_{\text{г}} \varepsilon_{\text{г}} g K_a \quad (30)$$

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar} \varepsilon_{\text{г(II;III)}}^{4,75}}{18 \cdot 0,61 \sqrt{\text{Ar} \varepsilon_{\text{г(II;III)}}^{4,75}}} \quad (31)$$

$$w_{\text{г}} = \frac{\text{Rev}}{d_{\text{е}}} \quad (32)$$

$$w_{\text{т}} = f(\varepsilon_{\text{г(II;III)}}) \quad (33)$$

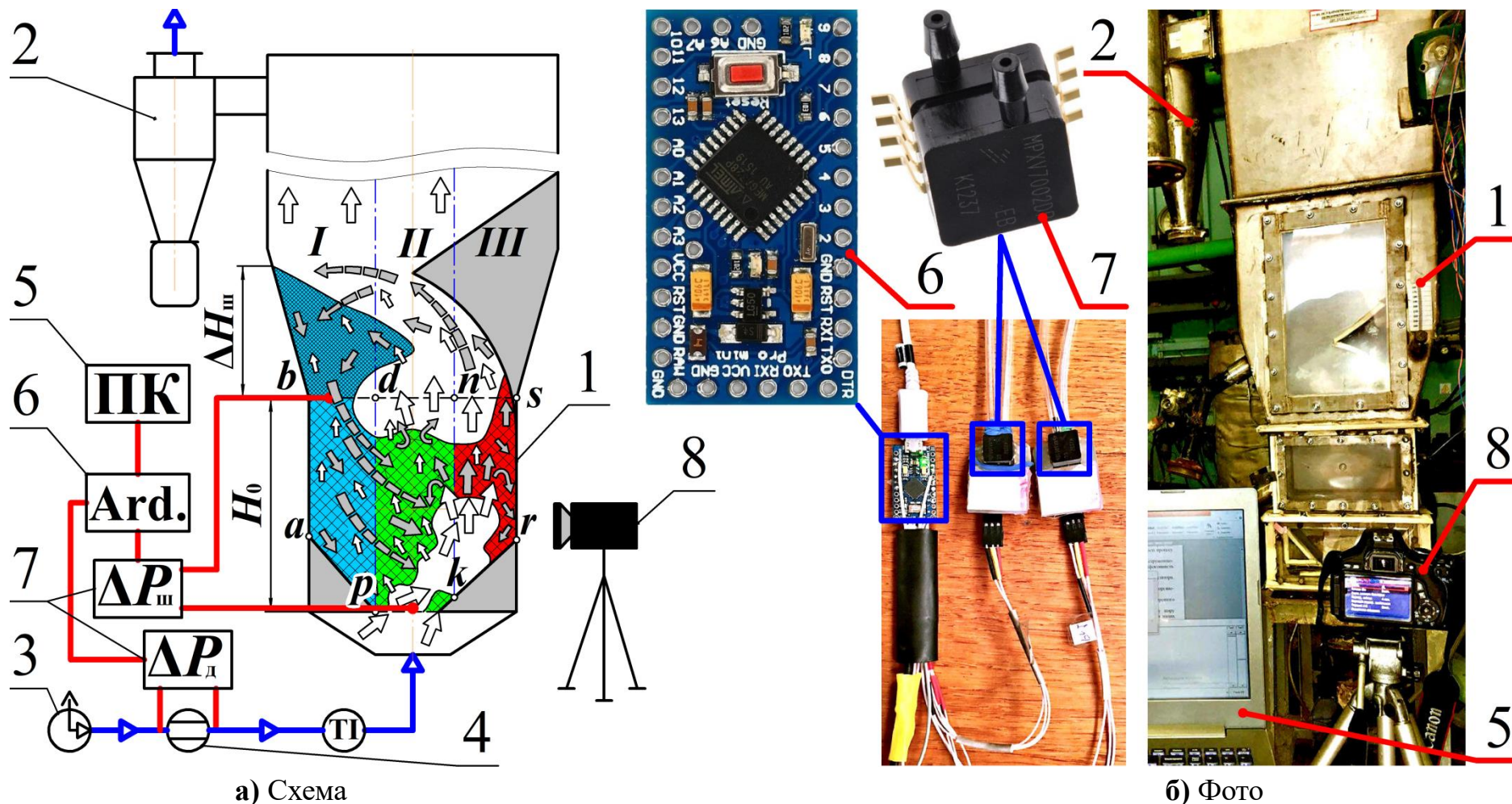
Початкові умови при $\tau=0$
($\tau_{\text{ц}}(n-1)$):

$$\begin{cases} H = H_0'; \\ w_{\text{т}} = 0; \\ \varepsilon_{\text{г}} = \varepsilon_0'; \\ M_{\text{зал.}} = M_0'; \\ \Delta P_{\text{заг.}} = \Delta P_{\text{гідрост(0)}} \end{cases} \quad (34)$$

Початкові умови при $\tau = \tau_{\text{ц1}} + \tau_{\text{ц2}}$
($\tau_{\text{ц1}} + \tau_{\text{ц2}} + \tau_{\text{ц}}(n-1)$):

$$\begin{cases} H = H_{\text{max}}; \\ w_{\text{т}} = 0; \\ \varepsilon_{\text{г}} = \varepsilon_{\text{г(max)}}; \\ M_{\text{зал.}} = M_{\text{зал.(min)}}; \\ \Delta P_{\text{заг.}} = \Delta P_{\text{min}} \end{cases} \quad (35)$$

Експериментальні дослідження гідродинаміки неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження ($H_0=0,32$ м; $\Delta P_{\text{гідрост}(0)}=2389$ Па)



а) Схема

б) Фото

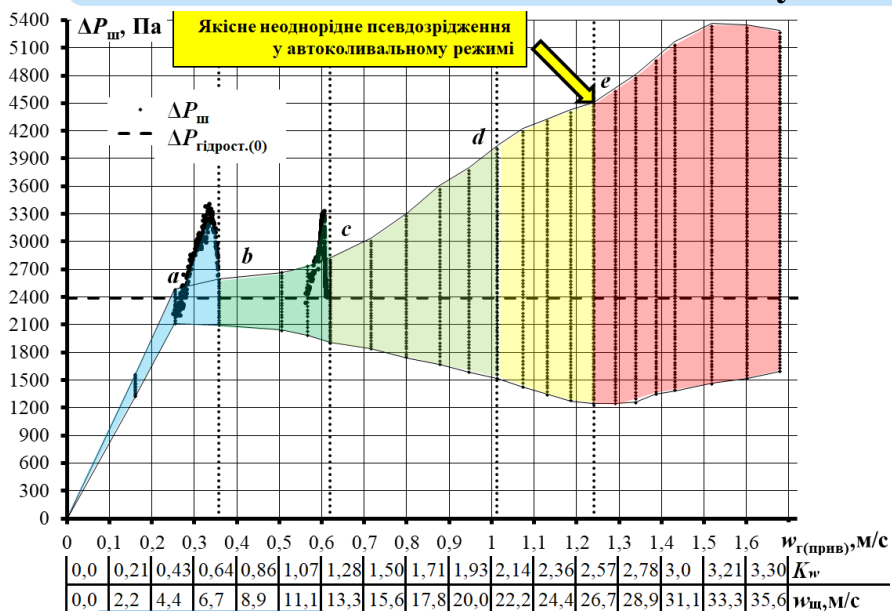
1 – камера гранулятора; 2 – циклон; 3 – газодувка; 4 – діафрагма; 5 – комп'ютер;
6 – *Arduino Pro Mini*; 7 – перетворювачі тисків; 8 – відеокамера

Експериментальна установка для дослідження гідродинаміки псевдозрідження

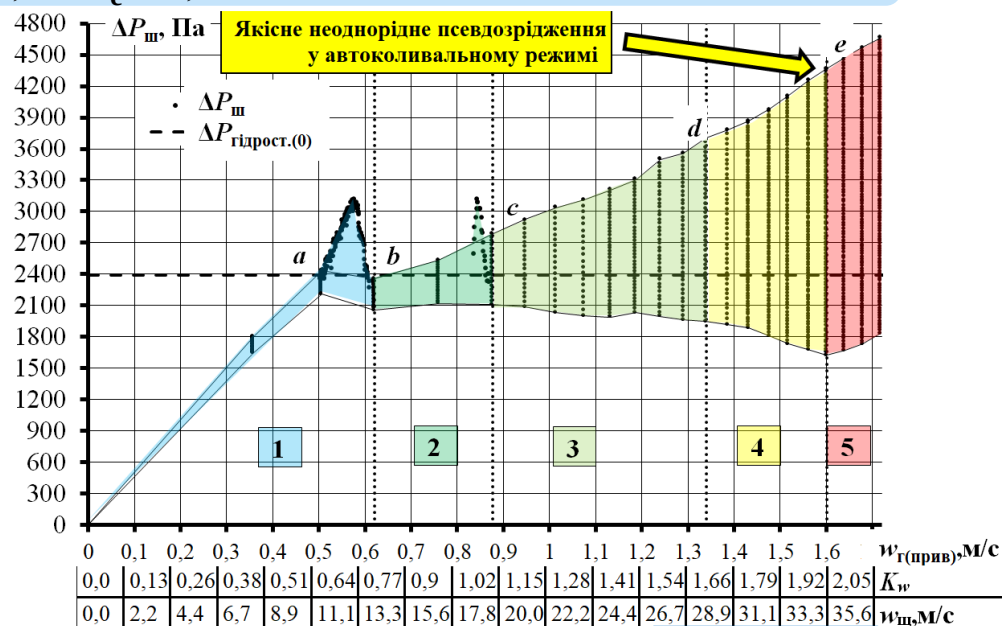
$$A \times B \times H_a = 0,3 \times 0,11 \times 1,5 \text{ м}$$

Криві псевдозрідження при асиметричному двоканальному введенні зріджувального агенту для $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм.

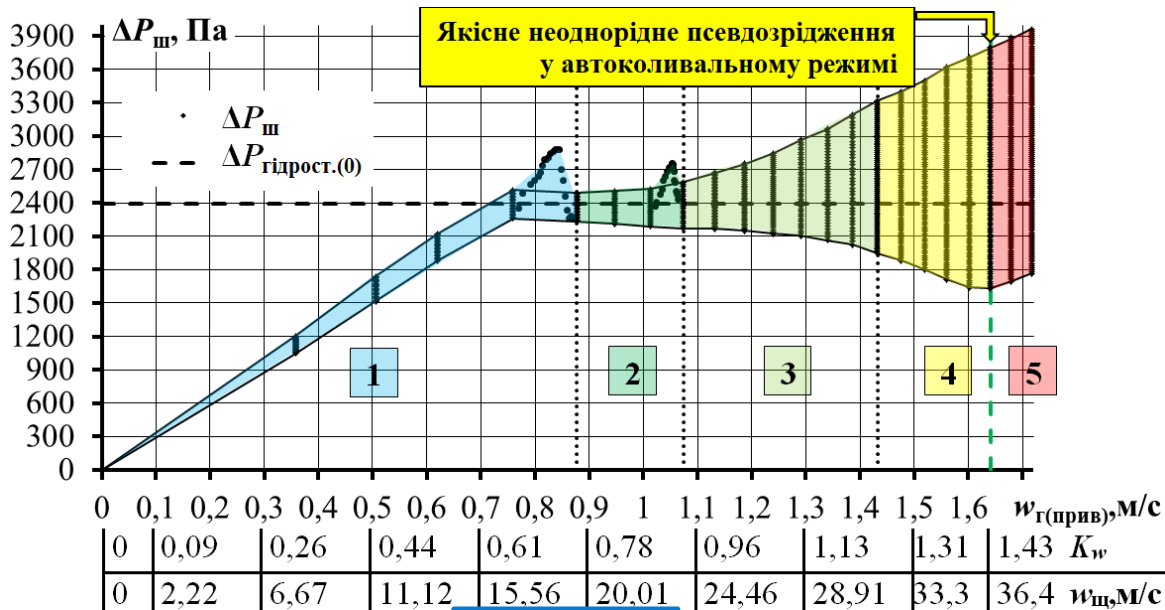
14



1) $d_e = 1,5$ мм

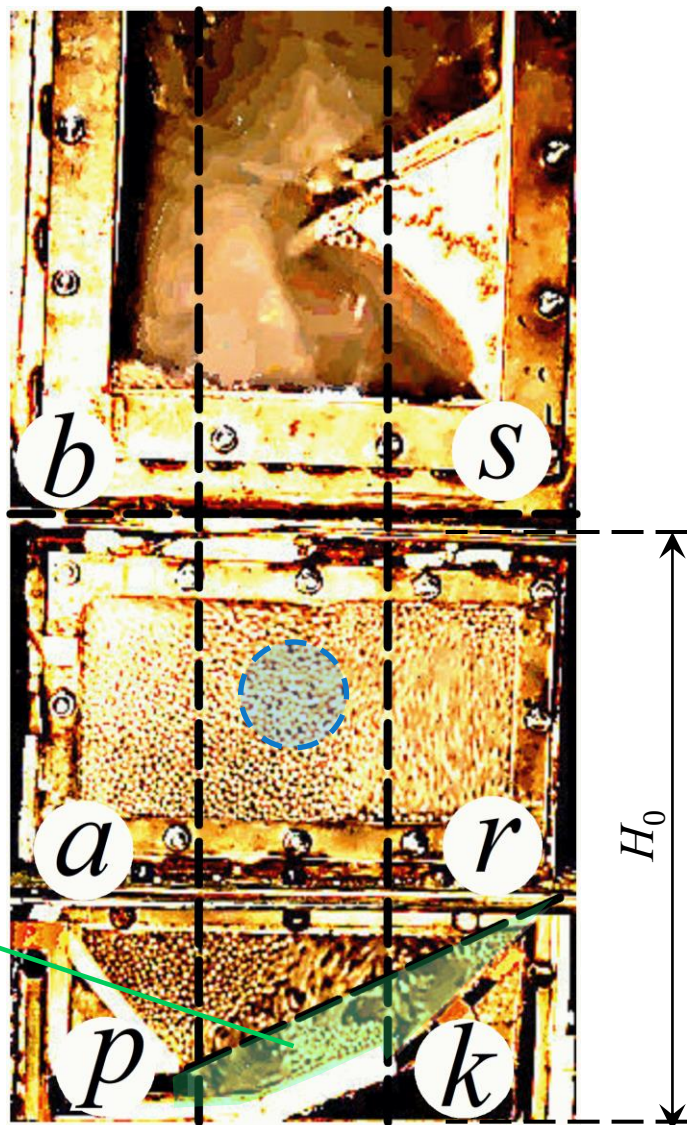


2) $d_e = 2,5$ мм

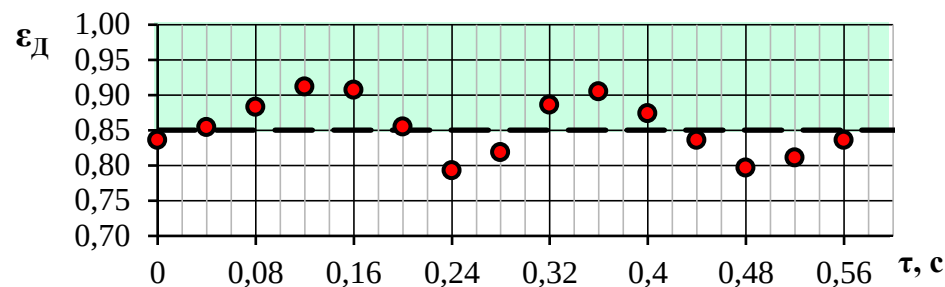


3) $d_e = 4,0$ мм

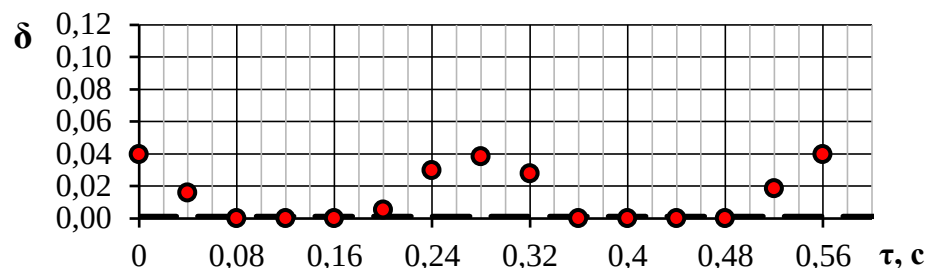
Оцінка якості гідродинаміки неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі при $d_c=4,0$ мм ($H_0=0,32$ м; $w_{p.прив.}=1,64$ м/с; $K_w=1,43$)



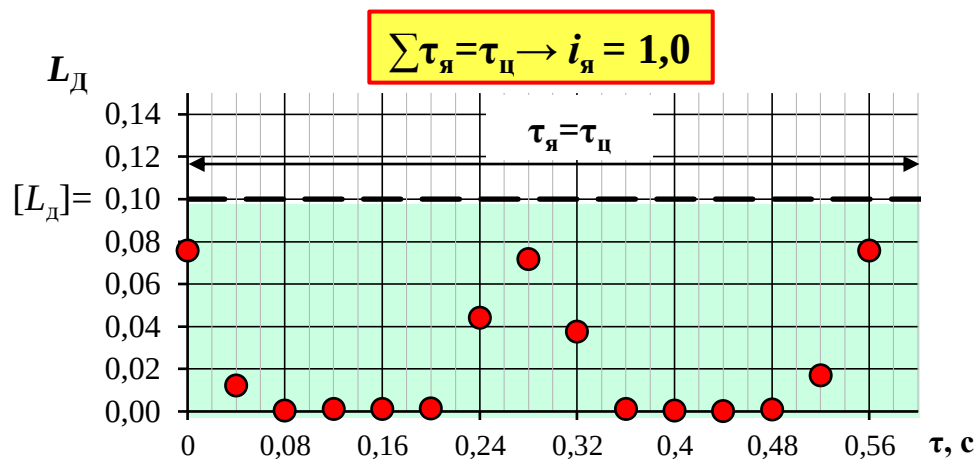
1. Гідродинамічна обстановка в камері гранулятора.



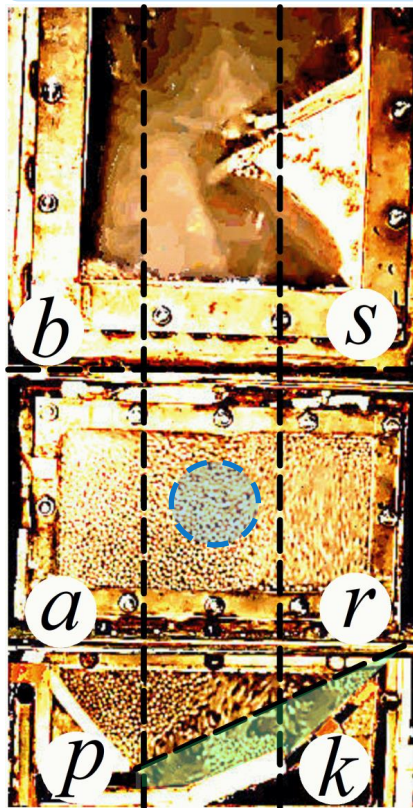
2. Динаміка зміни порозності в зоні Д – $\varepsilon_D=f(\tau)$.



3. Динаміка зміни розміру застійної зони на поверхні ГРП – $\delta=f(\tau)$.



4. Динаміка зміни показника втрати якості – $L_D=f(\tau)$.



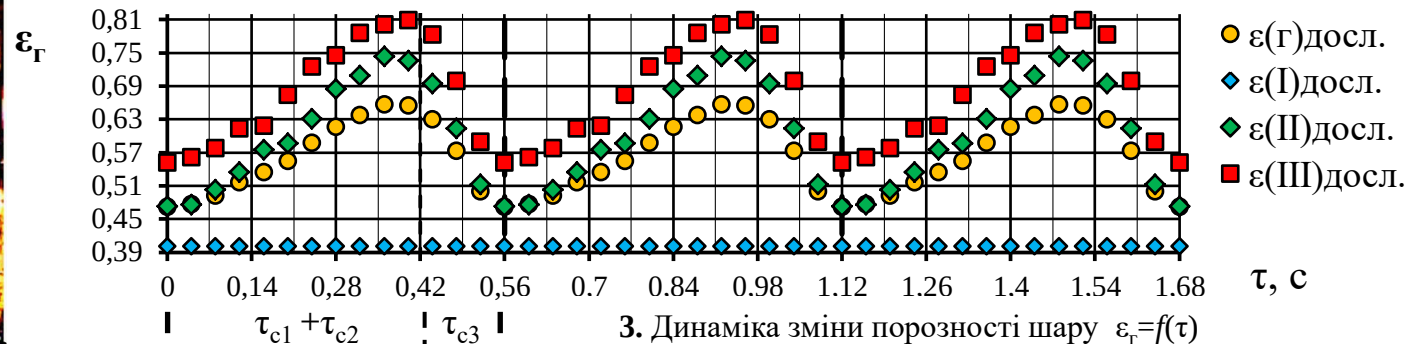
1. Гідродинамічна обстановка в камері гранулятора.

$$\tau_{\text{ц}} = 0,56 \text{ с}$$

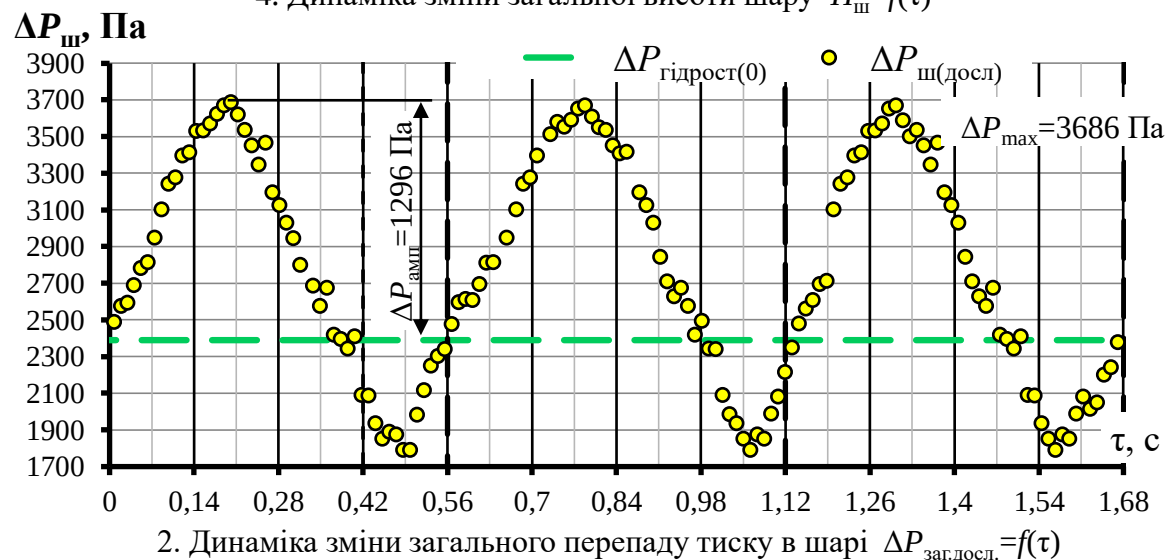
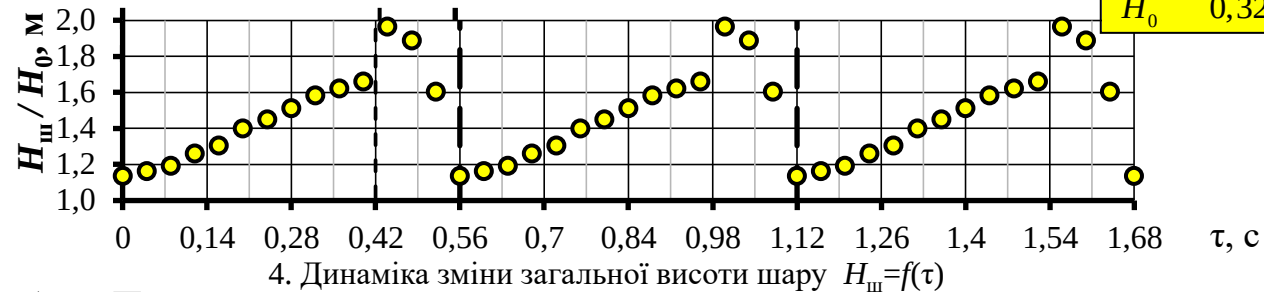
$$\begin{aligned} \tau_{\text{с1}} &\approx 0,25\tau_{\text{ц}}; \\ \tau_{\text{с2}} &\approx 0,5\tau_{\text{ц}}; \\ \tau_{\text{с3}} &\approx 0,25\tau_{\text{ц}}; \end{aligned}$$

$$f = \frac{1}{\tau_{\text{ц}}} = 1,785 \text{ Гц}$$

$$J_{\Delta P} = \frac{\Delta P_{\text{амп}}}{\Delta P_{\text{гідрост(0)}}} K_{\text{в}} = \frac{\Delta M_{\text{вин}}}{M_0} = 0,426$$



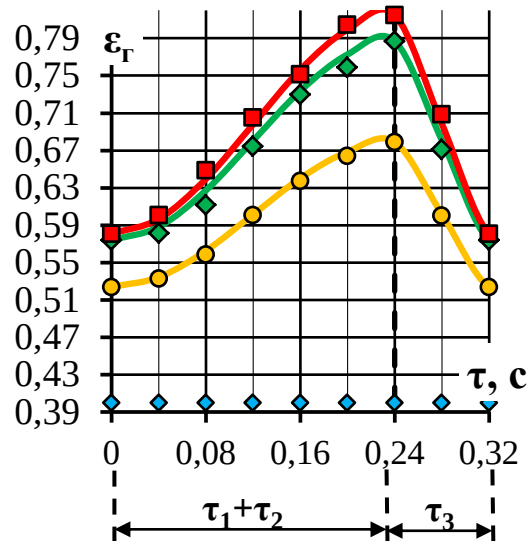
$$\frac{H_{\text{max}}}{H_0} = \frac{0,63}{0,32} = 1,96$$



Узагальнення результатів досліджень гідродинаміки при $i_{\gamma}=1,0$

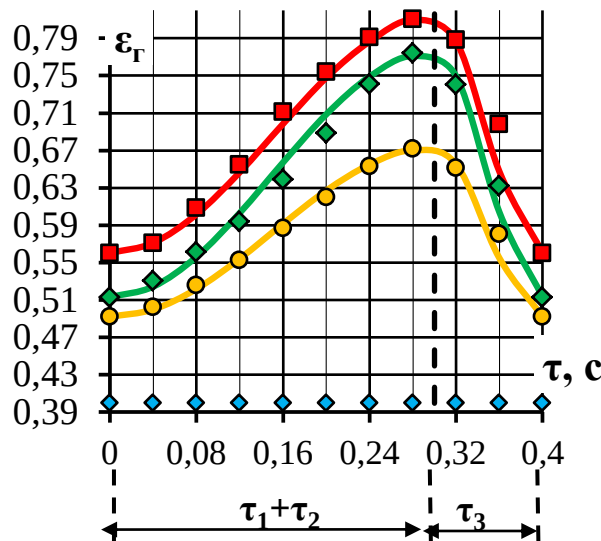
Динаміка зміни порозності шару

$\circ \varepsilon(\Gamma)\text{досл.}$ $\diamond \varepsilon(\Pi)\text{досл.}$ $\blacksquare \varepsilon(\text{III})\text{досл.}$ $\blacklozenge \varepsilon(\text{I})\text{досл.}$
 $\text{---} \varepsilon(\Gamma)\text{розрах.}$ $\text{---} \varepsilon(\Pi)\text{розрах.}$ $\text{---} \varepsilon(\text{III})\text{розрах.}$



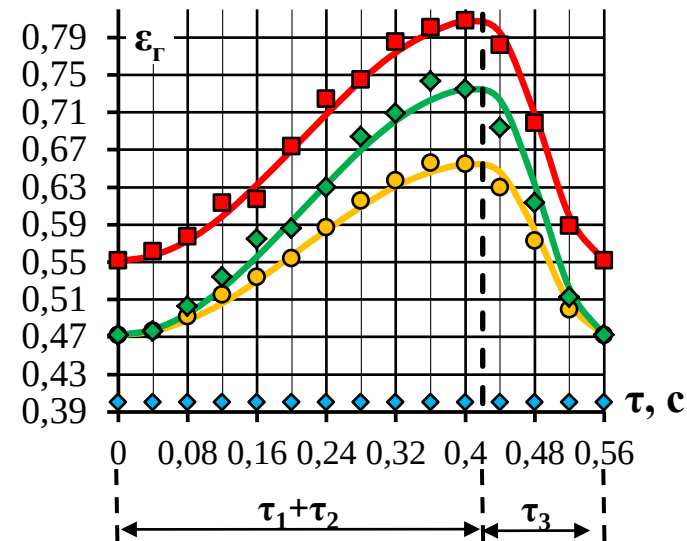
$R(\varepsilon_{\text{сеп}})=0,935$; $R(\varepsilon_{\text{II}})=0,929$;
 $R(\varepsilon_{\text{III}})=0,998$

1) $d_e = 1,5 \text{ мм}$; $K_w = 2,66$
 $\Delta M_{\text{вин(max)}} = 0,48M_0$;
 $\tau_{\Pi} = 2,08 \text{ с}$



$R(\varepsilon_{\text{сеп}})=0,991$; $R(\varepsilon_{\text{II}})=0,988$;
 $R(\varepsilon_{\text{III}})=0,992$

2) $d_e = 2,5 \text{ мм}$; $K_w = 2,03$
 $\Delta M_{\text{вин(max)}} = 0,45M_0$;
 $\tau_{\Pi} = 2,22 \text{ с}$



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

3) $d_e = 4,0 \text{ мм}$; $K_w = 1,43$
 $\Delta M_{\text{вин(max)}} = 0,43M_0$;
 $\tau_{\Pi} = 2,35 \text{ с}$

Час необхідний для повного перемішування, с:

$$\tau_{\Pi} = \left(M_0 / \Delta M_{\text{вин(max)}} \right) \tau_{\Pi} \quad (40)$$

$$\varepsilon_{\Gamma(j)}(\tau_i) = \varepsilon_{\Gamma(\text{min})}(j) + A_{(j)} + A_{(j)} \sin \left(\frac{2\pi}{T_{(j)}} \left(\tau_i - \tau_{\Pi(j)}(n-1) \right) - K_{\text{здв.}} \right) \quad (41)$$

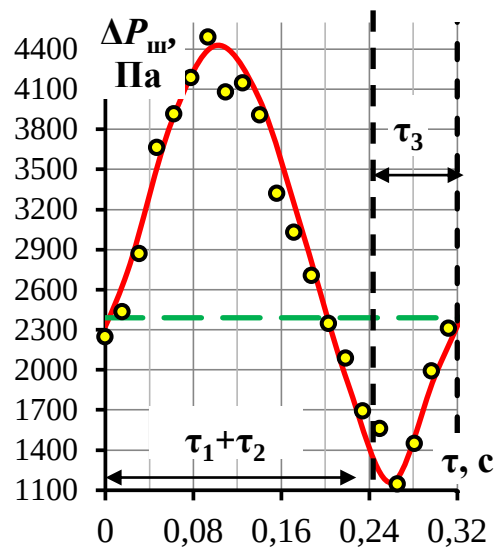
$$A_{(j)} = (\varepsilon_{\Gamma(\text{max})}(j) - \varepsilon_{\Gamma(\text{min})}(j)) / 2 \quad (42)$$

$$K_{\text{здв.}} = 5 \cdot \pi / 10 \quad (43)$$

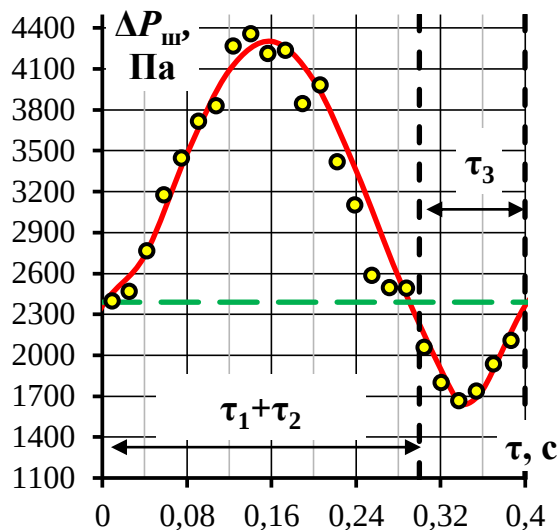
$$\begin{aligned} \tau_i \in [0; \tau_{c1} + \tau_{c2}] &\rightarrow T = 1,5 \cdot \tau_{\Pi(j)} \\ \tau_i \in [\tau_{c3}; \tau_{\Pi}] &\rightarrow T = 0,5 \cdot \tau_{\Pi(j)} \end{aligned} \quad (44)$$

Рівняння (20) отримано для $1,5 \leq d_e \leq 4,0 \text{ мм}$ при $0,35 \leq i_{\gamma} \leq 1,0$

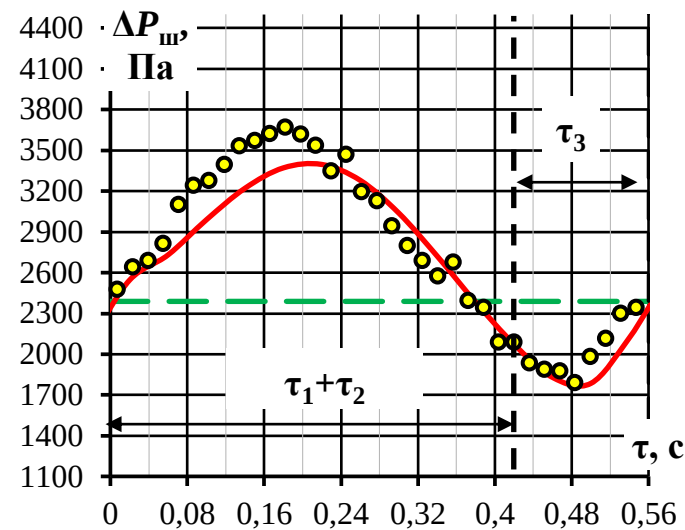
Перепад тиску в шарі зернистого матеріалу



а) $R=0,983$

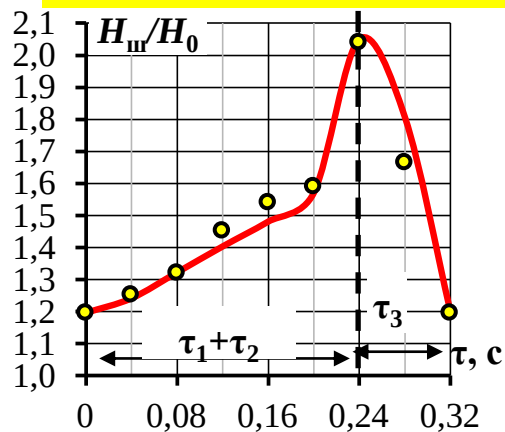


б) $R=0,962$

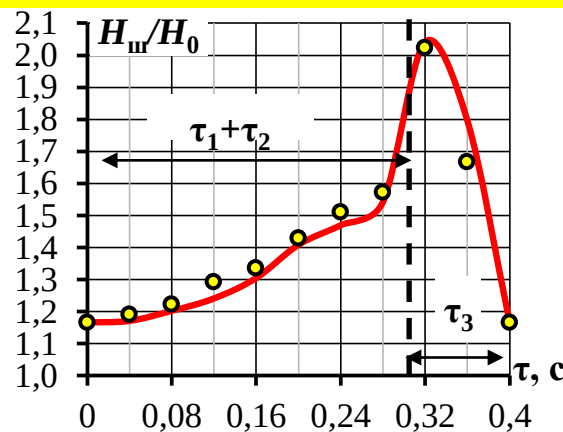


в) $R=0,96$

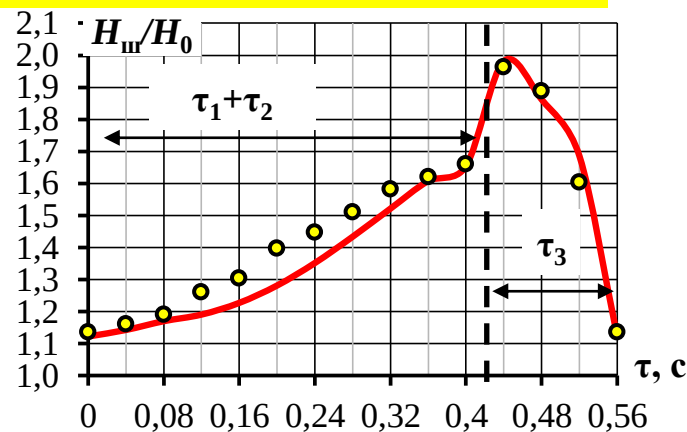
Відношення загальної висоти шару зернистого матеріалу до початкової



а) $R=0,9818$



б) $R=0,9878$



в) $R=0,9866$

1) $d_e = 1,5 \text{ мм}; K_w = 2,66$

2) $d_e = 2,5 \text{ мм}; K_w = 2,03$

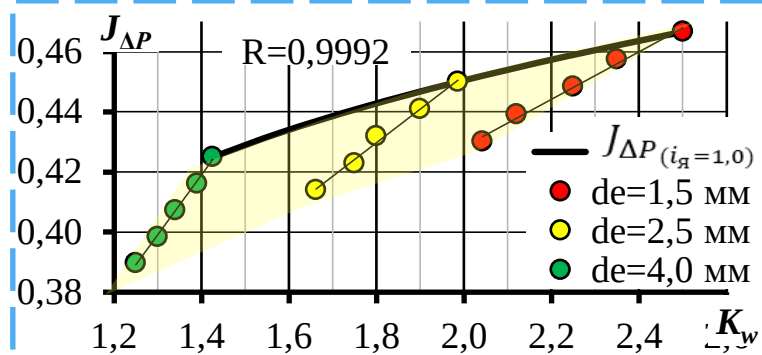
3) $d_e = 4,0 \text{ мм}; K_w = 1,43$

Узагальнення результатів експериментальних досліджень гідродинаміки

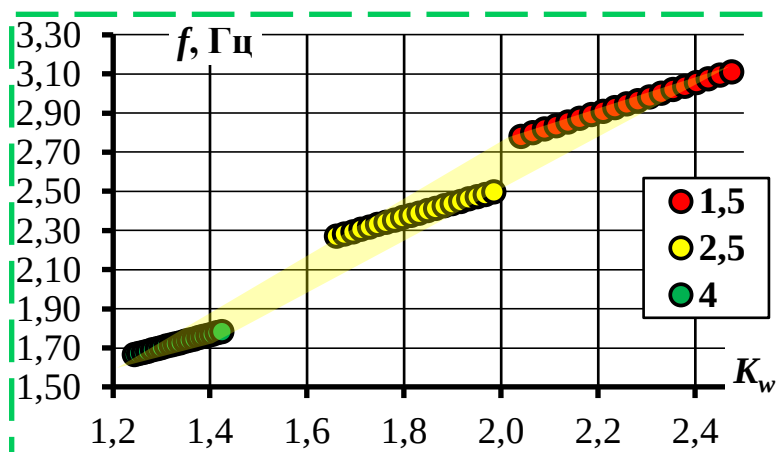
$$K_{w(i_{я}=1,0)} = -0,553 \cdot \ln\left(\frac{100aH_0}{\varphi}\right) - 1,1736 \quad (36)$$

$$a = \frac{6(1 - \varepsilon_0)}{d_e} \quad (37) \quad \varphi = \frac{F_{ш}}{S_a} 100\% \quad (38)$$

Рівняння (2) дійсне при $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм



1. Залежність $J_{\Delta P}=f(K_w)$: $R>0,97$.

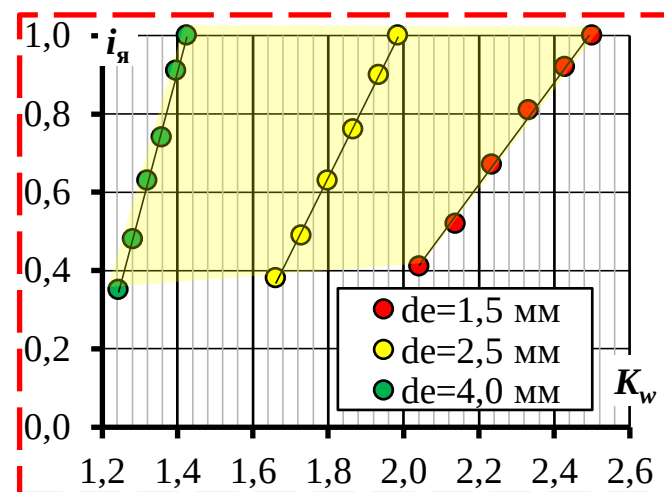


2. Залежність $f=f(K_w)$: $R>0,97$.

$$J_{\Delta P} = \left[91,41 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right) + 0,3247 \right] K_w - 38,554 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right)^{0,7666} \quad (39)$$

$$J_{\Delta P(i_{я}=1,0)} = 0,4012 \left(K_{w(i_{я}=1,0)} \right)^{0,1659} \quad (40) \quad R=0,9992$$

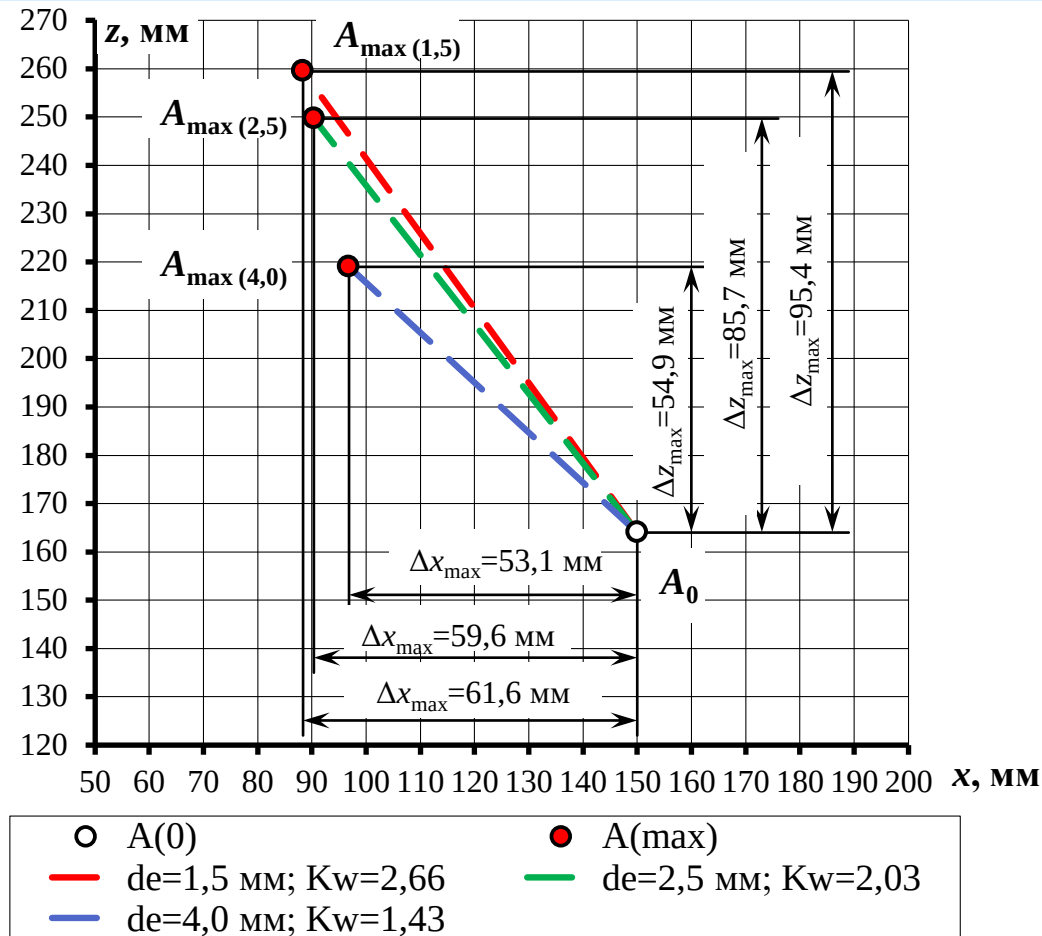
$$f = 0,4523 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right)^{-0,077} K_w + 1,3106 e^{-48,87 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right)} \quad (41)$$



3. Залежність $i_{я}=f(K_w)$: $R>0,98$.

$$i_{я} = \left[298,16 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right) + 0,9187 \right] K_w - 237,4 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right) + 2,003 \quad (42)$$

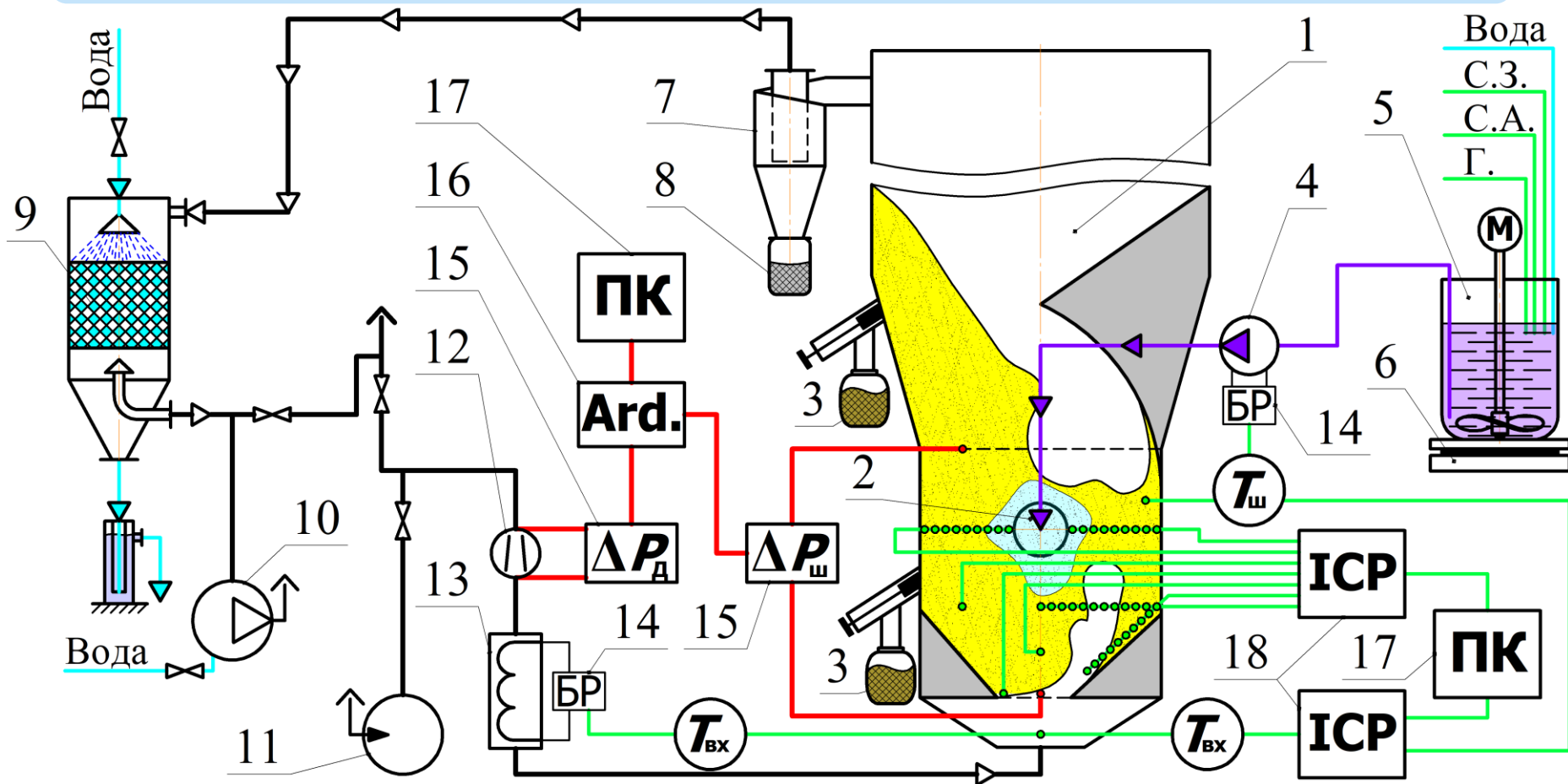
Рівняння (39), (41), (42) дійсні при $0,35 \leq i_{я} \leq 1,0$



1. Координати центру мас шару.

Таблиця 1 – Приведені швидкості переміщення центру мас шару при $i_{\text{я}} = 1,0$

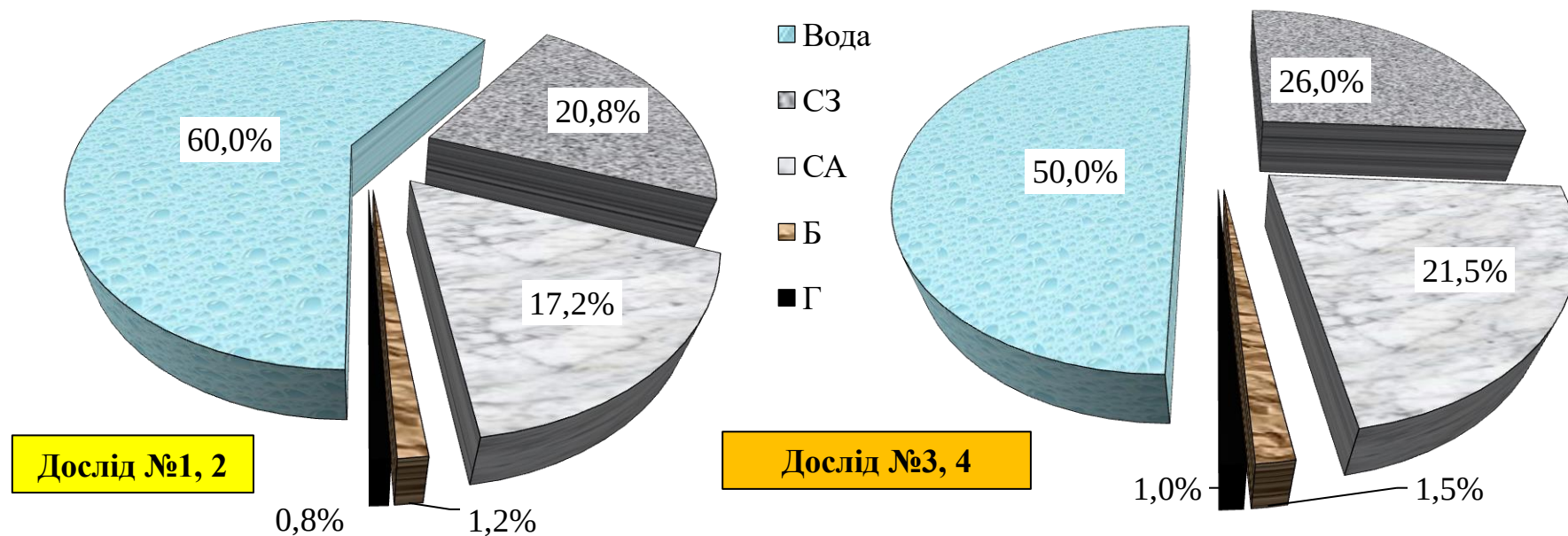
d_e , мм	a , $\text{м}^2/\text{м}^3$	K_w	$\tau_{\text{ц}}$, с	Δx_{max} , мм	Δz_{max} , мм	$w_{\text{ц.м.}(\uparrow)}$, м/с	$w_{\text{ц.м.}(\downarrow)}$, м/с
1,5	2400	2,66	0,32	61,6	95,4	0,47	1,42
2,5	1440	2,03	0,40	59,6	85,7	0,35	1,04
4,0	900	1,43	0,56	53,1	54,9	0,18	0,55



- 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)

1. Схема дослідної установки

Склад рідкої гетерогенної фази



1. Склад робочого розчину: дослід №1; дослід №2

Комп.	Хімічний склад сухих речовин, %(мас)						
	K	Ca	Mg	S	C	P	N
С.З.	24,4	11,8 – 14,14	5,61 – 9,05	0,64	2,99	2,44	–
С.А.	–	–	–	24	–	–	21

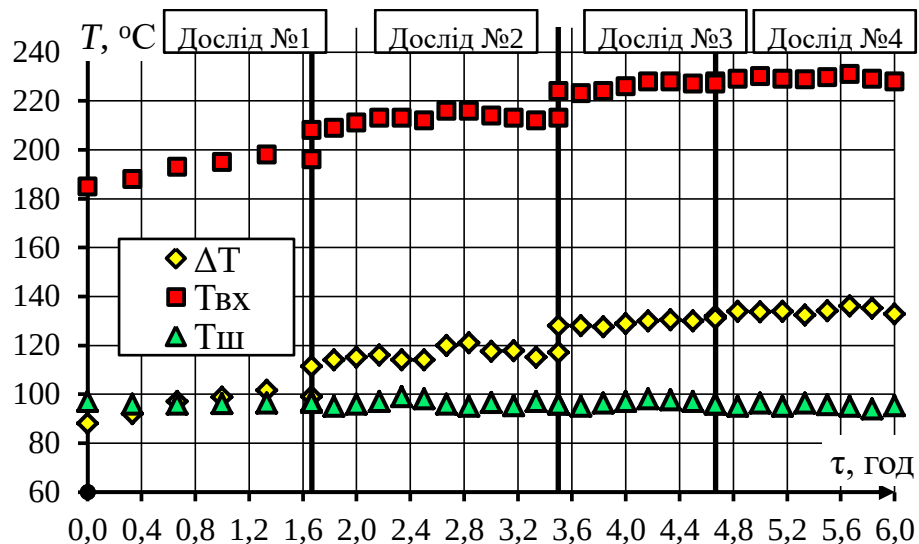
2. Хімічний склад соняшникової золи та сульфату амонію



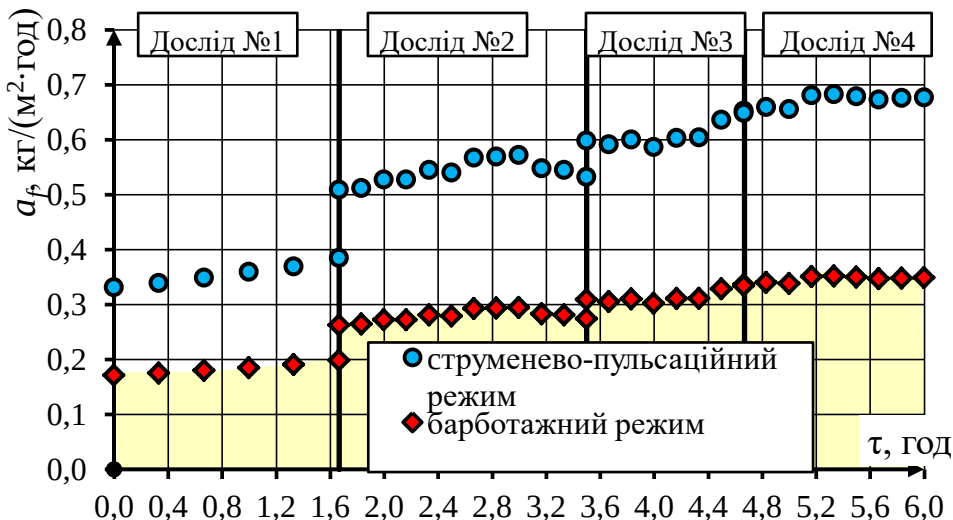
3. Фото початкових центрів грануляції
($d_e=1,85$)

**Кінетичні характеристики процесу грануляції інноваційних органо-мінеральних добрив
складу: $[Г]:[К]:[S]:[N]:[Ca]:[Mg]:[P]=[1,5]:[21,5]:[13,8]:[9,1]:[4,6]:[3,2]:[1,8]$
при застосуванні неоднорідного псевдозрідження у автоколивальному режимі**

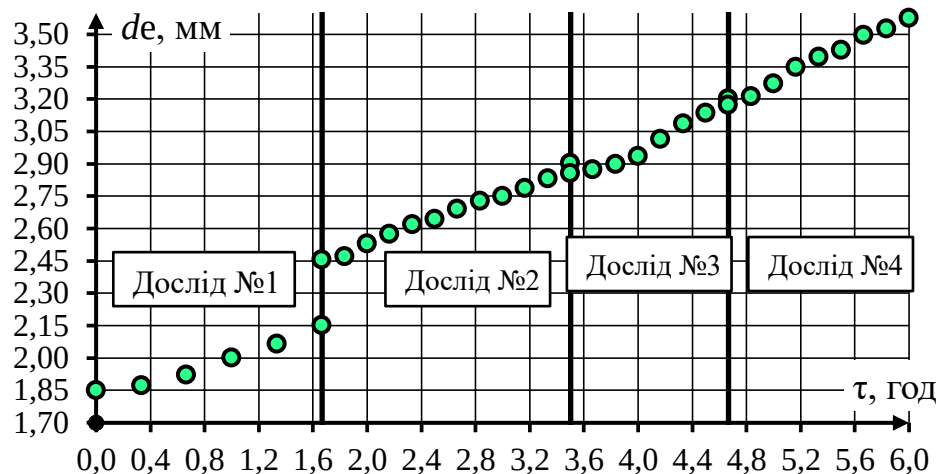
23



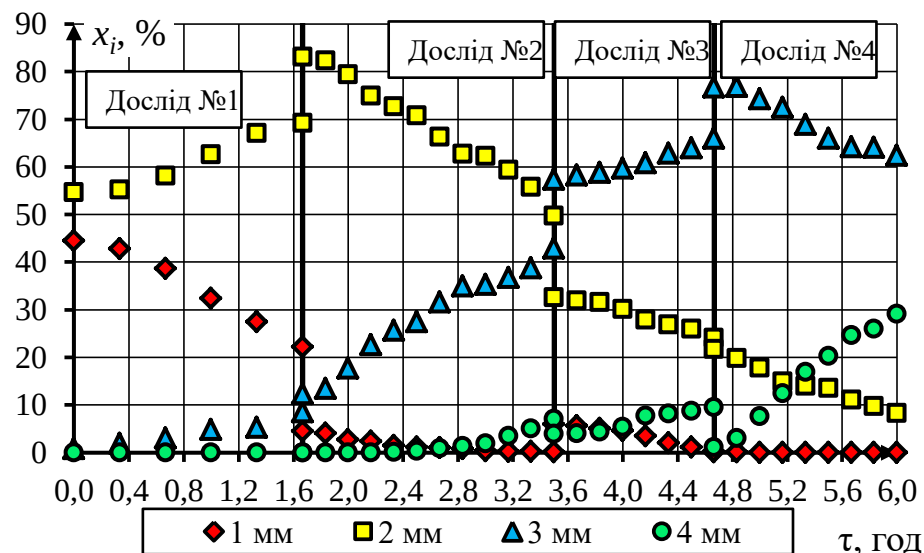
1. Динаміка зміни температур - $T=f(\tau)$.



2. Динаміка зміни питомого навантаження поверхні шару за вологою - $a_f=f(\tau)$.

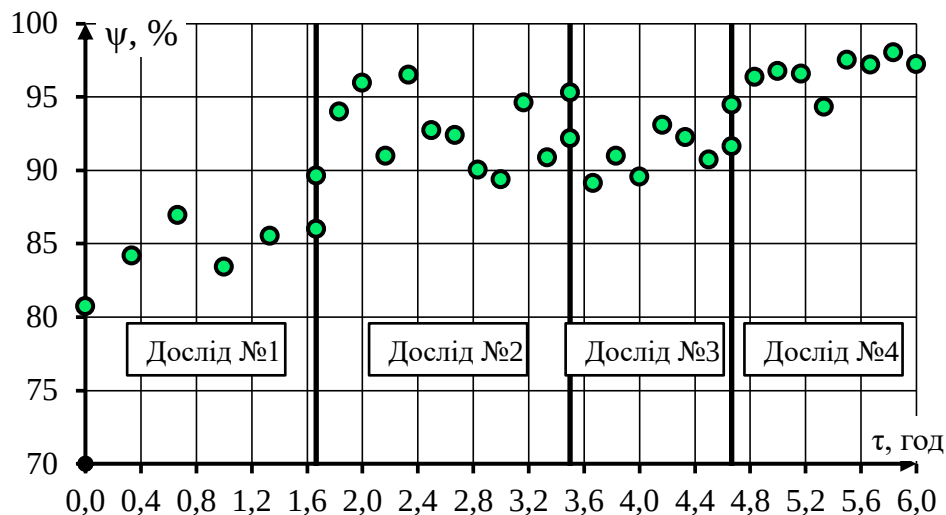


3. Динаміка зміни еквівалентного діаметра гранул - $d_e=f(\tau)$.

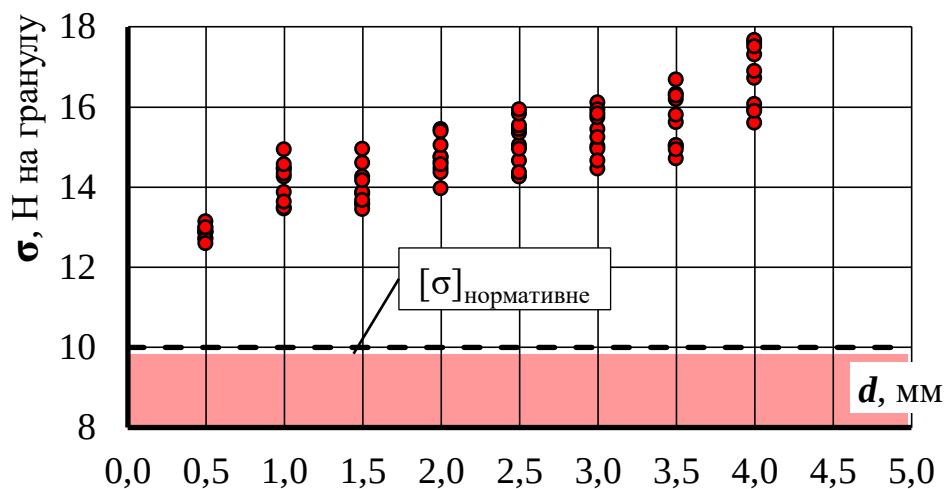


4. Динаміка зміни масових відсотків окремих фракцій $x_i=f(\tau)$.

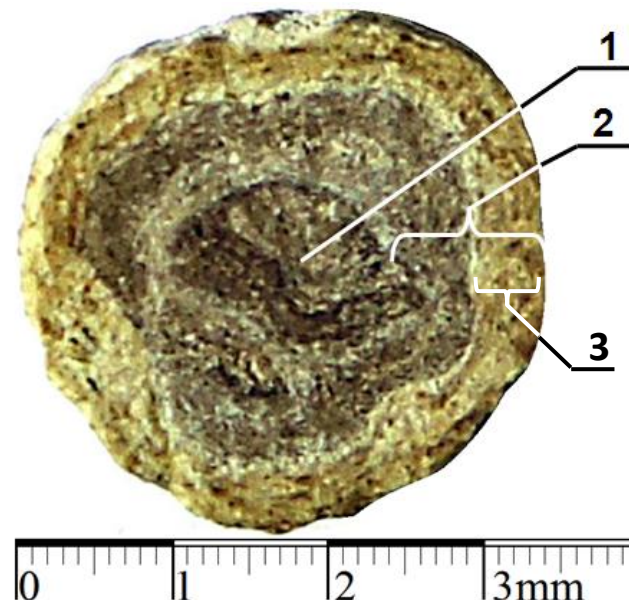
Кінетика грануляції інноваційних органо-мінерально добрив складу:
 $[Г]:[К]:[S]:[N]:[Ca]:[Mg]:[P]=[1,5]:[21,5]:[13,8]:[9,1]:[4,6]:[3,2]:[1,8]$



1. Динаміка зміни коефіцієнта грануляції - $\psi=f(\tau)$.

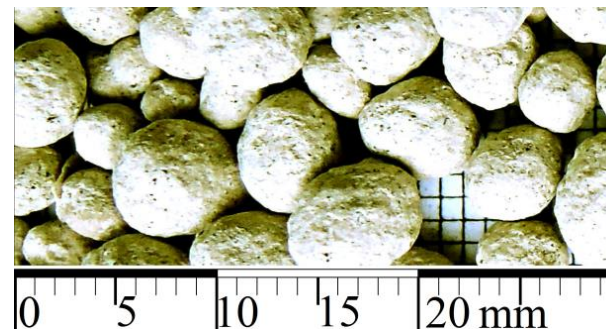


2. Міцність гранульованого продукту $[\sigma]=f(d)$

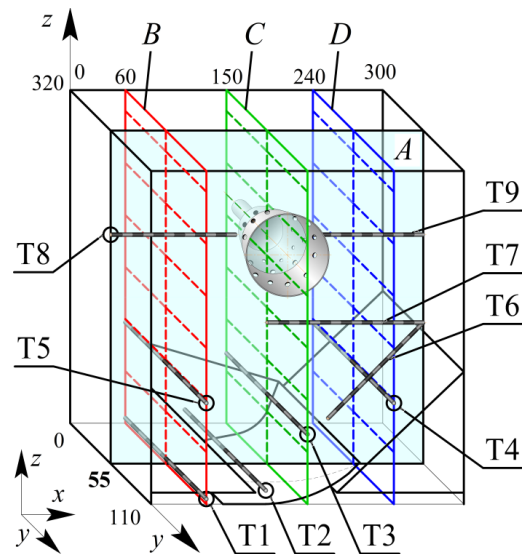


1 – центр грануляції; 2 – шарова структура композиту;
 3 – нашарування після дослідів 1...4

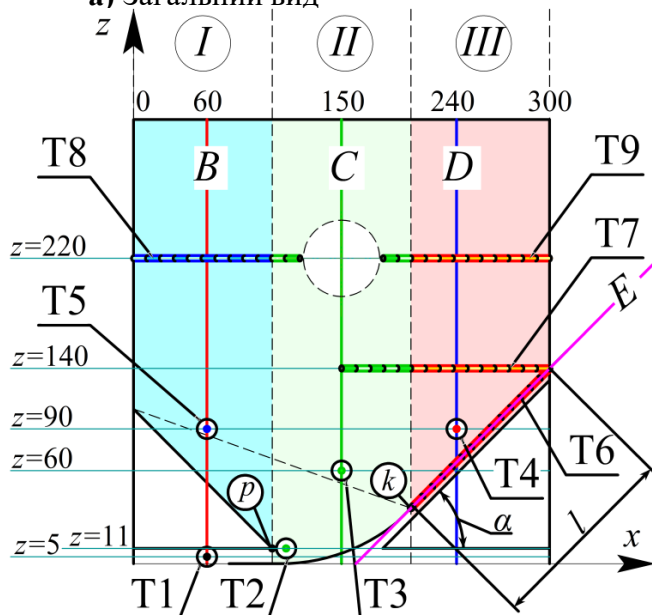
3. Фото зрізу гранули фракції +3,0 мм



4. Фото гранульованого продукту



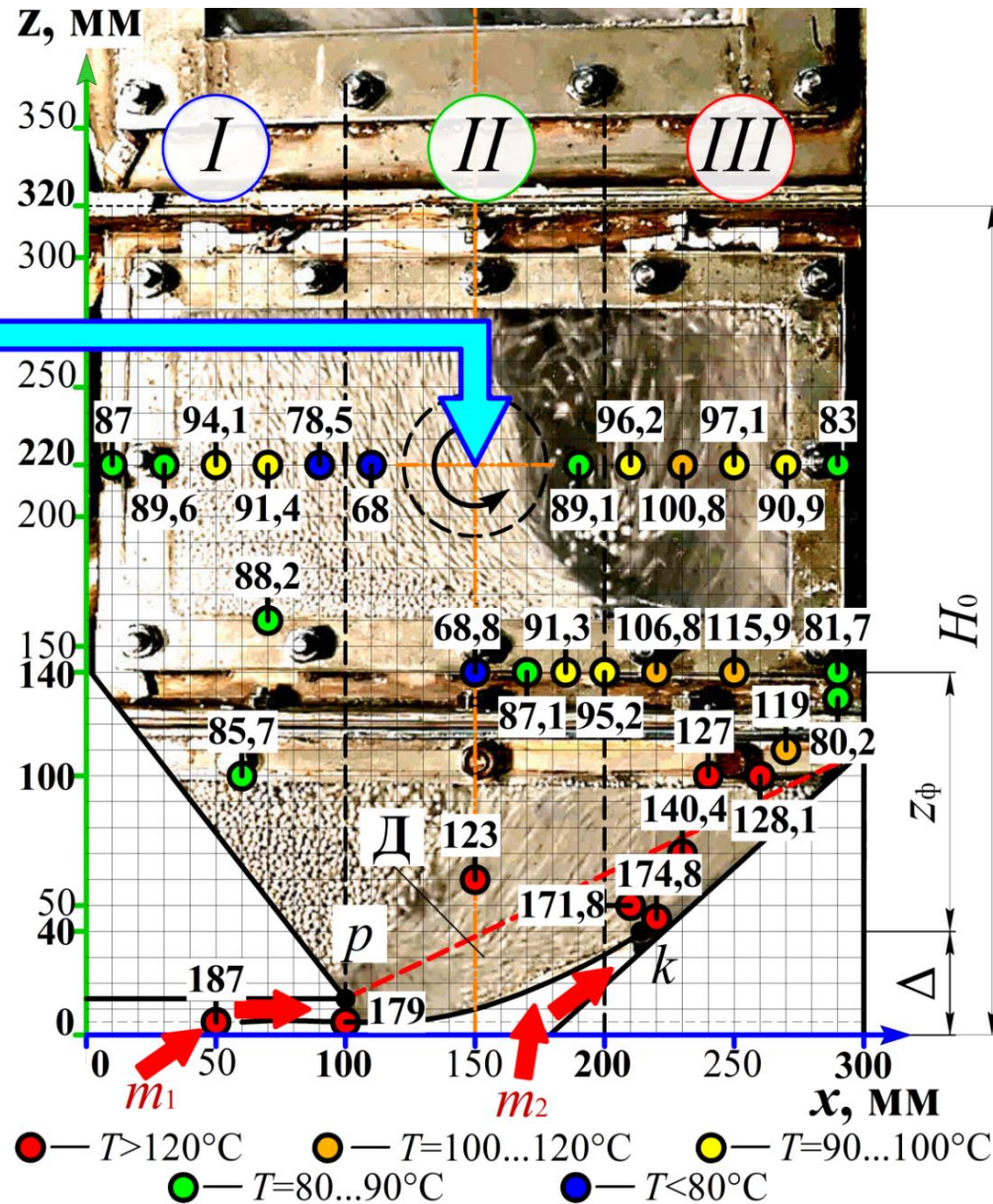
а) Загальний вид



б) Розміщення у площині А ($y=0,55\text{ мм}$)

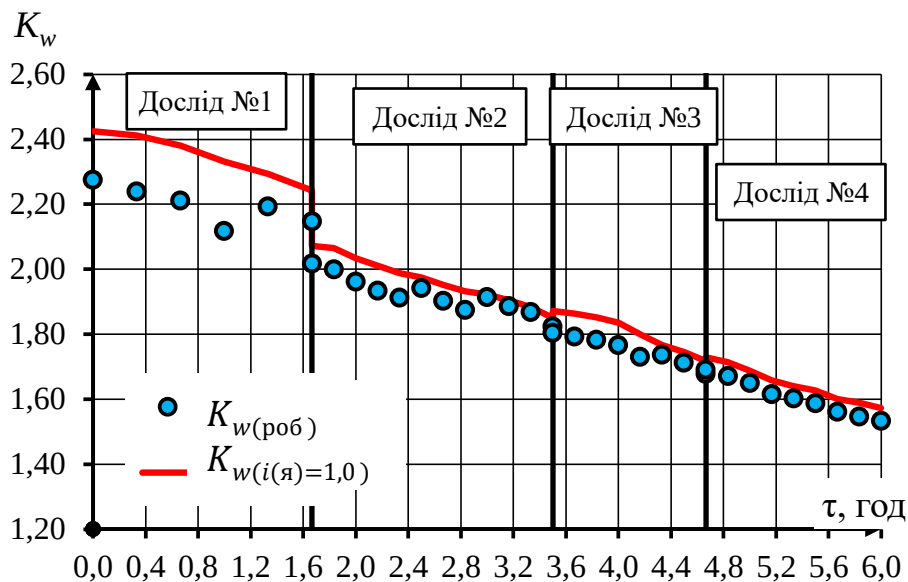
1. Схема розміщення термопар у камері гранулятора

Гетерогенна
рідка фаза

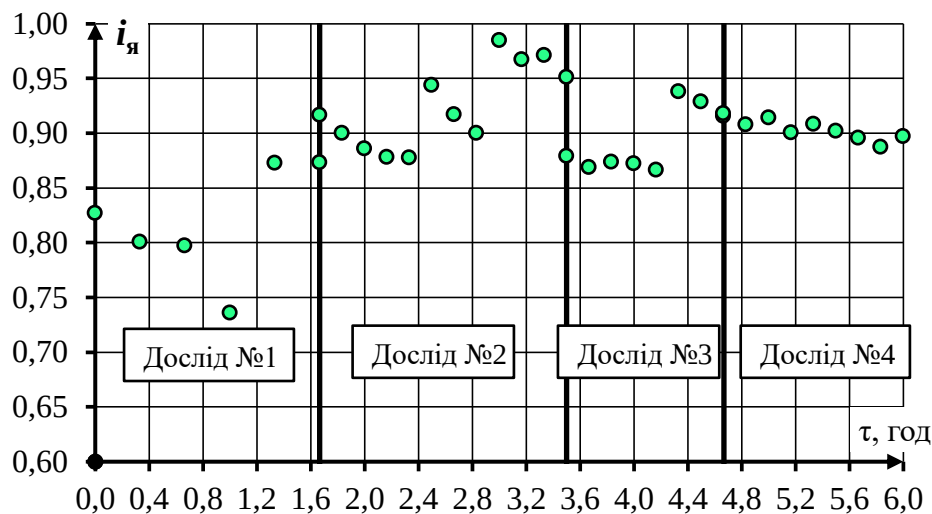


2. Накладання температурного поля на гідродинаміку в камері гранулятора ($\tau_i=0,75\tau_{\text{ц}}$; $f=1,785\text{ Гц}$)

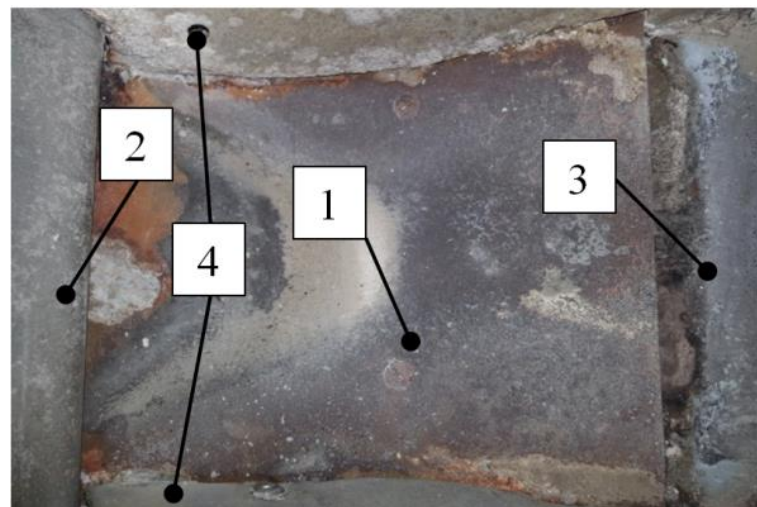
Перевірка параметрів неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі



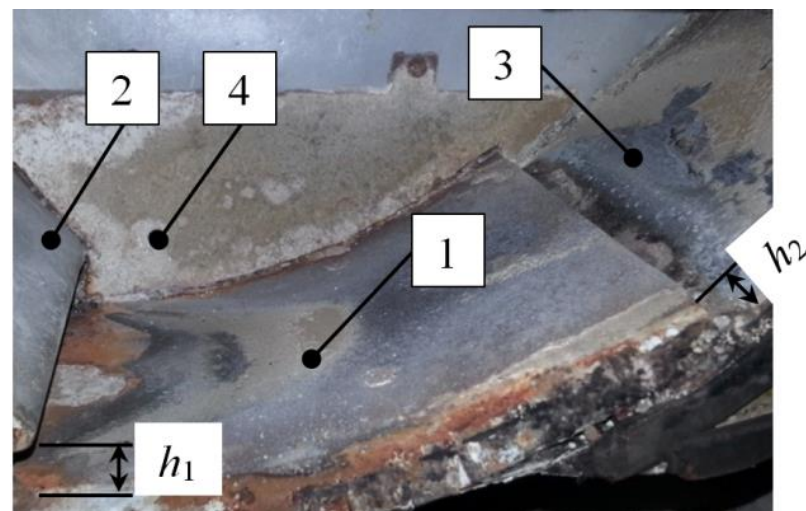
1. Динаміка зміни $K_w = f(\tau)$.



2. Динаміка зміни $i_{я} = f(\tau)$.



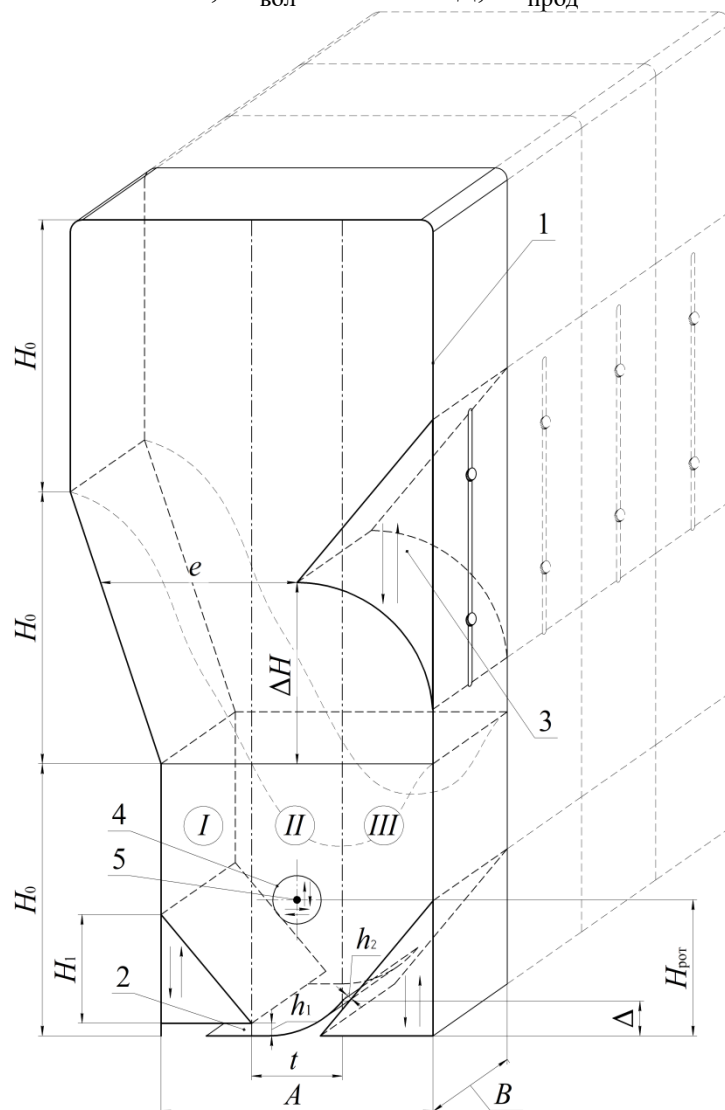
а) вид зверху



б) вид збоку

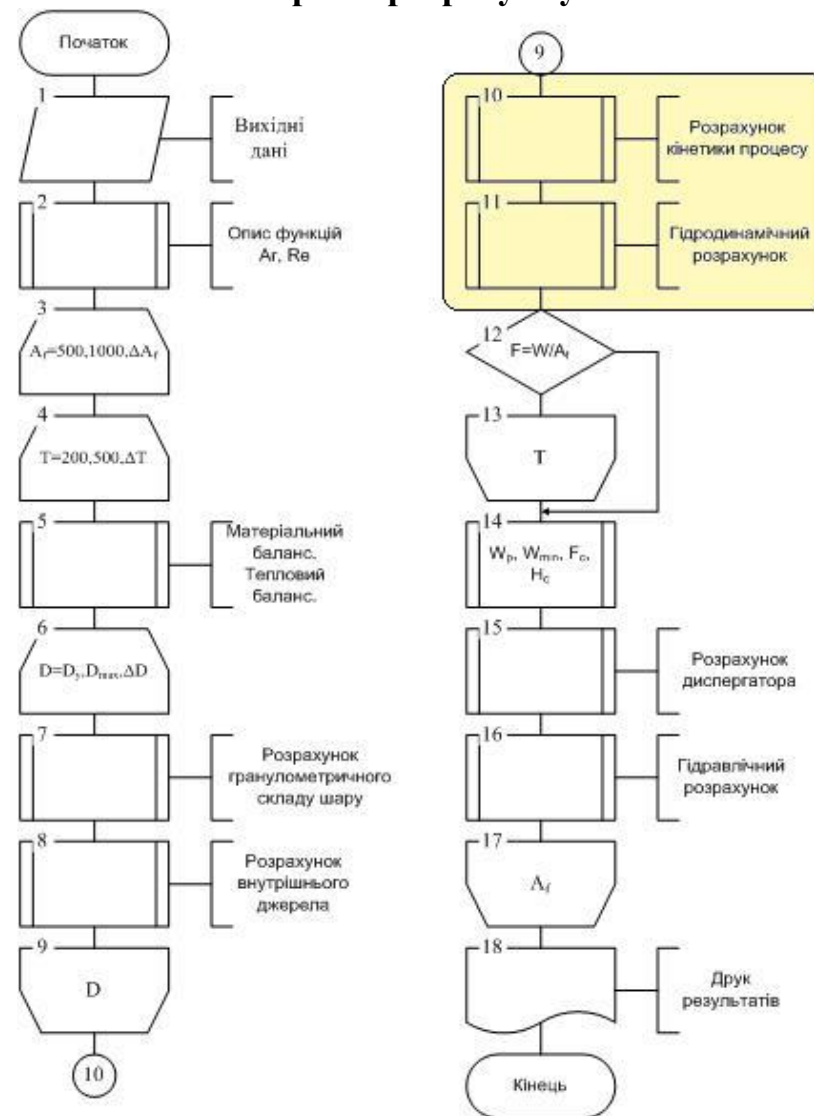
3. Фото ГРП після проведення ряду досліджень кінетики грануляції

Модуль: $A \times B \times H_0 = 0,9 \times 0,3 \times 0,9$ м; $d_e = 3,0$ мм;
 $\Delta T = 120^\circ\text{C}$; $M_{\text{вол}} = 170$ кг/год; $M_{\text{прод}} = 153$ кг/год



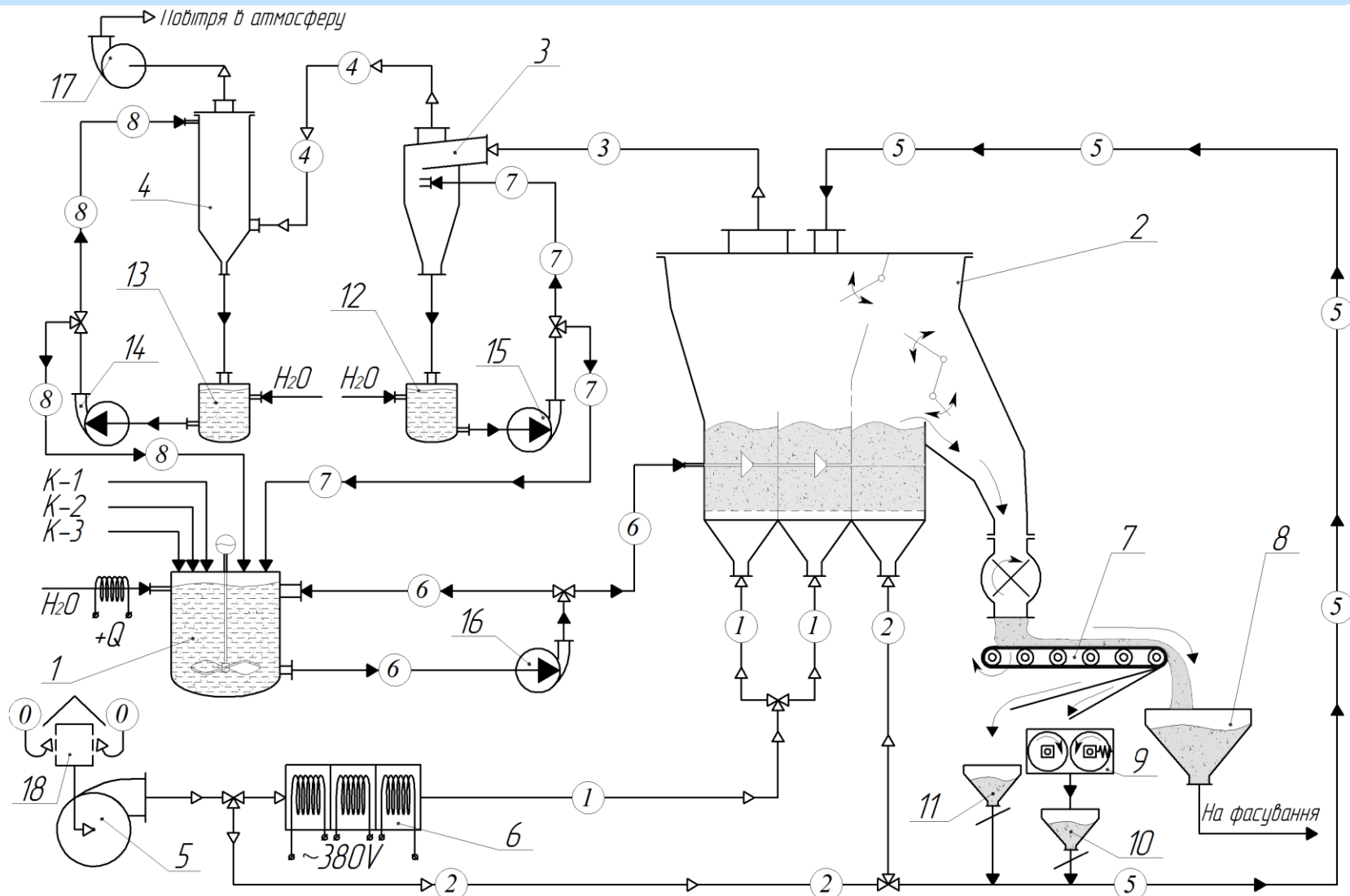
1 – камера гранулятора; 2 – ГРП; 3 – направляюча вставка;
 4 – механічний диспергатор; 5 – точка введення рідкої фази

Алгоритм розрахунку



$$d_6 = \frac{H_0 - z_\phi - \Delta}{1 + \frac{\pi}{4}}. \quad (43)$$

Технологічна схема виробництва органо-мінеральних добрив



1 – ємність для робочого розчину; 2 – гранулятор; 3 – мокрий циклон; 4 – скрубер; 5 – вентилятор ВцП (газодувка); 6 – теплогенератор; 7 – транспортер; 8 – бункер готового продукту; 9 – валкова дробарка; 10, 11 – бункери для нових центрів гранулювання; 12, 13 – ємності для циркуляційної води; 14, 15, 16 – насоси; 17 – вентилятор; 18 – фільтр.

Соціально-екологічна

Проведеними агродослідженнями встановлено, що застосування комплексних інноваційних гранульованих гумусованих органо-мінеральних добрив на основі екологічно чистої сировини сприятиме підвищенню врожайності сільсько-господарської культури на 30...40 % і одночасно зменшує в них вміст нітратів у 1,5...3 рази без порушення екологічної рівноваги при інтенсивному землекористуванні. Враховуючи це та за даними маркетингового відділу ВАТ «Азот» (м. Черкаси) споживачі готові купувати їх по ціні аміачної селітри (9300 грн/т).

Технічна

1. Підвищення продуктивності промислових грануляторів у 1,5 рази, що дозволить зменшити енергозатрати на реалізацію процесу гранулювання.
2. Підвищити надійність роботи гранулятора з псевдозрідженим шаром та у 2 рази зменшити термін роботи без промивки (1 раз на 14 днів).
3. Збільшення продуктивності промислового гранулятора при збереженні умов реалізації струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі шляхом застосування блочно-модульної схеми.
4. Розроблення технології одностадійного перероблення відходів хімічної та харчової промисловостей підвищить екологічну безпеку в промисловості.
5. Гранульовані органо-мінеральні добрива із переважною кількістю поживних та стимулюючих речовин органічного походження (зола соняшника) дозволить підвищити екологічність при їх застосуванні, що значно зменшить ризик забруднення водних ресурсів.

Економічна

Розрахунок окупності проекту та повернення інвестицій.

Станом на 23.05.2018 за даними ВАТ «Азот» м. Черкаси вартість 1 т сульфату амонію $\Pi_{\text{C.A.}} = 6400$ грн (230 \$).

Прогнозована ціна гранульованого гумусованого сульфату амонію – $\Pi_{\text{Г.C.A.}} = 9000$ грн/т (326 \$) тоді при обсязі виробництва за рік $V = 4000$ т прибуток становитиме:

$$\Pi = (\Pi_{\text{Г.C.A.}} - \Pi_{\text{C.A.}})V = (9000 - 6400)4000 = 10,4 \text{ млн грн (376,5 тис \$)}.$$

Прогнозований обсяг інвестицій для створення промислової установки, яка дозволяє отримувати гумусовані ОМД зі змінним вмістом поживних речовин, які є відходами хімічної та харчової промисловостей становить $I \approx 10$ млн. грн. Тоді окупність:

$$O = I/\Pi = 10 \cdot 10^6 / (10,4 \cdot 10^6) = 0,96 \text{ року} \approx 12 \text{ місяців}.$$

Указані розрахунки ґрунтуються на безперервній роботі модульного апарату. У разі непередбачуваних обставин, зупинок і простоювання виробництва повернення інвестицій можливе при виробництві 8 тис. т гумусованого гранульованого сульфату амонію.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі – підвищення ефективності процесу та надійності роботи апарата при одержанні 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 пробою газового струменя z_{ϕ} 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 агенту, 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_{γ} , 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 агенту 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 %), Са (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».

Акти впровадження

"Затверджую"
Директор ПП «АгроЗАР»
Гладун Л.П.
(підпис, м.п.)
"25" жовтня 2016 р.



АКТ

впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи Гайдая С.С.
"Гідродинаміка у грануляторах із псевдозрідженим шаром при одержанні
органо-мінеральних добрив"

Ми, що підписалися нижче, від Приватного підприємства «АгроЗАР»
(посадові особи від підприємства)
Директор Гладун Любов Павлівна, від НТУУ "КПІ" – завідувач кафедри
машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв (МАХНВ),
науковий керівник Корнієнко Я.М. та аспірант кафедри МАХНВ Гайдай С.С.
підтверджуємо, що в період
2014-2015 р. на пілотній установці проводились тестові дослідження процесу
гранулоутворення нових комплексних орґано-мінеральних добрив у
псевдозрідженому шарі при зневодненні композитних розчинів, що містили
кістяне борошно, сульфат амонію, хлорид калію та гумінові речовини.

За результатами досліджень визначено технологічні параметри процесу
одержання сфероподібних гранул, складом Г:Р:Са:Н:К=1:10:19:11:2, який
визначався замовником, розміром 1,8÷4,5 мм, міцністю $\sigma \geq 10$ Н на гранулу із
рівномірним розподіленням компонентів по всьому об'єму.

Застосування струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження
дозволило збільшити питоме навантаження поверхні шару за вологою до
 $a_f = 0,8 \div 0,9$ кг_{вол.}/(м²·год), що у 2 рази перевищує цей показник для
барботажного режиму псевдозрідження. При цьому, коефіцієнт
гранулоутворення становив $\psi \geq 90\%$.

У подальшому результати досліджень будуть використані при розробці
промислової установки для виробництва гуміново-мінеральних добрив із
використанням поживних речовин мінерального та органічного походження.

Цей акт не є підставою для фінансових розрахунків

Від ПП «АгроЗАР»
(назва підприємства)
ЄДРПОУ 39975939

с. Городок, вул. Барона Штейнгеля 145В
Рівненський район, Рівненська область

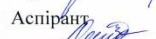
Директор

 Гладун Л.П.

Від НТУУ "КПІ"

Завідувач кафедри
машин та апаратів
хімічних і нафтопереробних
виробництв, науковий керівник

 Я.М. Корнієнко

Аспірант
 С.С. Гайдай

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Ю.І. Якименко
"15" листопада 2017 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертації Гайдая Сергія Сергійовича
«Гідродинаміка у грануляторах із псевдозрідженим шаром
при одержанні орґано-мінеральних добрив»,

що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Цим актом засвідчується, що дисертація асистента кафедри машин та апаратів
хімічних і нафтопереробних виробництв КПІ ім. Ігоря Сікорського
Гайдая Сергія Сергійовича «Гідродинаміка у грануляторах із псевдозрідженим шаром
при одержанні орґано-мінеральних добрив», що представлена на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук, відповідає напрямку наукових досліджень КПІ ім.
Ігоря Сікорського та наукової роботи кафедри машин та апаратів хімічних і
нафтопереробних виробництв і безпосередньо пов'язана з держбюджетною темою
№ 2543-п на тему «Розробка високоефективного процесу та технологічних засад
одержання екологічно чистих азотно-кальцієво-гуміново-сірковмісних добрив»,
№ державної реєстрації 0112U001580.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі під
час проведення лекційних та практичних занять для напрямку підготовки 133:
Галузеве машинобудування для спеціалізації 05050315 – «Інжиніринг, комп'ютерне
моделювання та проектування обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв»
із дисципліни «Процеси, апарати і машини галузі» (з кредитних модулів:
«Гідромеханічні та механічні процеси», «Масообмінні процеси»).

Також результати дисертаційної роботи використовуються при дипломному
проектуванні, проведенні наукових досліджень та підготовці дисертацій магістрів на

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.

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.
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.
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.

Статті у фахових виданнях:

1. 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*)
2. 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*).
3. 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*).
4. 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.
5. 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.

Патенти на корисну модель:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Патент № 100309 Україна МПК (2015.01) C05G 1/00. Спосіб виготовлення гранульованого органо-мінерального добрива / Любека А. М., Корнієнко Я. М., **Гайдай С. С.**, Мартинюк О.В.; Заявл. 12.12.2014; Опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14/2015.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

1. Корнієнко Я. М. Підвищення ефективності псевдозрідження при застосуванні газорозподільного пристрою щільного 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.
2. 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.
3. Корнієнко Я. М. Закономірності утворення органомінерально-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.
4. Корнієнко Я. М. Кінетика процесу створення органомінерально-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.
5. Корнієнко Я. М. Закономірності утворення органомінерально-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.
6. 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.
7. 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.
8. Корнієнко Я. М. Апроксимація функції масового розподілу гранул за розмірами при грануляції 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, 18-19 квітня 2016 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2016. – С. 6-9.
9. 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.
10. 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.

Статті у інших виданнях:

1. 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, EJI, RePEc, InfoBase Index, IIOR, CiteFactor, Open J-Gate).
2. 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.
3. 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.

**Дякую за
увагу!**

Зауваження у відгуках на автореферат дисертації Гайдая С. С.

1. Інститут газу Національної академії наук України, м. Київ

Відгук підписав пров.н.с., д.т.н., професор Хвастухін Ю. І. Відгук позитивний, є зауваження:

1. У авторефераті дисперсний склад шару характеризується через еквівалентний діаметр, але не наводиться розподілення маси гранул за діаметром.
2. Які вимоги до дисперсного складу нерозчинних домішок, що додаються до базового розчину сульфату амонію для одержання пошарової структури гранул, неведеної на рисунку 18 у авторефераті?

2. Національного університету «Львівська політехніка», м. Львів

Відгук підписав завідувач кафедри «Хімічної інженерії», д.т.н., професор Атаманюк В. М. Відгук позитивний, є зауваження:

1. У чому полягає відмінність струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження від барботажного чи фонтануючого?
2. Чи можна використовувати запропоновану методику оцінки якості для однорідного режиму псевдозрідження?

3. Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ

Відгук підписав член.-кор. НАН України, д.т.н., професор Авраменко А. О. Відгук позитивний, є зауваження:

1. Як визначалося співвідношення масових витрат зріджувального агенту, який підводиться до першої та другої щілин (рисунок 1 у авторефераті)?
2. На рисунку 4 в авторефераті бажано вказати критичну швидкість псевдозрідження та пояснити наявність екстремумів у області 1 та 2.

4. Національний університет харчових технологій, м. Київ

Відгук підписав завідувач кафедри «Технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування ННІТІ ім. І. С. Гулого», д.т.н., професор Мирончук В. Г. Відгук позитивний, є зауваження:

1. Потребує пояснень, яким чином надані автором рекомендації щодо усунення ризиків застійних зон використовуються за умов зміни геометричних розмірів апарату, тобто, як усуваються проблеми масштабного переходу від експериментальної установки до промислового апарату.

5. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

Відгук підписав завідувач кафедри «Інтегрованих технологій, процесів та апаратів», д.т.н., професор Вєд В. Є. Відгук позитивний, є зауваження:

1. У роботі наведено приклад отримання органо-мінеральних добрив при грануляції розчинів сульфату амонію з домішками гумінових речовин та соняшникової золи. Чи можна застосовувати цей спосіб грануляції у разі використання інших речовин?
2. У формулі (8), ст. 8, не зрозуміло які параметри враховано при визначенні втрат тиску на подолання сил тертя газової та твердої фаз.

6. Інститут газу Національної академії наук України, м. Київ

Відгук підписав заступник директора, д.т.н. Жук Г. В. Відгук позитивний, є зауваження:

1. У розділі 4, рис. 10, наведено схему пілотної установки для процесу грануляції із застосуванням введення рідкої фази всередину шару зернистого матеріалу. Чи можна застосовувати запропонований гідродинамічний режим при іншому способі введення рідкої фази (над шаром механічною форсункою тощо)?
2. Як зміниться температура вкінці першої та третьої стадій, відповідно до фізичної моделі, наведеної на рис. 2?

7. Інститут біологічної хімії ім. Ф. Д. Овчаренка Національної академії наук України, м. Київ

Відгук підписав директор Інституту біологічної хімії ім. Ф. Д. Овчаренка Національної академії наук України, д.т.н., с.н.с. Прокопенко В. А. Відгук позитивний, є зауваження:

1. Яким чином визначалося співвідношення гумінових речовин у гранульованому продукті?
2. Як визначалась пошарова структура гранульованого продукту?

8. Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ

Відгук підписали гол.н.с., д.т.н., с.н.с. Давиденко Б. В. та пр.н.с., д.т.н., с.н.с. Сорокова Н. М. Відгук позитивний, є зауваження:

1. В авторефераті відсутня інформація стосовно можливості застосування рівняння (9) для розрахунку динаміки зміни загальної порозності шару в апараті у випадку зміни поперечних розмірів камери гранулятора у зоні газорозподільного пристрою?
2. По мірі збільшення розміру гранул та їх зневоднення сила тертя між гранулами буде змінюватись. З автореферату неясно, як це враховувалось при розрахунку втрат тиску на тертя.

9. Національний університет харчових технологій, м. Київ

Відгук підписав завідувач кафедри «Машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв», д.т.н., професор Гавва О. М. Відгук позитивний, є зауваження:

1. Чи можна застосовувати запропонований струменево-пульсаційний режим коли висота шару дорівнює висоті пробю факела?
2. Як впливає конструкція газорозподільного пристрою та камери гранулятора на умови реалізації струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі?

10. Інституту колоїдної хімії та хімії води ім. А. В. Думанського Національної академії наук України, м. Київ

Відгук підписав пров.н.с. відділу хімії, фізики та біології води, д.х.н., с.н.с. Кучерук Д. Д. Відгук позитивний, є зауваження:

1. З автореферату не зрозуміло яким чином визначалась швидкість початку псевдозрідження (критична швидкість) в умовах двоканального асиметричного введення зріджувального агенту.
2. Рисунок 19 на стор. 15 пересичений графічними і цифровими позначеннями, тому сприйняття наведеної на ньому інформації ускладнене.

Офіційний опонент, д.т.н., професор Нагурський Олег Антонович

1. У описі фізичної моделі процесу грануляції вказано, що частинки рухаються із швидкістю, що перевищує швидкість пневмотранспорту (с.57). Не зрозуміло, на чому ґрунтується таке твердження, адже в умовах пневмотранспорту проходить винос частинок з апарату?
2. Яким чином визначався об'єм пустот у різних зонах шару в певний момент часу, якщо аналіз проводився із фотофіксаціями, отриманими через певні проміжки часу?
3. Розроблення математичної моделі неоднорідного струменево-пульсаційного режиму проведене на основі аналізу експериментальних даних, отриманих для моно шару частинок різних розмірів. На скільки адекватно дана модель зможе описувати гідродинаміку полідисперсного шару?
4. У п.4.3. (с.140) вказані координати характерної точки в якій знімалася температура шару для регулювання процесу грануляції, а у таблиці експериментальних даних вона відсутня.
5. Чим обґрунтовано вибір початкової температури теплоносія 187 °С, враховуючи використання для грануляції добрив органічні речовини, нестійкі до дії високих температур?
6. На чому ґрунтується вибір ширини камери гранулятора B у робочій зоні // як $1/3$ від загальної ширини гранулятора?

Офіційний опонент, д.т.н., с.н.с. Петрова Жанна Олександрівна

1. Дослідна установка є прототипом промислової чи ні? Якщо так, то якої?
2. В роботі зазначена інтенсифікація масообмінних процесів у 1,5 рази, але не наведено реальні енергетичні показники та їх порівняння з існуючими в подібних апаратах.
3. Немає аналізу питання стану в світі.
4. Експериментально визначено параметри досягнення індексу динамічної якості гідродинаміки неоднорідному псевдозрідженні в автоколивальному режимі $i_{\text{я}} \rightarrow 1,0$ при значенні висоти нерухомого шару $H_0 = 0,32$ м. Як можна визначити ці параметри при збільшенні висоти початкового шару хоча б у 1,5 рази?
5. Автоколивальний режим псевдозрідження також досягається при барботажному та поршневному режимах псевдозрідження із застосуванням перфорованих, ковпачкових або колосникових газорозподільних пристроїв. Чому для створення струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження застосовано ГРП щілинного типу?
6. Бажано надати більш повне пояснення різкому збільшенню загальної висоти шару в кінці другої стадії циклу пульсацій, рис. 3.14, 3.24 та 3, 34.
7. Було б бажано встановити вплив якості гідродинаміки при неоднорідному автоколивальному режимі псевдозрідження ($i_{\text{я}} \rightarrow 1,0$) на коефіцієнт грануляції при частоті пульсацій більше 3 Гц.
8. Струменево-пульсаційний режим псевдозрідження супроводжується винесенням значної кількості зернистого матеріалу за межі початкового шару, що призводить до суттєвого зменшення поверхні міжфазового контакту, тому доцільно визначати цю межу у вигляді $\Delta M_{\text{ш}}/M_0 \leq 0,5$.
9. Автором експериментально встановлено, що швидкість газу в щілинах ГРП $w_{\text{щ(ГРП)}} \geq 30$ м/с. Як забезпечити виконання цієї вимоги при $d_e \leq 1,5$ мм?
10. При заданому способі введення рідкої фази в апарат доцільно було б обґрунтувати розмір газової бульбашки та частоту її проходження через зону зрошення при яких забезпечується достатня поверхня зернистого матеріалу в цій зоні, що запобігатиме локальному перезволоженню та утворенню агломератів.
11. На рис. 3.14 а і б має місце неспівпадіння індукційного періоду τ_1 , впродовж якого відбувається зростання газової бульбашки до критичного розміру.