

Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України

Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Гайдай Сергій Сергійович

УДК 628.5:66.002.8

Дисертація

**Гідродинаміка у грануляторах із псевдозрідженим шаром
при одержанні органо-мінеральних добрив**

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за
спеціальністю 05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

_____ С.С. Гайдай

Науковий керівник Корнієнко Ярослав Микитович д.т.н., проф.

Київ – 2018

АНОТАЦІЯ

Гайдай С.С. Гідродинаміка у грануляторах із псевдозрідженим шаром при одержанні органо-мінеральних добрив. – Кваліфікаційна наукова праця 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.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності процесу гранулювання комплексних органо-мінеральних добрив шляхом застосування неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі та розробленню методики для розрахунку промислового апарата.

В існуючих способах зневоднення та грануляції рідких систем у апаратах із псевдозрідженим шаром використовується барботажний або фонтануючий режими. При цьому, через мінімальну різницю швидкостей газового теплоносія і твердих частинок основний опір процесу масообміну зосереджений у дифузійному шарі, розташованому безпосередньо біля поверхні твердих частинок. Підвищення інтенсивності дифузійно-контрольованих процесів можливе при реалізації пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі, який забезпечує суттєві збільшення відносної швидкості газового теплоносія та дисперсної фази і, відповідно, зменшенню дифузійного опору масопередачі.

У літературі відсутні відомості щодо дослідження струменево-пульсаційного псевдозрідження та переходу його в автоколивальний режим, який би забезпечив стабільну кінетику грануляції при зневодненні рідких гетерогенних систем у апараті із псевдозрідженим шаром, що підтверджує актуальність теми дисертації.

У роботі науково обґрунтовано принципи взаємодії газової фази із зернистим матеріалом при струменево-пульсаційному псевдозрідженні у

автоколивальному режимі, що супроводжується переміщенням у надшаровий простір більше 50 % від маси початкового шару за один цикл із частотою пульсацій 1,6...1,8 Гц.

Для реалізації цих умов було розроблено оригінальну конструкцію камери гранулятора та газорозподільного пристрою (ГРП), що забезпечує двох-канальне підведення теплоносія до апарату.

Експериментально встановлено, що досягнення стабільного автоколивального режиму неоднорідного псевдозрідження у розробленому апараті відбувається при нерівномірному збільшенні порозності матеріалу від $\varepsilon_I = 0,4$ (зона I) до $\varepsilon_{II} = 0,63$ (зона II) та $\varepsilon_{III} = 0,8$ (зона III) внаслідок спрямованого переміщення зернистого матеріалу із зон II та III в надшаровий простір зони I. Це забезпечує досягнення максимальних миттєвих значень потенційної енергії шару зернистого матеріалу, які в 1,7...2,0 рази перевищують цей показник у стані рівноваги на початковій та кінцевій стадії циклу пульсацій.

Таким чином, у запропонованому двох-канальному асиметричному струменевому введенні зріджувального агента в камеру гранулятора, споряджену в надшаровому просторі розподільником, відбувається коливальне переміщення центру мас зернистого матеріалу, що виражається зміною його координат у вертикальній фронтальній площині.

У роботі розвинуто відому математичну модель переміщення центру мас шару зернистого матеріалу та запропоновано оригінальну методику вимірювання загального тиску в шарі із застосуванням комп'ютеризованого комплексу, який дозволяє отримувати дані із частотою 63 Гц та точністю ± 1 Па.

Розв'язок математичної моделі неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі проводився із використанням експериментально одержаних залежностей циклічної зміни порозності шару в різних зонах апарату. Це дозволило прогнозувати частоту пульсацій, динаміку зміни загального тиску в шарі, а також загальну висоту псевдозрідженого шару

із коефіцієнтом кореляції $R > 0,94$ при різних значеннях числа псевдозрідження в інтервалі зміни дисперсного складу шару $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм.

Теоретично обґрунтовано та експериментально встановлено, що створення автоколивального режиму неоднорідного псевдозрідження, який супроводжується переміщенням до 60 % маси матеріалу в надшаровий простір відносно початкової за один цикл визначається двох-канальним способом введення зріджувального агента зі швидкістю газу в щілинах ГРП $w_{щ} \geq 30$ м/с за нормальних умов при заданих співвідношеннях масових витрат в них.

Узагальнення експериментальних даних проведено у вигляді функціональних залежностей частоти пульсацій шару зернистого матеріалу та індексу перемішування від числа псевдозрідження і дисперсного складу шару із $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм при застосуванні струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі із відношенням висоти пробою факела z_{ϕ} до висоти нерухомого шару $H_0 - z_{\phi}/H_0 < 0,5$.

Запропоновані критерії оцінки якості гідродинаміки в автоколивальному режимі струменево-пульсаційного псевдозрідження у вигляді функції витрат якості гідродинаміки та індексу динамічної якості гідродинаміки, що дозволяє визначити технологічні параметри, при яких мінімізується ризик утворення застійних зон на робочих поверхнях ГРП, що підвищує стійкість процесів грануляції із застосуванням теплоносія з температурою більше 300 °С.

Визначено умови існування автоколивального режиму струменево-пульсаційного псевдозрідження, які забезпечують індекс динамічної якості гідродинаміки $i_{я} \geq 0,85$ для частинок матеріалу в діапазоні значень еквівалентного діаметра $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм та встановлено функціональну залежність цього параметра від гідродинамічного режиму руху теплоносія в щілинах ГРП, числа псевдозрідження та дисперсного складу шару зернистого матеріалу.

Перевірка достовірності фізичної та математичної моделей проводилась на пілотній установці при дослідженні кінетики процесу гранулювання органічно-мінеральних добрив на основі сульфату амонію, соняшникової золи та гумінових домішок. Результати досліджень показали, що застосування

неоднорідного псевдозрідження у автоколивальному режимі дозволяє, щонайменше, у 1,5 рази підвищити питоме навантаження поверхні шару за вологою, порівняно із барботажем режимом при коефіцієнтах грануляції $\psi \geq 90 \%$. Одержаний гранульований продукт має сферо-подібну форму із пошаровою структурою з еквівалентним діаметром 2,5 мм та міцністю 16 Н на гранулу, що в 1,6 рази перевищує діючий норматив. При цьому загальна висота шару пульсаційно збільшувалась у 1,7...2,0 рази, відносно висоти нерухомого шару H_0 із відповідним пропорційним збільшенням потенційної енергії. При цьому досягнуто коефіцієнт переміщення шару в одному циклі – 70 % та індекс динамічної якості гідродинаміки $i_{я} \geq 0,85$. Достовірність розробленого методу оцінки якості гідродинамічного режиму псевдозрідження підтверджено відсутністю застійних зон матеріалу на робочих поверхнях ГРП при застосуванні в реальних процесах грануляції теплоносія із температурою до 300 °С.

Експериментально визначено конфігурації температурного поля при проведенні реального процесу грануляції та встановлено, що запропонований спосіб взаємодії газового теплоносія із зернистим матеріалом при реалізації струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі дозволяє суттєво збільшити зону інтенсивного тепломасообміну зі збереженням рушійної сили по висоті апарату та сприяє підвищенню процесів, які супроводжуються наявністю фазових переходів.

Обґрунтовано технологічну схему промислової установки продуктивністю 500 кг/год по гранульованому продукту для одержання органо-мінеральних добрив із застосуванням оригінальної конструкції промислового апарату за модульним принципом.

Удосконалено методику розрахунку гранулятора органо-мінеральних добрив при зневодненні водяних розчинів сульфату амонію із домішками соняшникової золи та гумінових компонентів при застосуванням промислових електрокалориферів для нагріву теплоносія.

Ключові слова: псевдозрідження, гідродинаміка, струменево-пульсаційний автоколивальний режим, грануляція, органо-мінеральні добрива.

SUMMARY

Haidai S.S. Hydrodynamics in granulators with a fluidized bed when obtaining organic-mineral fertilizers. – Qualification scientific work manuscript copyright.

Thesis for a candidate degree in technical sciences, specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to efficiency increase of the granulation process of complex organic-mineral fertilizers by applying the inhomogeneous fluidization in an auto-oscillating mode and development of method for calculation the industrial apparatus.

In existing methods of dehydration and granulation of liquid systems in apparatuses with fluidized bed the bubbling or the fountaining modes are used. The main resistance of the mass transfer process is concentrated in the diffusion layer, located directly near the surface of solid particles due to the minimum difference in the velocity of gas and solid particles. The increasing of intensity of diffusion-controlled processes is possible with the implementation of the jet-pulsation fluidization in an auto-oscillating mode which provides significant increasing of the relative velocity of the gas phase and the dispersed solid phase that accordingly is decreasing the diffusion resistance of mass transfer.

There is no information in the literature about the investigations of jet-pulsating mode of fluidization and about its transition into auto-oscillating mode that could provide a stable kinetics of dehydration and granulation of liquid heterogeneous systems in a fluidized bed apparatus. This confirms the relevance of the topic of the dissertation.

In the work is scientifically substantiated the principles of interaction of the gas phase with the granular material during the jet-pulsating fluidization in an auto-oscillating mode that is accompanied by displacement of more than 50 % of mass to the space above the initial layer in a single cycle with a frequency of pulsatings in range from 1,6 to 1,8 Hz.

In order to realize these conditions, an original design of the granulator chamber and gas distributing device (GDD) was developed. It provides a two-channel supplying of coolant to the apparatus.

It has been experimentally established that the achievement of a stable auto-oscillating mode of non-uniform fluidization in the developed apparatus this occurs when there is non-uniform increasing of a bed porosity from $\varepsilon_I = 0,4$ (zone *I*) to $\varepsilon_{II} = 0,63$ (zone *II*) and $\varepsilon_{III} = 0,8$ (zone *III*) due to the directed movement of the granular material from zones *II* and *III* into the surface over zone *I*. This ensures the achievement of the maximum instantaneous values of the potential energy of the bed of granular material, which is in 1,7 ... 2,0 times higher than when is equilibrium state in the initial and the final stage of the cycle of a pulsation.

Thus, in the proposed two-channel asymmetric injection of jets of the liquefying agent into the granulator chamber (in which in space over the bed is fitted the distributor device) there is a pulsating displacement of the mass center of the granular material, which expressed by the change in its coordinates in the vertical and frontal planes.

In this work a well-known mathematical model of moving the center of mass of a bed of granular material is improved and the original method of measuring the pressure difference in a bed with the use of a computerized complex is proposed, which allows to receive data with a frequency of 63 Hz and an accuracy of ± 1 Pa.

The solution of the mathematical model of inhomogeneous jet-pulsed fluidization in an auto-oscillating mode was done using experimentally obtained dependences of cyclic change of the bed porosity in different zones of the apparatus. This allowed to predict the frequency of pulsations, the dynamics of change in a fluidized bed pressure drop and the overall height of the fluidized bed with a correlation coefficient $R > 0,94$ at different values of the number of fluidization in the interval of change in a disperse composition of the bed $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ mm.

It is theoretically proved and experimentally established that the creation of an auto-oscillating mode of non-uniform fluidization, which is accompanied by the displacement of up to 60 % of the mass of a material into the space over the bed

relative to the initial bed in one cycle is determined by a two-channel method of injection of a liquefying agent at a gas velocity in the slits of the gas distribution device $w_{slits} \geq 30$ m/s for the normal conditions with the given ratios of mass expenditures in them.

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 $H_0 - z_\phi/H_0 < 0,5$.

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 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 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.

The temperature field configuration was experimentally determined while realization of the granulation process and was established that the proposed method of interaction of the heat carrier with the granular material during the implementation of the jet-pulsating fluidization in an auto-oscillating mode significantly increases the zone of intense heat and mass transfer with the preservation of the driving force on the height of an apparatus and contributes to the increase of processes, accompanied by the presence of phase transitions.

The technological scheme of an industrial plant with the productivity of creating the granular product of 500 kg/h is substantiated for the production of organic-mineral fertilizers using the original design of an industrial apparatus on a modular principles.

The method of calculation of organic-mineral fertilizer granulator in dehydration of water solutions of ammonium sulfate with admixtures of sunflower ash and humic components with the use of industrial electric heaters for heating of coolant was improved.

Keywords: fluidization, hydrodynamics, jet-pulsating auto-oscillating mode, granulation, organo-mineral fertilizers.

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. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/11943>. *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». – Електронні текстові дані (1 файл: 6,92 Мбайт). – Київ: НТУУ «КПІ». – 2015. – 167 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/11944>. *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 Сікорського – Електронні текстові дані (1 файл: 8,79 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2017. – 210 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/12411>. *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. – P. 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. – P. 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. – P. 562-576. (Входить до наукометричних баз Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, 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 органо-мінеральних добрив, проведення експериментальних досліджень, аналіз одержаних результатів.*

8. Корнієнко Я. М. Кінетика процесу створення органо-мінерально-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 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. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування способу виготовлення гранульованого органо-мінерального 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 / Монастирний 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 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. *Особистий внесок здобувача: експериментальне визначення впливу особливостей газорозподільного пристрою щільного 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 органічно-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, EJL, RePEc, InfoBase Index, IOR,

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.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	21
ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	30
1.1 Участь України у протидії світовій продовольчій кризі.....	30
1.2 Роль органо-мінеральних добрив у збереженні родючості ґрунтів.....	32
1.3 Створення нового покоління органо-мінеральних добрив з вітчизняної сировини	33
1.4 Грануляція у апаратах із псевдозрідженим шаром	34
1.5 Режими взаємодії газової фази із зернистим матеріалом.....	40
1.6 Математичне моделювання взаємодії газового потоку із твердими частинками.....	45
Висновки до розділу 1	52
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ СТРУМЕНЕВО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ В АВТОКОЛИВАЛЬНОМУ РЕЖИМІ.....	55
2.1 Фізична модель грануляції органо-мінеральних добрив при зневодненні рідких гетерогенних систем у псевдозрідженому шарі	55
2.2 Фізична модель неоднорідного псевдозрідження	59
2.2.1 Взаємодія газового струменя при застосуванні газорозподільного пристрою щілинного типу	59
2.2.2 Неоднорідне струменево-пульсаційне псевдозрідження в автоколивальному режимі	62
2.3 Оцінка якості неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі	73
2.4 Методика проведення комплексних експериментальних досліджень	75
2.4.1 Визначення коефіцієнта гідравлічного опору ГРП	75
2.4.2 Визначення порозності та висоти шару в камері апарата	77
2.4.3 Визначення порозності в робочій зоні ГРП	78
2.4.4 Визначення загального тиску в шарі та індексу перемішування	79
2.4.5 Визначення кінетичних характеристик процесу грануляції органо- мінеральних добрив	80

	19
Висновки до розділу 2.....	82
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	
ГІДРОДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ	83
3.1 Обґрунтування раціональної конструкції ГРП та камери гранулятора	83
3.2 Визначення умов переходу струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальний режим.....	86
3.2.1 Вплив дисперсного складу шару зернистого матеріалу на якісні параметри автоколивального режиму	86
3.3 Визначення основних параметрів неоднорідного псевдозрідження у автоколивальному режимі псевдозрідження	114
3.4 Перевірка адекватності математичної моделі неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі	119
Висновки до розділу 3.....	124
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ	
ГРАНУЛЮВАННЯ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ.....	125
4.1 Дослідження кінетики процесу гранулювання органо-мінеральних добрив із застосуванням автоколивального режиму.....	125
4.2 Аналіз гідродинамічних характеристик процесу гранулювання органо-мінеральних добрив.....	134
4.2.1 Визначення індексу перемішування та частоти пульсацій у автоколивальному режимі псевдозрідження	134
4.2.2 Критерії оцінки якості неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі	138
4.3 Конфігурація температурного поля в камері гранулятора при неоднорідному струменево-пульсаційному псевдозрідженні в автоколивальному режимі	141
Висновки до розділу 4.....	147
РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ	
РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	149
5.1 Конструктивно-технологічні засади промислового гранулятора.....	149

5.2	Методика розрахунку апарата для одержання органо-мінеральних добрив із пошаровою структурою	152
5.4	Ефективність від впровадження результатів дисертації	154
	Висновки до розділу 5	156
	ВИСНОВКИ	157
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	159
	Додаток А. Розрахунок похибок вимірювань	175
	Додаток Б. Визначення величин та залежностей при проведенні комплексних експериментальних досліджень	186
	Додаток В. Результати досліджень гідродинаміки неоднорідного псевдозрідження при застосуванні комп'ютеризованого вимірювального комплексу	193
	Додаток Г. Програма розрахунку динамічної якості гідродинаміки у грануляторі із псевдозрідженим шаром при неоднорідному псевдозрідженні у автоколивальному режимі	203
	Додаток Ґ. Програма розв'язку математичної моделі неоднорідного псевдозрідження у автоколивальному режимі	206
	Додаток Д. Результати експериментальних досліджень кінетики процесу грануляції органо-мінеральних добрив у грануляторі із псевдозрідженим шаром при застосуванні неоднорідного псевдозрідження у автоколивальному режимі	216
	Додаток Е. Опис роботи промислової установки виробництва органо-мінеральних добрив	222
	Додаток Є. Методика розрахунку промислового гранулятора	226
	Додаток Ж. Алгоритм та програма розрахунку промислового гранулятора	238
	Додаток З. Список публікацій здобувача за темою дисертації	242
	Додаток И. Акти впровадження результатів досліджень	251

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Умовні позначення:

- P – периметр щілини газорозподільного пристрою, м;
- a_f – навантаження поверхні шару за вологою, $\text{кг}_{\text{вол}}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$;
- b_{max} – півширина факела у його максимальному перетині, м;
- C_1 – експериментальний коефіцієнт при розрахунку горизонтальної
далекобійності газового факела;
- d_e – еквівалентний діаметр часток в шарі, м;
- f – частота пульсацій, Гц;
- $f_{\text{Г}}$ – коефіцієнт тертя для газової фази;
- $f_{\text{Т}}$ – коефіцієнт тертя для твердої фази;
- $f_{\text{ш}}$ – загальна поверхня часток у шарі, м^2 ;
- F_a – площа поперечного перерізу апарата, м^2 ;
- F_p – площа живого перерізу ГРП, м^2 ;
- $F_{\text{щ}}$ – площа щілин газорозподільного пристрою, м^2 ;
- $g(d)$ – функція масового розподілення гранул за розмірами, $1/\text{мм}$;
- H_0 – висота нерухомого шару, м;
- $H_{\text{ш}}$ – висота шару, м;
- K – константа вивантаження, $1/\text{год}$;
- K_e – коефіцієнт збільшення радіуса впливу струменів на структуру
шару;
- K_f – коефіцієнт тертя;
- K_w – число псевдозрідження;
- $M_{\text{гр.}}$ – маса гранульованого продукту, кг;
- $M_{\text{пилу.}}$ – маса утвореного пилу, кг;
- $M_{\text{сух.}}$ – маса сухих речовин у робочому розчині, кг;
- $M_{\text{ш}}$ – маса шару, кг;
- N – потужність, кВт;

- $\Delta P_{\text{ГРП}}$ – гідравлічний опір газорозподільного пристрою, Па;
 $\Delta P_{\text{д}}$ – перепад тиску на камерній діафрагмі, Па;
 $\Delta P_{\text{гідрост(0)}}$ – гідростатичний опір нерухомого шару, Па;
 r_o – приведений радіус щілини газорозподільного пристрою, м;
 t – крок між щілинами газорозподільного пристрою, м;
 t_{max} – максимальне значення кроку між щілинами газорозподільного пристрою для об'єднання газових бульбашок, м;
 T – період коливань, с;
 $T_{\text{вх}}, t_1$ – температура теплоносія на вході в апарат, $^{\circ}\text{C}$;
 $T_{\text{ш}}, t_2$ – температура в шарі матеріалу, $^{\circ}\text{C}$;
 U_o – середня швидкість зріджуючого агента в перерізі отвору, м/с;
 v_i – швидкість i -тої фази, м/с;
 V – об'ємні витрати повітря, $\text{м}^3/\text{год}$;
 W – масові витрати вологи, $\text{кг}/\text{год}$;
 $w_{\text{Г}}$ – швидкість газової фази, м/с;
 $w_{\text{Г(прив)}}$ – приведена швидкість газової фази, м/с;
 $w_{\text{кр}}$ – швидкість початку псевдозрідження (критична швидкість), м/с;
 $w_{\text{р(прив)}}$ – приведена робоча швидкість газу в апараті, м/с;
 $w_{\text{т}}$ – швидкість твердої фази, м/с;
 $w_{\text{щ}}$ – швидкість газу в щілинах газорозподільного пристрою, м/с;
 $x_{\text{гор}}$ – горизонтальна далекобійність газового струменя, м;
 $z_{\text{ф}}$ – висота пробою газового факела, м.

Грецькі символи:

- $\alpha_{\text{ф}}$ – кут розкриття у зоні факела;
 Δ – лінійний розмір зміщення точок введення зріджувального агента по вертикальній осі z ;
 ∇ – оператор Гамільтона;
 μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, $\text{Па}\cdot\text{с}$;
 ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\text{м}^2/\text{с}$;

- ρ_i – густина i -тої фази, кг/м^3 ;
 φ – коефіцієнт живого перерізу газорозподільного пристрою;
 λ – лінійна швидкість росту розмірів частинок, мм/год ;
 ξ – коефіцієнт гідравлічного опору;
 ε_0 – порозність нерухомого шару;
 ε_T – об'ємна частка газу;
 ε_s – об'ємна частка твердого матеріалу;
 τ – час, с ;
 $\overline{\overline{\tau}}$ – тензор напруги розтяг-стиск, Па ;
 ψ – коефіцієнт грануляції, $\%$.

Умовні скорочення:

- АПК – агропромисловий комплекс;
 Б. – бентоніт;
 Г. – гумат;
 ГРП – газорозподільний пристрій;
 З.В. – зона висхідного руху;
 З.З. – зона зрошення;
 З.І. – зона інтенсивного теплообміну;
 З.Р. – зона низхідного потоку (релаксації);
 ПК – персональний комп'ютер;
 С.З. – соняшникова зола;
 ХПК – хімічна потреба кисню, $\text{мг}(\text{O}_2)/\text{дм}^3$;
 CFB – Circulating Fluidized Bed;
 CFD – Computational Fluid Dynamics;
 DEM – модель «Discrete Element Method»;
 MP-PIC – модель «Multiphase Particle-in-Cell».

ВСТУП

Актуальність теми. В останні десятиліття на світовому ринку спостерігається збільшення попиту на продукцію аграрного сектора України, яка входить до групи країн лідерів по виробництву соняшникової олії, а також постійно збільшується експорт зернових культур, особливо кукурудзи та ріпаку.

У результаті спостерігається стійка тенденція щодо виснаження родючості ґрунтів та суттєвого зменшення вмісту гумусу навіть у чорноземах Лісостепу, тому збереження родючості ґрунтів є стратегічно важливим завданням.

Окрім цього, внаслідок порушення науково обґрунтованих принципів землеробства у попередні періоди господарювання, збільшення обсягів валового збору сільськогосподарської продукції проводилося за рахунок збільшення площі орних земель. Розораність ґрунтів в Україні становить 55 %, що у 2 рази більше, ніж у розвинених країнах західної Європи та у 3 – ніж у США.

Світова практика збереження родючості ґрунтів за рахунок внесення більше 400 кг діючої речовини на 1 гектар із азотно-фосфорно-калійними добривами для України тоді була недосяжною, а в теперішній час, через відсутність фосфоро- та калійно-вмісної сировини, є нереальною.

Разом з тим, на виробництвах капролактаму та соняшникової олії утворюється, відповідно, велика кількість розчинів сульфату амонію та соняшникової золи, що можуть бути сировиною для виробництва азотно-калійно- фосфорних добрив із домішками магнію та інших мікроелементів. Більшість із цих поживних речовин мають органічне походження.

В КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблено спосіб та технологію одержання гранульованих азотно-гумінових добрив при грануляції у псевдозрідженому шарі розчинів сульфату амонію із застосуванням барботажного гідродинамічного режиму. Процес супроводжувався утворенням застійних зон

у грануляторі та на робочих поверхнях газорозподільного пристрою (ГРП), суттєво зменшувало питоме навантаження поверхні шару за вологою та стійкість проведення процесу.

Тому, встановлення закономірностей взаємодії газового теплоносія із зернистим матеріалом при струменево-пульсаційному псевдозрідженні у автоколивальному режимі, який забезпечує інтенсивне перемішування зернистого матеріалу в об'ємі апарату та усуває застійні зони на робочих поверхнях ГРП та одночасно підвищує ефективність процесу масообміну та підтверджує актуальність теми дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами.

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 завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу гранулювання органомінеральних добрив шляхом застосування неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі та розрахунку промислового апарату. Для досягнення поставленої мети сформульовані такі задачі дослідження:

– сформулювати фізичну модель процесу одержання органомінеральних 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 багатошарових 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

переміщенням 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 ($i_{\text{я}} \rightarrow 1,0$) дозволяють 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 барботажем 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" та сформульовано науково-технічні задачі; обрано математичну модель та методи її розв'язання, проведено аналіз результатів математичного моделювання та визначено раціональні режими проведення процесу гранулювання; обґрунтовано критерії оцінки якості гідродинамічного режиму псевдозрідження; автором самостійно розроблено сучасну методику проведення експериментальних досліджень із застосуванням комп'ютеризованих систем вимірювання, проведено експериментальні дослідження; визначено конструктивні параметри камери гранулятора, спорядженої оригінальною конструкцією ГРП та направляючою вставкою, 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; 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 дисертації. 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.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Участь України у протидії світовій продовольчій кризі

Однією з першочергових глобальних цілей сталого розвитку до 2030 року, відповідно до резолюції Генеральної Асамблеї ООН [1], є досягнення продовольчої безпеки завдяки сприянню сталому розвитку сільського господарства.

Земельні ресурси планети, які відповідають умовам господарської діяльності людини, складають 134 млн. км² і лише 1/3 земельного фонду – це сільськогосподарські угіддя, з яких 11 % являють собою орні землі та 24 % – луки і пасовища.

На даний момент, резервів, придатних для сільськогосподарського освоєння, практично не залишилось і у багатьох країнах світу вони щорічно зменшуються на 5...7 млн. га. Перевантаження полів сільськогосподарськими культурами і неправильний їх обробіток ведуть до опустелювання земель і на даний момент 19% суші знаходиться на межі критичного стану [2, 3]. Разом з тим, за прогнозами демографів, до 2030 року потреби у продовольстві збільшаться щонайменше на 50 % [4].

Україна є 44 за величиною території країною світу, за площею орних земель (32,5 млн. га.) посідає 9 місце, а за рівнем розораності (53,8 %) – одне з перших місць у світі, при цьому її запаси чорноземів найбільші [5].

Продукти сільського господарства складають основу продовольчої безпеки України [6]. Сільське господарство країни протягом 2010 – 2017 років демонструвало позитивну динаміку, оскільки у загальному виробництві зросло на 34 %, експорт – на 54 %, частка сектора у ВВП країни збільшилася з 7,5 % (у 2010 році) до 11,6 % (у 2017 році) [7]. З 2010 по 2017 роки в Україні збільшено обсяг вирощування кукурудзи, насіння соняшнику, сої, зернових і зернобобових, значна частина яких (за даними ДФС та розрахунками ЕДК) [8] іде на експорт, рисунок 1.1.

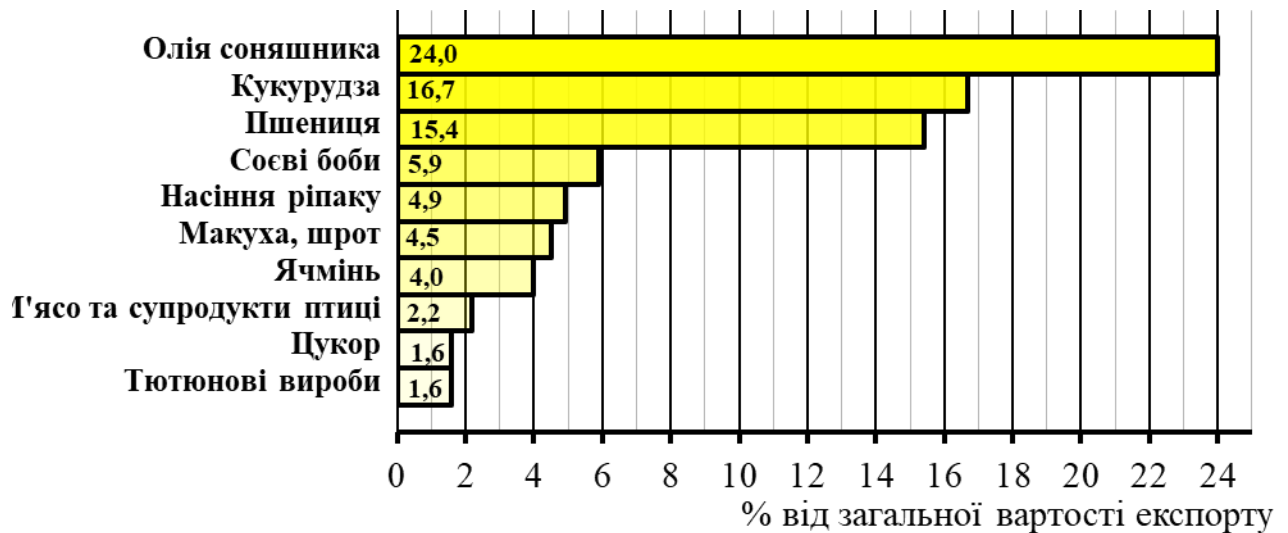


Рисунок 1.1 – Топ-10 товарів аграрного експорту з України у 2017 [8]

Однак підвищення цих показників за роки земельної реформи призвело до істотного погіршення якісного стану земельного фонду, тому деградація та опустелювання земель є одними з найбільш серйозних викликів для сталого розвитку, які спричиняють істотні проблеми екологічного і соціально-економічного характеру [9]. У зв'язку з цим, розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 березня 2016 р. № 271-р було затверджено Національний план щодо боротьби з деградацією та опустелюванням земель [10], однак за роки незалежності так і не створено механізму збереження родючості ґрунтів [10].

Тим часом, найбільша кількість сільськогосподарських угідь страждає через втрати гумусу та поживних речовин, при чому на даний момент у 43 % випадків до виснаження ґрунтів призвело неправильне вирощування рослин, 39 % земель постраждали від переущільнення та 38 % – від замулення та утворення кірки [11]. Чимала кількість земель отруєна шкідливими речовинами: 11 % ґрунтів насичені радіонуклідами, 9,3 % складають ґрунти забруднені пестицидами, 8 % – важкими металами [11].

Таким чином, у сучасних умовах землекористування, зважаючи на кризовий стан земельних ресурсів, необхідними умовами сталого розвитку є застосування ґрунтоохоронних агротехнологій, забезпечення зменшення

хімічного та механічного навантаження на ґрунти, запровадження заходів із відновлення якісного стану деградованих та малопродуктивних земель.

1.2 Роль органо-мінеральних добрив у збереженні родючості ґрунтів

Існуючі способи збереження родючості ґрунтів за рахунок внесення мінеральних добрив на теперішній час є недостатніми. Інтенсивне застосування хімічних отрутохімікатів та інших засобів призводить до забруднення водних ресурсів та порушення екологічної рівноваги. У європейських країнах жорстко контролюється використання у підприємствах АПК екологічно небезпечних засобів, їх вплив на довкілля, а також заходи щодо захисту ґрунтів, водних ресурсів і збереження та розвитку біорізноманіття [12].

Для усунення цих негативних явищ у останні десятиліття велику увагу приділяють створенню органічних [13-17] та органо-мінеральних добрив, які поліпшують умови живлення рослин без негативного впливу на екосистему.

У якості органічної речовини використовують торф, сапропель, гідролізний лігнін, гній, послід, тверді побутові відходи, рештки деревини та опалого листя, буре вугілля, тощо [12,13, 18-26].

Проте, на практиці значний вплив на використання органо-мінеральних добрив має економічний фактор. Мінімальні обсяги внесення органічних добрив на 1 гектар становлять 15...25 т/га. Окрім того, родючість ґрунтів залежить від активних хімічних процесів, пов'язаних із утворенням гумінових речовин. Тому для прискорення цих процесів доцільно, щоб у ОМД органічна частина представлялась у вигляді гумінових речовин, які являють собою полідисперсну систему високомолекулярних азотовмісних органічних з'єднань, у складі яких виділяють 3 групи: гумінові кислоти, фульвокислоти та гумін [27].

До найбільш важливих функцій гумінових речовин відносяться [28-30]:

1. акумулятивна – здатність накопичувати довгострокові запаси всіх елементів живлення, вуглеводів та амінокислот у різних середовищах;

2. транспортна – утворення комплексних органо-мінеральних сполук із металами та мікроелементами, які активно мігрують до рослин;
3. регуляторна – гумінові речовини формують зафарбування ґрунтів та регулюють мінеральне живлення, катіонний обмін, буферність та окисно-відновні процеси у ґрунті;
4. протекторна – шляхом сорбції токсичних речовин та радіонуклідів гумінові речовини запобігають їх надходженню до рослин.

Окрім того, гумати приймають участь у формуванні структури ґрунту, покращують його аерацію, водоутримуючу та водопропускну властивості. Гумати не шкідливі для здоров'я людини, не накопичуються в рослинах.

Зміна ступеня модифікації гумінових речовин дозволяє керувати властивостями гумінової плівки і додаючи до традиційного складу гуміново-органомінеральних добрив бентоніт або пісок, можна регулювати активність гумінових речовин [30, 32].

1.3 Створення нового покоління органо-мінеральних добрив з вітчизняної сировини

В Україні утворюються значні кількості водяних розчинів сульфату амонію на коксохімічних виробництвах та при одержанні капролактаму.

Так, при виробництві капролактаму із продуктивністю 50 тис. т. на рік утворюється до 135 тис. т. кристалічного сульфату амонію, який за багатостадійною технологією одержують із 40% водяного розчину із органічними домішками, вміст яких виражається через хімічну потребу кисню ($XPK=3500 \text{ мг(O}_2\text{)/дм}^3$). У вакуумних кристалізаторах із часом накопичується концентрація органічних домішок та інших мінеральних компонентів до $XPK=150\text{...}200 \text{ тис. мг(O}_2\text{)/дм}^3$, які періодично виводять із системи у виді промислових стоків (за рік 6 тис. т).

На кафедрі МАХНВ розроблено спосіб одержання добрив при застосуванні техніки псевдозрідження [31-33], який дозволяє одержувати гранульований сульфат амонію із домішками гумінових речовин в одну стадію.

Проблему недостачі в цих добривах калійно-фосфоровмісних компонентів запропоновано вирішити шляхом використання соняшникової золи або кісткового борошна [34-36].

Побічним продуктом при виробництві соняшникової олії є шрот та жмих, які складають 17-20 % від початкової маси насіння. Всі великі олійно-екстракційні заводи та олійно-жирові комбінати України впровадили технологію спалювання лушпиння, а також гранул та брикетів із нього, при чому утворюється 31,2 тис.т/рік [37-39], яка містить корисні поживні речовини та мікроелементи органічного походження.

Основні компоненти соняшникової золи складають 95,67 % від загальної маси, решта (4,33 %) – Zn, C, Co, Mn, Fe, Mo [39, 40].

Отже, розроблення технологічних засад перероблення водяних розчинів сульфату амонію із домішками соняшникової золи та гумінових речовин дозволить одержати нове покоління органо-мінеральних гумінових добрив високої споживчої якості. Можливість змінювати співвідношення поживних мінеральних і стимулюючих речовин у залежності від агрокліматичних умов регіону їх застосування сприятиме збереженню екологічної рівноваги при землекористуванні.

Утилізація відходів хімічної, харчової та вугледобувної промисловостей підвищить екологічну безпеку на виробництві.

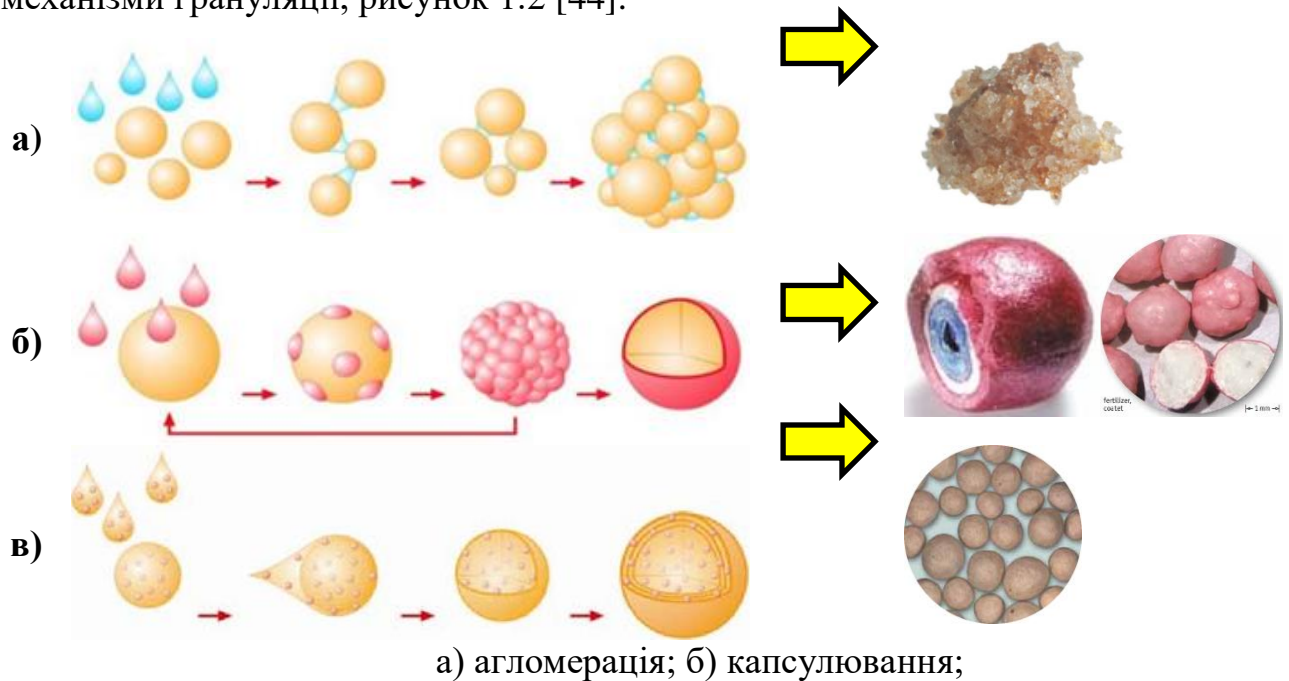
1.4 Грануляція у апаратах із псевдозрідженим шаром

Застосування техніки псевдозрідження для зневоднення та грануляції дозволяє реалізовувати процес масової кристалізації при інтенсивному видаленні розчинника, а у випадку наявності суспендованих компонентів у

робочому розчині [41-43] – отримувати композитні матеріали з різною морфологією.

Окрім одностадійного процесу одержання гранульованого продукту при зневодненні рідких систем у апараті з псевдозрідженим шаром, коефіцієнт використання теплоти сягає 50 % і більше.

При цьому, найбільш часто реалізуються агломераційний та пошаровий механізми грануляції, рисунок 1.2 [44].



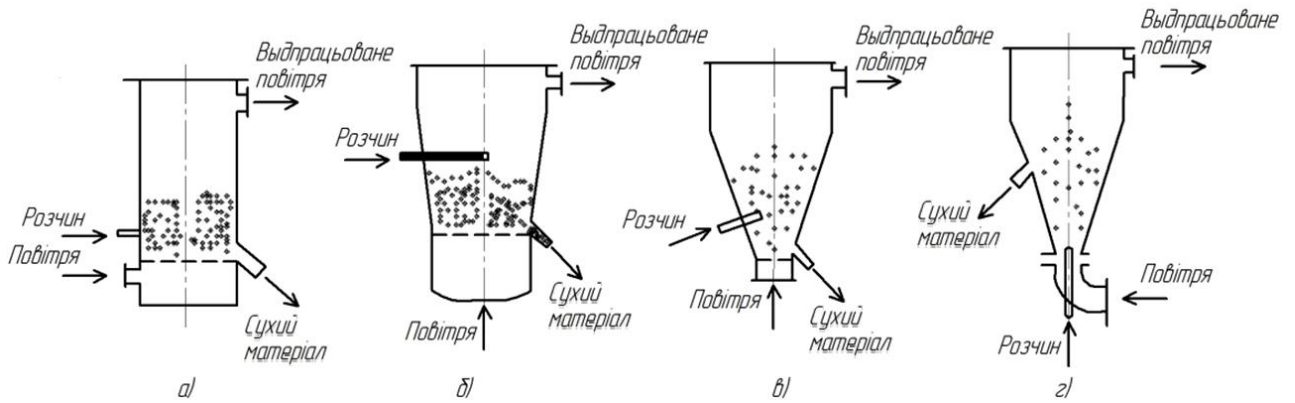
а) агломерація; б) капсулювання;

в) нашарування гомогенних та гетерогенних систем

Рисунок 1.2 – Найбільш поширені механізми грануляції [44]

Існуючі базові технологічні схеми реалізації процесу грануляції наведені на рисунку 1.3 [43].

У таких апаратах зазвичай реалізується барботажний, рисунок 1.3 а та б, або фонтануючий, рисунок 1.3 в та г, гідродинамічні режими [40], які забезпечують роботу грануляторів при введенні робочого розчину через форсунки різного типу. При цьому, такий спосіб реалізації взаємодії газового теплоносія не забезпечує активне об'ємне перемішування і супроводжується високим ризиком утворення застійних зон на робочих поверхнях ГРП.



а) барботажний із боковим введенням розчину в шар; б) барботажний із верхнім введенням розчину в шар; в) фонтануючий із боковим введенням розчину в шар; г) фонтануючий із нижнім введенням розчину в шар

Рисунок 1.3 – Основні гідродинамічні режими в грануляторах із псевдозрідженим шаром для зневоднення рідких систем [43]

Аналогічне технічне рішення використано і в апаратах компанії *Glatt*, *GEA*, *NIRO*, *Vector*, *OKAWARA* та іншими [44-45], рисунок 1.4 та 1.5, а також прямокутними [44, 46], рисунок 1.6 та 1.7, корпусами з розширенням у верхній частині для сушіння, гранулювання та капсулювання.

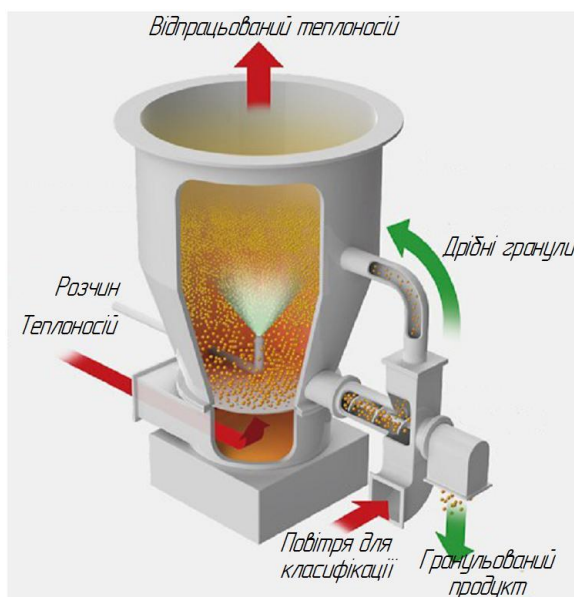


Рисунок 1.4 – Гранулятор компанії *OKAWARA* [44]



Рисунок 1.5 – Гранулятор компанії *Glatt* [45]

Для запобігання локального перезволоження шару в окремих випадках [44, 46], рисунок 1.6 та 1.7, пропонується збільшення кількості форсунок по ширині апарата. При цьому, подача теплоносія-зріджувального агенту відбувається роздільно в кожну секцію для забезпечення стійкого фонтануючого режиму. Над кожною секцією протитечійно розпилюється робочий розчин [46], що сприяє реалізації агломераційного механізму грануляції, рисунок 1.6.

У випадку [44], рисунок 1.7, рух зріджувального агенту та напрям розпилю співпадають, а теплоносієм забезпечує циркуляцію матеріалу у вертикальному напрямку.

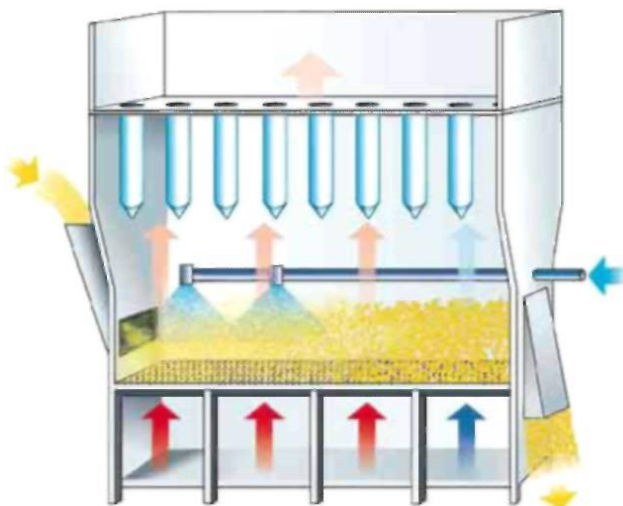


Рисунок 1.6 – Гранулятор компанії
Glatt типу *GFG 750* [46]

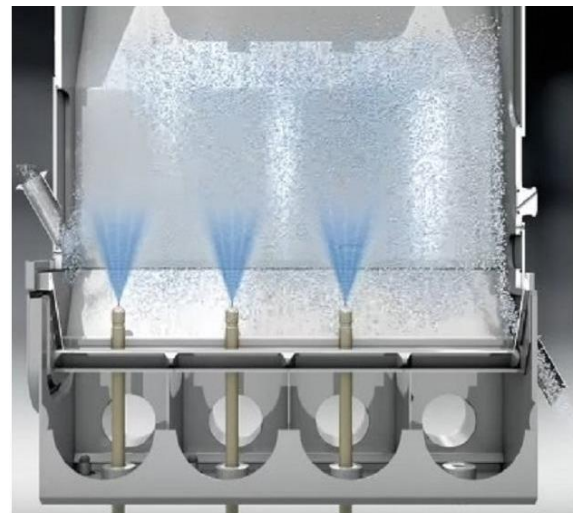


Рисунок 1.7 – Гранулятор компанії
Glatt типу *GFG 1200* [44]

Стійкість процесу забезпечується інтенсивним рухом твердих частинок у вертикальному напрямку зі швидкостями, близькими до режиму пневмотранспорту. Завдяки цьому відбувається часткове зневоднення крапель до контакту з гранулами. Найбільш яскраво цей спосіб реалізації показано на рисунку 1.8 [47], у якому реалізується фонтануючий режим із великим кутом розкриття гранулятора.

Для забезпечення направленої циркуляції в шарі запропоновано застосовувати технологію *Wurster* [48-50], рисунок 1.9.

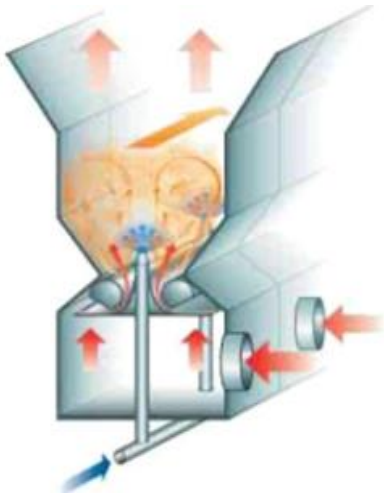


Рисунок 1.8 – Гранулятор із технологією *ProCell* [47]

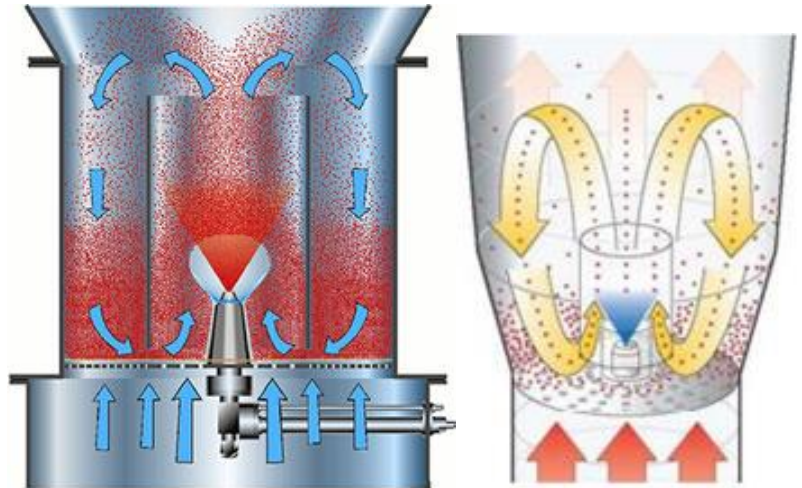


Рисунок 1.9 – Гранулятори з технологією *Wurster* [48-50]

Технологією *ProCell* [47], рисунок 1.8, передбачено направлене введення зріджувального агенту через ГРП щілинного типу із високою швидкістю газу в щілинах. Основна відмінність технології *Wurster* [48-50], рисунок 1.9, полягає у введенні більшої частини зріджувального агенту у вертикально розташовані в камері труби, які забезпечують направлену циркуляцію гранул, а меншу – у низхідну зону, де сушіння відбувається в режимі фільтрації. При цьому, у обох випадках забезпечується стійкість процесу навіть при роботі з високоадгезійними речовинами.

З метою підвищення ефективності процесу грануляції висококонцентрованих рідких систем було розроблено вихровий гранулятор [51], у основу якого закладено принцип використання енергії закрученого газового потоку при псевдозрідженні, рисунок 1.10. Введення рідкої фази здійснюється розпилювачем із застосуванням електромагнітних коливань для забезпечення мінімального діапазону зміни розмірів крапель.

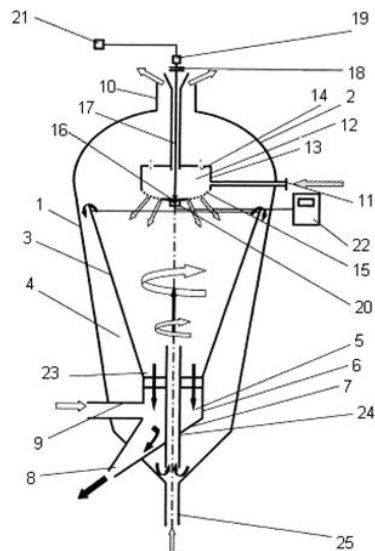


Рисунок 1.10 – Вихровий гранулятор псевдозрідженого шару [51]

Основними недоліками вище наведених грануляторів є мала поверхня контакту твердих частинок із розчином у зоні зрошення, що призводить до зменшення питомого навантаження шару за вологою. Локальне підведення рідкої фази через форсунки придатні тільки для гомогенних систем і унеможливають використання гетерогенних суспензій, а також їх застосування обмежує максимальне питома навантаження поверхні шару за вологою (збільшується зона перезволоження шару).

Суттєвим недоліком гідродинамічних режимів у вище наведених конструкціях грануляторів полягає у відсутності пульсаційного режиму псевдозрідження, при якому більша відносна швидкість та відповідно менша товщина дифузійного шару, що підвищує ефективність масообміну.

Тому, для одержання органо-мінеральних добрив із заданими властивостями при зневодненні рідких гетерогенних систем, до складу яких входять термолабільні речовини необхідно розробити новий спосіб взаємодії газового теплоносія із зернистим матеріалом, при якому, окрім відомих переваг техніки псевдозрідження, повинне забезпечуватись інтенсивне оновлення поверхні контакту фаз.

1.5 Режими взаємодії газової фази із зернистим матеріалом

Особливості гідродинаміки при псевдозрідженні розглядались в багатьох роботах [50-129]. Режими взаємодії газового середовища із зернистим матеріалом можна умовно розділити на:

- киплячий шар (барботаажний), при якому газові бульбашки проходять через шар зернистого матеріалу при середніх значеннях порозності $\varepsilon_r \approx 0,55$ з відповідним розширенням шару та збільшенням його висоти. Режим реалізується при застосуванні ГРП із коефіцієнтом живого перерізу $\varphi = 5-9\%$.
- фонтануючий, при якому висота пробою локально сформульованого факела практично дорівнює висоті шару в апараті, а кут розкриття у зоні факела $\alpha_\phi \geq 30^\circ$.

При цьому у факелі матеріал рухається в режимі пневмотранспорту із порозністю $\varepsilon_r \rightarrow 0,9$ і після його виходу за межі шару зменшується кінетична енергія частинок, які виходять до периферійної зони та рухаються до низу апарату в щільному потоці з $\varepsilon_r = 0,4$. Тобто, в апараті спостерігається спрямована вертикальна циркуляція зернистого матеріалу.

Автором [72] проведено детальні дослідження руху газового струменя в шарі зернистого матеріалу при фонтануючому режимі, фізичну модель якого наведено на рисунку 1.11 [72].

У роботі [72] показано, що на відстані Y_c газовий струмінь розділяється на факел із постійною формою та бульбашку, яка поступово збільшується зі збільшенням відношення висоти пробою газового факела y_ϕ до початкової висоти шару $y_\phi/H_0 \geq 1$.

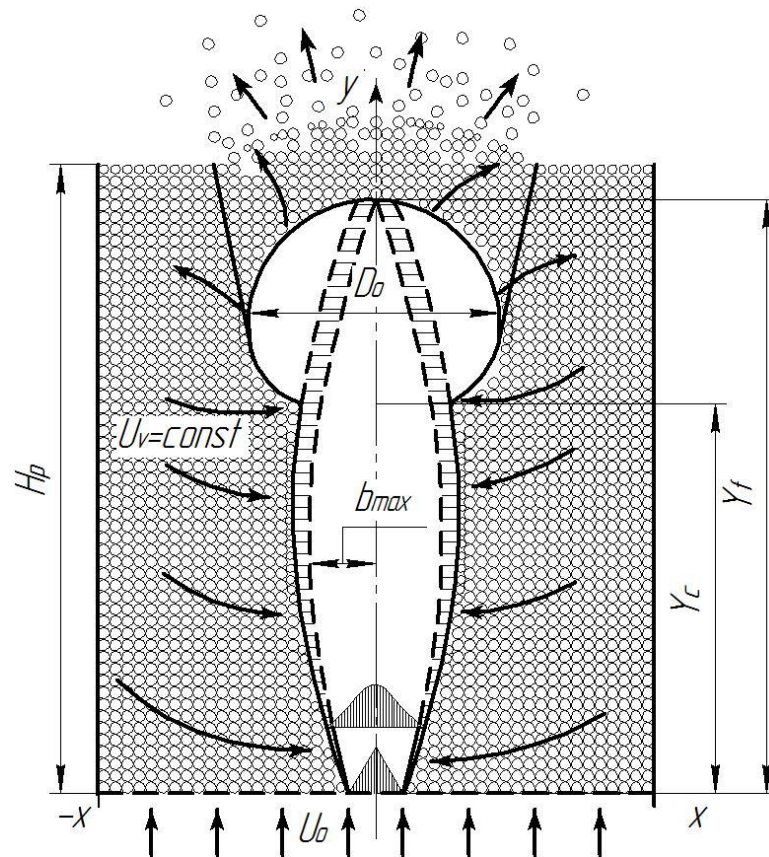


Рисунок 1.11 – Фізична модель міжфазової взаємодії у системі газ-тверді частинки при фонтануючому режимі псевдозрідження [72]

При значеннях $y_f/H_0 > 0.5$ процес розповсюдження струменя у шарі характеризується збільшенням розмірів утвореної каверни до крайнього значення [72], рисунок 1.12, і реалізується режим фонтанування.

У випадку, коли $y_f/H_0 \leq 0.5$, газовому струменю не вистачає енергії для повного пробію шару. У зв'язку з цим, після утворення каверни у верхній частині факела відбувається циклічне формування та відривання газової бульбашки від факела [72] із періодом T та частотою $f = 1/T$, рисунок 1.13. Природньо, що розмір бульбашки буде визначатися величиною підйомної сили.

Проведені дослідження при грануляції розчинів сульфату амонію в апараті із псевдозрідженим шаром [31-33, 36, 89, 111, 112-127] показали, що відношення $y_f/H_0 \leq 0.5$. Тому режим руху газової фази [72], рисунок 1.13, дозволяє при формуванні газової бульбашки реалізувати фільтраційний рух теплоносія через щільний шар зернистого матеріалу на межі контакту з нею, а

також наявності інтенсивної зони мікро циркуляцій у пограничній області – «хмарі». Це суттєво підвищує дифузійні процеси перенесення шарів розчинника до газової фази. Окрім цього, рух газової бульбашки до верхньої межі шару призводить до активного об'ємного перемішування зернистого матеріалу внаслідок інерційного винесення матеріалу, що знаходиться перед лобовою частиною бульбашки та стійкого руху частинок при заповненні пустот, які виникли при переміщенні газової бульбашки.

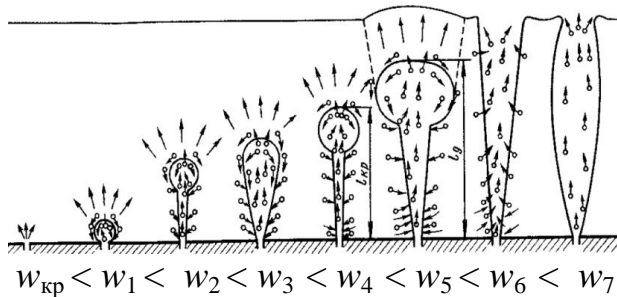


Рисунок 1.12 – Схема розвитку газового струменя у нерухомому шарі зернистого матеріалу при $y_{\phi}/H_0=0,5$ [72]

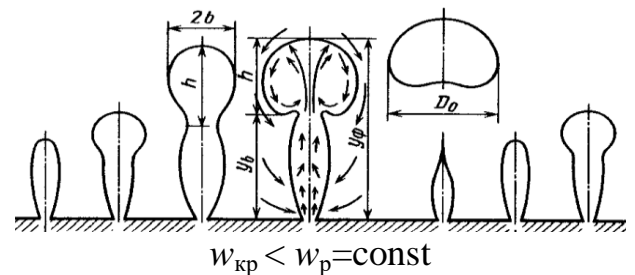


Рисунок 1.13 – Фази розвитку газового струменя із утворенням бульбашки при $y_{\phi}/H_0 \leq 0,5$ [72]

Автором [72] встановлено, що при утворенні декількох газових струменів за умови, що $y_{\phi}/H_0 \leq 0.5$ існує максимальне значення кроку між ними t_{\max} [72], перевищення якого зумовлює звичайний барботаж поодиноких газових бульбашок $t > t_{\max}$, рисунок 1.14 а. При $t < t_{\max}$ відбувається злиття бульбашок із 2-х факелів, що забезпечує інтенсифікацію об'ємного перемішування в шарі, рисунок 1.14 б.

Максимальне значення кроку між двома паралельними газовими струменями, що забезпечує об'єднання бульбашок, рисунок 1.14 б [72], м:

$$t_{\max} = 2K_c b_{\max}. \quad (1.1)$$

Коефіцієнт збільшення радіуса впливу струменів на структуру шару [72]:

$$K_c = KD_0 / 2b_{\max}. \quad (1.2)$$

Звідки випливає пропорційна залежність t_{\max} від геометричного розміру газового факела.

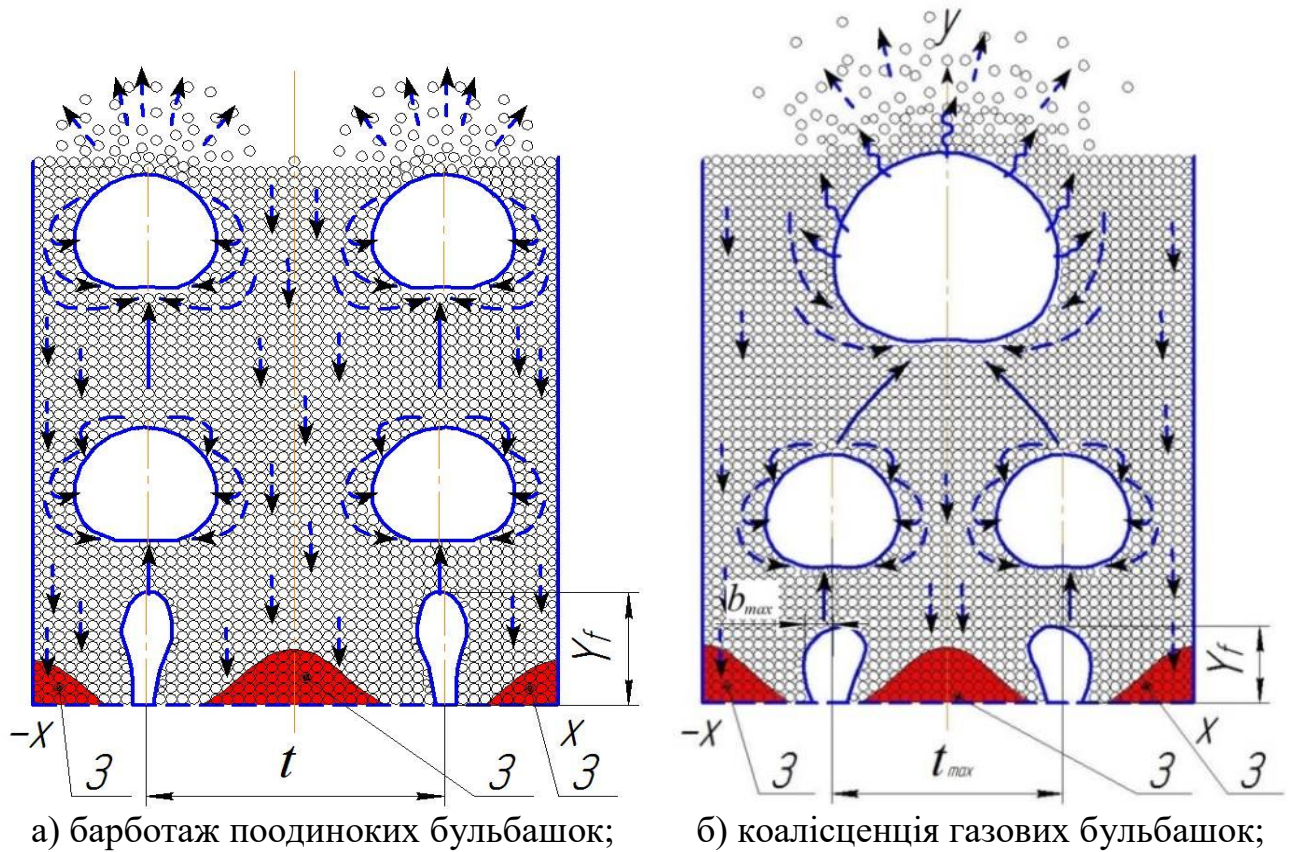


Рисунок 1.14 – Модель взаємодії кількох газових бульбашок у шарі при барботажному режимі псевдозрідження [72]

При цьому, на горизонтальній поверхні ГРП між вертикально направленими газовими факелами, а також між факелами та стінками апарата утворюються застійні зони З, рисунок 1.14 а та б, і при високих температурах теплоносія можуть призвести до оплавлення гранул.

Зменшення імовірності появи застійних зон на робочих поверхнях ГРП забезпечується при горизонтальному направленні газового струменя через щілини ГРП [72], рисунок 1.15.

Газовий струмінь рухається у горизонтальному напрямку до відстані $Y_{вт}$ від щілини, на якій починає переходити у вертикально направлений на відстані $x_{гор}$ [72], рисунок 1.15, м:

$$x_{гор} = \frac{w_{щ} r_o}{0,585 w_p C_1}; \quad r_o = \frac{2F_{щ}}{\Pi}. \quad (1.3)$$

В останні десятиліття у багатьох роботах [43-87, 90-104] наведені результати досліджень, спрямовані на інтенсифікацію процесів перенесення при застосуванні техніки псевдозрідження. Цей напрям сформульовано як неоднорідне псевдозрідження в коливальному режимі. Ідея розглядати взаємодії газового теплоносія в гравітаційному полі як коливання пружної системи наведена у роботах [52, 53, 83-87], зокрема [83, 84] вважає, що автоколивальний режим можливо реалізувати при застосуванні пристрою для пульсуючого введення теплоносія або у випадку поршневого режиму, коли висота шару зернистого матеріалу втричі перевищує діаметр апарата.

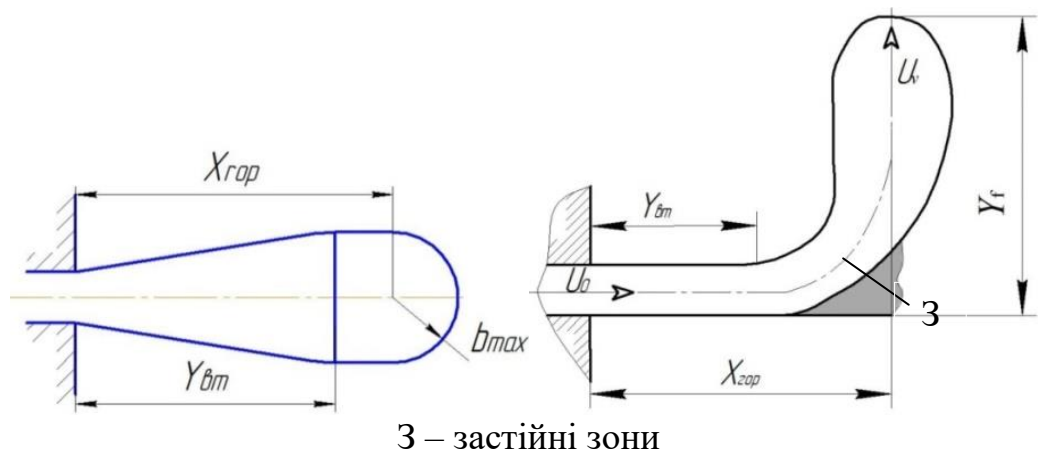


Рисунок 1.15 – Схема горизонтального підведенні газового факела [72]

Такі підходи спрямовані на підвищення об'ємного перемішування в шарі, але їх реалізація можлива при встановленні умов, що забезпечують усунення застійних зон на робочих поверхнях ГРП.

Враховуючи викладене більш перспективним, з точки зору підвищення ефективності процесів тепло- масообміну, є пульсаційний режим, для якого характерне об'єднання газових бульбашок, але задача усунення застійних зон на робочих поверхнях ГРП залишається не вирішеною.

1.6 Математичне моделювання взаємодії газового потоку із твердими частинками

Автори [81] виділяють три основні підходи для математичного опису взаємодії газових потоків з твердими частинками: модель Ейлера-Ейлера, Ейлера-Лагранжа (*MP-PIC*) та дискретна модель Ейлера-Лагранжа (*DEM*).

У моделі Ейлера-Ейлера газ і тверді частинки розглядаються, як взаємопроникні фази, які безперервно взаємодіють у часі та просторі. Для врахування течії всередині потоків використовується теорія потоку твердих частинок Дженкінса і Річмана. При такому підході обидві фази займають певний об'єм, який зведений до об'ємної частки [81].

Об'ємну частку кожної фази розраховують за допомогою рівняння нерозривності [81]:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \bar{v}_i) = 0. \quad (1.4)$$

Використовуючи рівняння збереження імпульсу для кожної фази враховується масообмін між фазами, наявність підйимальної сили і сил, що залежать від тертя, тиску та зчеплення частинок на міжфазовій межі [81]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_i \rho_i u_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i) \cdot u_i = & -\alpha_i \nabla p_i + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_i + \alpha_i \rho_i g + \sum_{j=1}^2 [R_{ji} + \dot{m}_{ji} u_{ji} - \dot{m}_{ij} u_{ij}] + \\ & \sum_{j=1}^2 [R_{ji} + \dot{m}_{ji} v_{ji} - \dot{m}_{ij} v_{ij}] + F_i + F_{\text{lift},i} + F_{\text{vm},i}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

де F_i – вектор зовнішньої масової сили, Па/м; $F_{\text{lift},i}$ – вектор підйомної сили, Па/м; $F_{\text{vm},i}$ – вектор приєднаної масової сили, Па/м.

Недоліком даної моделі є неадекватне відображення взаємодії фаз частинка-частинка та частинка-газ.

У стохастичній моделі Ейлера-Лагранжа (*MP-PIC*), газова та тверда фаза розглядаються як два потоки у вигляді емульсії, в якій виділяється елементарний об'єм та на основі нього проводиться розрахунок [81].

Ця модель описується двома основними рівняннями: рівнянням нерозривності потоку та рівнянням збереження імпульсів, які записуються для газової та твердої фази.

Рівняння нерозривності потоку для i -тої фази [81]:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i) = 0. \quad (1.6)$$

Рівняння збереження імпульсів для i -тої фази [81]:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i u_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i u_i) = -\nabla \cdot p - F + \alpha_i \rho_i g. \quad (1.7)$$

Недолік даної моделі полягає в тому, що вона адекватно описує взаємодію фаз газ-частинка лише в апаратах із дуже малими розмірами коли теплові флуктуації газової фази впливають на рух частинок великих розмірів. Дана модель неприйнятна для твердої фази, однак підходить для опису емульсії, утвореної двома потоками [81].

Дискретна модель Ейлера-Лагранжа (*DEM*) [82] є найбільш фундаментальною моделлю, яка розглядає газову фазу у вигляді неперервного потоку, а тверді частинки – у вигляді дискретних елементів. У моделі *DEM* взаємодія тверда частинка-газ розглядається у вигляді простих зіткнень.

Модель записується рівняннями нерозривності та рівнянням імпульсів, відповідно для газової та твердої фаз.

Рівняння нерозривності [81]:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i) = 0. \quad (1.8)$$

Рівняння імпульсів [81]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_i \rho_i u_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i u_i) = -\nabla \cdot \alpha_i p + \nabla \cdot (\alpha_i \bar{\tau}_i) + \alpha_i \rho_i g + F_{DEM}, \quad (1.9)$$

де F_{DEM} – сила зчеплення між частинками, Н.

Перевагою даної моделі є те, що вона дозволяє описати газові бульбашки у виді дискретних частинок, що можуть зіштовхуватися, зливатися, зупинятися, скорочуватися й зростати.

Авторами [81] із застосуванням програмного середовища *Ansys Fluent* проведено порівняння результатів моделювання трьох різних підходів з

експериментальними даними, що були отримані при масових витратах зріджувального агенту 0,005 кг/с. На основі одержаних даних було отримано графічну динаміку розвитку газової бульбашки в часі, яка свідчить про те, що результати отримані за дискретною моделлю Ейлера-Лагранжа найбільш точно відповідають експериментальним даним, але експеримент проведено на невеликій моделі, яка не враховує коливань шару і тому не може бути використаною для промислових масштабів. Усі ці моделі відносяться до барботажного режиму псевдозрідження.

У роботі [83] запропоновано підхід до моделювання автоколивального поршневого режиму неоднорідного псевдозрідження [82, 85-87] у вузькому колонному апараті з висотою шару, яка в декілька разів перевищує його поперечний переріз, при чому на поверхню шару циклічно підіймаються поодинокі газові бульбашки без поперечної коаліценції, рисунок 1.16.

При моделюванні розглядається перехід шару зі стану мінімального зрідження до пульсуючого режиму із припущеннями, що шар рівномірно заповнений дрібними бульбашками, їх вихід на поверхню випадковий, а викривлення поверхні шару незначні [82-87]. Авторами [83, 84] рівняння збереження імпульсу для газової та твердої фаз представлено у наступному вигляді:

$$\rho_T \varepsilon_T \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] + \rho_G \varepsilon_G \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial \tau} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] = -\nabla p - [\rho_T \varepsilon_T + \rho_G \varepsilon_G] \vec{g}. \quad (1.10)$$

При одномірному русі шару вздовж направленої догори вертикальної вісі x , нехтуючи інерцією газової фази [83, 84]:

$$\rho_T (1 - \varepsilon_T) \left[\frac{\partial v_x}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_T (1 - \varepsilon_T) g. \quad (1.11)$$

Автори [83, 84] запропоновано виразити результат у лівій частині (1.11) при інтегруванні по осі x від 0 до H через швидкість центра мас шару v_m :

$$H \rho_T (1 - \varepsilon_T) \frac{dv_m}{d\tau} = \Delta P(\tau) - H \rho_T (1 - \varepsilon_T) g. \quad (1.12)$$

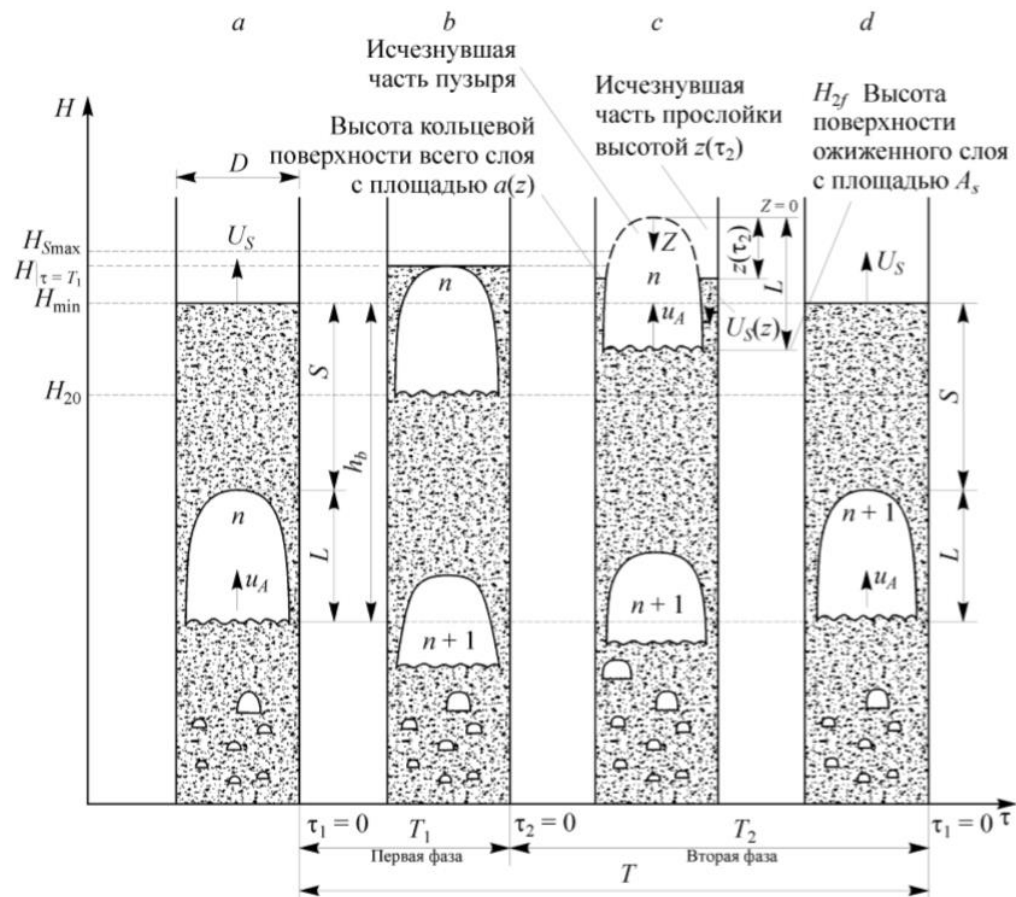


Рисунок 1.16 – Автоколивальний поршневий режим неоднорідного псевдозрідження [82, 85-87] у вузькому колонному апараті

Гідравлічний опір шару найчастіше виражається через рівняння Ергуна, яке для рухомого шару приймає вид [83, 84], Па:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{150\mu_r(1-\varepsilon)^2}{d_e^2\varepsilon^2} \left(\frac{v}{\varepsilon} - v_T \right) + \frac{1.75\rho_r(1-\varepsilon)}{d_e\varepsilon} \left(\frac{v}{\varepsilon} - v_T \right)^2. \quad (1.13)$$

З урахуванням наведених рівнянь, автором [83, 84] отримано рівняння для визначення коливань поверхні шару із позначенням констант (A , B , C_1) та з урахуванням, що $H=2H_0$:

$$\frac{d^2H(\tau)}{d\tau^2} = \frac{\Delta P(\tau)}{\rho_r(1-\varepsilon_r(\tau))H(\tau)} - g; \quad (1.14)$$

$$A = \frac{150\mu_r}{d_e^2\varepsilon^2}; \quad B = \frac{1.75\rho_r}{d_e\varepsilon}; \quad C_1 = H_0(1-\varepsilon_0);$$

$$\frac{d^2H}{d\tau^2} - \frac{AC_1H}{(H-C_1)^2} \left(\frac{dH}{d\tau} - \frac{2vH}{H-C_1} \right) + \quad (1.15)$$

$$+ \frac{BH}{2(H - C_1)} \left(\frac{dH}{d\tau} - \frac{2vH}{H - C_1} \right) \left| \frac{dH}{d\tau} - \frac{2vH}{H - C_1} \right| + 2g = 0.$$

У результаті вирішення рівняння (1.5) автором одержано залежність гідравлічного опору шару в автоколивальному режимі для двох випадків: при збільшенні швидкості зріджувального агенту та при його імпульсному введенні, що передбачає застосування додаткових зовнішніх механізмів.

Автором [83, 84] пропонується визначити гідравлічний опір для приведених середніх значень порозності шару, що є неприйнятним для неоднорідного пульсаційного псевдозрідження.

Більш повно описує природу неоднорідного псевдозрідження моделювання гідродинаміки у виділеному елементарному об'ємі псевдозрідженого циркулюючого шару, рисунок 1.17, за запропонованою моделью (CFB) [82, 85-87].

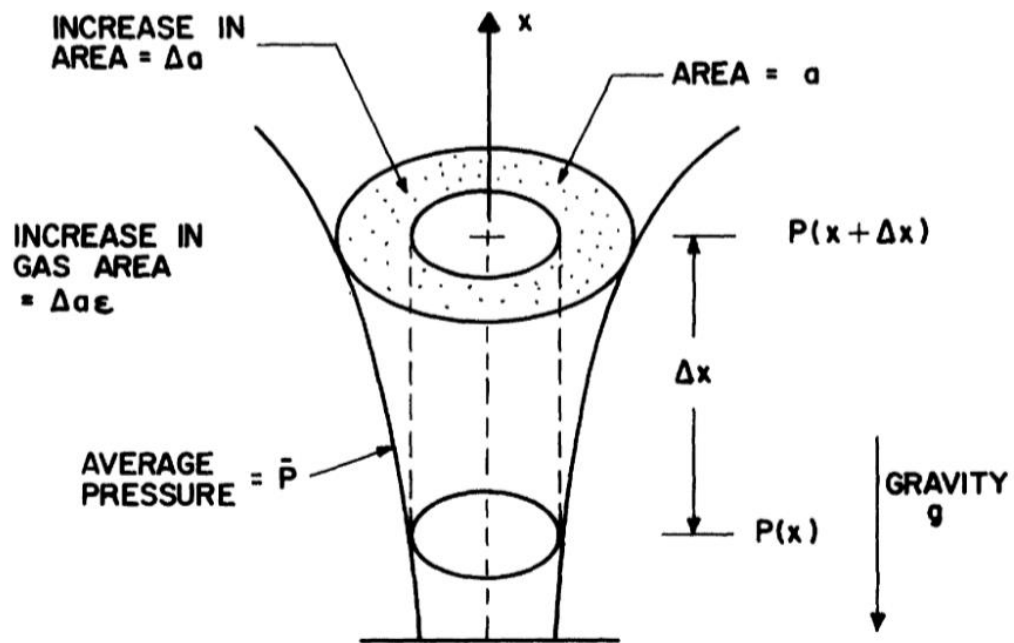


Рисунок 1.17 – Фізична модель псевдозрідження у виділеному елементарному об'ємі шару [82]

Автор [82, 85-87] розглядає зміну гідравлічного опору шару по висоті dP/dx , як загальну суму втрат на надання імпульсу, на подолання тертя твердої та газової фаз а також – гравітаційної складової:

$$\left(\frac{dP}{dx}\right)_{\text{загальний}} = \left(\frac{dP}{dx}\right)_{\text{імпульсу}} + \left(\frac{dP}{dx}\right)_{\text{тертя}} + \left(\frac{dP}{dx}\right)_{\text{гідрост.}} \quad (1.16)$$

Для розв'язку моделі [82, 85-87] застосовуються рівняння нерозривності потоку газової та твердої фаз:

$$\frac{\partial(\rho_{\Gamma}\varepsilon_{\Gamma})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\Gamma}\varepsilon_{\Gamma}w_{\Gamma})}{\partial x} = 0; \quad (1.17)$$

$$\frac{\partial(\rho_{\text{T}}\varepsilon_{\text{T}})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\text{T}}\varepsilon_{\text{T}}w_{\text{T}})}{\partial x} = 0, \quad (1.18)$$

а також рівняння збереження імпульсу для газової та твердої фаз [82, 85-87]:

$$\frac{\partial(\rho_{\Gamma}\varepsilon_{\Gamma}w_{\Gamma})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\Gamma}\varepsilon_{\Gamma}w_{\Gamma}^2)}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial x} + \beta(w_{\text{T}} - w_{\Gamma}) + \frac{2f_{\Gamma}\rho_{\Gamma}\varepsilon_{\Gamma}w_{\Gamma}^2}{D_{\text{а(пр)}}} + \rho_{\Gamma}g; \quad (1.19)$$

$$\frac{\partial(\rho_{\text{T}}\varepsilon_{\text{T}}w_{\text{T}})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\text{T}}\varepsilon_{\text{T}}w_{\text{T}}^2)}{\partial x} = \beta(w_{\Gamma} - w_{\text{T}}) - G\frac{\partial\varepsilon_{\text{T}}}{\partial x} + \frac{2f_{\text{T}}\rho_{\text{T}}\varepsilon_{\text{T}}w_{\text{T}}^2}{D_{\text{а(пр)}}} + (\rho_{\text{T}} - \rho_{\Gamma})\varepsilon_{\text{T}}g. \quad (1.20)$$

Міжфазний коефіцієнт тертя за рівнянням Ергуна [82, 85-87]:

$$\text{- при } \varepsilon_{\Gamma} \leq 0.8: \quad \beta = 150 \frac{\varepsilon_{\text{T}}^2 \mu_{\Gamma}}{(\varepsilon_{\Gamma} d_{\text{е}} \Phi)^2} + 1,75 \frac{|w_{\Gamma} - w_{\text{T}}| \rho_{\Gamma} \varepsilon_{\text{T}}}{\varepsilon_{\Gamma} d_{\text{е}} \Phi}; \quad (1.21)$$

$$\text{- при } \varepsilon_{\Gamma} \leq 0.8: \quad \beta = \frac{3}{4} C_d \frac{|w_{\Gamma} - w_{\text{T}}| \rho_{\Gamma} \varepsilon_{\text{T}}}{d_{\text{е}} \Phi} \varepsilon_{\Gamma}^{-2,65}, \quad (1.22)$$

де коефіцієнт опору [82, 85-87]:

$$\text{- при } Re_{\Gamma} \leq 1000: \quad C_d = \frac{24}{Re_{\Gamma}} (1 + Re_{\Gamma}^{0,687}); \quad (1.23)$$

$$\text{- при } Re_{\Gamma} \geq 1000: \quad C_d = 0,44. \quad (1.24)$$

Критерій Рейнольдса для твердої та газової фаз [82, 85-87]:

$$Re_{\Gamma} = \frac{|w_{\Gamma} - w_{\text{T}}| d_{\text{е}} \rho_{\Gamma} \varepsilon_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}}; \quad Re_{\Gamma} = \frac{D_{\text{а(пр)}} w_{\Gamma} \rho_{\Gamma} \varepsilon_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}}. \quad (1.25)$$

Модуль напружень твердої фази [82, 85-87]:

$$G(\varepsilon_{\Gamma}) = \frac{\partial P}{\partial \varepsilon} = 10^{-8,76\varepsilon_{\Gamma} + 5,43}. \quad (1.26)$$

Для області розвиненого потоку робиться припущення, що коефіцієнт тертя f_{Γ} , модифіковані виразом Хагена-Пуайзеля, такий, як і для самого газу та визначається залежно від гідродинамічного режиму [82, 85-87]:

$$\text{- при } Re_T \leq 2100: \quad f_T = \frac{16}{Re_T}; \quad (1.27)$$

$$\text{- при } 2100 \leq Re_T \leq 100000: \quad f_T = \frac{0,0791}{Re_T^{0,25}}; \quad (1.28)$$

$$\text{- при } Re_T > 100000: \quad \frac{1}{\sqrt{f_T}} = 2 \log(Re_T \sqrt{f_T}) - 0,8. \quad (1.29)$$

При розрахунках вводиться кореляція Канно [82, 85-87]:

$$f_T = 0,0025 w_T^{-1}. \quad (1.30)$$

Втрати тиску на надання імпульсу газу та твердим частинкам визначаються з кінетичної енергії [82, 85-87]:

$$\Delta P_{\text{імпульсу}} = \frac{1}{2} [\rho_T \cdot \varepsilon_T \cdot w_T^2 + \rho_G \cdot \varepsilon_G \cdot w_G^2]. \quad (1.31)$$

Загальні втрати тиску на подолання тертя у псевдозрідженому шарі визначаються як сума втрат на тертя твердої та газової фаз [82, 85-87]:

$$\sum \Delta P_{\text{тертя}} = \Delta P_{\text{т.г.}} + \Delta P_{\text{т.т.}} \quad (1.32)$$

При визначенні втрат тиску на подолання сил тертя не існує універсального способу. Один із способів полягає у визначенні тертя твердих частинок через нормальні напруження і до внутрішнього кута тертя:

$$\Delta P_{\text{тертя}} = \frac{4}{D_{\text{а(пр)}}} \int_0^H (\tau_{wG} + \tau_{wT}) dx. \quad (1.33)$$

Найбільш поширений метод його визначення для випадку розвиненого потоку полягає у використанні рівняння Фаннінга [82, 85-87]:

$$\frac{4(\tau_{wG} + \tau_{wT})}{D_{\text{а(пр)}}} = \frac{4}{D_{\text{а(пр)}}} \left(\frac{1}{2} \rho_G \varepsilon_G w_G^2 f_G + \frac{1}{2} \rho_T \varepsilon_T w_T^2 f_T \right). \quad (1.34)$$

При розгляді тертя твердих частинок рівняння (1.34) спрощується з використанням коефіцієнта навантаження [83]:

$$\theta = \frac{\varepsilon_T \rho_T w_T}{\varepsilon_G \rho_G w_G}. \quad (1.35)$$

Тоді втрати тиску на тертя твердих частинок з урахуванням коефіцієнта тертя для твердих частинок f_T [83]:

$$\Delta P_{\text{т.т.}} = \frac{2}{D_{\text{а(пр)}}} f_{\text{т}} \theta w_{\text{Г}} \rho_{\text{Г}} w_{\text{Т}} H. \quad (1.36)$$

Однак за результатами проведених досліджень Кінно і Сайто встановили кореляційну залежність [83]:

$$2f_{\text{т}} w_{\text{Т}} = 5,7 \cdot 10^{-2} \sqrt{g D_{\text{а(пр)}}}. \quad (1.37)$$

Тому, втрати тиску на подолання тертя твердих частинок [83]:

$$\Delta P_{\text{т.т.}} = 5,7 \cdot 10^{-2} \frac{1}{D_{\text{а(пр)}}} \varepsilon_{\text{Г}} \rho_{\text{Г}} w_{\text{Г}} \theta H_0 \sqrt{g D_{\text{а(пр)}}}. \quad (1.38)$$

Втрати тиску в розвиненій області потоку на подолання тертя газу [83]:

$$\Delta P_{\text{т.г.}} = 2f_{\text{Г}} \varepsilon_{\text{Г}} \rho_{\text{Г}} w_{\text{Г}}^2 H_0 \frac{1}{D_{\text{а(пр)}}}. \quad (1.39)$$

Втрати тиску на гравітаційну складову в *CFB* моделі [83]:

$$\Delta P_{\text{гідрост.}} = gH(\rho_{\text{Т}} \varepsilon_{\text{Т}} + \rho_{\text{Г}} \varepsilon_{\text{Г}}). \quad (1.40)$$

Таким чином, існуючі рівняння для моделювання гідродинамічних умов при барботажному, або фонтануючому режимах псевдозрідження дають змогу із високою точністю описати реальний процес, що підтверджується результатами їх порівняння з дослідними даними [82-87]. Однак через відсутність фундаментальних досліджень перехідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі, який із точки зору процесів перенесення є більш ефективним, на даний момент не існує моделей для його опису, тому встановлення закономірностей його реалізації є дуже актуальною задачею.

Висновки до розділу 1

В сучасних умовах глобалізації важлива роль у вирішенні завдань продовольчого забезпечення відводиться Україні, на території якої зосереджено до 16% світових запасів ґрунтів, на яких можливо вирощувати сільськогосподарську продукцію, звідки впливає стратегічно важливе

завдання – збереження родючості ґрунтів при інтенсивному режимі їх експлуатації.

Світова практика вирішення цієї задачі тільки шляхом збільшення кількості внесення мінеральних добрив у теперішніх умовах виявилась малоефективною.

Тому великий практичний інтерес представляють добрива, що містять у змінних співвідношеннях поживні органічні та мінеральні речовини, розкислюючі домішки та гумінові речовини, вміст яких визначається агро-екологічними умовами їх застосування.

В сучасних умовах у якості сировини доцільно використовувати розчини сульфату амонію, що утворюється як побічний продукт на коксохімічних та хімічних виробництвах, а також значні кількості соняшникової золи, бурого вугілля й торфу для одержання комплексних гранульованих ОМД, що містять азот, фосфор, калій, кальцій, інші мікроелементи та задану кількість гумінових речовин.

У якості способу для перероблення рідких гетерогенних систем доцільно застосовувати техніку псевдозрідження, яка дозволяє одержати гранульований продукт із рівномірним розподіленням мінеральних та органічних компонентів по всьому об'ємі гранули із заданими фізико-механічними властивостями при використанні теплоти більше 50 %.

Кінетика процесу грануляції рідких систем у псевдозрідженому шарі залежить від взаємодії газового теплоносія (зріджуючого агенту) із зернистим матеріалом при здійсненні дифузійно-контрольованих процесів.

Тому доцільно провести дослідження різних режимів псевдозрідження і визначити його якісні та кількісні характеристики.

Мета і завдання 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.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ СТРУМЕНЕВО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ В АВТОКОЛИВАЛЬНОМУ РЕЖИМІ

2.1 Фізична модель грануляції органо-мінеральних добрив при зневодненні рідких гетерогенних систем у псевдозрідженому шарі

Для одержання гранульованих твердих композитів, що містять мінеральні поживні речовини, розкислюючі домішки та гумінові компоненти необхідно створити багатшарову структуру із товщиною $1...10 \cdot 10^{-6}$ м, що забезпечить статистичну рівномірність розподілення компонентів по об'єму гранульованого продукту з діаметром $d_e = 1,5...4,0$ мм.

Принципову схему проведення такого процесу наведено на рисунку 2.1.

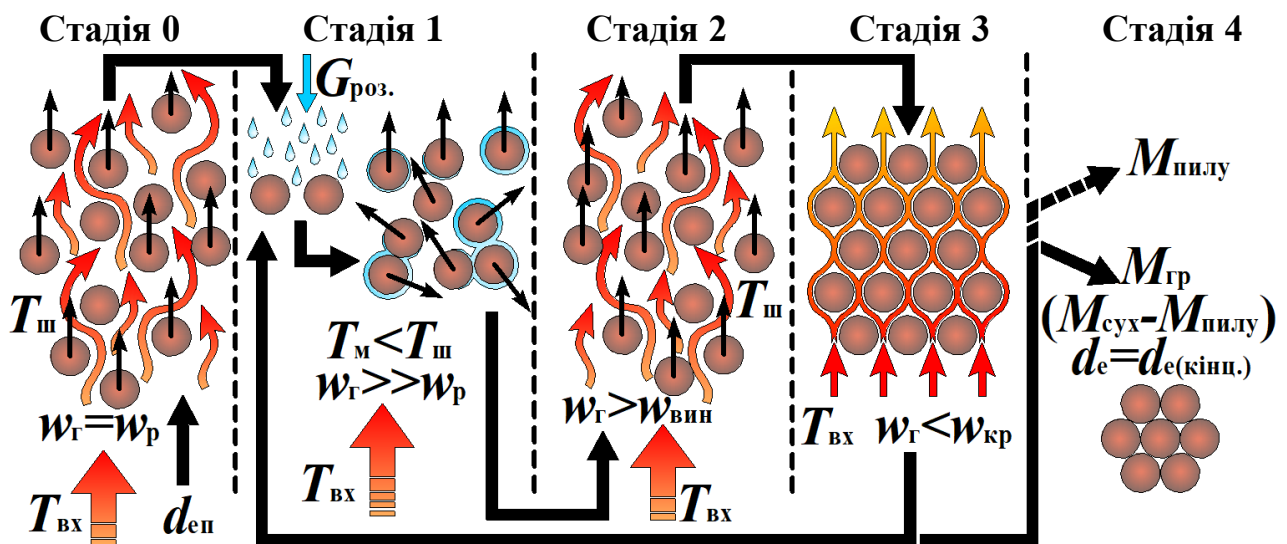


Рисунок 2.1 – Принципова схема процесу одержання органо-мінеральних добрив із пошаровою структурою

На стадії 0, рисунок 2.1, початкові центри грануляції із $d_{сп}$ при підведенні зріджувального агенту (теплоносія) із швидкістю $w_{р} > w_{кр}$ та температурою $T_{вх}$ нагріваються до температури шару $T_{ш} = 90...96$ °С.

При досягненні заданого значення $T_{ш}$ в середину псевдозрідженого шару механічним диспергатором вводиться рідка фаза, яка на поверхні частинок, внаслідок дії адгезійно-сорбційних сил, утворює надтонку плівку рідини. Для

запобігання перезволоження та утворення агломератів, час перебування гранул у зоні зрошення повинен бути якомога меншим, а зволожені гранули необхідно швидко розподілити між сухими гранулами. Цього можливо досягти шляхом створення ефективного об'ємного перемішування твердого матеріалу за допомогою зріджувального агента-теплоносія, стадія 1, рисунок 2.1.

На стадії 3, рисунок 2.1, відбувається випаровування вологи з утвореної на поверхні твердих частинок плівки рідини з одночасним перерозподілом вологи між рештою сухих гранул за рахунок підведення теплоти від сухих гранул та газового теплоносія. При цьому, процес зневоднення та сушіння доцільно проводити у фільтраційному режимі (стадія 3), рисунок 2.1. Це дозволить досягти максимальних значень коефіцієнтів перенесення дифузійно контрольованих процесів та сприятиме підвищенню механічної міцності новоутвореного мікрошару на поверхні гранул.

Після стадії 3, рисунок 2.1, зернистий матеріал за короткий термін контактує із високотемпературним теплоносієм, при чому відбувається повне видалення вологи із гранул, які в результаті цього набувають температури, близької до $T_{ш}$ і в подальшому повертаються в зону зрошення.

У результаті багатократного циклічного проходження всіх стадій 1-3 еквівалентний діаметр шару збільшується із середньою лінійною швидкістю росту гранул (λ) до заданого кінцевого ($d_{e(кінц.)}$) за час Δt проходження n циклів:

$$d_{e(кінц.)} = d_{e(i)} + \lambda \Delta t. \quad (2.1)$$

Гранули, які досягнуть заданого розміру ($d_{e(кінц.)}$) будуть виведені у вигляді готового гранульованого продукту з робочого циклу – стадія 4, рисунок 2.1.

Одночасно з цим утворюється і пилова фракція. Ефективність процесу гранулювання визначають коефіцієнтом грануляції ψ – відношення маси гранульованого продукту $M_{гр.}$ до маси сухих речовин $M_{сух.}$, що надходять із рідкою фазою на стадії 1 у зону зрошення:

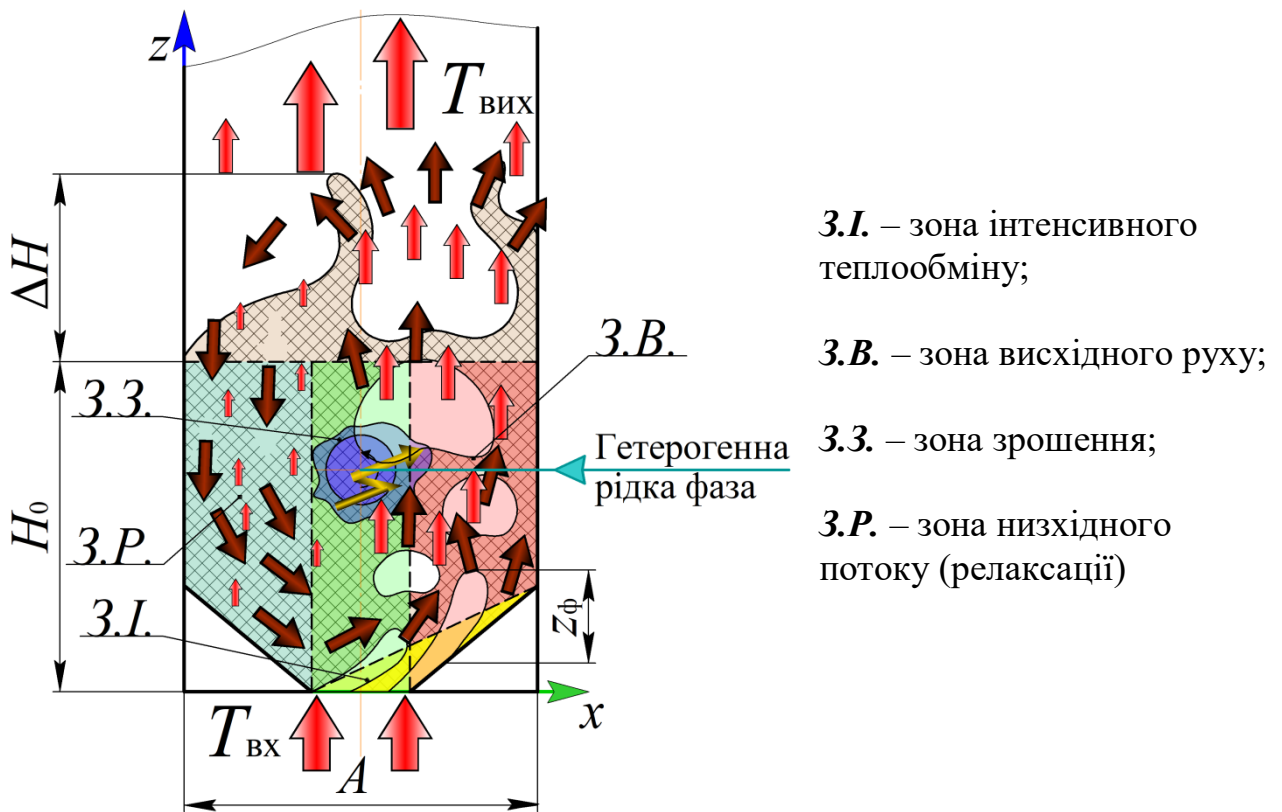
$$\psi = \frac{M_{\text{гр.}}}{M_{\text{сух.}}} 100\%; \quad (2.2)$$

$$M_{\text{гр.}} = M_{\text{сух.}} - M_{\text{пилу.}} \quad (2.3)$$

Цей коефіцієнт повинен бути $\psi \geq 90\%$, що є критерієм оцінки стійкості кінетики та ефективності процесу зневоднення та гранулювання.

Суміщення наведених стадій в одному апараті дозволяє техніка псевдозрідження.

Для реалізації такого механізму грануляції органо-мінеральних композитів із пошаровою структурою, необхідно забезпечити інтенсивну циркуляцію зернистого матеріалу з поступовим проходженням через відповідні технологічні зони апарата: зону інтенсивного теплообміну (3.1.), зону висхідного потоку (3.В.), зону зрошення (3.3.), та зону низхідного руху – релаксації (3.Р.), рисунок 2.2.



3.1. – зона інтенсивного теплообміну;

3.В. – зона висхідного руху;

3.3. – зона зрошення;

3.Р. – зона низхідного потоку (релаксації)

Рисунок 2.2 – Фізична модель процесу грануляції в апараті із псевдозрідженим шаром

У зоні інтенсивного теплообміну (3.1.), розташованій безпосередньо біля робочих поверхонь ГРП, рисунок 2.2, відбувається передача імпульсу від зріджувального агенту з температурою $T_{вх}$ до твердих частинок, внаслідок чого вони рухаються зі швидкістю, що перевищує швидкість пневмотранспорту, та відбувається інтенсивне випаровування вологи. Після цього, частинки з зони інтенсивного тепло-масообміну (3.1.) потрапляють у зону висхідного потоку (3.В.) та переносяться до зони зрошення (3.3.), де відбувається розподілення рідкої фази по поверхні твердих частинок, яка за рахунок адгезійно-сорбційних сил утримується на їх поверхні у вигляді тонкої плівки. Процес супроводжується насиченням вологою газового середовища до температури мокрого термометра та його наступним відведенням із апарата з температурою $T_{вих}$. Тверді частинки, на поверхні яких внаслідок випаровування вологи та масової кристалізації утворюється мікро-шар, переміщуються в зону релаксації (3.Р.) де відбувається зміцнення новоутвореної структури. Одночасно відбувається сорбція частини парів вологи сухими гранулами. Решта вологи переноситься до газового теплоносія, який рухається в режимі фільтрації через шар зернистого матеріалу.

Із зони (3.Р.) зернистий матеріал знову надходить до зони (3.1.). Процес багаторазово повторюється, до досягнення гранулами заданого еквівалентного діаметра, тобто апарат працює в автоколивальному режимі.

Отже, ефективність процесу зневоднення та грануляції визначається рушійною силою масопередачі в газовому теплоносії та оновленням поверхні контакту фаз в зоні зрошення (3.3.).

Для цього, необхідно забезпечити взаємодію газового середовища та твердих частинок, при якій реалізуються положення фізичної моделі.

Вибір раціональної конструкції ГРП та камери гранулятора дозволить досягти поставленої мети.

2.2 Фізична модель неоднорідного псевдозрідження

Процес зневоднення та грануляції можливий при застосуванні газового теплоносія, температура якого перевищує температуру плавлення мінеральних речовин у рідких системах. Економічна ефективність процесу зростає при збільшенні $\Delta T = T_{\text{вх}} - T_{\text{ш}}$.

Визначальну роль у забезпеченні стійкої кінетики процесу зневоднення та грануляції відіграє гідродинаміка.

Основними вимогами до гідродинамічного режиму є:

- відсутність застійних зон на робочих поверхнях газорозподільного пристрою (ГРП);
- забезпечення активного об'ємного перемішування матеріалу шляхом винесення щонайменше 40% маси шару за межі робочої зони з наступним поверненням до неї із частотою $1,5 \leq f \leq 3,5$ Гц;
- наявність мінімально достатньої поверхні зернистого матеріалу в зоні зрошення.

2.2.1 Взаємодія газового струменя при застосуванні газорозподільного пристрою щілинного типу

Для моделювання процесу неоднорідного псевдозрідження розглядаємо комірку, що набуває форму паралелепіпеда із розмірами $A \times B \times H$. При цьому, відношення $B:A=1:3$, рисунок 2.3.

Висота нерухомого шару матеріалу в апараті H_0 визначається з умов масообміну при стійкій кінетиці процесу грануляції експериментально. Попередніми дослідженнями [88] встановлено, що висота пробою газового факела $z_{\text{ф}}$ для гранульованого продукту із густиною $\rho_{\text{т}} = 1450$ кг/м³, еквівалентним діаметром $d_e = 1,42 \dots 3,97$ мм при застосуванні ГРП щілинного типу із коефіцієнтом живого перерізу $\varphi = 4,9$ % становить $z_{\text{ф}} = 80 \dots 100$ мм. Дальність пробою горизонтального (первинного) струменя 1 становить

$x_{\text{гор.}} = 80$ мм [88], рисунок 2.3 в, який вводиться в т. p , рисунок 2.3. На відстані $x_{\text{гор.}}$ струмінь змінює горизонтальний напрямок на вертикальний і на висоті Δ (т. k) від площини $I-I$ починає трансформуватися у газову бульбашку.

Запропоновано в точку k вертикально вводити додатковий (вторинний) газовий струмінь 2, який створює газовий факел висотою z_{ϕ} . Канал утвореного струменя 2 інтенсивно підживлюється первинним газовим струменем 1.

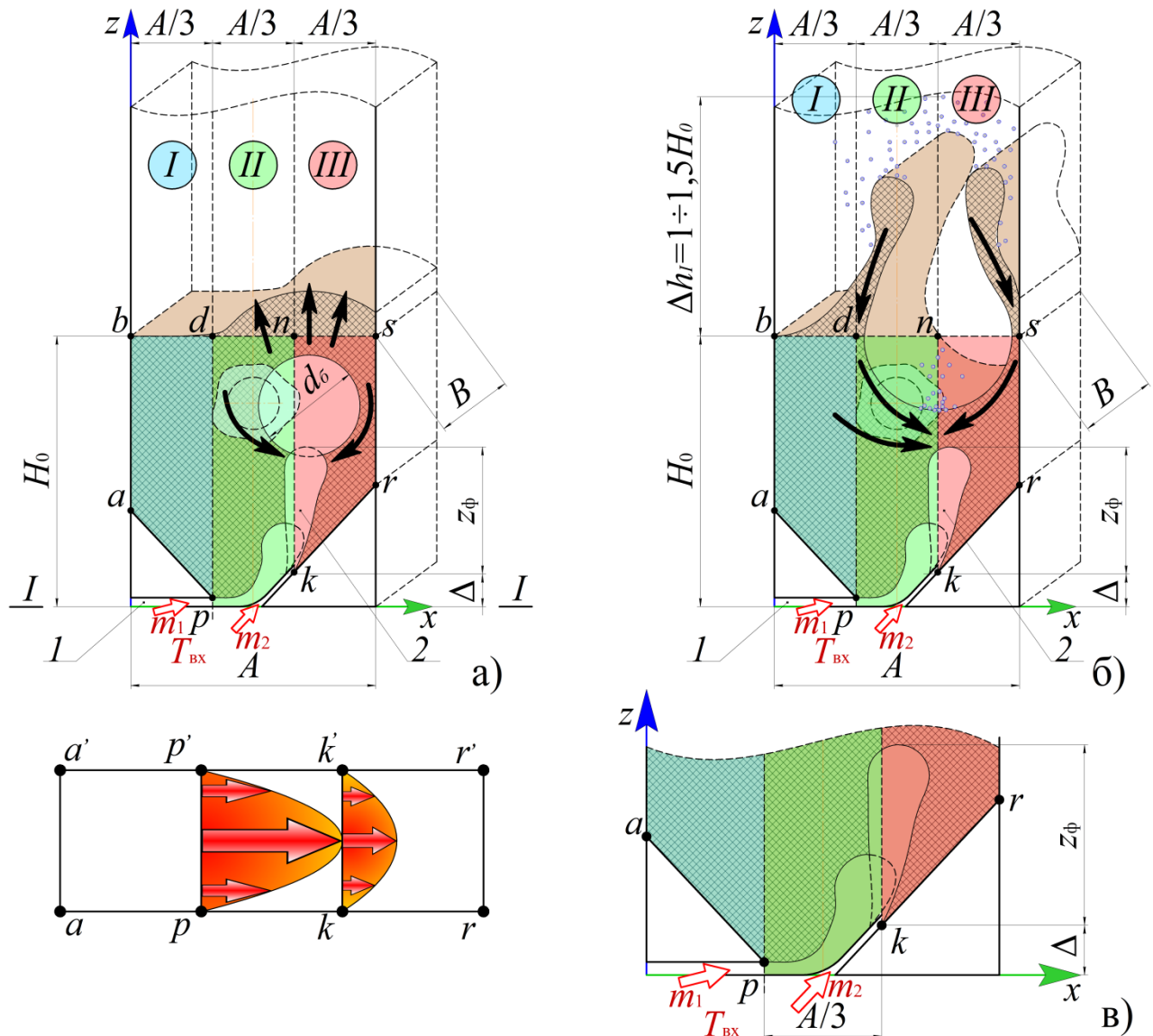


Рисунок 2.3 – Фізична модель взаємодії плоских газових струменів із зернистим матеріалом: а) фаза формування газової бульбашки; б) фаза інерційного винесення матеріалу; в) формування газових факелів біля поверхні ГРП

У результаті того, що швидкість підведення газового середовища в об'єднаний струмінь перевищує швидкість фільтрації по периметру утворених

газових пустот, на висоті $\Delta+z_{\phi}$ починає зростати газова бульбашка за умови, якщо $(\Delta+z_{\phi})/H_0 \ll 0,5$. Якщо ця умова не виконується – реалізується звичайний режим фонтанування.

Стан рівноваги сил, що діють на бульбашку в момент початку її руху до верхньої межі шару, запишеться:

$$\Delta P_{\text{підйому}} = \Delta P_{\text{гідростатичний}}; \quad (2.4)$$

$$V_{\phi} \rho_T (1 - \varepsilon_0) g = F_{\phi} (H_0 - d_{\phi} - z_{\phi} - \Delta) \rho_T (1 - \varepsilon_0) g, \quad (2.5)$$

або:

$$V_{\phi} = F_{\phi} (H_0 - d_{\phi} - z_{\phi} - \Delta), \quad (2.6)$$

де $V_{\phi} = \pi d_{\phi}^3 / 6$ – об'єм сферичної газової бульбашки, м^3 ; $F_{\phi} = \pi d_{\phi}^2 / 4$ – поперечний горизонтальний переріз бульбашки, м^2 .

Для випадку пласких щілин, через які подаються газові струмені, утворена бульбашка має циліндричну форму з горизонтальною віссю симетрії та шириною циліндра B , тобто:

$$V_{\phi} = \frac{\pi d_{\phi}^2}{4} B; \quad F_{\phi} = d_{\phi} B, \quad (2.7)$$

де B – ширина камери апарата, м.

Тоді:

$$\frac{\pi d_{\phi}^2}{4} B = d_{\phi} B (H_0 - d_{\phi} - z_{\phi} - \Delta), \quad (2.8)$$

звідки діаметр бульбашки:

$$d_{\phi} = \frac{H_0 - z_{\phi} - \Delta}{1 + \frac{\pi}{4}}. \quad (2.9)$$

Матеріал, що знаходиться перед лобовою частиною бульбашки, при її виході буде інерційно винесений за межі початкового шару, висотою H_0 . Якщо залишкова висота шару в зоні дії струменя 2 по площині kn становить $H_{\text{зал.}} > (\Delta+z_{\phi})$, рисунок 2.3 – відбувається утворення вторинної газової бульбашки відповідно меншого розміру.

При виконанні умови $H_{\text{зал.}} = (\Delta+z_{\phi})$ вторинна бульбашка не утворюється та реалізується фонтануючий режим.

Інерційно винесений за умовну лінію $bdns$ зернистий матеріал під дією сили тяжіння сходить із висоти Δh_l у зону II і III, що спричинює динамічний

удар, спрямований у протилежному до руху газового середовища напрямку. Це призводить до миттєвого зменшення активності у зоні фонтанування і, як наслідок, зупинки руху зернистого матеріалу на робочих поверхнях ГРП.

Окрім того, перемішування зернистого матеріалу проходить у зонах *II* та *III* і майже не захоплює зону *I*. Такий характер руху твердих частинок не сприяє інтенсифікації оновлення поверхні контакту фаз у зоні зрошення, рисунок 2.3, та призводить до неконтрольованого процесу утворення агломератів.

Таким чином, звичайний струменево-пульсаційний фонтануючий режим є непридатним для проведення процесів зневоднення та гранулювання із застосуванням високотемпературного теплоносія.

2.2.2 Неоднорідне струменево-пульсаційне псевдозрідження в автоколивальному режимі

Для створення автоколивального режиму псевдозрідження запропоновано після розриву бульбашки інтенсивно винесений зернистий матеріал в надшаровому просторі перемістити з правої зони *II* та *III* до лівої вертикальної площини зони *I* камери гранулятора шляхом встановлення направляючої вставки *E* [88], що зумовлює збільшення висоти шару, рисунок 2.4, та пульсаційного зміщення центра мас шару по вертикальній та горизонтальній осях, рисунок 2.5.

В результаті цього, у зоні *I* відбувається суттєве пульсаційне збільшення висоти шару на величину $\Delta h_I = (0,5...1,0) H_0$, рисунок 2.4 г, і, як наслідок, значно збільшується гідростатичний тиск у зоні низхідного руху *I* (т. *p*), рисунок 2.4. Це призводить до зсуву значної маси зернистого матеріалу в перехідну зону *II*, рисунок 2.5, оскільки в точці *p* тиск, що діє на шар, збільшується за рахунок зміщення центру мас шару (Ц.М.) в зону *I*, що спричинює зсув шару зернистого матеріалу в зону *II* по лінії dp .

У зв'язку з цим, у подальшому відбувається зміщення траєкторії руху газового факела, що виходить із т. p (первинного) та його об'єднання із вторинним струменем у т. k .

Таким чином, газовий теплоносій, що вводиться у зону III , створює локальний поршневий режим у зоні висхідного руху III через збільшення тиску матеріалу в зоні I та II .

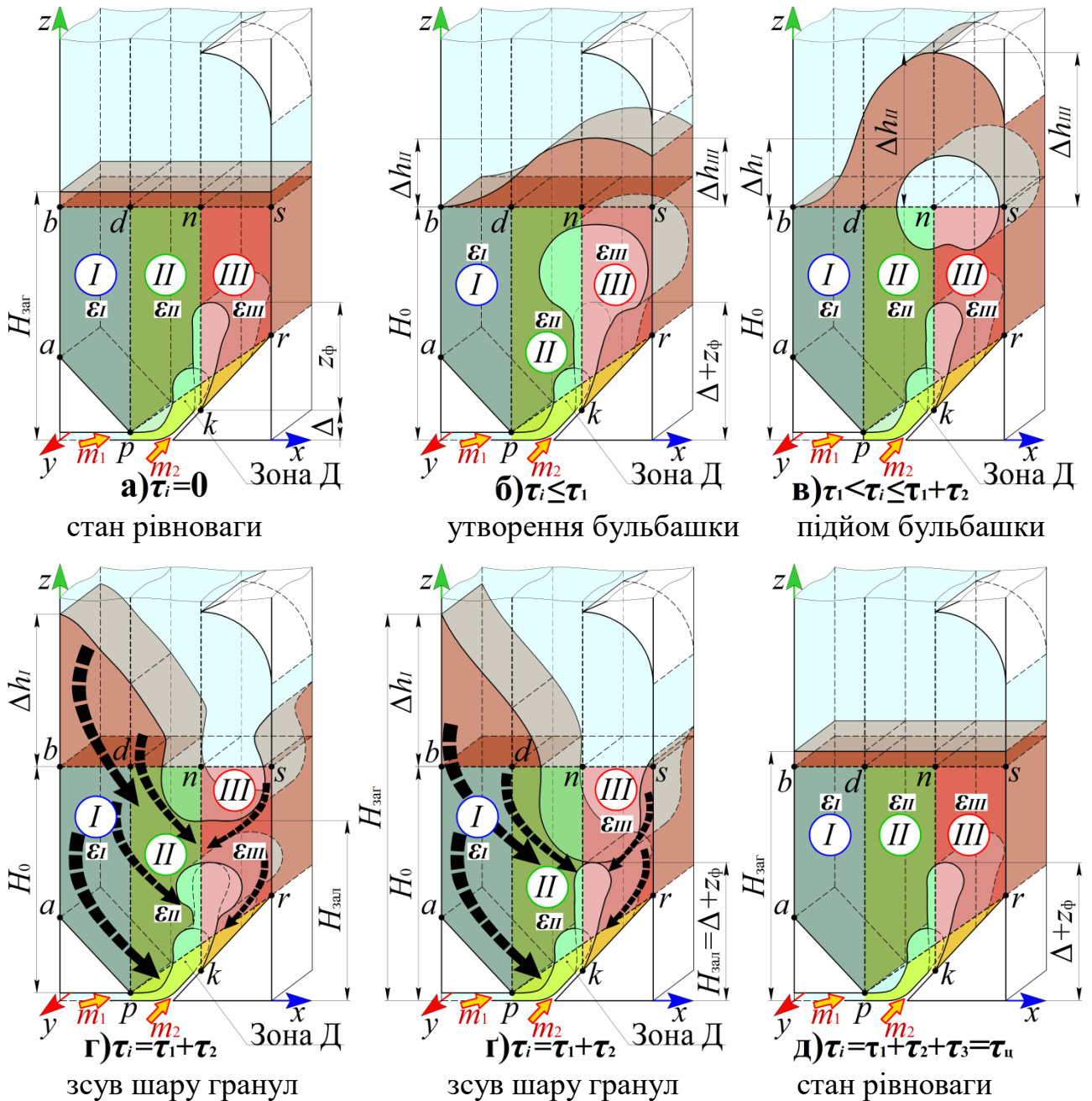


Рисунок 2.4. – Спосіб взаємодії газової та твердої фаз у камері гранулятора при неоднорідному псевдозрідненні в автоколивальному режимі

Так, у початковому стані рівноваги, рисунок 2.5 а, при значенні часу $\tau=0$ складові рівнодійної сили в точці “ p ” набувають мінімального значення і розраховуються за виразами:

$$N_{B(p)} = N_{B(p)\min} = (H_0 + \Delta h_{\text{ш}} - h_1)(1 - \varepsilon_0)\rho_T g, \quad (2.10)$$

де h_1 – вертикальний розмір першої щілини, м.

$$N_{\Gamma(p)} = N_{\Gamma(p)\min} = KN_{B(p)}. \quad (2.11)$$

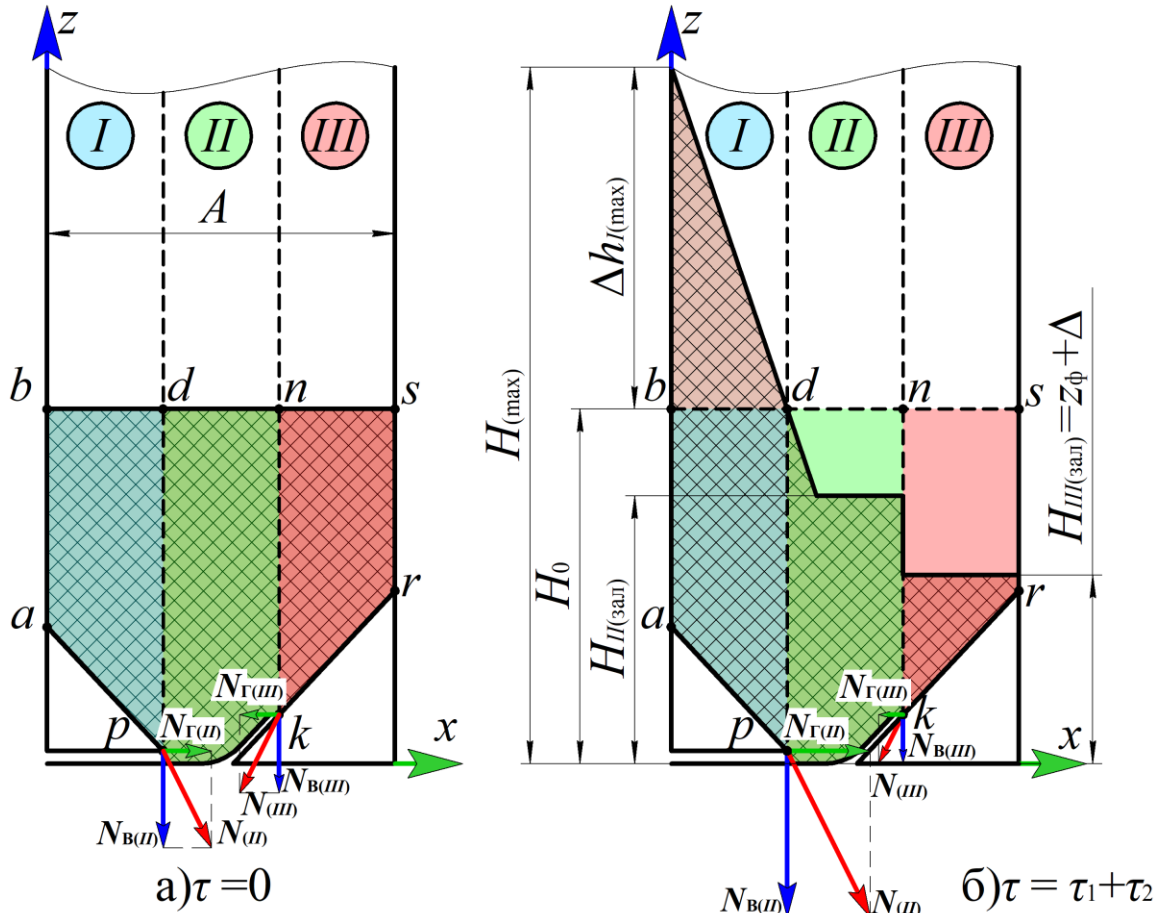


Рисунок 2.5 – Схема дії сил у робочій зоні ГРП

У цьому випадку значення складових рівнодійної сили в точці “ k ” набувають максимальних значень:

$$N_{B(k)\max} = \left(H_0 + \Delta H_0 - \Delta - \frac{h_2}{\cos \alpha} - z_{\phi} \right) (1 - \varepsilon_0)\rho_T g; \quad (2.12)$$

$$N_{\Gamma(k)\max} = KN_{B(k)\max}. \quad (2.13)$$

У цьому випадку горизонтальний струмінь повинен подолати найбільший спротив, що призводить до зменшення його довжини руху в горизонтальному напрямку, рисунок 2.4 а.

У кінці другої стадії при значеннях $\tau = \tau_1 + \tau_2$, та переміщення максимальної кількості матеріалу за межі об'єму початкового шару ($0,33M_{ш0}$) при $\varepsilon_{II(\max)} = 1,5\varepsilon_0$ та $\varepsilon_{III(\max)} = 2\varepsilon_0$ Ц.М. зміщується по вертикалі та горизонталі на відповідні величини $\Delta y_{Ц.М.}$ та $\Delta x_{Ц.М.}$, а зусилля, що діють у точці “*p*”, досягають максимальних значень:

$$N_{В(p)} = N_{В(p)\max} = (H_0 - h_1 + \Delta h_I)(1 - \varepsilon_0)\rho_T g. \quad (2.14)$$

Це зумовлює пропорційне збільшення діючої сили у горизонтальному напрямку:

$$N_{Г(p)} = N_{Г(p)\max} = KN_{В(p)\max}. \quad (2.15)$$

У той же час, рівнодійна сила в точці “*k*” набуває мінімальних значень через суттєве зменшення вертикальної та горизонтальної складових:

$$N_{В(k)} = N_{В(k)\min} = \left(\frac{H_{II} + H_{III}}{2} - \Delta - h_1 - z_\phi \right) (1 - \varepsilon_0)\rho_T g, \quad (2.16)$$

де H_{II} і H_{III} – залишкові висоти шару в зонах II та III.

Пропорційно зменшується і дія сили у горизонтальному напрямку:

$$N_{Г(k)} = N_{Г(k)\min} = KN_{В(k)\min}.$$

У цьому випадку гідравлічний опір руху струменів у горизонтальному та вертикальному напрямках зменшується, що сприяє підвищенню швидкості руху гранул над робочими поверхнями ГРП.

Реалізація такої моделі взаємодії газового середовища та зернистого матеріалу можлива при застосуванні спеціальної конструкції ГРП [89].

Зміщення точки введення вторинного факела на величину Δ по осі z сприяє зменшенню гідростатичного тиску в т. k , порівняно із т. p і, як наслідок, адекватного зменшення гідравлічного опору руху вторинного газового факела.

Таким чином, розмір газової бульбашки d_6 та координата її утворення залежить від H_0 та значення Δ , яке забезпечується конструкцією ГРП.

У свою чергу, горизонтальна дальність пробую $x_{гор}$ первинного газового струменя залежить від швидкості газу в щілинах ГРП, а відповідно і від кінетичної енергії, яка повинна бути достатньою для досягнення значення $x_{гор} > 0,8A/3$.

Отже, на відміну від однорідного псевдозрідження, енергія, що підводиться зі зріджувальним агентом, витрачається на локальне введення енергії з газовою фазою в задану область шару, що призводить до збільшення потенціальної енергії шару в 1,5...2 рази, а дисперсна система виводиться зі стану рівноваги. У подальшому під дією сил гравітації та загального тиску зернистий матеріал динамічно заповнює утворені пустоти в шарі та повертає систему до стану рівноваги (кінець циклу). Такий цикл повторюється багатократно з частотою $f < 2$ Гц і призводить до автоколивального режиму псевдозрідження.

У процесі зворотного руху зернистого матеріалу при заповненні пустот у камері апарата відбувається протитечійний рух зернистого матеріалу з теплоносієм, що значно підвищує рушійну силу масообміну. Окрім того, у зоні I рух газового теплоносія відбувається виключно у фільтраційному режимі.

При русі газової бульбашки вгору в її кормовій частині утворюється зниження тиску, що зумовлює трьох-мірне переміщення зернистого матеріалу в цю зону [90-104]. Внаслідок цього, у верхній частині шару відбувається активне переміщення матеріалу до висоти $H_{III(зал)} = z_{\phi} + \Delta$.

Таким чином, застосування струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження дозволяє суттєво оновити поверхню контакту фаз та підвищити коефіцієнти перенесення маси між фазами.

Основною вимогою до гідродинамічного режиму при реалізації процесу зневоднення та гранулювання є відсутність застійних зон на поверхні ГРП та інтенсивне оновлення поверхні контакту фаз у зоні зрошення.

Тому, дослідним шляхом необхідно визначити режим гідродинаміки при якому виконуються поставлені вимоги.

Відповідно до цього, автоколивальний неоднорідний струменево-пульсаційний режим псевдозрідження умовно складається з наступних стадій:

1 – утворення газової бульбашки з частковим розширенням шару в зоні II та III – τ_1 ;

2 – переміщення зернистого матеріалу із зон II і III в надшаровий простір та у зону I (інерційний викид) та збільшення висоти шару в цій зоні – τ_2 ;

3 – переміщення зернистого матеріалу в зворотному напрямку із зони I в зони II та III та повернення шару до початкового стану (стан рівноваги) – τ_3 .

Тоді загальний час циклу запишеться, як:

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3. \quad (2.17)$$

Загальна висота шару на першій стадії, коли утворюється бульбашка:

$$H_I (1 - \varepsilon_{\Gamma(\text{зар.})}(\tau_i)) = H_0 (1 - \varepsilon_0); \quad (2.18)$$

$$H_I = \frac{H_0 (1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon_{\Gamma(\text{зар.})}(\tau_i))}. \quad (2.19)$$

Приймаємо, що в зоні I (низхідній) порозність шару $\varepsilon_I = \text{const}$ і $\varepsilon_I = \varepsilon_0 = 0,4$.

Максимальні значення порозностей у зоні II – $\varepsilon_{II} = 1,5\varepsilon_0$ і у зоні III – $\varepsilon_{III} = 2\varepsilon_0$ розраховуються з мінімальних залишкових висот $H_{\text{зал.}}$ у зонах II і III, що визначає рівень неоднорідності псевдозрідження.

Залишкова висота шару в зоні III після досягнення максимального значення порозності шару в III зоні визначається як, м:

$$H_{\text{зал. III}} = \frac{H_0 (1 - \varepsilon_{\Gamma(III)\text{max}})}{(1 - \varepsilon_0)}. \quad (2.20)$$

Якщо мінімальна допустима залишкова висота шару в III зоні $H_{\text{зал. (III)}} = \Delta + z_{\text{ф}}$, тоді:

$$\varepsilon_{\Gamma(III)\text{max}} = 1 - \frac{(\Delta + z_{\text{ф}})(1 - \varepsilon_0)}{H_0}. \quad (2.21)$$

Прийнявши, що камера апарата має форму паралелепіпеда, тоді збільшення висоти шару над I зоною можна записати наступним чином:

$$\Delta h_I = \Delta h_{II} + \Delta h_{III}. \quad (2.22)$$

Тобто, Δh_I визначається як сума зменшення висот шару над зонами II – Δh_{II} та III – Δh_{III} . Величини цих параметрів розраховуються за виразами:

$$\Delta h_{II} = \frac{H_0 (\varepsilon_{\Gamma(II)}(\tau_i) - \varepsilon_0)}{1 - \varepsilon_0}. \quad (2.23) \quad \Delta h_{III} = \frac{H_0 (\varepsilon_{\Gamma(III)}(\tau_i) - \varepsilon_0)}{1 - \varepsilon_0}. \quad (2.24)$$

Тоді підставивши (2.23) та (2.24) у рівняння (2.22) значення збільшення висоти в зоні I набуває наступного вигляду, м:

$$\Delta h_I = \frac{H_0(\varepsilon_{\Gamma(III)}(\tau_i) + \varepsilon_{\Gamma(II)}(\tau_i) - 2\varepsilon_0)}{1 - \varepsilon_0}. \quad (2.25)$$

Швидкість зсуву матеріалу запропоновано визначати з використанням закону Бернуллі, м/с:

$$w_{зс.(I)} = \sqrt{2gH_{зс.}} \quad (2.26)$$

де $H_{зс.} = \Delta h_{I(\max)}$ – максимальна надлишкова висота збільшення шару (зсуву) над зоною I , м.

Цілком очевидно, що залежність висоти шару від порозності має нелінійний характер.

Для опису такого процесу доцільно використати підхід запропонований у роботі [83, 84] з використанням рівнянь збереження імпульсу для газової та твердої фаз:

$$\rho_T \varepsilon_T \left[\frac{\partial \vec{w}_T}{\partial \tau} + (\vec{w}_T \cdot \nabla) \vec{w}_T \right] + \rho_G \varepsilon_G \left[\frac{\partial \vec{w}_G}{\partial \tau} + (\vec{w}_G \cdot \nabla) \vec{w}_G \right] = -\nabla p - [\rho_T \varepsilon_T + \rho_G \varepsilon_G] \vec{g}. \quad (2.27)$$

Для поршневого режиму, нехтуючи інерцією газової фази, авторами [83, 84] рівняння 2.27 записується у вигляді:

$$\rho_T (1 - \varepsilon_G) \left[\frac{\partial w_{Tz}}{\partial \tau} + w_{Tz} \frac{\partial w_{Tz}}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_T (1 - \varepsilon_G) g. \quad (2.28)$$

Тоді, з урахуванням рівняння 2.28, якщо виразити результат лівої частини через швидкість переміщення центру мас шару $w_{ц.м.}$ [83, 84] по осі z :

$$H \rho_T (1 - \varepsilon_G(\tau_i)) \frac{\partial w_{ц.м.}}{\partial \tau} = \Delta P_{загальний}(\tau_i) - H \rho_T (1 - \varepsilon_G(\tau_i)) g. \quad (2.29)$$

Враховуючи це, було одержано наступне рівняння [83, 84]:

$$\frac{d^2 H(\tau_i)}{d\tau_i^2} = \frac{\Delta P_{загальний}(\tau_i)}{\rho_T (1 - \varepsilon_G(\tau_i)) H(\tau_i)} - g. \quad (2.30)$$

де $\Delta P_{загальний}(\tau_i)$ – поточне значення гідравлічного опору зернистого матеріалу, наявного в об'ємі початкового шару з висотою $H_0 + \Delta h_0$; Δh_0 – збільшення висоти шару за рахунок утворення газового факела, рисунок 2.4 б.

Умовна схема переміщення центру мас шару зернистого матеріалу наведена на рисунку 2.6.

У загальному випадку рух Ц.М. носить складний характер, тому запропоновано визначати хорду між початковим A_0 та крайнім верхнім положенням Ц.М. в т. A_{\max} . Відхилення положення Ц.М. по осях z та x визначалось величинами Δz та Δx . Прийнято, що переміщення Ц.М. по осі y відсутнє і $\Delta y = 0$ м. З урахуванням цього, довжина відрізка A_0A_{\max} може бути визначеною із виразу, м:

$$|A_0A_{\max}| = \sqrt{\Delta z_i^2 + \Delta x_i^2}. \quad (2.31)$$

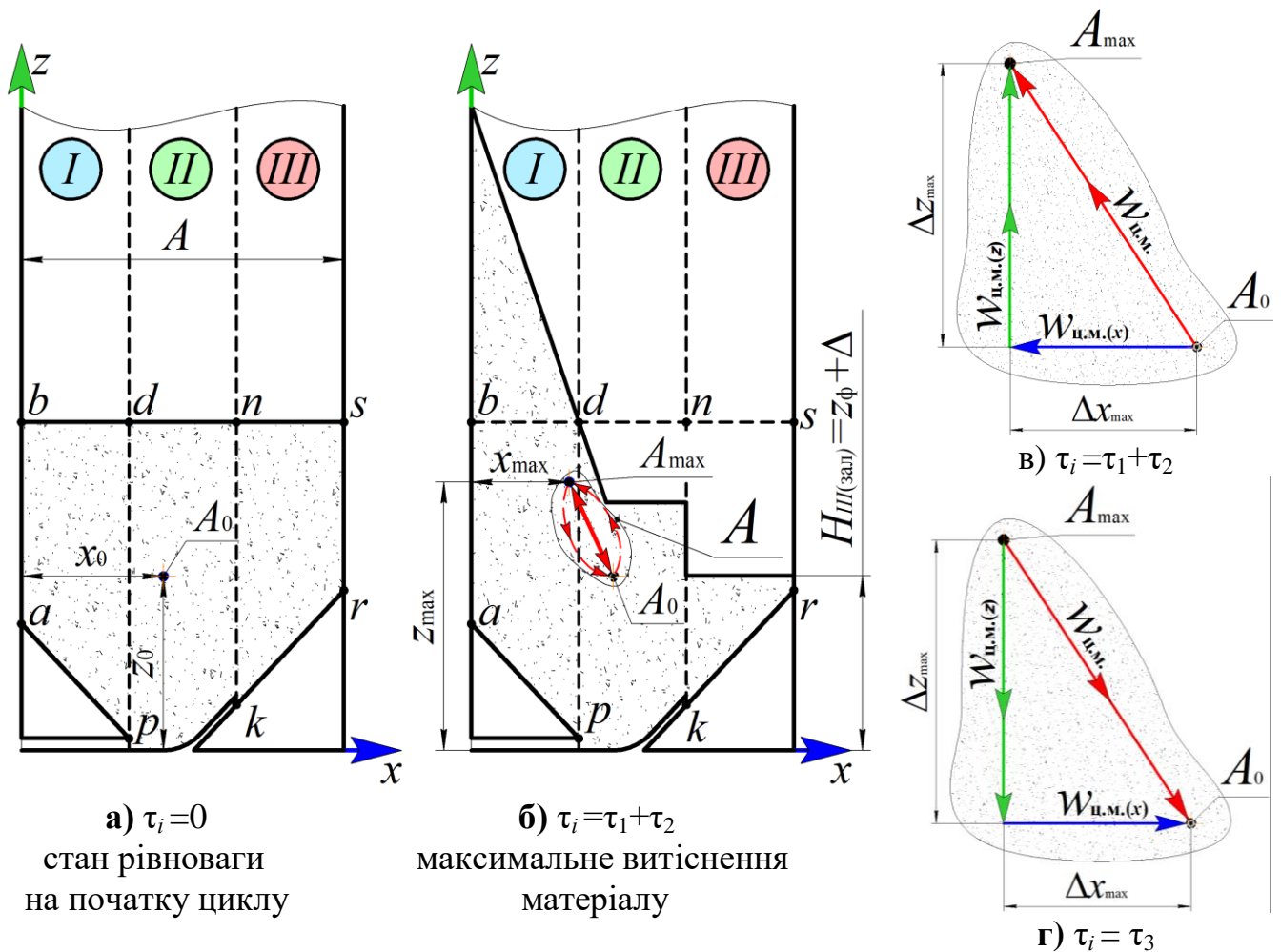


Рисунок 2.6 – Умовна схема переміщення центру мас шару при струменево-пульсаційному псевдозрідженні у автоколивальному режимі

Приведену швидкість переміщення центру мас шару можна визначити як:

$$w_{\text{ц.м.}}(\tau_i) = \frac{\sqrt{\Delta z_i^2 + \Delta x_i^2}}{\Delta \tau_i}. \quad (2.32)$$

При цьому на початку циклу пульсацій при $\tau_i = 0$ с шар зернистого матеріалу знаходиться у рівноважному стані, його центр мас займає початкове положення $A_0(z_0; x_0)$, рисунок 2.6, а значення приведеної швидкості його переміщення становить $w_{ц.м.} = 0$ м/с.

Відповідно до фізичної моделі, максимальне значення переміщення Ц.М. у точці A_{\max} досягається протягом другої стадії пульсації ($\tau_1 + \tau_2$), а повернення в точці A_0 у третій стадії (τ_3). Тоді швидкість переміщення Ц.М. від A_0 до A_{\max} ($w_{ц.м.(\uparrow)}$) і, відповідно, у зворотньому напрямку від A_{\max} до A_0 ($w_{ц.м.(\downarrow)}$), м/с:

$$w_{ц.м.(\uparrow)} = \frac{\sqrt{\Delta z_{\max}^2 + \Delta x_{\max}^2}}{\tau_1 + \tau_2}, \quad (2.33) \quad w_{ц.м.(\downarrow)} = \frac{\sqrt{\Delta z_{\max}^2 + \Delta x_{\max}^2}}{\tau_3}. \quad (2.34)$$

Усереднене значення приведеної швидкості при крайніх положеннях центру мас шару для стадії 3 також можна записати у вигляді, м/с:

$$w_{ц.м.(\downarrow)} = \sqrt{2g\Delta z_{\max}}. \quad (2.35)$$

Величину швидкості переміщення Ц.М. у точку A_{\max} проводимо з виразу:

$$\frac{w_{ц.м.(\uparrow)}}{w_{ц.м.(\downarrow)}} = \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_3} = K_{ц.м.} \quad (2.36)$$

Звідки $w_{ц.м.(\uparrow)} = w_{ц.м.(\downarrow)} K_{ц.м.}$, де $K_{ц.м.} < 1$, а значення τ_1 , τ_2 та τ_3 визначаються експериментально.

Проте, на відміну від запропонованого способу [83, 84] розрахунок загального гідравлічного опору проводився за іншою методикою [82, 85-87]:

$$\Delta P_{\text{загальний}}(\tau_i) = \Delta P_{\text{імпульсу}}(\tau_i) + \Delta P_{\text{тертя}}(\tau_i) + \Delta P_{\text{гідрост.}}(\tau_i). \quad (2.37)$$

Для розв'язку цього рівняння необхідно експериментально визначити динаміку зміни середньої та локальних (по зонах) значень порозності шару.

Переміщення маси матеріалу, пов'язане із формуванням газової бульбашки, відбувається із зон II та III. Тому запропоновано рівняння для визначення складової втрат тиску на переміщення маси із зон II та III виражається із значень порозності в цих зонах – $\varepsilon_{\tau(II;III)}$:

$$\Delta P_{\text{імпульсу}}(\tau_i) = \frac{1}{2} [\rho_{\tau} \varepsilon_{\tau(II;III)}(\tau_i) w_{\tau}(\tau_i)^2 + \rho_{\Gamma} \varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau_i) w_{\Gamma}(\tau_i)^2], \quad (2.38)$$

де $\varepsilon_{\Gamma(II;III)}$, $\varepsilon_{\Gamma(II;III)}$ – порозніть твердої та газової фаз у *II* та *III* зонах камери гранулятора; w_T , w_Γ – миттєві значення швидкості твердих частинок та газу відповідно, м/с.

Миттєві значення приведеної швидкості газової фази визначались із відомої залежності [52] з урахуванням порозності шару в *II* та *III* зонах камери гранулятора:

$$\text{Re}(\tau_i) = \frac{\text{Ar}\varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau_i)^{4,75}}{18 \cdot 0,61 \sqrt{\text{Ar}\varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau_i)^{4,75}}}; \quad (2.39)$$

$$w_\Gamma(\tau_i) = \frac{\text{Re}(\tau_i)v}{d_e}. \quad (2.40)$$

Усереднена миттєва швидкість твердих частинок у перших двох стадіях циклу, м/с:

$$w_T(\tau_i) = \frac{\Delta\varepsilon_{\Gamma(II;III)}}{\Delta\tau} = \frac{\varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau_{i-t}) - \varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau_i)}{\tau_i - \tau_{i-t}}. \quad (2.41)$$

Гідравлічний опір на подолання сил тертя при русі газу та тертя між твердими частинками проводився за запропонованим автором [82, 85-87] виразом:

$$\sum \Delta P_{\text{тертя}}(\tau_i) = \Delta P_{\text{т.г.}}(\tau_i) + \Delta P_{\text{т.т.}}(\tau_i); \quad (2.42)$$

$$\Delta P_{\text{т.г.}}(\tau) = 2f_{\Gamma}\varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau)\rho_{\Gamma}w_{\Gamma}^2H_0 \frac{1}{D_{\text{а(пр)}}}; \quad (2.43)$$

$$\Delta P_{\text{т.т.}}(\tau) = 5,7 \cdot 10^{-2} \frac{1}{D_{\text{а(пр)}}} \varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau)\rho_{\Gamma}w_{\Gamma(\text{кр})}\theta H_0 \sqrt{gD_{\text{а(пр)}}}; \quad (2.44)$$

$$\theta(\tau) = \frac{\varepsilon_{\text{т(II;III)}}(\tau)\rho_{\text{т}}w_{\text{т}}(\tau)}{\varepsilon_{\Gamma(II;III)}(\tau)\rho_{\Gamma}w_{\Gamma}(\tau)}. \quad (2.45)$$

Гідравлічний опір шару визначався за виразом, запропонованим автором [82, 85-87]:

$$\Delta P_{\text{гідрост.}}(\tau_i) = g \int_0^{H_i} (\rho_{\text{т}}\varepsilon_{\text{т(зар.)}}(\tau) + \rho_{\Gamma}\varepsilon_{\Gamma(\text{зар.)}}(\tau)) dz, \quad (2.46)$$

де H_i – значення висоти шару при певному часі τ_i , м.

На відміну від [82, 85-87] гідростатичний тиск визначається з урахуванням фізичної моделі:

$$\Delta P_{\max} = \Delta P_{\text{гiдрост.}(0)} + \Delta P_{\text{бульб.}} = \rho_{\text{T}}(1 - \varepsilon_0')g(H_0 + \Delta H_0 + d_{\text{б}(\max)}), \quad (2.47)$$

де $\Delta P_{\text{гiдрост.}(0)}$ – гiдростатичний опiр нерухомого шару, Па:

$$\Delta P_{\text{гiдрост.}(0)} = \rho_{\text{T}}(1 - \varepsilon_0')g(H_0 + \Delta H_0), \quad (2.48)$$

де ε_0' – порознiсть шару з урахуванням утворених та постiйно наявних газових факелiв; d_{\max} – максимально можливий розмiр газової бульбашки у момент вiдриву вiд газових факелiв.

При чому середню швидкiсть росту газової бульбашки можна визначити з урахуванням змiни порознiсть шару в II та III зонах камери гранулятора:

$$\frac{dV_{\text{б}}}{d\tau} = f(\varepsilon_{\text{Г}(II;III)}) = K_{\varepsilon} \frac{d\varepsilon_{\text{Г}(II;III)}}{d\tau} = K_{\varepsilon} \frac{\varepsilon_{\text{Г}(II;III)}(\tau_{i-t}) - \varepsilon_{\text{Г}(II;III)}(\tau_i)}{\tau_i - \tau_{i-t}}, \quad (2.49)$$

де K_{ε} – безрозмiрний коефiцiєнт, отриманий дослiдним шляхом.

З урахуванням моделi витiснення маси матерiалу з фiксованого об'єму шару ($A \times B \times H$) визначається кiлькiсть маси зернистого матерiалу, винесеного за межi шару (iз стартовою висотою $H_0 + \Delta H_0$), як:

$$\Delta M_{(\max)} = \frac{(\Delta P_{\max} - \Delta P_{\text{гiдрост.}(0)})F_{\text{а}}}{g} \cdot K_{\text{а}}, \quad (2.50)$$

де $K_{\text{а}}$ – коефiцiєнт, що враховує звуження камери гранулятора в зонi ГРП (для розробленої конструкцiї ГРП $K_{\text{а}}=0,875$); $F_{\text{а}}=A \cdot B$ – площа поперечного перерiзу камери гранулятора з фiксованими розмiрами $A \times B \times H_0$, м²:

Тодi залишкова маса шару в апаратi становитиме, кг:

$$M_{\text{зал.}(min)} = M_0 - \Delta M_{\text{виносу}(max)}, \quad (2.51)$$

або:

$$M_{\text{зал.}}(\tau_i) = M_0 - \Delta M(\tau_i) = V_{\text{ш0}} \left(1 - \varepsilon_{\text{Г}(заг.)(\tau)} \right) \rho_{\text{T}}. \quad (2.52)$$

Тому поточне значення гiдростатичного тиску визначається як, Па:

$$\Delta P_{\text{гiдрост.}}(\tau_i) = \frac{M_{\text{зал.}}(\tau_i)g}{F_{\text{а}} \cdot K_{\text{а}}}. \quad (2.53)$$

Для розв'язку математичної моделi необхідно дослiдним шляхом визначити характер змiни порознiсть шару в часi $\varepsilon_{\text{Г}}=f(\tau)$.

Для цього, шляхом відеозйомки визначається залежність порозності у вказаній зоні $D - \varepsilon_{Di} = f(\tau)$ і порівнюється із допустимим заданим $[\varepsilon_D] = 0,85 \dots 0,95$.

Для кількісної оцінки якості гідродинаміки використано метод Тагуті, який дозволяє розрахувати показник втрати якості гідродинаміки [130]:

$$L_D = K_1 \left([\varepsilon_D] - \varepsilon_{Di} \right)^2 + K_2 \left(\frac{[\delta] - \delta_i}{l} \right)^2, \quad (2.54)$$

де $K_1 = 0,3$ та $K_2 = 0,7$ – вагові коефіцієнти; $\varepsilon_{дійсне}$ – експериментально визначене поточне значення порозності; $[\delta] = 0,01l$, м; l – довжина хорди пластини ГРП, м.

Якість гідродинаміки [116, 125, 126, 130]:

$$Y_a = 1 - L. \quad (2.55)$$

Область задовільної якості знаходиться при значенні якості гідродинаміки $0,9 \leq Y_a \leq 1$. Максимальне значення якості гідродинаміки $Y_a = 1$ буде досягнуто при величині показника втрати якості $L \rightarrow 0$ [116, 125, 126, 130]. Остаточне задовільне значення якості гідродинаміки буде визначатися дослідним шляхом.

Технічна концепція ГРП щілинного типу полягає у тому, щоб у шар зернистого матеріалу можна було локально ввести таку кінетичну енергію, яка б із частотою $f = 1,5 \dots 2$ Гц забезпечила збільшення кінетичної енергії псевдозрідженого шару практично у 2 рази.

Витрати потужності на збільшення потенційної енергії шару:

$$E_{\pi} = \frac{\Delta M_{\text{ш}}}{\tau_1 + \tau_2} (H_0 + \Delta h_l) g. \quad (2.56)$$

При цьому повинна виконуватися умова $E_{\kappa} > E_{\pi}$:

$$E_{\kappa} = \frac{(m_1 + m_2) w_{\text{ш}}^2}{2}, \quad (2.57)$$

де $m_1 + m_2$ – сумарні масові витрати зріджувального агента, кг/с; $w_{\text{ш}}$ – швидкість газу в щілинах ГРП, м/с (приймаємо, що $w_{\text{ш}} = w_{\text{ш}1} = w_{\text{ш}2}$).

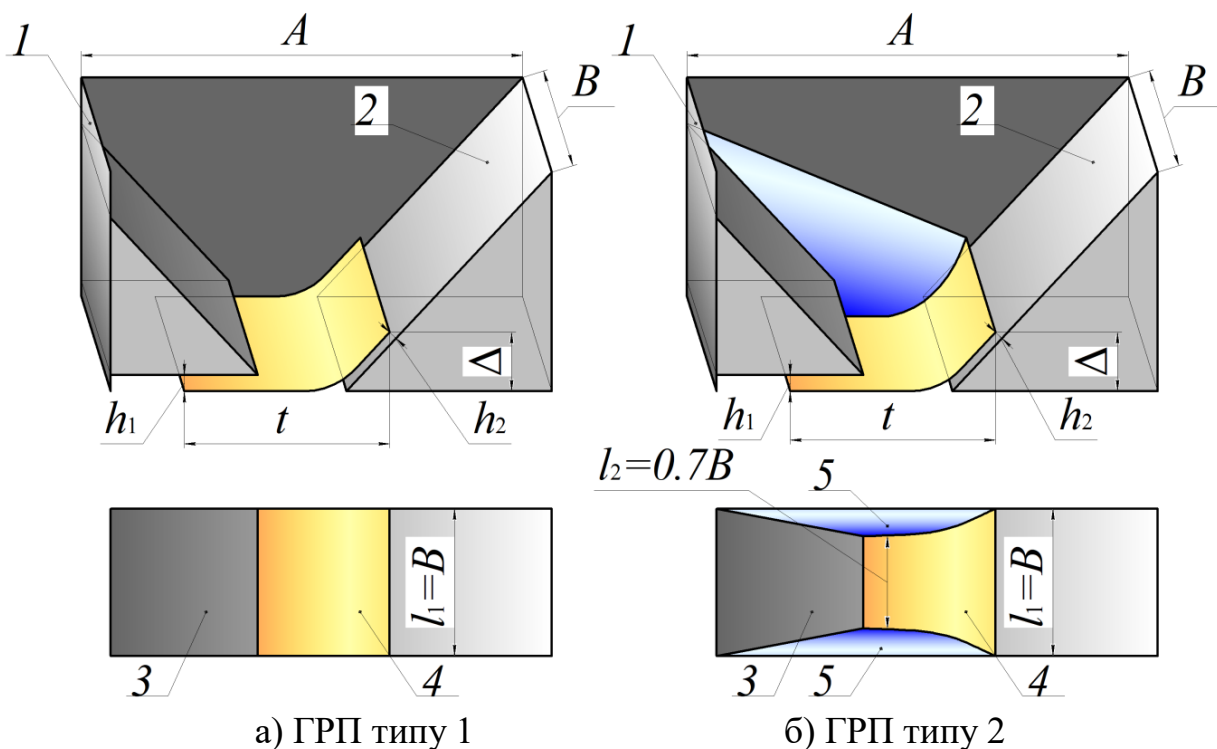
Якщо масові витрати газу визначаються із теплового розрахунку, а швидкість газу в постійному перерізі апарату визначається з урахуванням фізичних та реологічних властивостей твердих частинок та газового

середовища – швидкість у щілинах ГРП можливо регулювати зміною площі щілин.

2.4 Методика проведення комплексних експериментальних досліджень

2.4.1 Визначення коефіцієнта гідравлічного опору ГРП

Спосіб формування газових струменів у зоні ГРП, а також активних газових струменів у шарі зернистого матеріалу визначається конструкцією ГРП. Попередніми дослідженнями [88, 89] було встановлено, що найбільш раціональною є конструкція ГРП щілинного типу, рисунок 2.8.



1 – корпус апарату; 2 – правий колосник; 3 – лівий колосник;

4 – горизонтальна пластина; 5 – звужуючі вставки

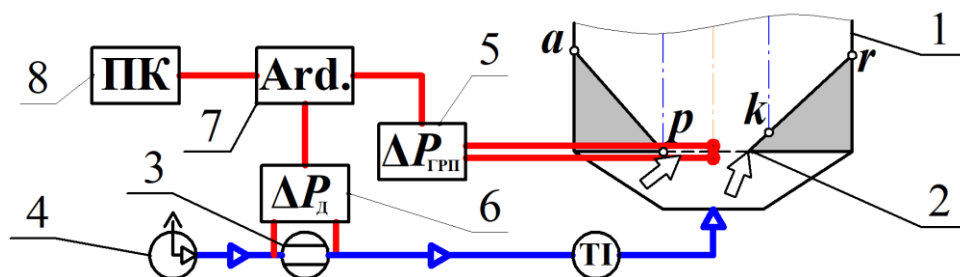
Рисунок 2.8 – Конструкції ГРП щілинного типу

Відмінність конструкцій полягає у зменшенні площі введення газового потоку через щілину 1.

Метою досліджень було визначення коефіцієнта гідравлічного опору газорозподільного пристрою.

Для проведення експериментальних досліджень був створений спеціальний експериментальний стенд, наведений на рисунку 2.9.

Витрати повітря, яке подається газодувкою 4, вимірювалися датчиками малих тисків (*MPXV7007DP*) 7 з точністю $\pm 0,1$ Па. Температура газу вимірювалася безпосередньо перед ГРП термопарою в комплекті з електронним потенціометром А-565 із точністю $\pm 0,5$ °С [88, 111]. Гідравлічний опір ГРП вимірювався датчиками малих тисків (*MPXV7007DP*) 6 з точністю $\pm 0,1$ Па з частотою 63 виміри в секунду, під'єднаних до комп'ютера через контроллер *Arduino Pro Mini*.



1 – гранулятор псевдозрідженого шару; 2 – газорозподільний пристрій (ГРП); 3 – камерна діафрагма; 4 – газодувка для подачі повітря; 5, 6 – датчики малих тисків *MPXV7007DP*; 7 – контроллер *Arduino Pro Mini*; 8 – комп'ютер

Рисунок 2.9 – Загальний вид дослідного стенду для визначення коефіцієнта гідравлічного опору ГРП

Коефіцієнт гідравлічного опору ГРП розраховується за виразом:

$$\Delta P_{\text{ГРП}} = \xi \frac{w_{\text{щ}}^2 \rho_{\text{Г}}}{2}. \quad (2.58)$$

Приймаємо:

$$A_{\text{ГРП}} = \frac{w_{\text{щ}}^2 \rho_{\text{Г}}}{2}. \quad (2.59)$$

Тоді гідравлічний опір ГРП приймає вигляд:

$$\Delta P_{\text{ГРП}} = \xi A_{\text{ГРП}}. \quad (2.60)$$

Швидкість газу в щілинах визначається за виразом:

$$w_{щ} = \frac{V_{сек}}{\varphi} 100\%, \quad (2.61)$$

де φ – коефіцієнт живого перерізу ГРП, %:

$$\varphi = \frac{F_{щ}}{AB} 100\%; \quad \varphi_1 = \frac{h_1 + h_2}{A} 100\%; \quad \varphi_2 = \frac{0,7h_1 + h_2}{A} 100\%, \quad (2.62)$$

де $F_{щ}$ – сумарна поверхня щілин, м²:

$$F_{щ} = (h_1 + h_2)B, \quad (2.63)$$

де h_1 та h_2 – висоти щілин ГРП, рисунок 2.8.

Об'ємні секундні витрати повітря при даній температурі вимірюються камерною діафрагмою та обчислюється за виразом, м³/с:

$$V_{сек} = 4,927 \cdot 10^5 \sqrt{\Delta P_{д}(273 + t_{сер})}, \quad (2.64)$$

де $t_{сер}$ – температура оточуючого середовища (лабораторії), °С.

Коефіцієнт гідравлічного опору визначається за виразом:

$$\xi = \frac{\Delta P_{ГРП}}{A_{ГРП}} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.65)$$

2.4.2 Визначення порозності та висоти шару в камері апарата

Метою досліджень було визначення впливу конструктивних параметрів газорозподільного пристрою та камери апарата на неоднорідність шару при псевдозрідженні.

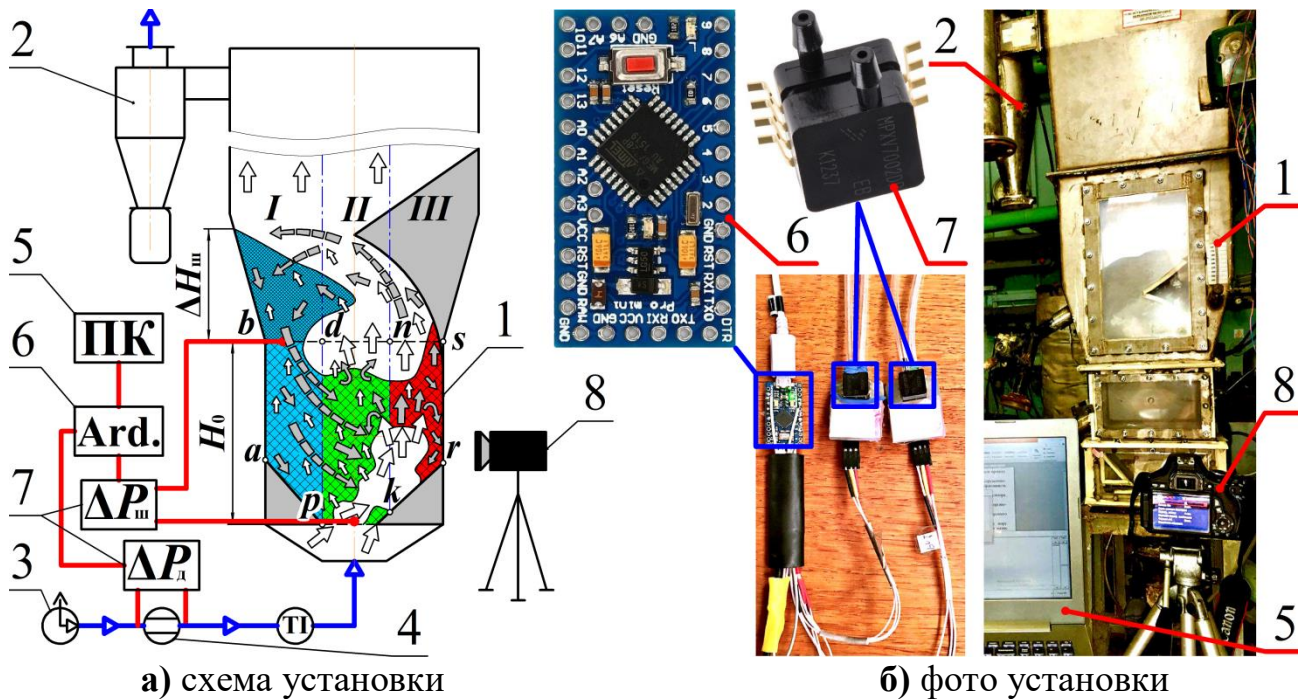
Для проведення досліджень гідродинаміки псевдозрідженого шару було створено установку, наведену на рисунку 2.10.

Для оцінки ступеня неоднорідності шару в апараті, необхідно визначити порозність шару в зоні низхідного потоку *I*, перехідній зоні *II* та зоні висхідного потоку *III*, рисунок 2.10, при $1,0 \leq K_w \leq 2,0$.

За допомогою відеокамери 9, рисунок 2.10, проводилася відеофіксація стану шару в камері апарата. Для цього, у якості передньої стінки апарата,

встановлено прозору пластину. Після чого проведено відеоаналіз отриманих результатів та виконано розкадровку процесу з частотою 0,04 кадра в секунду.

Виконувався аналіз отриманих фотознімків, при якому визначався об'єм пустот V_{Π} в зонах *I*, *II* та *III* у комірці апарату з фіксованими розмірами.



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

Рисунок 2.10 – Експериментальна установка для дослідження гідродинаміки псевдозрідженого шару

За результатами експериментів визначалася порозність шару:

$$\varepsilon_i = \frac{V_{\Pi(i)}}{V_{\text{ш}(i)}}, \quad (2.66)$$

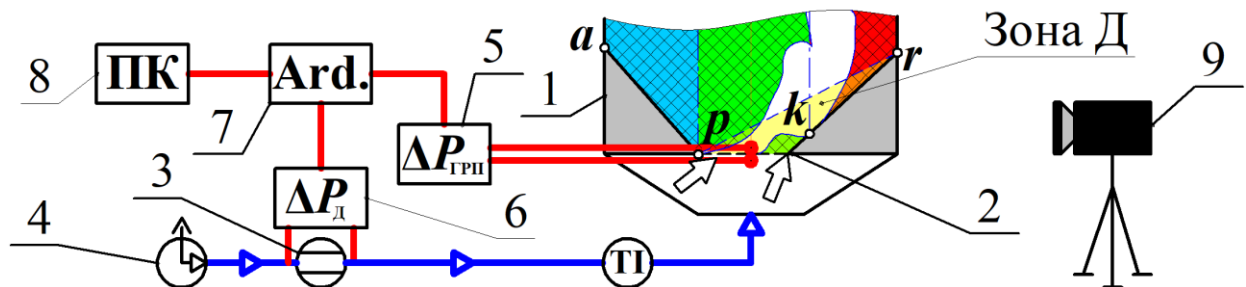
де $V_{\text{ш}} = V_I + V_{II} + V_{III}$ – загальний об'єм шару, м³.

2.4.3 Визначення порозності в робочій зоні ГРП

Метою досліджень було визначення впливу конструктивних параметрів газорозподільного пристрою на неоднорідність шару в робочій зоні ГРП.

Для проведення досліджень була створена установка, рисунок 2.10, із дослідним стендом, наведеним на рисунку 2.11.

Для оцінки ступеня неоднорідності шару в робочій зоні ГРП (зона Д), рисунок 2.11, необхідно визначити порозність шару в зоні Д.



- 1 – гранулятор псевдозрідженого шару; 2 – ГРП; 3 – камерна діафрагма;
 4 – газодувка для подачі повітря; 5, 6 – датчики малих тисків *MPXV7007DP*;
 7 – контроллер *Arduino Pro Mini*; 8 – комп'ютер; 9 – відеокамера

Рисунок 2.11 – Загальний вид дослідної установки для визначення порозності шару в робочій зоні ГРП

За допомогою відеокамери 8, рисунок 2.11, проводилася відеофіксація шару в робочій зоні ГРП (зона Д), для цього в якості передньої стінки ГРП, встановлено прозору пластину. Після чого проведено відеоаналіз отриманих результатів та виконано розкадровку процесу з частотою 0,04 кадра в секунду.

Виконувався фото аналіз отриманих знімків, при якому визначався об'єм шару в зоні Д ($V_{ш(Д)}$) та пустот в ньому ($V_{п(Д)}$). На основі результатів експериментів визначалася порозність шару за формулою:

$$\varepsilon_i = \frac{V_{п(Д)}}{V_{ш(Д)}}. \quad (2.67)$$

2.4.4 Визначення загального тиску в шарі та індексу перемішування

Метою досліджень було визначення впливу об'ємних витрат повітря на вході в апарат та еквівалентного діаметру зернистого матеріалу на загальний тиск у шарі та індекс перемішування шару.

Для проведення досліджень була використана установка, наведена на рисунку 2.11.

Для визначення індексу перемішування зернистого матеріалу необхідно виміряти перепад загального тиску в шарі.

Перепад загального тиску в шарі вимірювався датчиками малих тисків (*MPXV7007DP*) 6, з точністю $\pm 0,1$ Па з частотою 63 виміри в секунду, під'єднаних до комп'ютера через контроллер *Arduino Pro Mini*, рисунок 2.11.

За результатами експериментів будувалася крива псевдозрідження та визначався індекс перемішування шару:

$$j_{\Delta P} = (\Delta P_{\max} - \Delta P_{\text{гідрост.}(0)}) / \Delta P_{\text{гідрост.}(0)} = \Delta P_{\text{амп.}} / \Delta P_{\text{гідрост.}(0)}, \quad (2.68)$$

де ΔP_{\max} – максимальне значення загального тиску в шарі, Па.

2.4.5 Визначення кінетичних характеристик процесу грануляції органо-мінеральних добрив

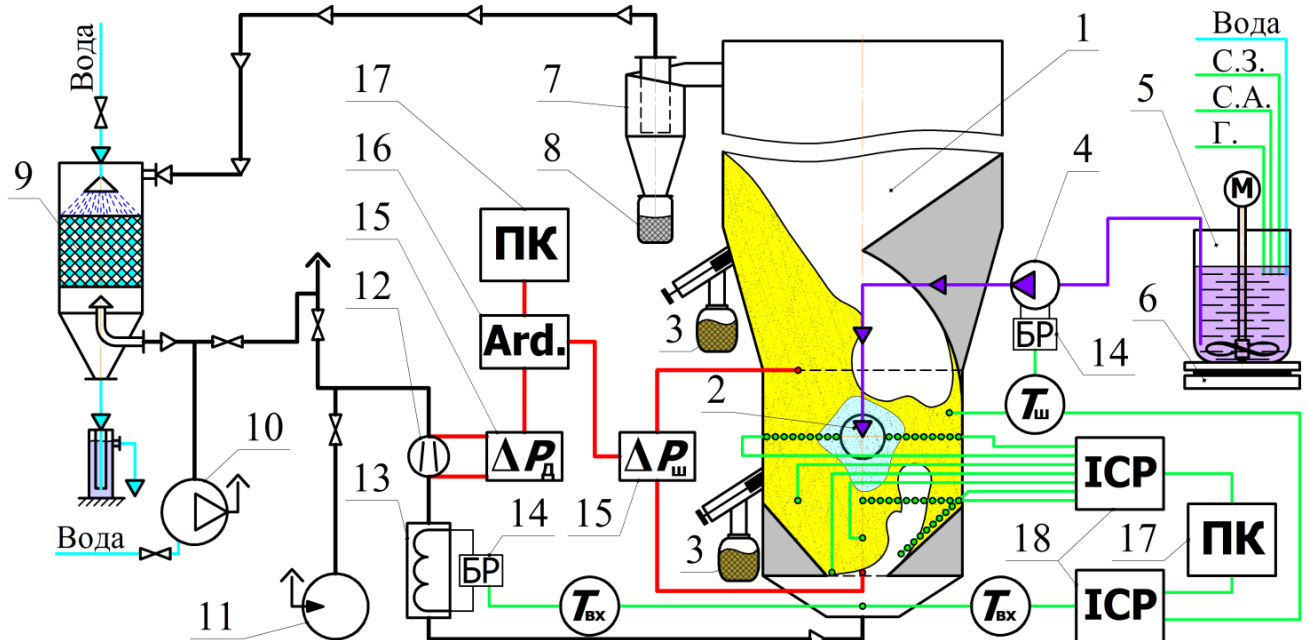
Метою експериментальних досліджень є визначення технологічних умов проведення безперервного процесу грануляції органо-мінеральних добрив з пошаровою структурою та заданими фізико-хімічними властивостями при застосуванні нової конструкції ГРП.

Для забезпечення умов фізичної моделі досліди проводились в грануляторі з псевдозрідженим шаром, який має прямокутну форму з встановленими в ньому направляючою вставкою та ГРП щілинного типу на спеціально розробленій дослідній установці для гранулювання багат шарових твердих органо-мінеральних добрив, рисунок 2.12, [88, 111]. Детальний опис установки наведено у додатку Б.

У якості початкових центрів грануляції використовувались кристали сульфату амонію, або дрібні гранули на основі сульфату амонію та органічних домішок. Температуру нагрітого теплоносія на вході до гранулятора необхідно тримати на рівні 205 °С, у псевдозрідженому шарі – 95...100 °С, за рахунок

зміни витрат робочого розчину, який за допомогою конічного диспергатора диспергується всередину псевдозрідженого шару.

Робочий розчин готувався на основі 50 %(мас.) та 60 %(мас.) водяного розчину сульфату амонію з рН = 6,5...7,6 з домішками соняшникової золи, бентаніту та гумінових речовин.



- 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 3.12 – Схема експериментальної установки

У стаціонарному процесі необхідно безперервно вимірювати і періодично, через кожні 10 хвилин, фіксувати з точністю $\pm 0,5$ °C температуру теплоносія в шарі і на вході в апарат [88, 111]. Витрати повітря вимірювати за допомогою камерної діафрагми з точністю $\pm 0,5$ м³/год, а витрати рідкої фази визначати зміною маси за певний проміжок часу, з точністю $\pm 0,005$ кг [88, 111]. Час досліду фіксувати спеціальним хронометром з точністю ± 10 с. Періодично, з інтервалом 10 хвилин, відбирати проби (100 г) для проведення ситового

аналізу, для підтримки постійного загального тиску в шарі [88, 111] кожні 5 хв. вивантажувати таку кількість шару, щоб значення на U-подібному диференційному манометрі зберігалось на рівні 1962 Па з точністю ± 20 Па.

При проведенні дослідів висоту псевдозрідженого шару визначати через його гідравлічний опір в діапазоні 1900...2200 Па [88, 111] і вимірювати за допомогою датчиків малих тисків *MPXV7007DP* з точністю $\pm 0,1$ Па.

За результатами експериментів визначались величини, наведені у додатку Б.

Висновки до розділу 2

1. Сформульовано фізичну модель модель грануляції органічно-мінеральних добрив із пошаровою структурою при зневодненні рідких гетерогенних систем у псевдозрідженому шарі.

2. Обґрунтовано принципи взаємодії газового зріджувального агента із зернистим матеріалом при струменево-пульсаційному режимі псевдозрідження шляхом коалісценції газових струменів та умов його переходу в автоколивальний режим без застосування зовнішніх механізмів.

3. Обрано математичну модель для опису неоднорідного псевдозрідження у автоколивальному режимі.

4. Обґрунтовано критерії якості неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі при мінімізації ризиків утворення застійних зон на робочих поверхнях ГРП.

5. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень гідродинаміки у псевдозрідженому шарі та кінетики процесу гранулювання.

6. Розроблено спеціальну комп'ютеризовану систему на базі *Arduino Pro Mini* для вимірювання перепадів тиску в шарі із застосуванням датчиків малих тисків *MPXV7007DP*.

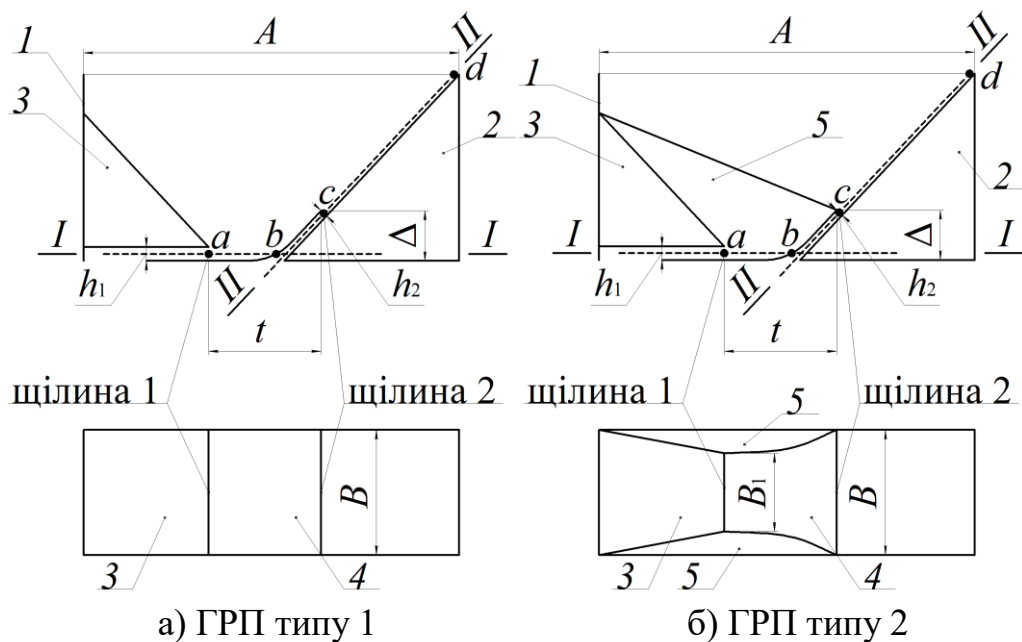
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ

3.1 Обґрунтування раціональної конструкції ГРП та камери гранулятора

Метою експериментальних досліджень було визначення конструктивних параметрів ГРП та камери гранулятора, що забезпечать реалізацію неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі із направленою циркуляцією зернистого матеріалу в камері гранулятора шляхом переміщення матеріалу в задану зону.

Досліди проводилися на пілотній установці згідно методики, описаної у розділі 2 пункті 2.4.1.

У якості ГРП застосовувалися решітки щілинного типу [51, 88, 89, 105, 117] наведені на рисунку 3.1 а, б, які було обрано за результатами попередніх досліджень [89].



а) ГРП типу 1
б) ГРП типу 2
1 – корпус апарату; 2 – правий колосник; 3 – лівий колосник;
4 – пластина; 5 – звужуючі вставки

Рисунок 3.1 – Конструкції ГРП щілинного типу

На рисунку 3.1 а наведено ГРП типу 1 із двома щілинами, розмірами $h_1:h_2 = 11:6$ мм, $t = 114$ мм, $A = 0,3$ м, $B = 0,11$ м. Щілина 2 розташована вище від щілини 1 на величину $\Delta = 40$ мм.

Коефіцієнт живого різну ГРП типу 1:

$$\varphi_1 = \frac{(h_1 + h_2)B}{AB} 100\% = 6\%, \quad (3.1)$$

де h_1, h_2 – висота щілини 1 та 2 відповідно; A, B – довжина і ширина ГРП.

ГРП типу 2, рисунок 3.1 б, відрізняється від ГРП типу 1 наявністю бокових звужуючих вставок 5, які на 30 % зменшують ширину щілини B_1 по відношенню до B , рисунок 3.1 б, із розмірами $h_1 = 11$ мм, $h_2 = 6$ мм, $t = 114$ мм, $A = 300$ мм, $B = 110$ мм, $B_1 = 0,7B$ мм, $\Delta = 40$ мм.

Коефіцієнт живого перетину ГРП типу 2:

$$\varphi_2 = \frac{h_1 B_1 + h_2 B}{AB} 100\% = 4,9\%, \quad (3.2)$$

де B_1 – ширина лівої щілини.

Експериментальні дані щодо визначення коефіцієнтів гідравлічного опору наведені у графічному вигляді на рисунку 3.2.

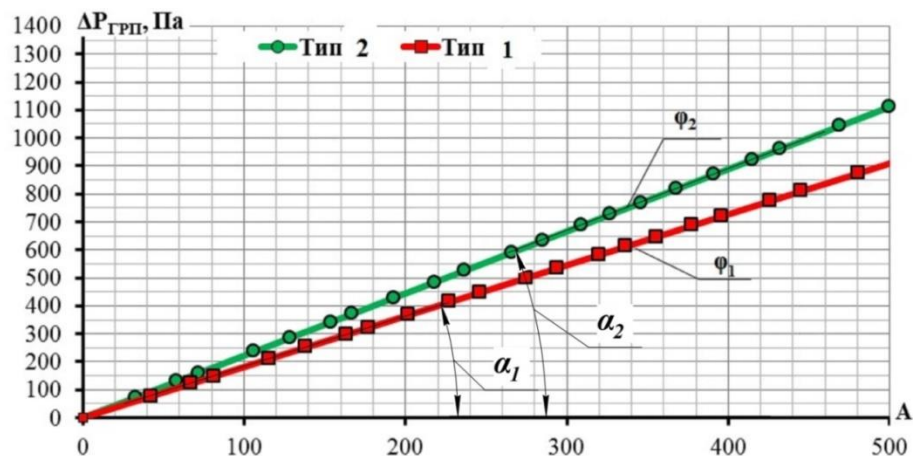


Рисунок 3.2 – Визначення коефіцієнта гідравлічного опору ГРП типу 1 та типу 2

Так, зменшення коефіцієнта живого перерізу з $\varphi_1 = 6\%$ до $\varphi_2 = 4,9\%$ призводить до збільшення коефіцієнта гідравлічного опору на 8% з $\xi_1 = \operatorname{tg} \alpha_1 = 1,68$ до $\xi_2 = \operatorname{tg} \alpha_2 = 1,82$.

Визначення впливу конструктивних особливостей ГРП на швидкість газового теплоносія на поверхні пластин розроблених конструкцій ГРП проводилось із застосуванням програмного середовища *SolidWorks* у площинах *I-I* по центральній осі щілини 1 – $h_1/2$ мм, а також *II-II* по центральній осі щілини 2 – $h_2/2$ мм), рисунок 3.1 а, б.

Результатом моделювання є епюри швидкостей на робочих ділянках ГРП *ab* та *cd*, рисунок 3.1 а, б, які свідчать про те, що за рахунок встановлення звужуючих вставок, було досягнуто локального підвищення швидкості в 1,8 рази, рисунок 3.3 б, порівняно з ГРП типу 1, рисунок 3.3 а.

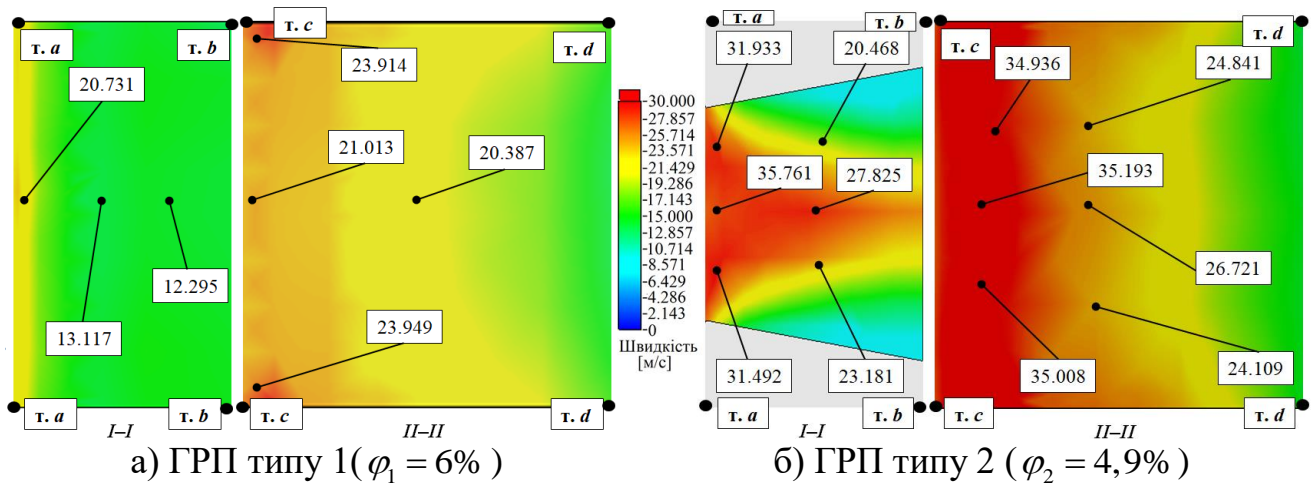


Рисунок 3.3 – Епюри швидкостей зріджувального агента для двох типів ГРП при $V_{сек}=0,03736$ м³/с, $w_{щ}=25$ м/с (*SolidWorks*)

Наявність локального збільшення швидкості газу в 1,8 рази на виході з щілини 1 ГРП типу 2 дозволило збільшити кінетичну енергію струменя в 3,24 рази, що відповідає вимогам фізичної моделі до ГРП.

На рисунку 3.4 наведено схеми розташування направляючої вставки у камері гранулятора [88, 106-109] із ГРП типу 2.

За результатами проведених досліджень [88] обрано конструкцію камери гранулятора типу 3, рисунок 3.4, з направляючою вставкою із радіусом скруглення $R=110$ мм на висоті над шаром до $0,47H_0$ та відстані від лівої стінки камери до $0,6A$. Саме така конструкція направляючої вставки у камері гранулятора у поєднанні із ГРП типу 2 забезпечують реалізацію направленої

циркуляції шару зернистого матеріалу при неоднорідному струменево-пульсаційному псевдозрідженні в автоколивальному режимі, шляхом переміщення маси зернистого матеріалу із зон II та III у зону I.

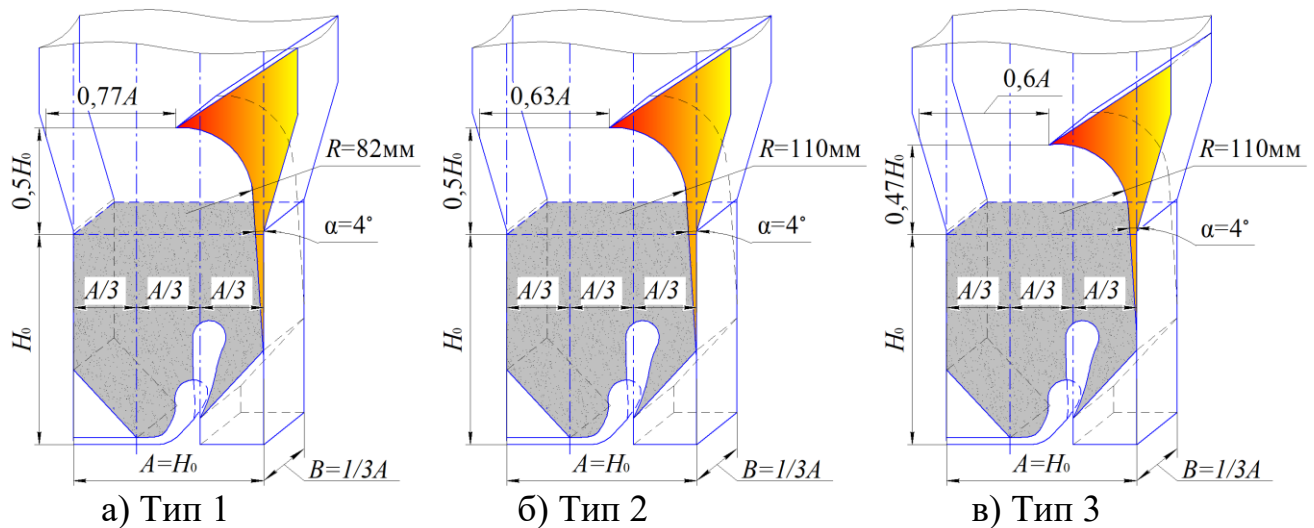


Рисунок 3.4 – Схема розташування направляючої вставки у камері гранулятора із ГРП типу 2 при $H_0=0,32$ м

3.2 Визначення умов переходу струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальний режим

3.2.1 Вплив дисперсного складу шару зернистого матеріалу на якісні параметри автоколивального режиму

Метою експериментальних досліджень було визначення впливу дисперсного складу зернистого матеріалу на неоднорідне псевдозрідження та умов його переходу в автоколивальний режим при усуненні застійних зон на робочих поверхнях ГРП.

Досліди проводилися на експериментальній установці, наведеній у розділі 2, пункт 2.6 згідно методики, описаної у розділі 2, пункт 2.4.2. Методику розрахунку діаметру бульбашки наведено у розділі 2, пункт 2.2.1.

У якості зернистого шару використовувався гранульований продукт на основі сульфату амонію та домішок органічних компонентів із еквівалентним діаметром d_e (4,0; 2,5; 1,5 мм) та, відповідно, питомою поверхнею шару

a (900; 1440; 2400 м²/м³). Початкова висота шару визначена з попередніх досліджень процесу грануляції і становила $H_0=0,32$ м. Густина твердих гранул визначалась експериментально і становить $\rho_T = 1450 \pm 10$ кг/м³.

Попередніми дослідженнями процесу гранулювання з використанням ГРП типу 1, при підведенні високотемпературного теплоносія реалізація автоколивального режиму супроводжувалась утворенням застійних зон на поверхнях ГРП та оплавленням зернистого матеріалу [88, 89].

Тому в подальшому дослідження гідродинаміки проводилися в апараті із застосуванням ГРП типу 2.

3.2.1.1 Параметри досягнення неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі при $d_e = 4,0$ мм

Визначено криву псевдозрідження для шару зернистого матеріалу з еквівалентним діаметром частинок $d_e = 4,0$ мм при початковій висоті нерухомого шару $H_0 = 0,32$ м ($z_{\phi}/H_0 < 0,5$), питомій поверхні шару $a = 6(1-\varepsilon_0)/d_e = 900$ м²/м³, масі шару $M_{\text{ш}} = 7,83$ кг, що відповідає гідростатичному тиску нерухомого шару $\Delta P_{\text{гідрост.}(0)} = H_0(1-\varepsilon_0)\rho_T g K_a = 2389$ Па, рисунок 3.5.

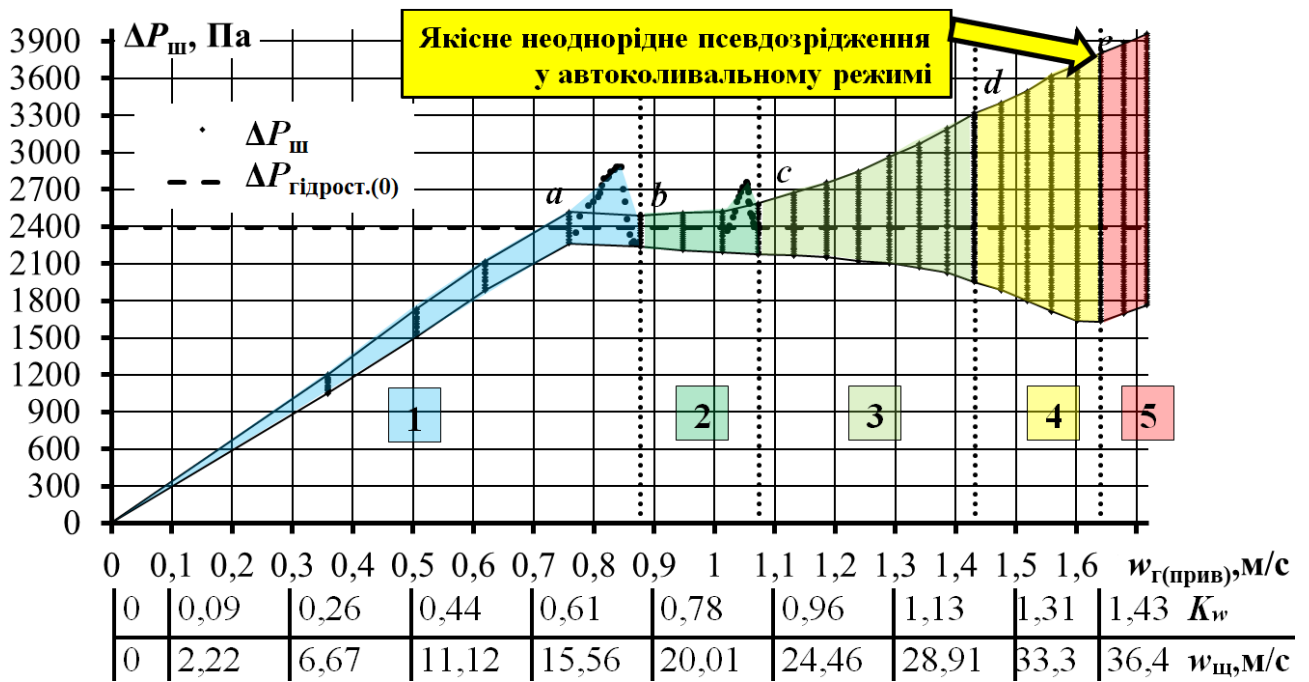


Рисунок 3.5 – Крива псевдозрідження ($d_e = 4,0$ мм)

Крива псевдозрідження, рисунок 3.5, умовно розділена на 5 зон. В зоні 1 при значеннях числа псевдозрідження $0 \leq K_w < 0,73$ рух газу в обох щілинах відбувається в фільтраційному режимі, про що свідчить фотофіксація шару ($K_w = 0,65$), рисунок 3.6 а. При цьому порозність шару в усіх зонах камери гранулятора однакова $\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = \varepsilon_{III} = \varepsilon_0 = 0,4$.

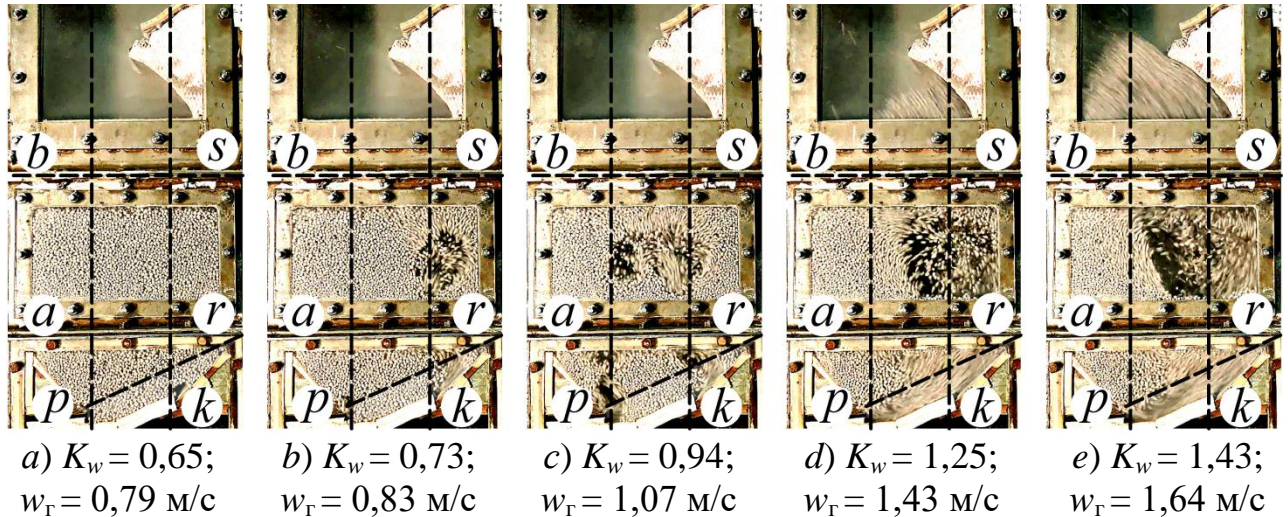


Рисунок 3.6 – Фотофіксація миттєвого стану шару ($d_e = 4,0$ мм)

при різних значеннях K_w

У зоні 2 ($0,73 \leq K_w < 0,94$) при числі псевдозрідження $K_w = 0,73$ відбувається пробій газового факела, що виходить із щілини 2 та, відповідно, збільшення порозності в зоні III $\varepsilon_{III} \rightarrow 0,55$, а газ, що виходить із щілини 1 продовжує рухатись у фільтраційному режимі ($\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = 0,4$), рисунок 3.6 – т. b.

Це свідчить про відсутність інерційного виносу матеріалу з пульсаційним збільшенням висоти шару в зоні I та об'ємного перемішування шару, оскільки індекс перемішування прямує до $j_{\Delta P} = (\Delta P_{\max} - \Delta P_{\text{гідрост.}(0)}) / \Delta P_{\text{гідрост.}(0)} \rightarrow 0$.

У зоні 3 ($0,94 \leq K_w < 1,25$), рисунок 3.5, при числі псевдозрідження $K_w = 0,94$ відбувається пробій факела, що виходить із щілини 1 та активізація руху газових струменів з обох щілин. Внаслідок цього реалізується пульсаційний режим із частотою пульсацій $f = 1,47$ Гц та незначним перевищенням значення гідростатичного опору нерухомого шару $\Delta P_{\text{амп.}} = \Delta P_{\max} - \Delta P_{\text{гідрост.}(0)} = 352$ Па, що підтверджується динамікою зміни загального $\Delta P_{\text{ш}}$, рисунок 3.7, отриманою при застосуванні вимірювального комплексу, наведеного у розділі 2, пункт 2.4.2.

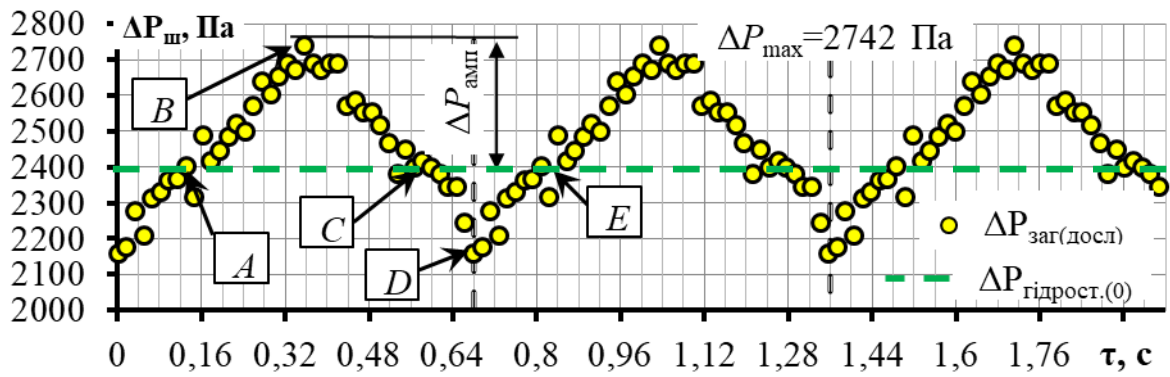
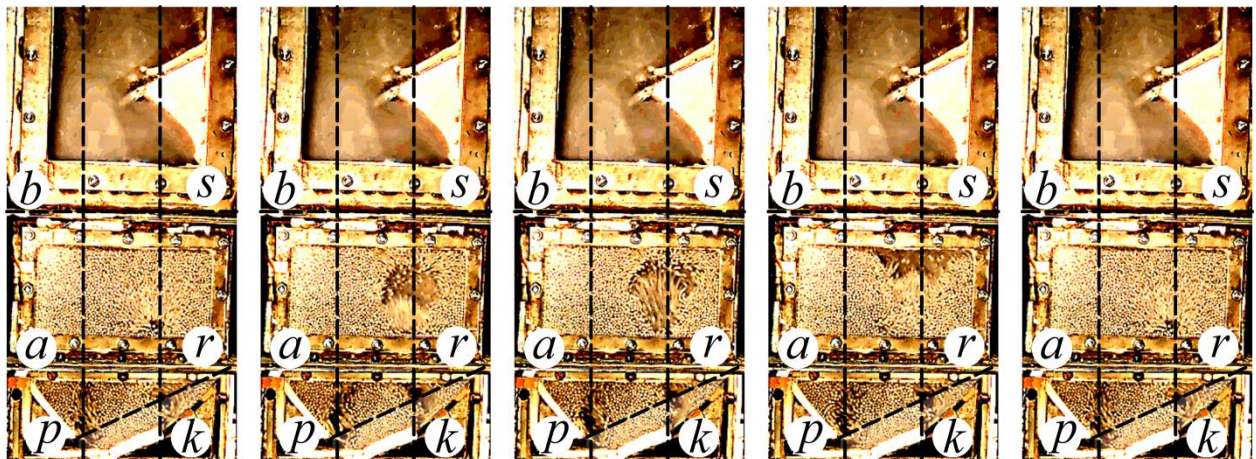


Рисунок 3.7 – Динаміка зміни загального тиску в шарі

$$(d_c = 4,0 \text{ мм}; K_w = 0,94; w_{\Gamma(\text{прив})} = 1,07 \text{ м/с})$$

При цьому інтенсивне об'ємне перемішування шару відсутнє, а індекс перемішування є недостатнім для забезпечення виконання положень фізичної моделі – $j_{\Delta P} = 0,14$, що підтверджується фотознімками стану шару в локальних екстремумах (точки А, Б, С), рисунок 3.8.



A) $\tau = 0,12 \text{ с}$

B) $\tau = 0,36 \text{ с}$

C) $\tau = 0,56 \text{ с}$

D) $\tau = 0,68 \text{ с}$

E) $\tau = 0,84 \text{ с}$

Рисунок 3.8 – Фотофіксації шару при мінімальному та максимальному значеннях загального тиску в шарі ($d_c = 4,0 \text{ мм}; K_w = 0,94; w_{\Gamma(\text{прив})} = 1,07 \text{ м/с}$)

При досягненні числа псевдозрідження $K_w = 1,25$ та $w_{\text{ш}} = 31,9 \text{ м/с}$ система переходить у автоколивальний струменево-пульсаційний режим псевдозрідження. Характер пульсацій тиску в шарі на початку області реалізації раціонального режиму роботи ($K_w = 1,25$) наведено на рисунку 3.9.

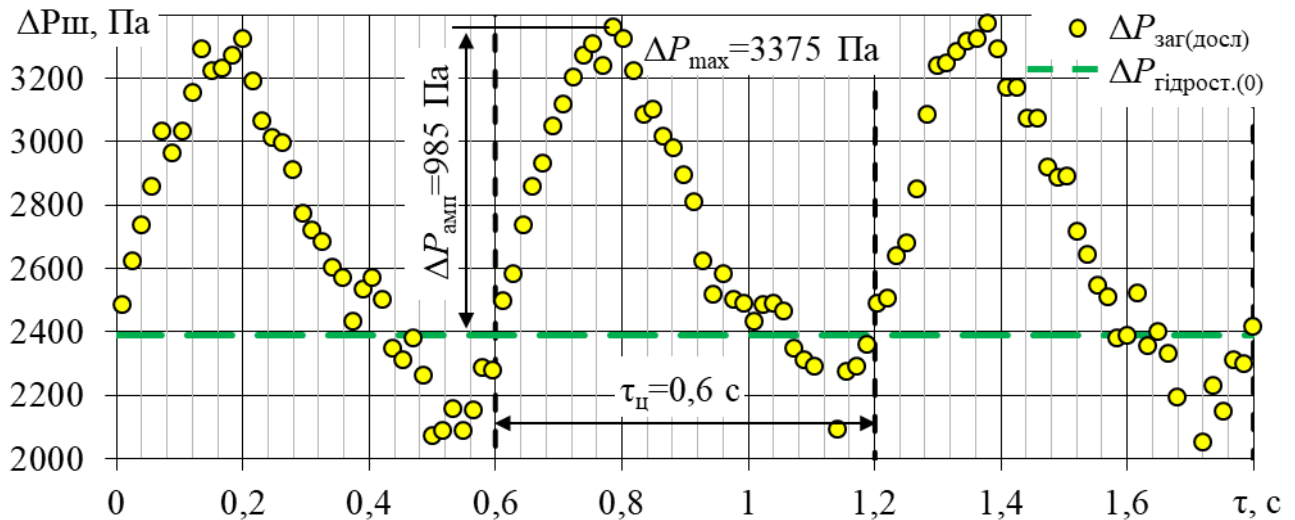


Рисунок 3.9 – Динаміка зміни загального тиску в шарі

$$(d_c = 4,0 \text{ мм}; K_w = 1,25; w_{Г(прив)} = 1,43 \text{ м/с})$$

Динаміка коливань $\Delta P_{ш}$, отримана експериментальним шляхом має синусоїдальний характер із періодом коливань $\tau_{ц} = 0,6$ с, або $f = 1,67$ Гц. Амплітуда перевищення гідростатичного опору нерухомого шару зернистого матеріалу $\Delta P_{амп.} = 985$ Па, що відповідає індексу перемішування $j_{\Delta P} = 0,41$, тобто накопичується потенційна енергія для винесення 41 % маси зернистого матеріалу за межі початкового шару, висотою H_0 .

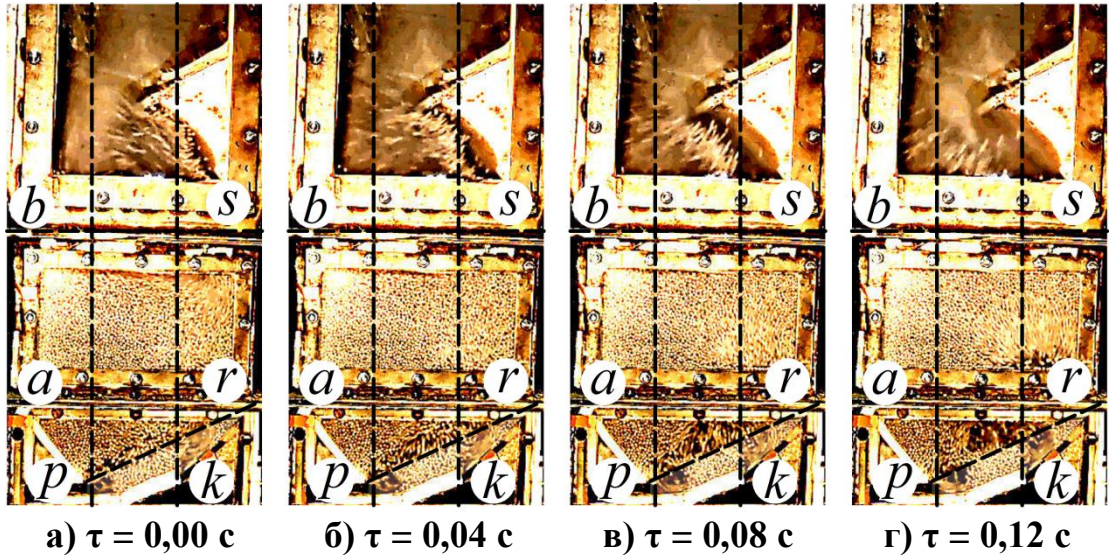
Для проміжку $0,0 \leq \tau_{ц} \leq 0,60$, що відповідає тривалості одного циклу, рисунок 3.9, на рисунку 3.10 наведено фотофіксації стану шару зернистого матеріалу з інтервалом часу $\tau = 0,04$ с.

У початку стадії 1 при $\tau = 0,00$ с, рисунок 3.10 а, шар зернистого матеріалу знаходиться у стані рівноваги, при цьому наявність газових факелів з об'ємом $V_{фак}$, що виходять із щілин ГРП, спричинює адекватне збільшення загальної висоти шару відносно початкової на величину $H = H_0 + \Delta H$.

Порозність шару у виділеному об'ємі $H_0 \times B \times A$ мінімальна і з урахуванням наявності пустот, утворених газовими струменями, становить $\varepsilon_r = 0,45$.

У результаті об'єднання масових витрат газу двох струменів, на вершині вертикального факела другого струменя $z_{ф(2)}$ починає формуватися газова бульбашка циліндричної (бочкоподібної) форми, рисунок 3.10 а.

Стадія 1 – $\tau_i = 0,00 \dots 0,15$ с



Стадія 2 – $\tau_i = 0,15 \dots 0,45$ с

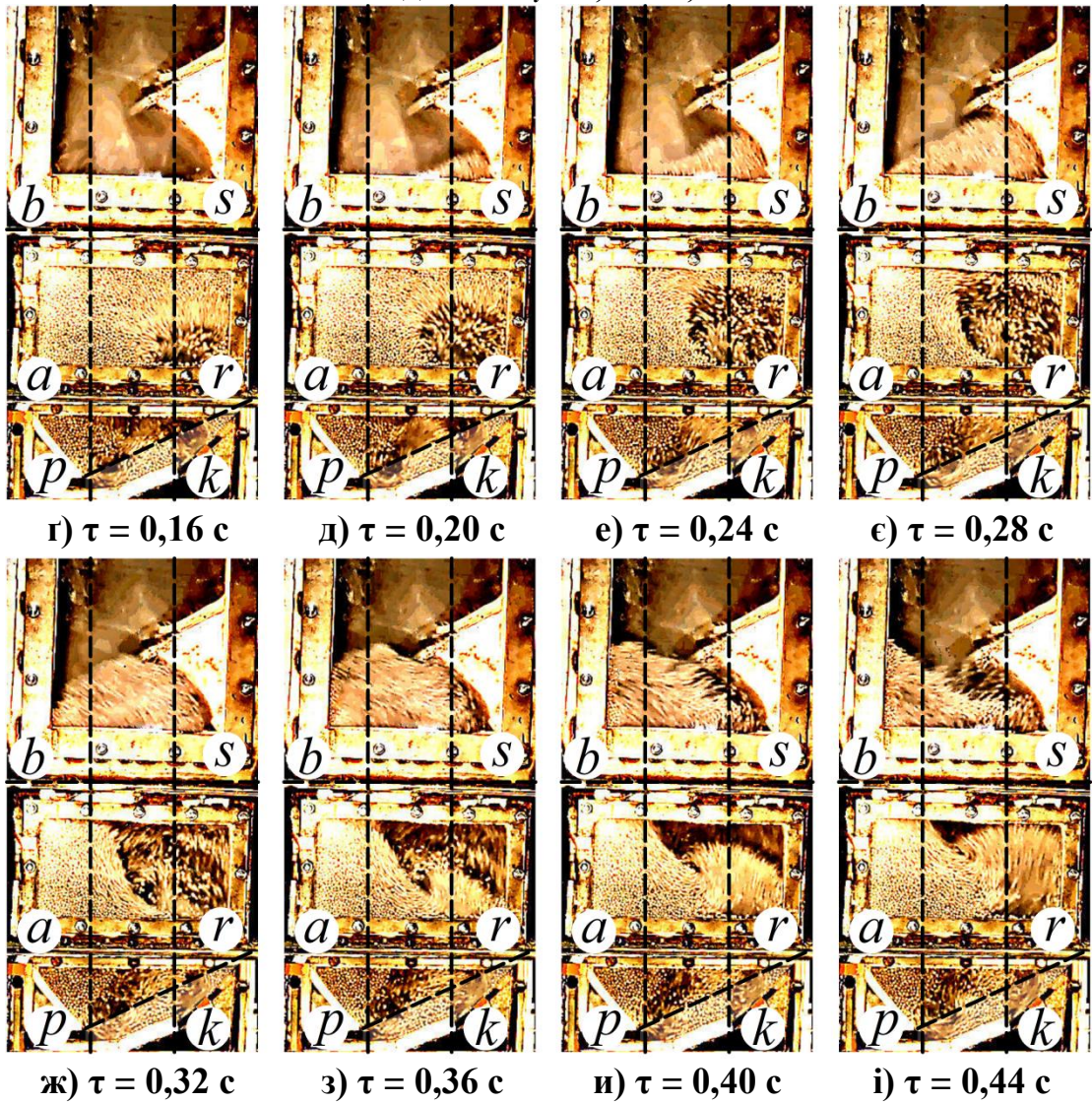
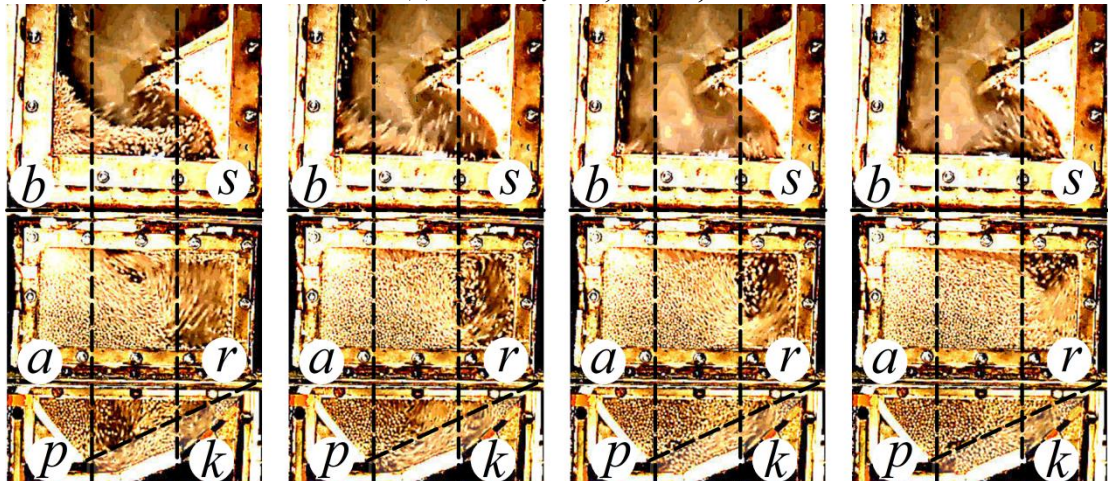


Рисунок 3.10, аркуш 1 – Фотофіксації стану шару зернистого матеріалу в камері гранулятора ($d_c = 4,0$ мм; $K_w = 1,25$; $w_{г(прив)} = 1,43$ м/с)

Стадія 3 – $\tau_i = 0,45...0,60$ с



і) $\tau = 0,48$ с

й) $\tau = 0,52$ с

к) $\tau = 0,56$ с

л) $\tau = 0,60$ с

Рисунок 3.10, аркуш 2 – Фотофіксації стану шару зернистого матеріалу в камері гранулятора ($d_e = 4,0$ мм; $K_w = 1,25$; $w_{Г(прив)} = 1,43$ м/с)

Так, як швидкість підведення зріджувального агенту в зону III значно перевищує швидкість фільтрації газу в шарі зернистого матеріалу, то розміри газового циліндру (бульбашки) починають збільшуватися в діаметрі (d_{0i}), а її ширина обмежується шириною камери апарата – B , рисунок 3.10 а-г.

Відповідно, це супроводжується збільшенням гідравлічного опору шару зернистого матеріалу до максимального $\Delta P_{ш(max)} = 3375$ Па, що перевищує $\Delta P_{гiдрост.(0)} = 2389$ Па на величину $\Delta P_{амп.} = 985$ Па при $\tau_i = 0,15$ с, рисунок 3.9, що пов'язано із витратами енергії на формування газової бульбашки. Утворений газовий циліндр (бульбашка) щільно прилягає до вертикальних стінок та має мінімальний зазор із зовнішньою правою вертикальною стінкою апарата.

Тобто, у II і III зонах утворюється пружна газова порожнина, яка починає переміщати зернистий матеріал у лобовій частині газової бульбашки.

При досягненні критичного розміру, газова бульбашка починає прискорено рухатись до поверхні псевдозрідженого шару, рисунок 3.10 г-є, що відповідає завершенню стадії 1 та початку стадії 2. При цьому, в кормовій частині бульбашки відбувається зниження тиску, що зумовлює трьох-мірний рух зернистого матеріалу в цю зону. Загальний перепад тиску в шарі починає зменшуватись від $\Delta P_{ш(max)}$ до $\Delta P_{гiдрост.(0)}$, рисунок 3.9.

Вихід газової бульбашки з шару спричинює інерційний викид зернистого матеріалу в надшаровий простір, рисунок 3.10 ж. Винесений із шару матеріал, за допомогою спеціального направляючого пристрою у надшаровому просторі апарата переміщається до зони *I*, збільшуючи у такий спосіб висоту шару в цій зоні, рисунок 3.10 і. Переміщення матеріалу із зон *II* і *III* відбувається до тих пір, доки миттєва висота зернистого матеріалу в зоні *III* не буде рівною $H_{\text{зал}} = z_{\text{ф}} + \Delta$, рисунок 3.10 і. Досягнення мінімальної залишкової висоти шару відповідає отриманому мінімальному значенню $\Delta P_{\text{ш}(\text{min})} = 2074$ Па при $\tau_i = 0,45$ с, рисунок 3.10.

Переміщення інерційно винесеного за межі шару матеріалу в зону *I*, шириною $A_I = A/3$, зумовлює досягнення Δh_1 максимального значення, рисунок 3.10 і. Після цього завершується стадія 2 і починається стадія 3, на якій відбувається інтенсивне зсіпання матеріалу із висоти $H_{\text{ш}} = H_0 + \Delta h_1$ у зони *II* та *III*, рисунок 3.10 і-л, до досягнення початкового рівноважного стану, рисунок 3.10 л.

У момент інтенсивного переміщення зернистого матеріалу енергія газового струменя витрачається на гальмування частинок зернистого матеріалу, що суттєво інтенсифікує процеси масообміну. У процесі зворотного руху зернистого матеріалу при заповненні пустот, утворених у зонах *II* та *III* відбувається протитечійний контакт зернистого матеріалу з теплоносієм, що значно підвищує рушійну силу масообміну. Окрім того, у зоні *I* рух газового теплоносія відбувається виключно у фільтраційному режимі.

Повернення шару зернистого матеріалу до стану рівноваги (початкового стану), рисунок 3.10 м супроводжується збільшенням $\Delta P_{\text{ш}}$ від $\Delta P_{\text{ш}(\text{min})}$ до $\Delta P_{\text{гидрост.}(0)}$ та завершує цикл, який триває $\tau_{\text{ц}} = 0,6$ с.

Такий цикл повторюється багатократно і призводить до автоколивального режиму псевдозрідження, що підтверджує положення фізичної моделі.

При досягненні числа псевдозрідження $K_w = 1,43$, приведеної швидкості газу $w_{\text{г}(\text{прив})} = 1,43$ м/с та в щілинах ГРП $w_{\text{щ}} = 36,1$ для частинок, із еквівалентним діаметром $d_e = 4,0$ мм обмежується зона раціонального режиму роботи,

рисуюнок 3.5 – точка *d*. Характер пульсацій загального тиску в шарі при $K_w = 1,43$ наведено на рисунку 3.11.

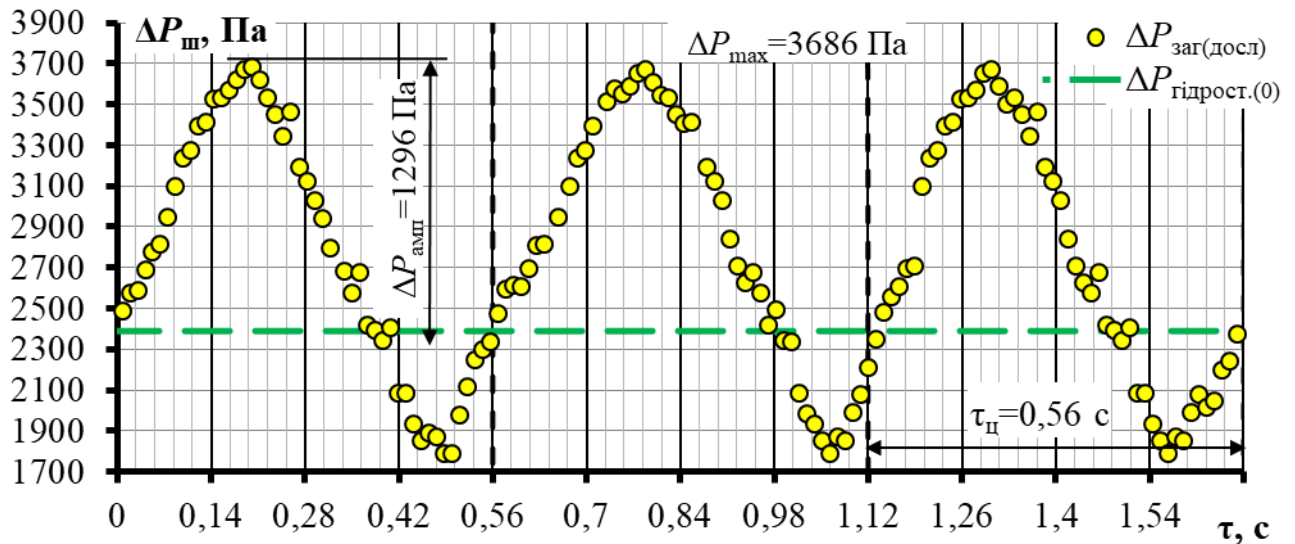


Рисунок 3.11 – Динаміка зміни загального тиску в шарі

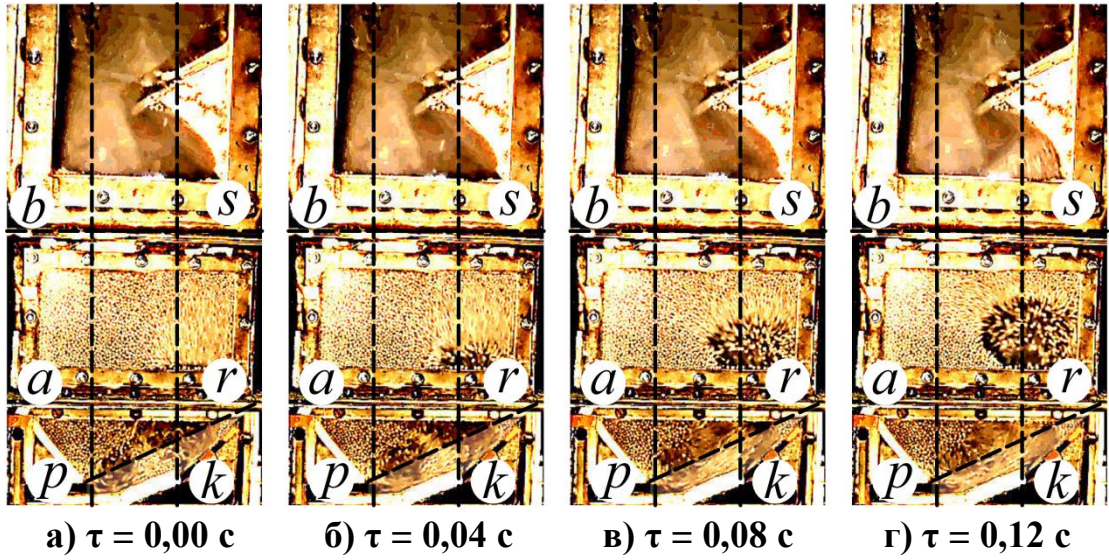
($d_e = 4,0$ мм; $K_w = 1,43$; $w_{г(прив)} = 1,64$ м/с)

Отримана експериментальним шляхом динаміка коливань $\Delta P_{ш}$ має синусоїдальний характер із періодом коливань $\tau_{ц} = 0,56$ с, або $f = 1,785$ Гц. Амплітуда перевищення гідростатичного опору нерухомого шару матеріалу $\Delta P_{амп} = 1296$ Па, що становить 54% від $\Delta P_{гідрост.(0)}$. Індекс перемішування становить $j_{\Delta P} = 0,54$, тобто відбувається інерційне винесення 54 % маси зернистого матеріалу за межі початкового шару, висотою H_0 .

Для проміжку $0,0 \leq \tau_{ц} \leq 0,56$, що відповідає тривалості 1 циклу при значенні $K_w = 1,43$, рисунок 3.11, на рисунку 3.12 наведено фотофіксації стану шару зернистого матеріалу з інтервалом часу $\tau = 0,04$ с. Наведені фотофіксації підтверджують наявність неоднорідного автоколивального режиму псевдозріднення, який повністю підтверджує положення фізичної моделі.

Основним параметром, необхідним для розв'язання розробленої математичної моделі є порозність шару в камері гранулятора, тому, за розробленою у пункті 2.4.2 розділу 2 методикою, дослідним шляхом визначено динаміку зміни середньої порозності шару та у зонах II і III, рисунок 3.13.

Стадія 1 – $\tau_i = 0,00 \dots 0,14$ с



Стадія 2 – $\tau_i = 0,14 \dots 0,42$ с

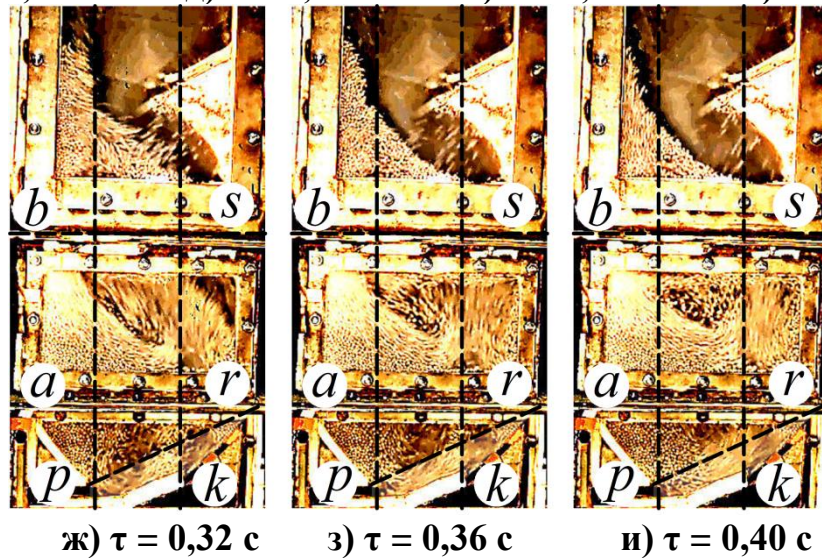
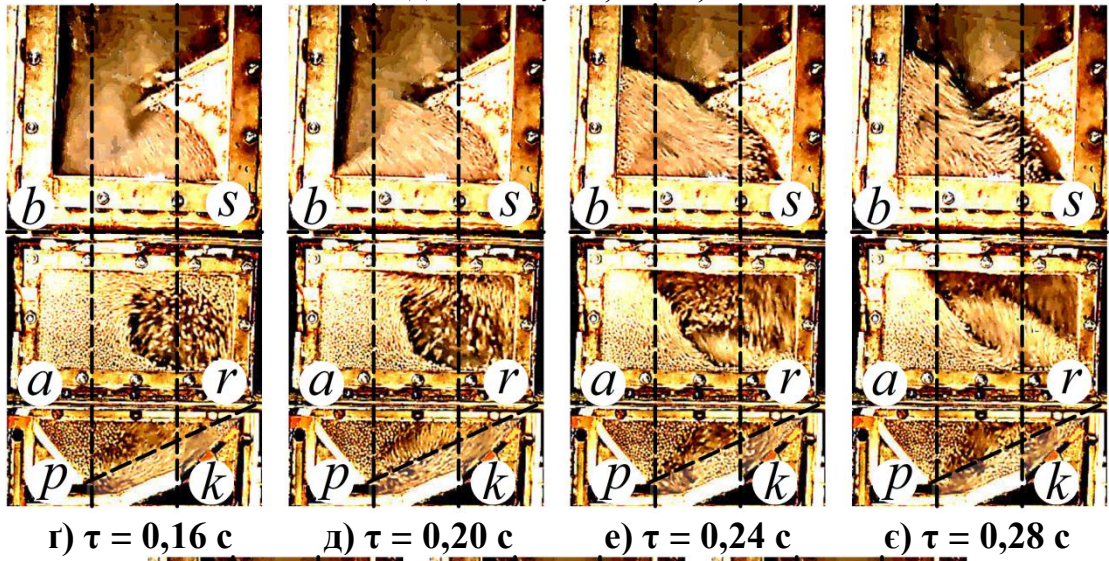


Рисунок 3.12, аркуш 1 – Фотофіксації стану шару зернистого матеріалу в камері гранулятора ($d_c = 4,0$ мм; $K_w = 1,43$; $w_{Г(прив)} = 1,64$ м/с)

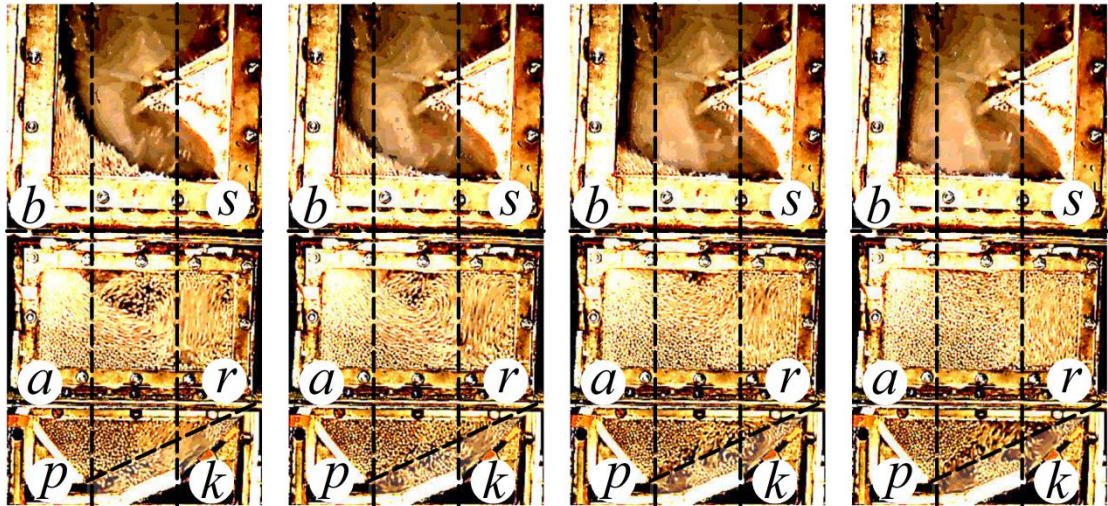
Стадія 3 – $\tau_i = 0,42 \dots 0,56$ сі) $\tau = 0,44$ сї) $\tau = 0,48$ сй) $\tau = 0,52$ ск) $\tau = 0,56$ с

Рисунок 3.12, аркуш 2 – Фотофіксації стану шару зернистого матеріалу в камері гранулятора ($d_e = 4,0$ мм; $K_w = 1,43$; $w_{\Gamma(\text{прив})} = 1,64$ м/с)

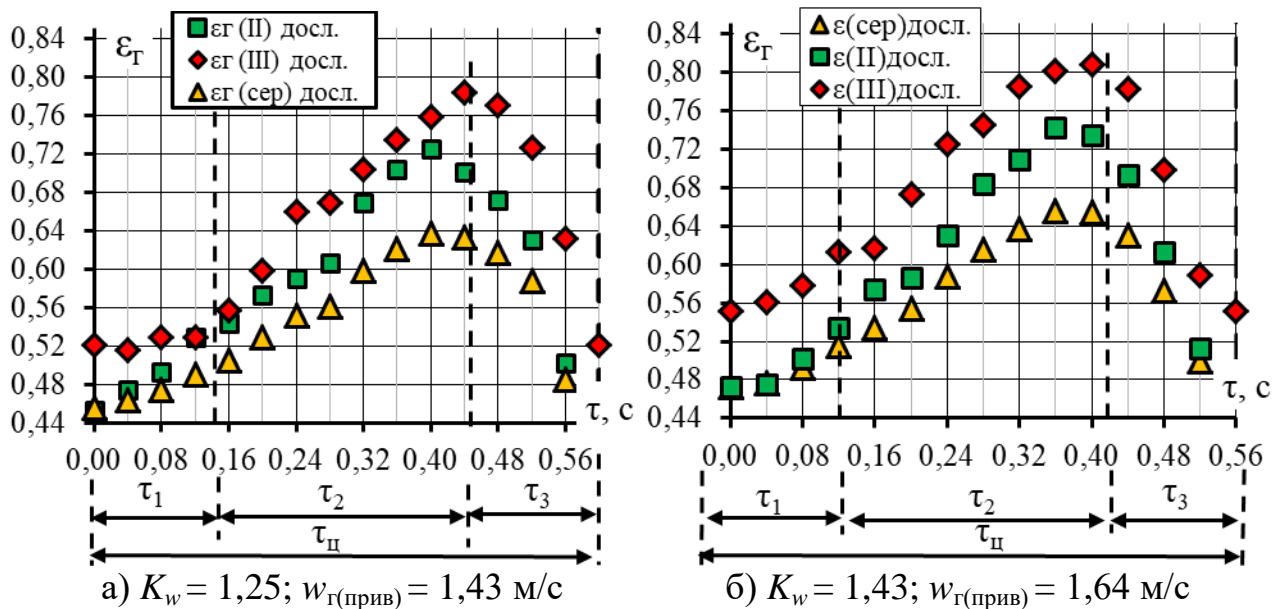


Рисунок 3.13 – Динаміка зміни порозності шару в фіксованому об'ємі камери гранулятора отримана дослідним шляхом при $d_e = 4,0$ мм – $\varepsilon_{\Gamma} = f(\tau)$

У межах існування автоколивального неоднорідного струменево-пульсаційного режиму ($d_e = 4,0$ мм) при $K_w = 1,25 \dots 1,43$ порозність шару, рисунок 3.13 а, б, у зоні I залишається постійною – $\varepsilon_I = 0,4$, а у зонах II, III та середня (у фіксованому об'ємі) відповідно змінюється в межах:

- при $K_w = 1,25$, рисунок 3.13 а: $\varepsilon_{\Gamma(\text{сеп.})} = 0,452...0,634$;
 $\varepsilon_{\Gamma(II)} = 0,456...0,728$; $\varepsilon_{\Gamma(III)} = 0,528...0,781$;
- при $K_w = 1,43$, рисунок 3.13 б: $\varepsilon_{\Gamma(\text{сеп.})} = 0,472...0,655$;
 $\varepsilon_{\Gamma(II)} = 0,47...0,743$; $\varepsilon_{\Gamma(III)} = 0,552...0,808$.

Динаміка зміни висоти шару при $K_w = 1,25$ та $K_w = 1,43$, рисунок 3.14, підтверджує імпульсне збільшення висоти шару в $H_{\text{ш}} = 1,71H_0$ (при $K_w = 1,25$) та $H_{\text{ш}} = 2H_0$ (при $K_w = 1,43$).

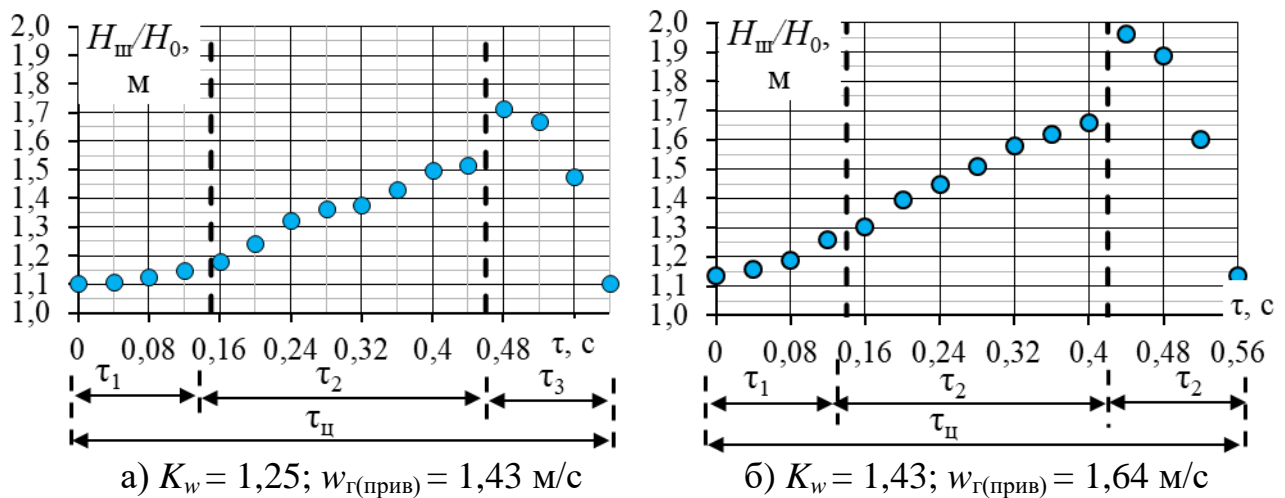


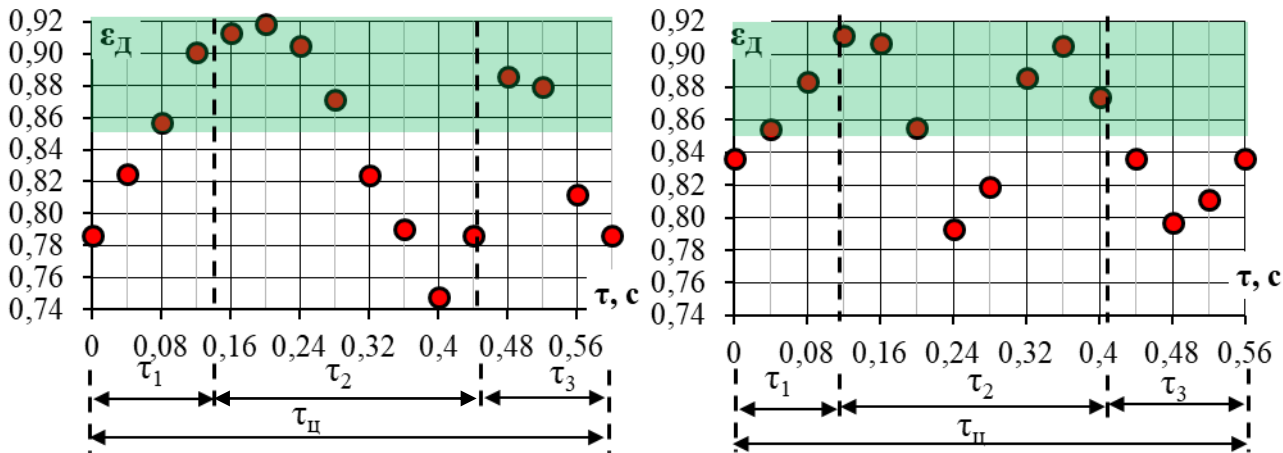
Рисунок 3.14 – Динаміка зміни висоти шару при $d_e = 4,0$ мм відносно початкової $H_0 = 0,32$ м – $H_i/H_0 = f(\tau)$

Доцільність визначення порозності в робочій зоні ГРП обґрунтовано у розділі 2, пункт 2.2.2. Експериментальне визначення динаміки зміни порозності шару в робочій зоні ГРП виконувалося згідно методики представленої у пункті 2.4.2 розділу 2.

Встановлено, що досягнення бажаного результату можливе тільки тоді, коли порозність у робочій зоні ГРП (зона Д) буде $\varepsilon_D \geq 0,85$.

Динаміку зміни порозності шару в зоні Д, отриману за результатами досліджень для $d_e = 4,0$ мм при $K_w = 1,43$ та $K_w = 1,64$ для обраних інтервалів часу наведено на рисунку 3.15.

Відповідно до пункту 2.2.2 другим фактором, який впливає на якість гідродинаміки є наявність малорухливої множини зернистого матеріалу на робочій поверхні ГРП, що входить у зону Д.



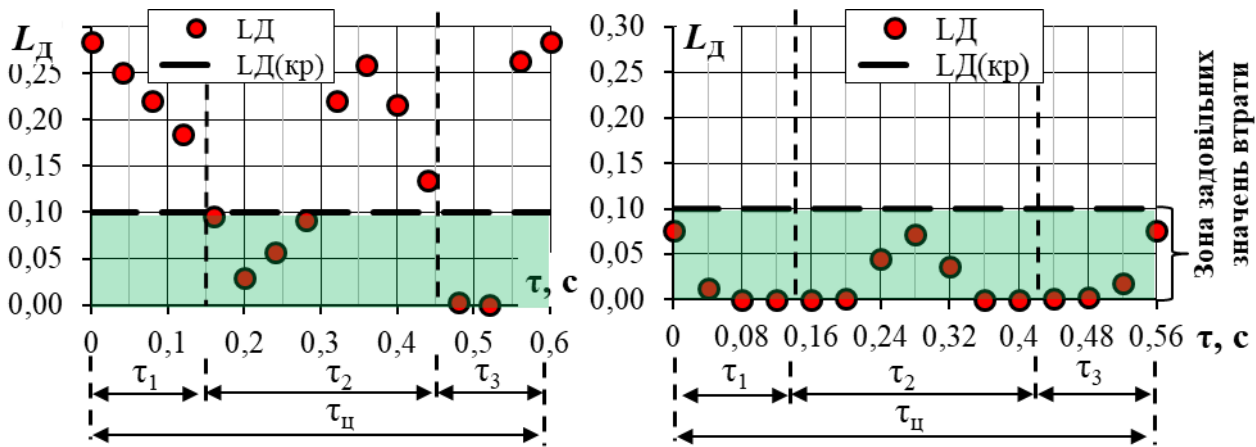
а) $K_w = 1,25$; $w_{Г(прив)} = 1,43$ м/с; $i_я = 0,35$ б) $K_w = 1,43$; $w_{Г(прив)} = 1,64$ м/с; $i_я = 1,0$
 Рисунок 3.15 – Динаміка зміни порозності в зоні Д

при $d_e = 4,0$ мм – $\epsilon_D = f(\tau)$

За методом Тагуті, пункт 2.3, показник втрати якості розраховувався для тих же проміжків часу, що і для порозності, за виразом (2.60) та побудовано динаміку зміни показника втрати якості гідродинаміки, рисунок 3.16.

Зона задовільної якості знаходиться при значенні втрати якості гідродинаміки $0 \leq L \leq 0,1$. Максимальне значення якості гідродинаміки буде досягнуте при умові $L \rightarrow 0$. Таким чином, загальний час, при якому забезпечується задана якість процесу: $\tau_я = \Sigma \tau_{я(i)}$.

Тобто, індекс динамічної якості гідродинаміки – $i_я = \tau_я / \tau_ц$. Загальний час, при якому забезпечується задана якість процесу при $K_w = 1,25$, рисунок 3.16 а, складає $\tau_я = 0,21$ с, тобто, індекс динамічної якості $i_я = 0,35$.



а) $K_w = 1,25$; $w_{Г(прив)} = 1,43$ м/с; $i_я = 0,35$ б) $K_w = 1,43$; $w_{Г(прив)} = 1,64$ м/с; $i_я = 1,0$
 Рисунок 3.16 – Динаміка зміни показника втрати якості при $d_e = 4,0$ – $L = f(\tau)$

При $K_w = 1,43$, рисунок 3.16 б, якісний процес забезпечується на всьому інтервалі циклу, а індекс динамічної якості $i_{\text{я}} = 1$, що відповідає повному забезпеченні якості гідродинамічного режиму.

Отже, для шару зернистого матеріалу із $d_e = 4,0$ мм та $H_0 = 0,32$ м при застосуванні розробленої конструкції камери гранулятора та ГРП реалізуються положення фізичної моделі щодо переходу та роботи у автоколивальному неоднорідному струменево-пульсаційному режимі псевдозрідження при забезпеченні значень числа псевдозрідження у межах $1,25 \leq K_w \leq 1,43$, приведеної швидкості зріджувального агенту $1,43 \leq w_{\text{р(прив)}} \leq 1,64$ м/с та в щілинах ГРП в межах $31,9 \leq w_{\text{щ}} \leq 36,1$ м/с. При цих значеннях забезпечується задовільних індекс динамічної якості гідродинамічних умов у зоні Д в межах $0,35 \leq i_{\text{я}} \leq 1,0$ при $L_{\text{д}} \leq 0,1$.

3.2.1.2 Параметри досягнення неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі при $d_e = 2,5$ мм

Визначено криву псевдозрідження для шару зернистого матеріалу з еквівалентним діаметром частинок $d_e = 2,5$ мм при $H_0 = 0,32$ м ($z_{\text{ф}}/H_0 < 0,5$), $M_{\text{щ}} = 7,83$ кг, $a = 1440$ м²/м³, що відповідає $\Delta P_{\text{гідрост.}(0)} = 2389$ Па, рисунок 3.17.

Як і для частинок із $d_e = 4,0$ мм, крива псевдозрідження при $d_e = 2,5$ мм, рисунок 3.17, умовно розділена на 5 зон:

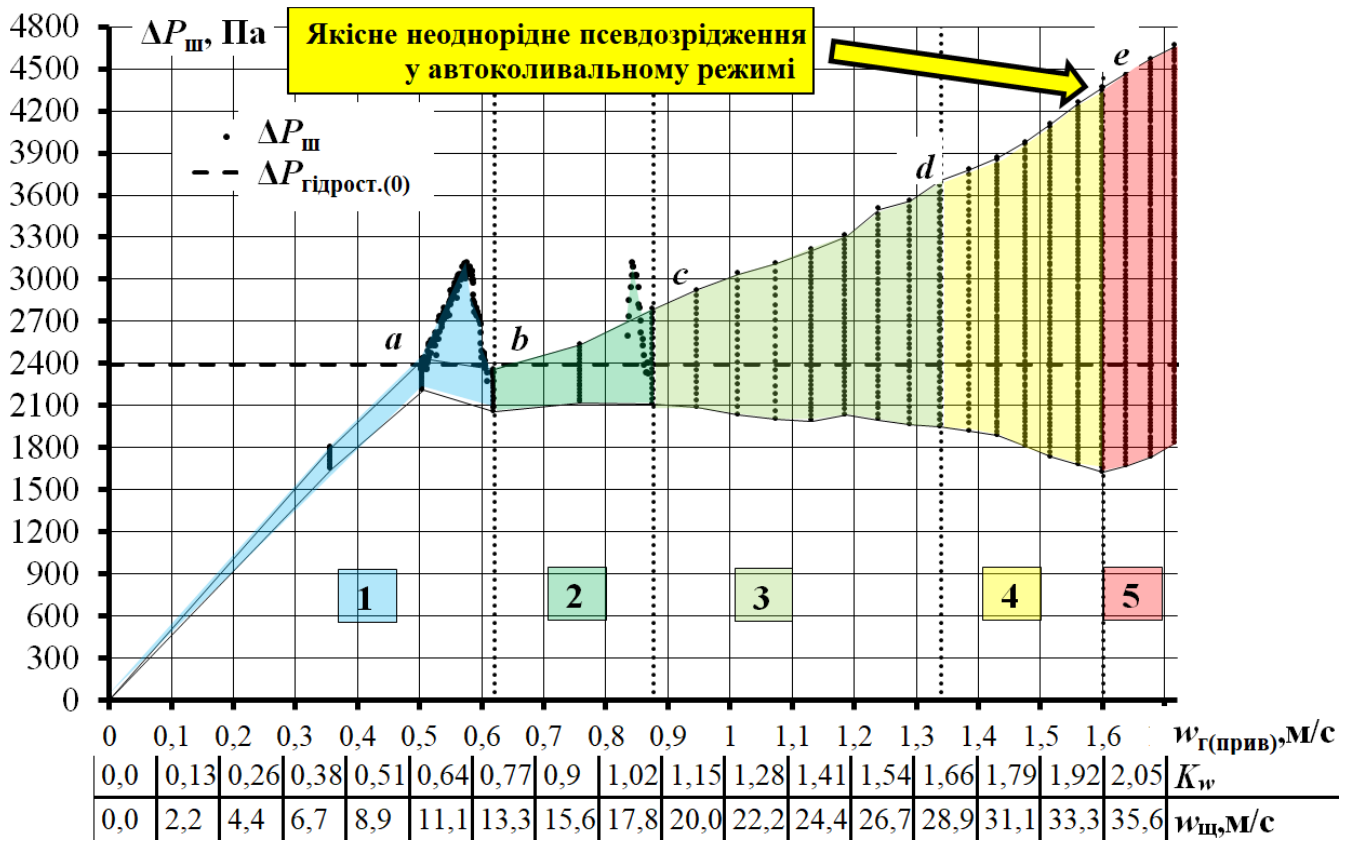
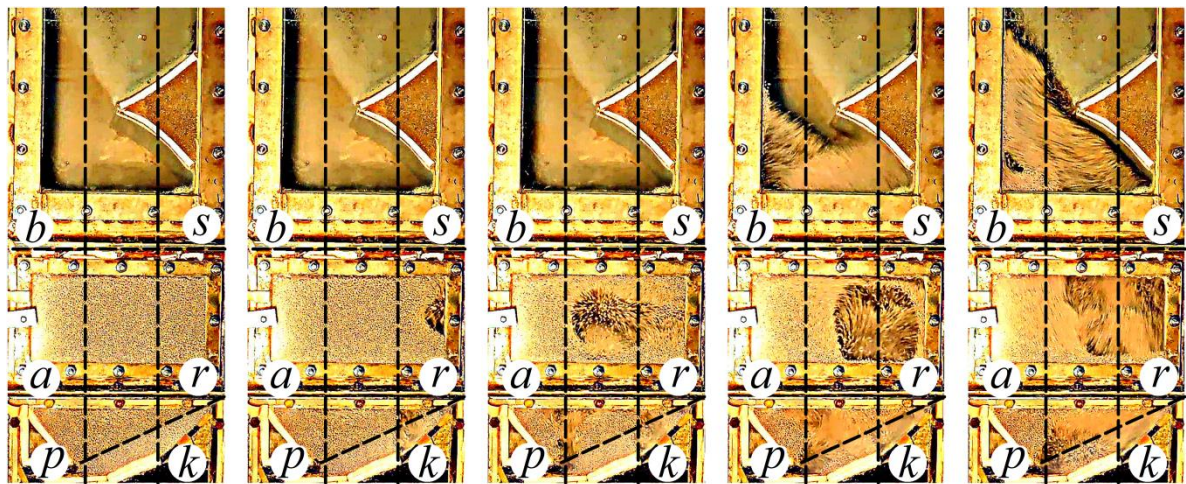
Зона 1 ($0 \leq K_w < 0,79$) – фільтраційний режим руху газового теплоносія в обох щілинах ($\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = \varepsilon_{III} = \varepsilon_0 = 0,4$), рисунок 3.18 а;

Зона 2 ($0,79 \leq K_w < 1,12$) – пробій газового факела із щілини 2 при $K_w = 0,79$ ($\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = 0,4$; $\varepsilon_{III} = f(\tau)$), рисунок 3.18 б;

Зона 3 ($1,12 \leq K_w < 1,71$) – пробій газового факела із щілини 1 при $K_w = 1,12$ ($\varepsilon_I = 0,4$; $\varepsilon_{II} = f(\tau)$; $\varepsilon_{III} = f(\tau)$), рисунок 3.18 в;

Зона 4 ($1,71 \leq K_w \leq 2,05$) – автоколивальний струменево-пульсаційний режим псевдозрідження ($\varepsilon_I = 0,4$; $\varepsilon_{II} = f(\tau)$; $\varepsilon_{III} = f(\tau)$), рисунок 3.18 г, д;

Зона 5 ($2,05 < K_w$) – режим фонтанування.

Рисунок 3.17 – Крива псевдозрідження ($d_e = 2,5$ мм)

a) $K_w = 0,6$; $w_{Г} = 0,50$ м/с b) $K_w = 0,79$; $w_{Г} = 0,62$ м/с c) $K_w = 1,12$; $w_{Г} = 0,88$ м/с d) $K_w = 1,71$; $w_{Г} = 1,34$ м/с e) $K_w = 2,05$; $w_{Г} = 1,60$ м/с

Рисунок 3.18 – Фотофіксація миттєвого стану шару ($d_e = 2,5$ мм)

Динаміка коливань $\Delta P_{ш}$, отримана експериментальним шляхом для початку автоколивального струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження при $K_w = 1,71$ та $w_{ш} = 29,4$ м/с (Зона 4), рисунок 3.19, має синусоїдальний характер із періодом коливань $\tau_{ц} = 0,44$ с, або $f = 2,27$ Гц.

Амплітуда перевищення гідростатичного опору нерухомого шару $\Delta P_{\text{амп.}} = 1313$ Па, що становить 54,9 % від $\Delta P_{\text{гідрост.}(0)}$. Індекс перемішування становить $j_{\Delta P} = 0,549$, тобто відбувається інерційне винесення 54,9 % маси зернистого матеріалу за межі початкового шару, висотою H_0 .

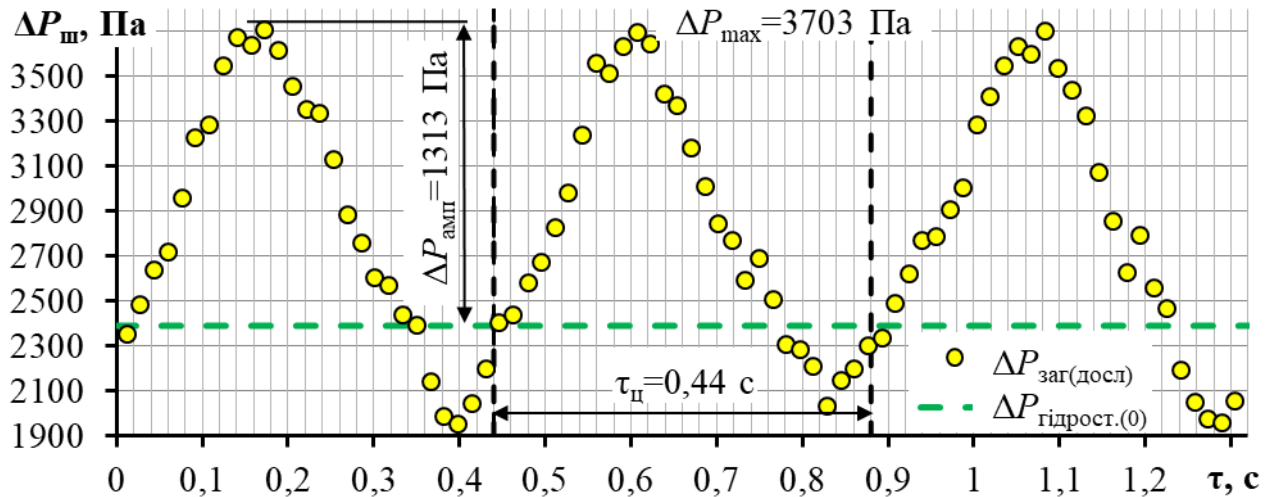


Рисунок 3.19 – Динаміка зміни загального тиску в шарі

$$(d_c = 2,5 \text{ мм}; K_w = 1,71; w_{\Gamma(\text{прив})} = 1,34 \text{ м/с})$$

Для проміжку $0,0 \leq \tau_{\text{ц}} \leq 0,44$, що відповідає тривалості 1 циклу, рисунок 3.19, на рисунку 3.20 наведено фотофіксації стану шару зернистого матеріалу з інтервалом часу $\tau = 0,04$ с.

Стадія 1 – $\tau_i = 0,00 \dots 0,11$ с

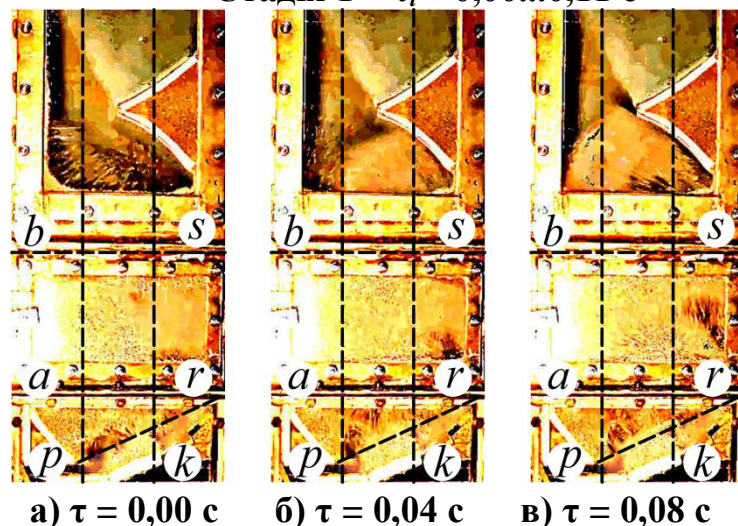
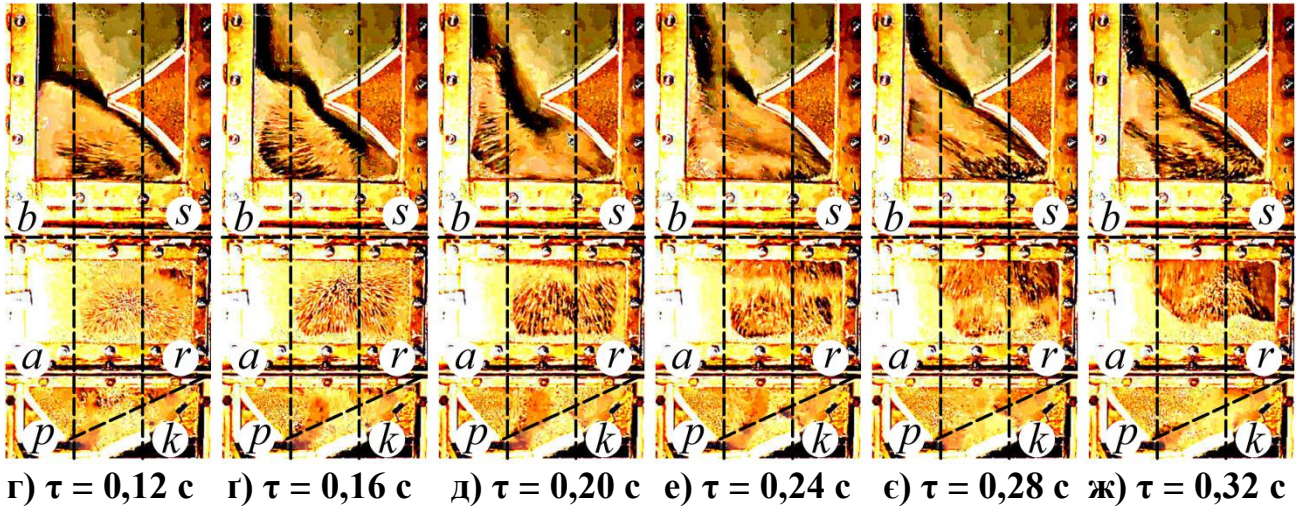


Рисунок 3.20, аркуш 1 – Фотофіксації стану шару зернистого матеріалу в камері гранулятора ($d_c = 2,5$ мм; $K_w = 1,71$; $w_{\Gamma(\text{прив})} = 1,34$ м/с)

Стадія 2 – $\tau_i = 0,11...0,33$ с



Стадія 3 – $\tau_i = 0,33...0,44$ с

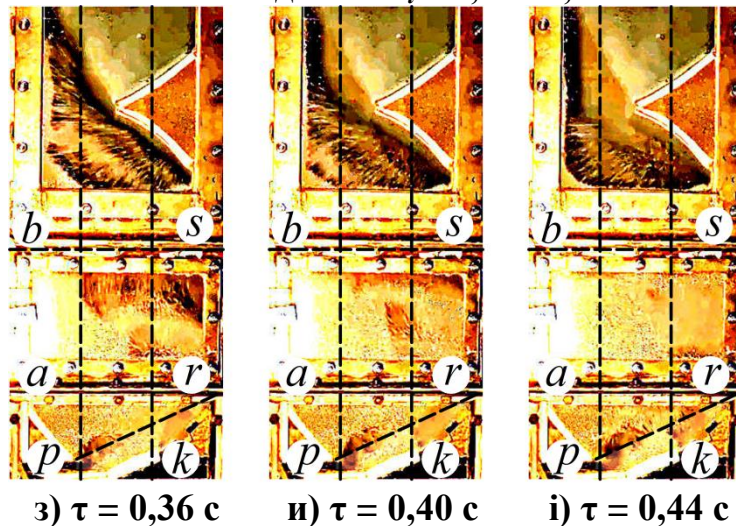


Рисунок 3.20, аркуш 2 – Фотофіксації стану шару зернистого матеріалу в камері гранулятора ($d_e = 2,5$ мм; $K_w = 1,71$; $w_{Г(прив)} = 1,34$ м/с)

Динаміка коливань $\Delta P_{ш}$, отримана експериментальним шляхом для завершення автоколивального струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження при $K_w = 2,05$ та $w_{ш} = 35,6$ м/с (Зона 4), рисунок 3.21, має синусоїдальний характер із періодом коливань $\tau_{ц} = 0,4$ с, або $f = 2,5$ Гц.

Амплітуда перевищення гідростатичного опору нерухомого шару $\Delta P_{амп.} = 1313$ Па, що становить 54,9 % від $\Delta P_{гидрост.(0)}$. Індекс перемішування становить $j_{\Delta P} = 0,82$, тобто відбувається інерційне винесення 82 % маси зернистого матеріалу за межі початкового шару, висотою H_0 .

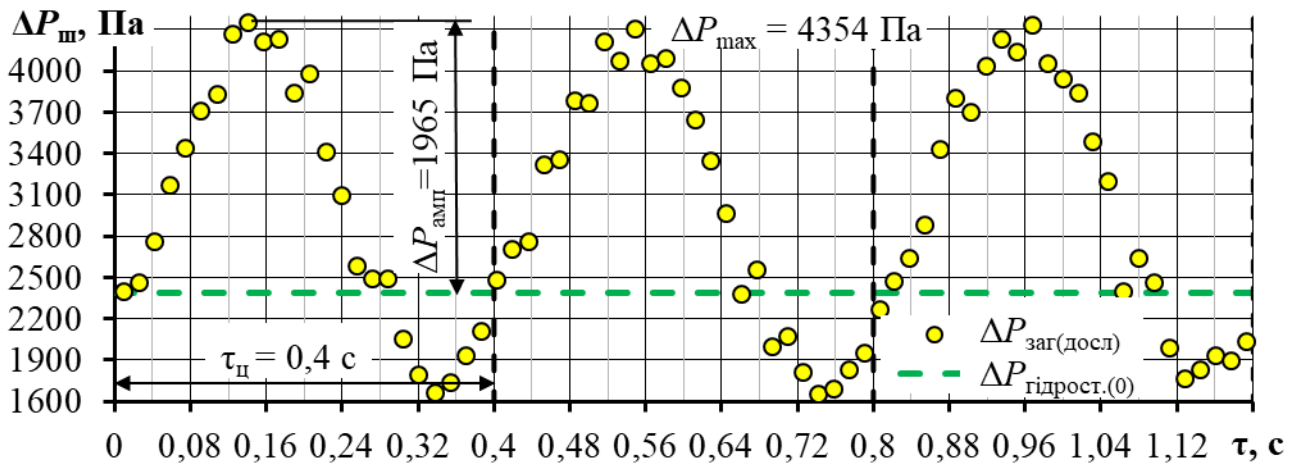


Рисунок 3.21 – Динаміка зміни загального тиску в шарі

$$(d_e = 2,5 \text{ мм}; K_w = 2,05; w_{\Gamma(\text{прив})} = 1,60 \text{ м/с})$$

Для проміжку $0,0 \leq \tau_{\text{ц}} \leq 0,4$, що відповідає тривалості 1 циклу, рисунок 3.21, на рисунку 3.22 наведено фотофіксації стану шару зернистого матеріалу з інтервалом часу $\tau = 0,04 \text{ с}$.

У межах існування автоколивального неоднорідного струменево-пульсаційного режиму ($d_e = 2,5 \text{ мм}$) при $K_w = 1,71 \dots 2,03$ порозність шару, рисунок 3.23 а, б, у зоні I залишається постійною – $\varepsilon_I = 0,4$, а у зонах II, III та середня (у фіксованому об'ємі) відповідно змінюється в межах:

- при $K_w = 1,71$: $\varepsilon_{\Gamma(\text{сеп.})} = 0,471 \dots 0,646$; $\varepsilon_{\Gamma(\text{II})} = 0,483 \dots 0,743$; $\varepsilon_{\Gamma(\text{III})} = 0,53 \dots 0,763$;
- при $K_w = 2,03$: $\varepsilon_{\Gamma(\text{сеп.})} = 0,492 \dots 0,67$; $\varepsilon_{\Gamma(\text{II})} = 0,513 \dots 0,774$; $\varepsilon_{\Gamma(\text{III})} = 0,56 \dots 0,81$.

Стадія 1 – $\tau_i = 0,00 \dots 0,1 \text{ с}$

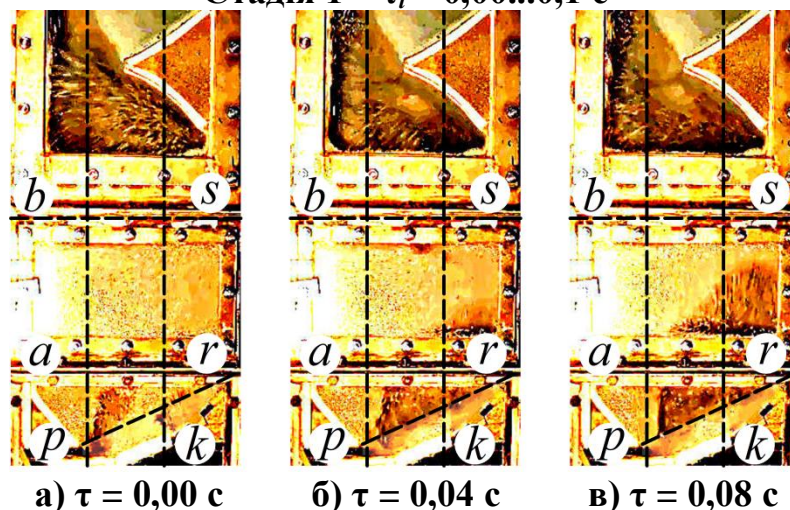
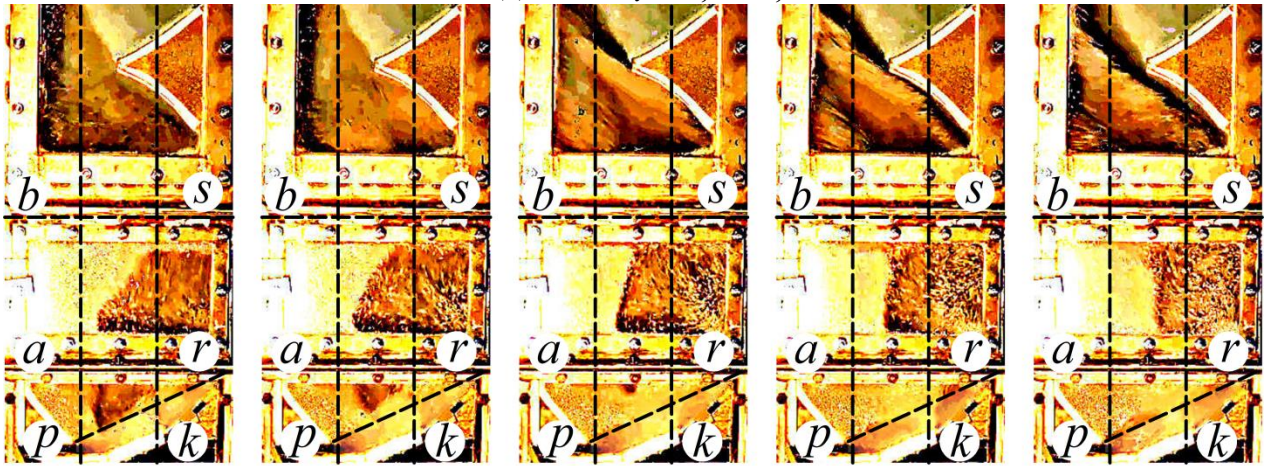


Рисунок 3.22, аркуш 1 – Фотофіксації стану шару зернистого матеріалу в камері гранулятора ($d_e = 2,5 \text{ мм}; K_w = 2,05; w_{\Gamma(\text{прив})} = 1,60 \text{ м/с}$)

Стадія 2 – $\tau_i = 0,1...0,3$ с



г) $\tau = 0,12$ с

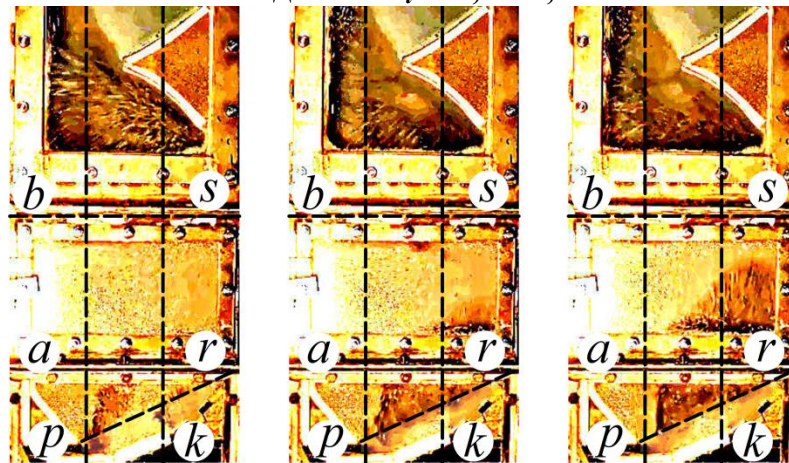
г) $\tau = 0,16$ с

д) $\tau = 0,20$ с

е) $\tau = 0,24$ с

е) $\tau = 0,28$ с

Стадія 3 – $\tau_i = 0,3...0,4$ с

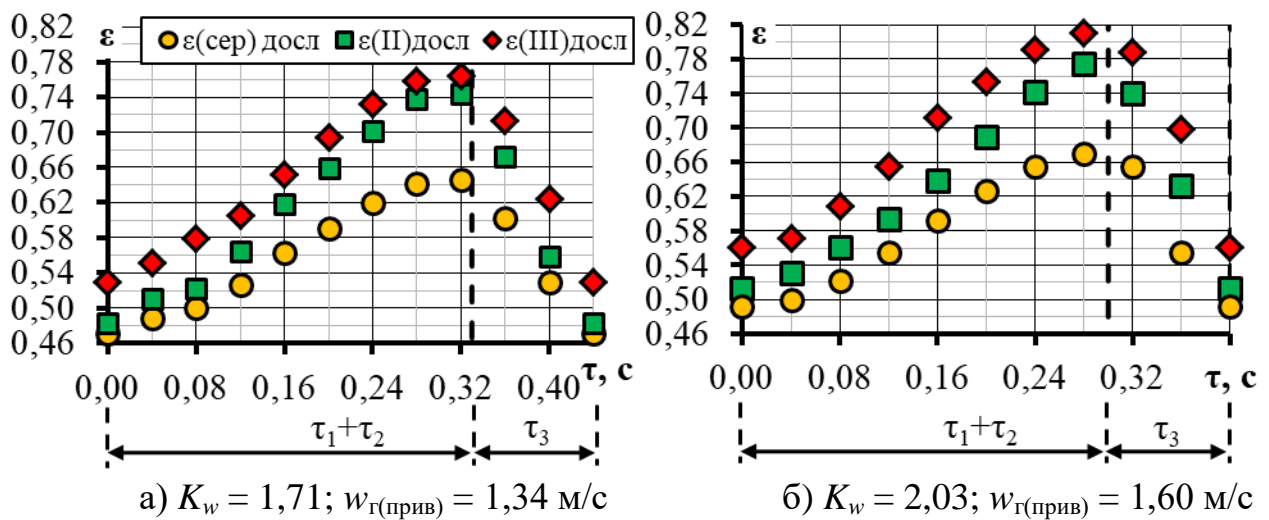


ж) $\tau = 0,32$ с

з) $\tau = 0,36$ с

и) $\tau = 0,40$ с

Рисунок 3.22, аркуш 2 – Фотофіксації стану шару зернистого матеріалу в камері гранулятора ($d_e = 2,5$ мм; $K_w = 2,05$; $w_{Г(прив)} = 1,60$ м/с)



а) $K_w = 1,71$; $w_{Г(прив)} = 1,34$ м/с

б) $K_w = 2,03$; $w_{Г(прив)} = 1,60$ м/с

Рисунок 3.23 – Динаміка зміни порозності шару в фіксованому об'ємі камери гранулятора отримана дослідним шляхом при $d_e = 2,5$ мм – $\varepsilon_{Г} = f(\tau)$

Динаміка зміни висоти шару при $K_w = 1,71$ та $K_w = 2,03$, рисунок 3.24, підтверджує імпульсне збільшення висоти шару в $H_{ш} = 1,83H_0$ (при $K_w = 1,71$) та $H_{ш} = 2,02H_0$ (при $K_w = 2,03$).

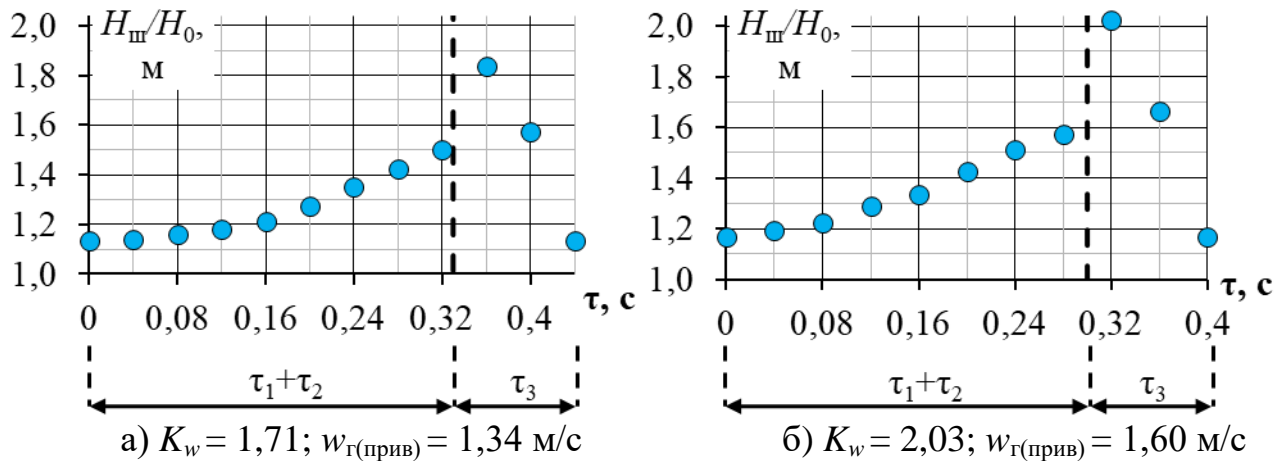


Рисунок 3.24 – Динаміка зміни висоти шару відносно початкової $H_0 = 0,32$ м при $d_e = 2,5$ мм – $H_i/H_0 = f(\tau)$

Динаміку зміни порозності шару в зоні Д, отриману за результатами досліджень для $d_e = 2,5$ мм при $K_w = 1,71$ та $K_w = 2,03$ для обраних інтервалів часу наведено на рисунку 3.25.

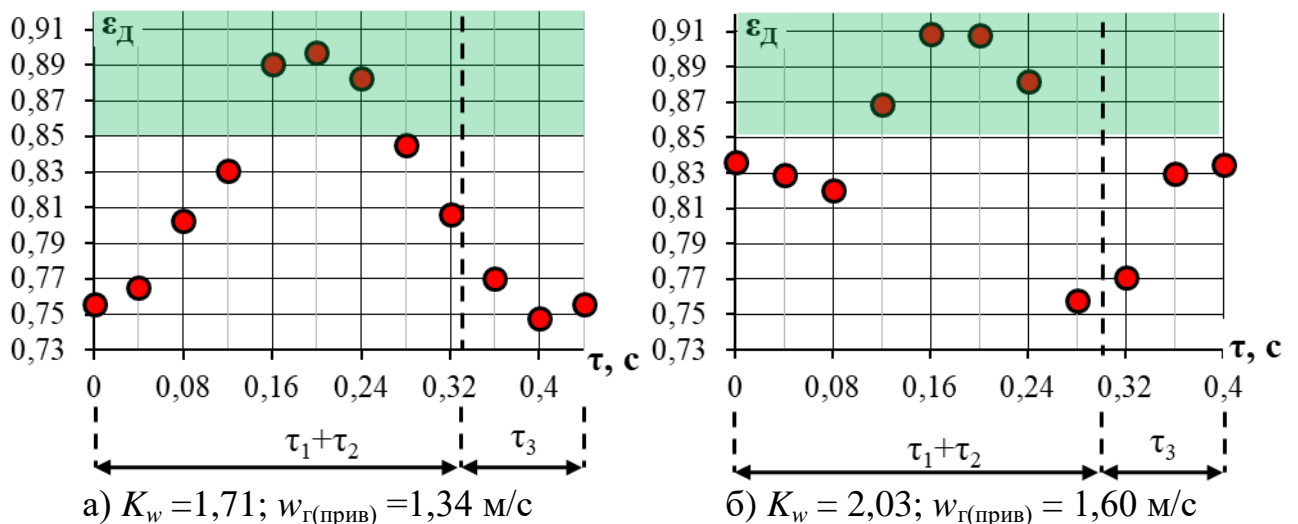


Рисунок 3.25 – Динаміка зміни порозності в зоні Д при $d_e = 2,5$ мм – $\varepsilon_D = f(\tau)$

На рисунку 3.26 наведено динаміку зміни показника втрати якості за методом Тагуті.

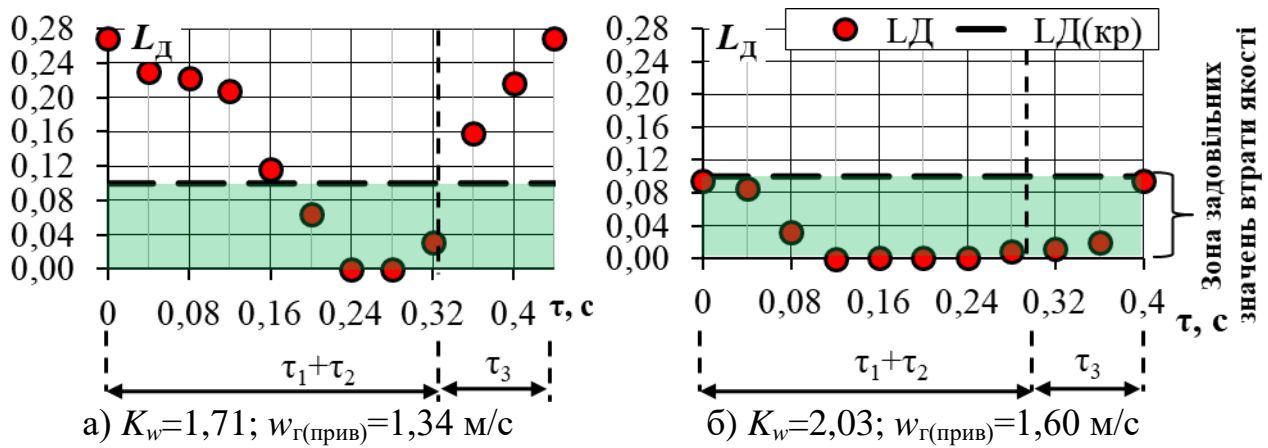


Рисунок 3.26 – Динаміка зміни показника втрати якості

при $d_e = 2,5$ – $L=f(\tau)$

Загальний час, при якому забезпечується задана якість процесу при $K_w = 1,71$, рисунок 3.26 а, складає $\tau_y = 0,17$ с, тобто, індекс динамічної якості $i_y = 0,386$. При $K_w = 2,03$, рисунок 3.26 б, якісний процес забезпечується на всьому інтервалі циклу, а індекс динамічної якості $i_y = 1$, що відповідає повному забезпеченні якості гідродинамічного режиму.

Отже, для шару зернистого матеріалу із $d_e = 2,5$ мм та $H_0 = 0,32$ м при застосуванні розробленої конструкції камери гранулятора та ГРП реалізуються положення фізичної моделі щодо переходу та роботи у автоколивальному неоднорідному струменево-пульсаційному псевдозрідженні при забезпеченні значень числа псевдозрідження у межах $1,71 \leq K_w \leq 2,03$, приведеної швидкості зріджувального агенту $1,34 \leq w_{р(прив)} \leq 1,60$ м/с та в щілинах ГРП в межах $29,4 \leq w_{щ} \leq 35,6$ м/с із забезпеченням задовільних значень індексу динамічної якості гідродинамічних умов у зоні Д в межах $0,386 \leq i_y \leq 1,0$ при $L_D \leq 0,1$.

3.2.1.3 Параметри досягнення неоднорідного псевдозрідження в автоколивальному режимі при $d_e = 1,5$ мм

Визначено криву псевдозрідження для шару зернистого матеріалу з еквівалентним діаметром частинок $d_e = 1,5$ мм при $H_0 = 0,32$ м ($z_{\phi}/H_0 < 0,5$), $M_{щ} = 7,83$ кг та $a = 2400$ м²/м³, що відповідає $\Delta P_{гидрост.(0)} = 2389$ Па, рисунок 3.27.

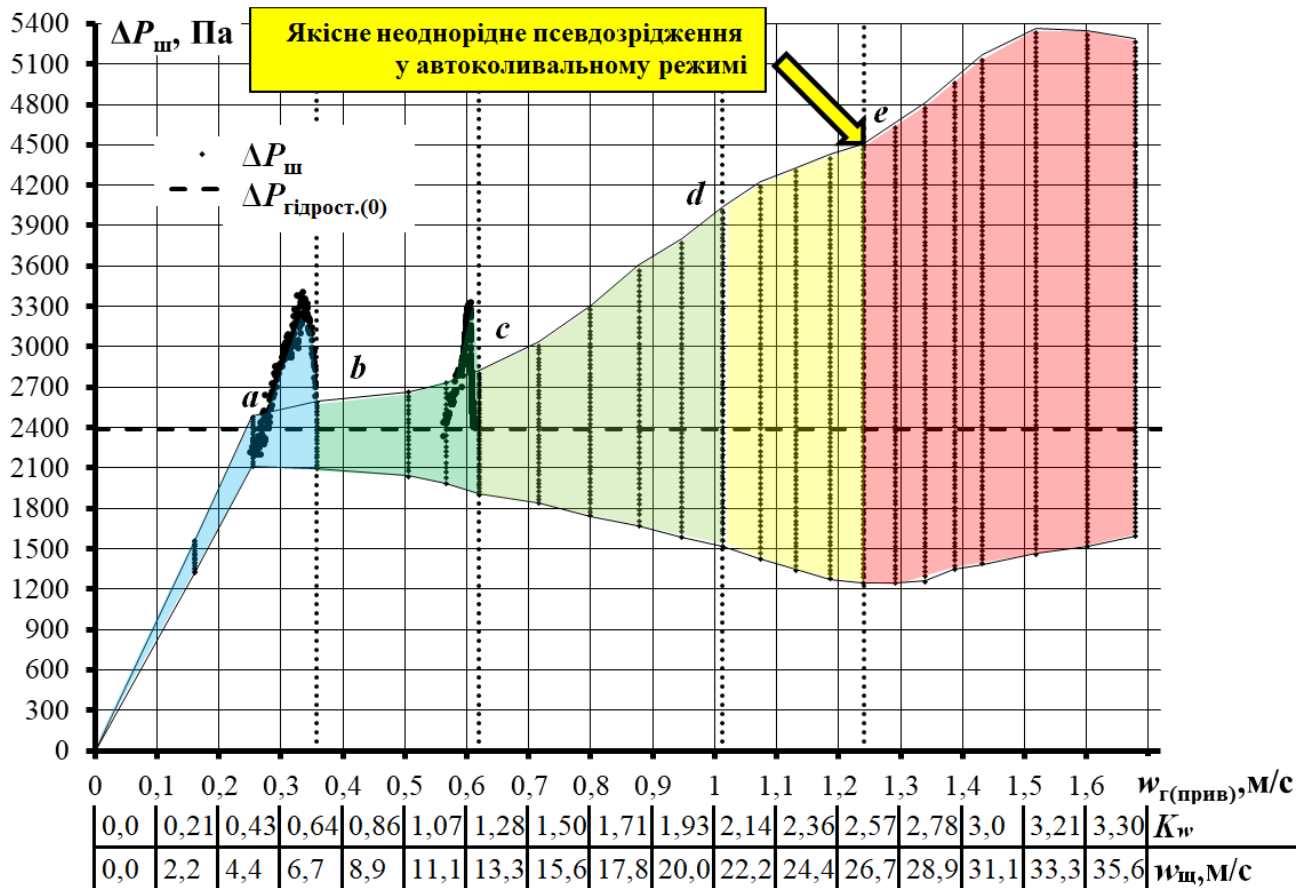


Рисунок 3.27 – Крива псевдозрідження ($d_e = 1,5$ мм)

Як і для частинок із $d_e = 4,0$ та $2,5$ мм, крива псевдозрідження при $d_e = 1,5$ мм, рисунок 3.27, умовно розділена на 5 зон:

Зона 1 ($0 \leq K_w < 0,77$) – фільтраційний режим руху газового теплоносія в обох щілинах ($\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = \varepsilon_{III} = \varepsilon_0 = 0,4$), рисунок 3.28 а;

Зона 2 ($0,77 \leq K_w < 1,32$) – пробій газового факела із щілини 2 при $K_w = 0,77$ ($\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = 0,4$; $\varepsilon_{III} = f(\tau)$), рисунок 3.28 б;

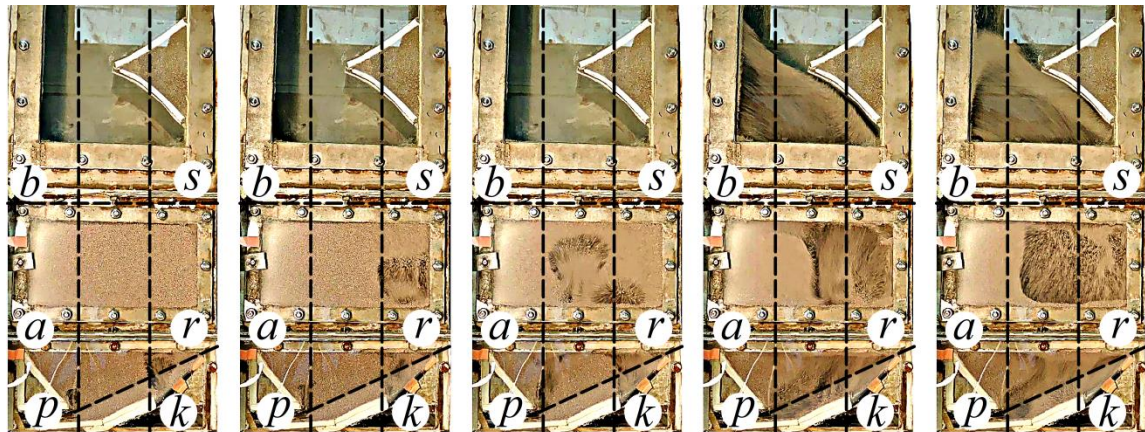
Зона 3 ($1,32 \leq K_w < 2,17$) – пробій газового факела із щілини 1 при $K_w = 1,32$ ($\varepsilon_I = 0,4$; $\varepsilon_{II} = f(\tau)$; $\varepsilon_{III} = f(\tau)$), рисунок 3.28 в;

Зона 4 ($2,17 \leq K_w \leq 2,66$) – автоколивальний струменево-пульсаційний режим псевдозрідження ($\varepsilon_I = 0,4$; $\varepsilon_{II} = f(\tau)$; $\varepsilon_{III} = f(\tau)$), рисунок 3.28 г, д;

Зона 5 ($2,66 < K_w$) – режим фонтанування.

Динаміка коливань $\Delta P_{ш}$, отримана експериментальним шляхом для початку автоколивального струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження

при $K_w = 2,17$ та $w_{ш} = 22,4$ м/с (Зона 4), рисунок 3.27, має синусоїдальний характер із періодом коливань $\tau_{ц} = 0,36$ с, або $f = 2,78$ Гц, рисунок 3.29.



a) $K_w = 0,65$ b) $K_w = 0,77$ c) $K_w = 1,32$ d) $K_w = 2,17$ e) $K_w = 2,66$
 $w_T = 0,303$ м/с $w_T = 0,36$ м/с $w_T = 0,61$ м/с $w_T = 1,01$ м/с $w_T = 1,24$ м/с

Рисунок 3.28 – Фотофіксація миттєвого стану шару ($d_e = 1,5$ мм)

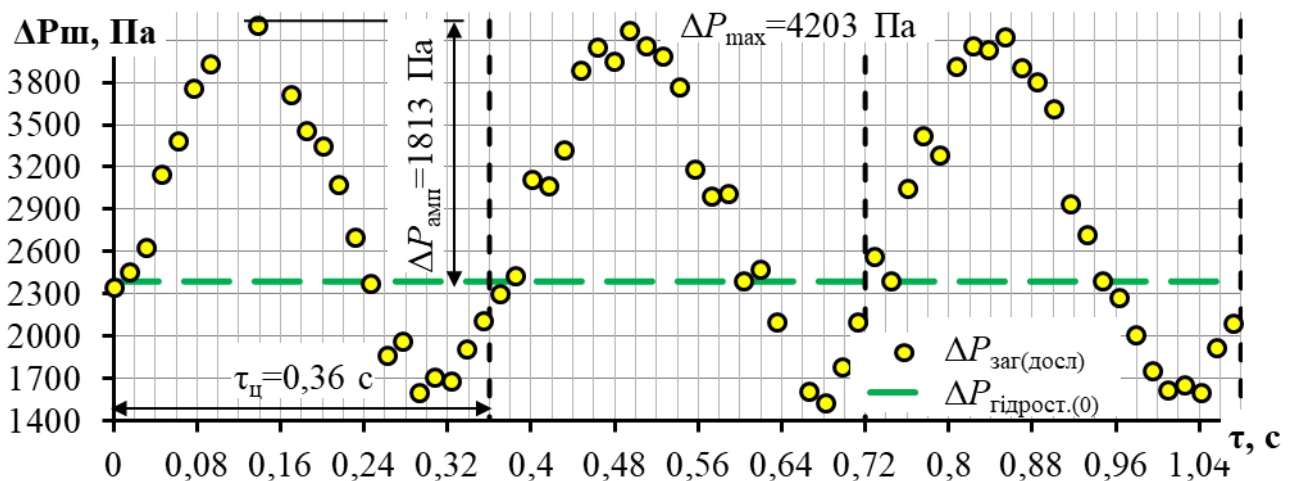


Рисунок 3.29 – Динаміка зміни загального тиску в шарі

($d_e = 1,5$ мм; $K_w = 2,17$; $w_{T(прив)} = 1,01$ м/с)

Амплітуда перевищення гідростатичного опору нерухомого шару $\Delta P_{амп.} = 1813$ Па, що становить 75,9 % від $\Delta P_{гідрост.(0)}$. Індекс перемішування становить $j_{\Delta P} = 0,759$, тобто відбувається інерційне винесення 75,9 % маси зернистого матеріалу за межі початкового шару, висотою H_0 .

Для проміжку $0,0 \leq \tau_{ц} \leq 0,36$, що відповідає тривалості 1 циклу, рисунок 3.29, на рисунку 3.30 наведено фотофіксації стану шару зернистого матеріалу з інтервалом часу $\tau = 0,04$ с.

Стадія 1 – $\tau_i = 0,00...0,09$ с



а) $\tau = 0,00$ с

б) $\tau = 0,04$ с

в) $\tau = 0,08$ с

Стадія 2 – $\tau_i = 0,09...0,27$ с



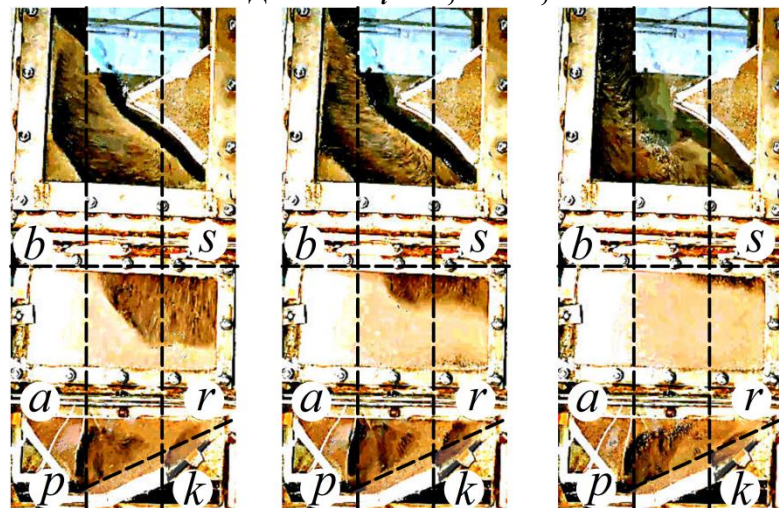
г) $\tau = 0,12$ с

д) $\tau = 0,16$ с

е) $\tau = 0,20$ с

е) $\tau = 0,24$ с

Стадія 3 – $\tau_i = 0,27...0,36$ с



є) $\tau = 0,28$ с

ж) $\tau = 0,32$ с

з) $\tau = 0,36$ с

Рисунок 3.30 – Фотофіксації стану шару зернистого матеріалу в камері

гранулятора ($d_e = 1,5$ мм; $K_w = 2,17$; $w_{Г(прив)} = 1,01$ м/с)

Наведені фотофіксації підтверджують наявність неоднорідного автоколивального режиму псевдозріднення, який повністю відповідає положенням фізичної моделі.

Динаміка коливань $\Delta P_{ш}$, отримана експериментальним шляхом для завершення автоколивального струменево-пульсаційного режиму псевдозріднення при $K_w = 2,66$ та $w_{ш} = 27,6$ м/с (Зона 4), рисунок 3.27, має синусоїдальний характер із періодом коливань $\tau_{ц} = 0,32$ с, рисунок 3.31.

Амплітуда перевищення гідростатичного опору нерухомого шару $\Delta P_{амп.} = 2094$ Па, що становить 87,6 % від $\Delta P_{гидрост.(0)}$ із частотою $f = 3,13$ Гц. Індекс перемішування становить $j_{\Delta P} = 0,876$, тобто відбувається інерційне винесення 87,6 % маси матеріалу за межі початкового шару, висотою H_0 .

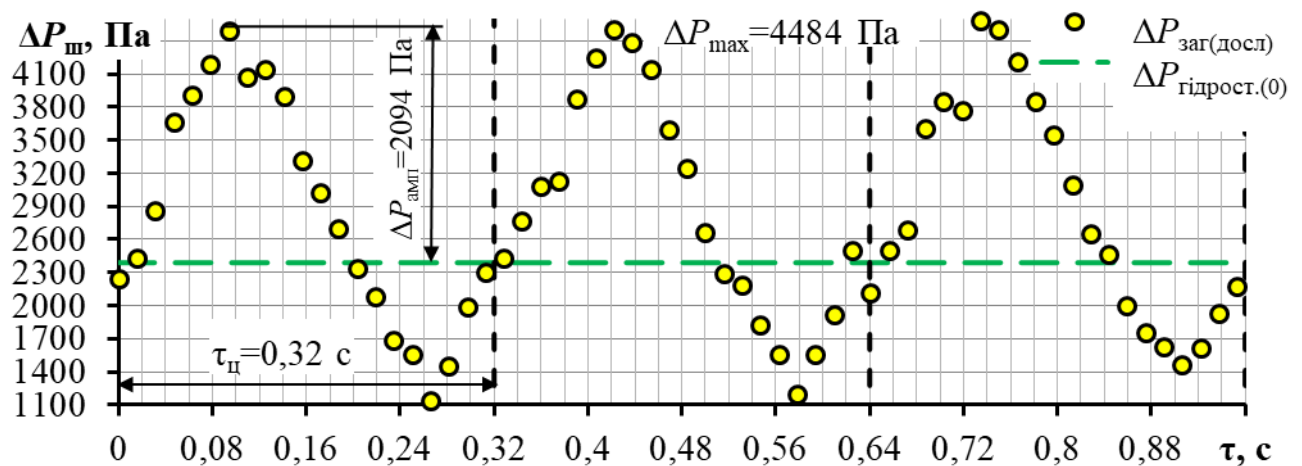


Рисунок 3.31 – Динаміка зміни загального тиску в шарі

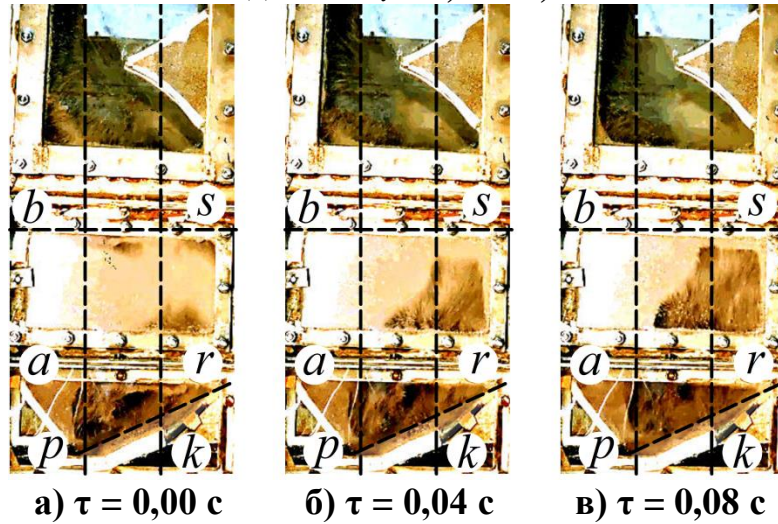
$$(d_e = 1,5 \text{ мм}; K_w = 2,66; w_{Г(прив)} = 1,24 \text{ м/с})$$

Для проміжку $0,0 \leq \tau_{ц} \leq 0,32$, що відповідає тривалості 1 циклу, рисунок 3.31, на рисунку 3.32 наведено фотофіксації стану шару зернистого матеріалу з інтервалом часу $\tau = 0,04$ с.

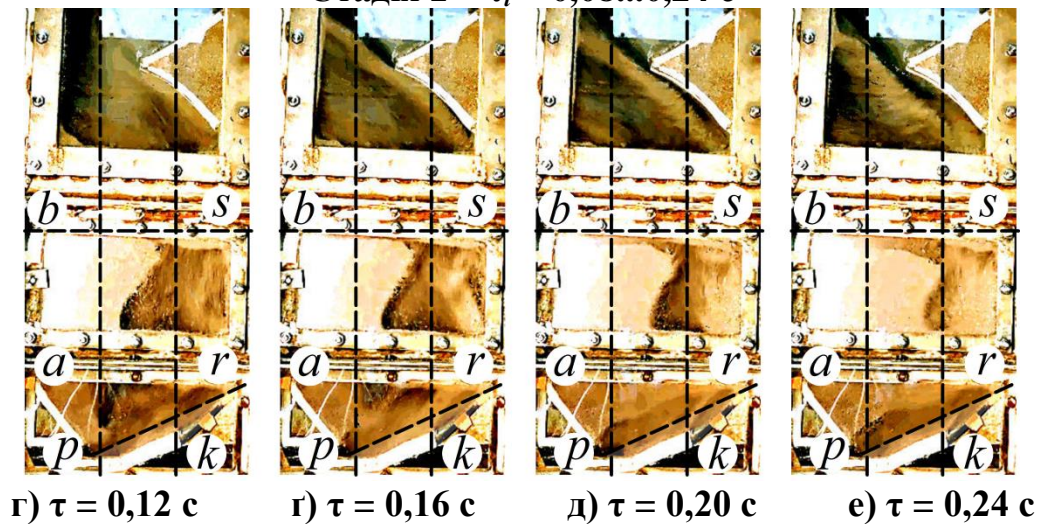
У межах існування автоколивального неоднорідного струменево-пульсаційного режиму ($d_e = 1,5$ мм) при $K_w = 2,17 \dots 2,66$ порозність шару, рисунок 3.33, у зоні I залишається постійною — $\varepsilon_I = 0,4$, а у зонах II, III та середня (у фіксованому об'ємі) відповідно змінюється в межах:

- при $K_w = 2,17$: $\varepsilon_{Г(ср.)} = 0,495 \dots 0,661$; $\varepsilon_{Г(II)} = 0,521 \dots 0,754$; $\varepsilon_{Г(III)} = 0,559 \dots 0,783$;
- при $K_w = 2,66$: $\varepsilon_{Г(ср.)} = 0,524 \dots 0,679$; $\varepsilon_{Г(II)} = 0,574 \dots 0,787$; $\varepsilon_{Г(III)} = 0,581 \dots 0,815$.

Стадія 1 – $\tau_i = 0,00...0,08$ с



Стадія 2 – $\tau_i = 0,08...0,24$ с



Стадія 3 – $\tau_i = 0,24...0,32$ с

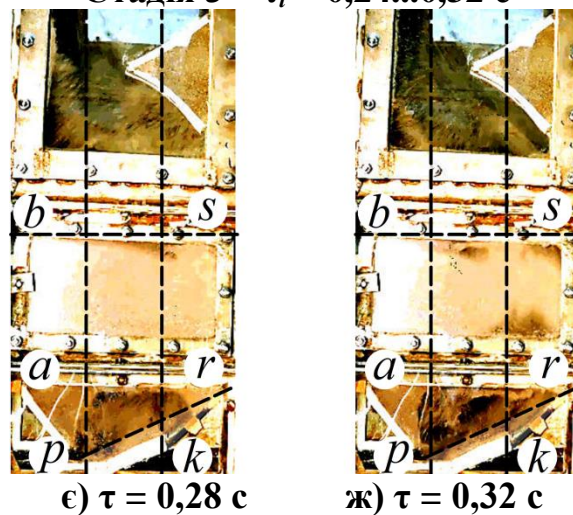


Рисунок 3.32 – Фотофіксації стану шару зернистого матеріалу в камері гранулятора ($d_e = 1,5$ мм; $K_w = 2,66$; $w_{\Gamma(\text{прив})} = 1,24$ м/с)

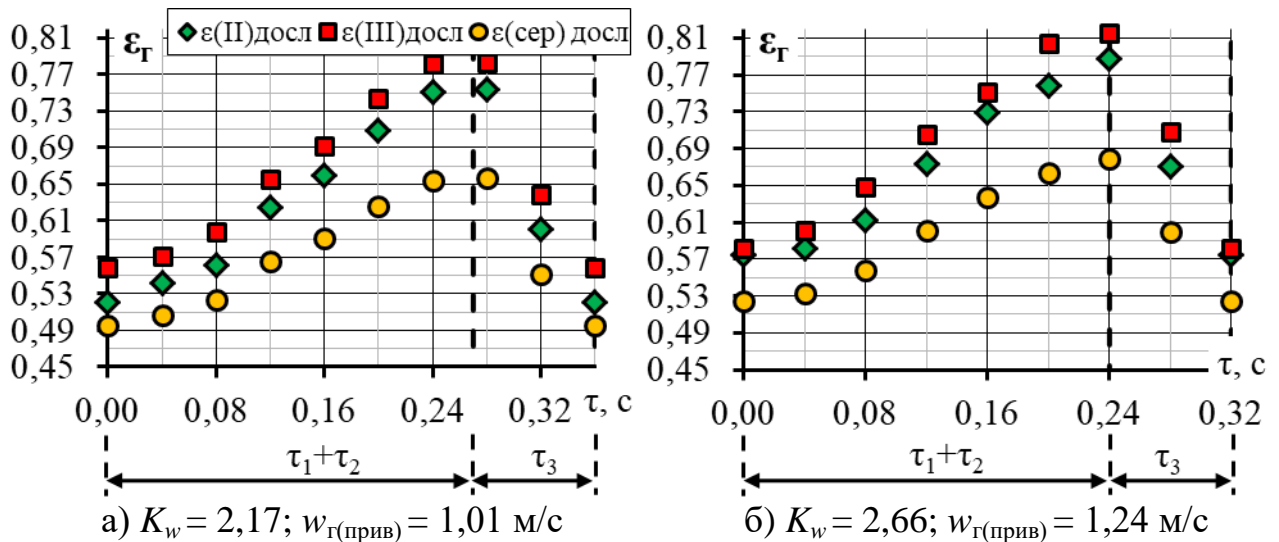


Рисунок 3.33 – Динаміка зміни порозності шару в фіксованому об'ємі камери гранулятора отримана дослідним шляхом при $d_e = 1,5$ мм – $\varepsilon_r = f(\tau)$

Динаміка зміни висоти шару при $K_w = 2,17$ та $K_w = 2,66$, рисунок 3.34, підтверджує імпульсне збільшення висоти шару в $H_{ш} = 1,9H_0$ (при $K_w = 2,17$) та $H_{ш} = 2,05H_0$ (при $K_w = 2,66$).

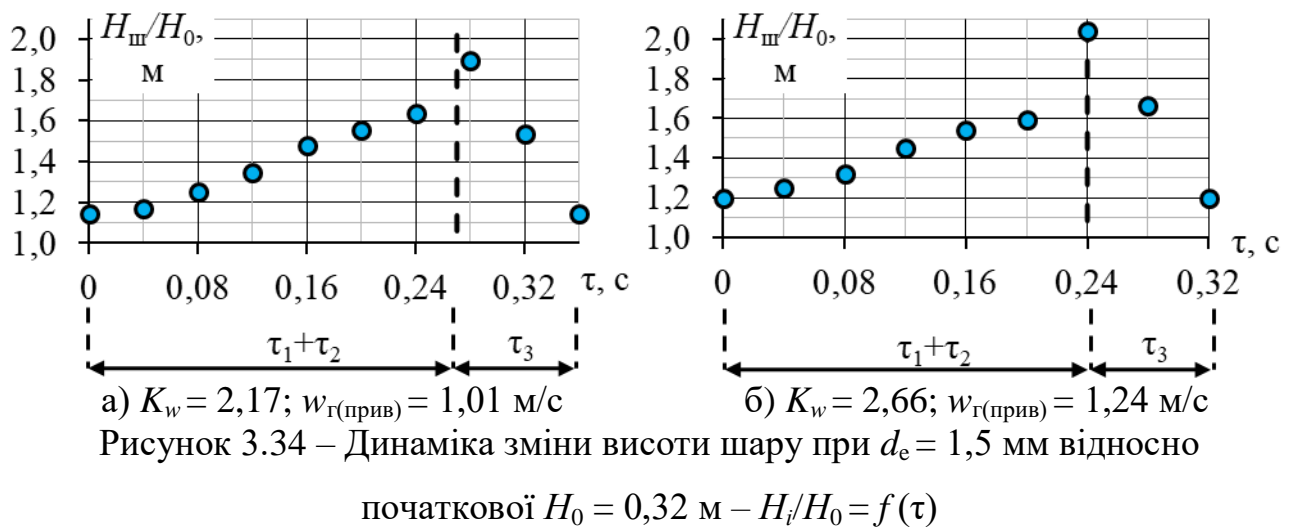
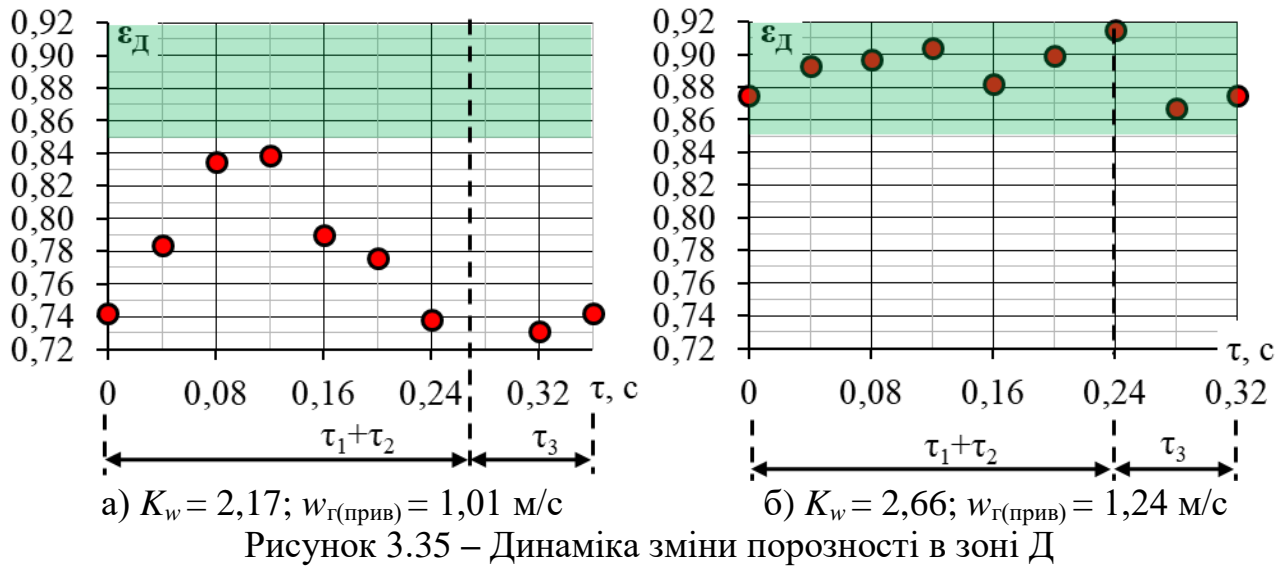


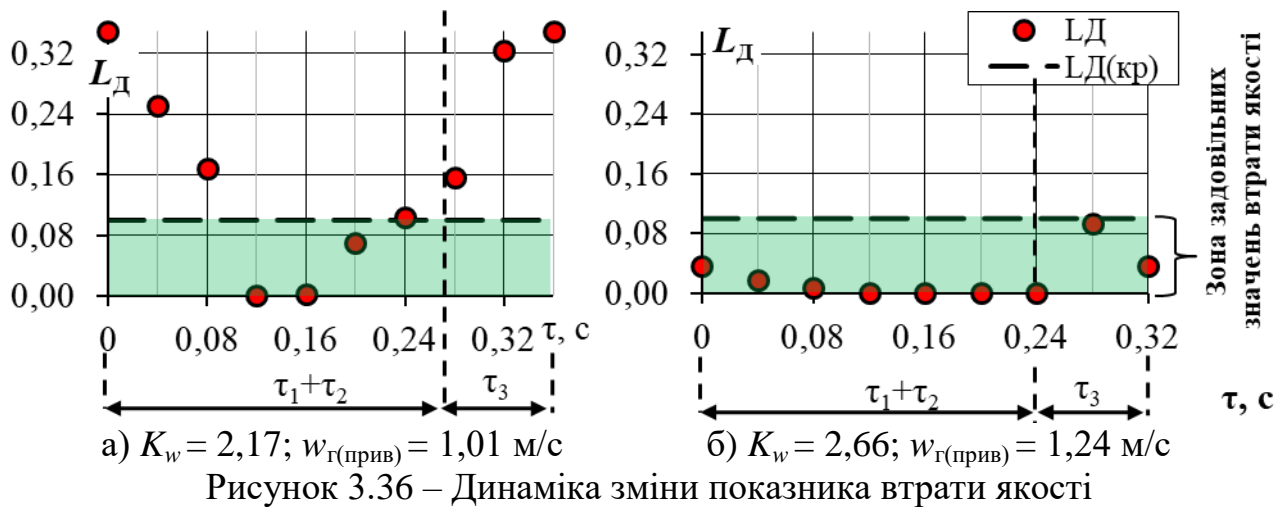
Рисунок 3.34 – Динаміка зміни висоти шару при $d_e = 1,5$ мм відносно початкової $H_0 = 0,32$ м – $H_i/H_0 = f(\tau)$

Динаміку зміни порозності шару в зоні Д, отриману за результатами досліджень для $d_e = 1,5$ мм при $K_w = 2,17$ та $K_w = 2,66$ для обраних інтервалів часу наведено на рисунку 3.35.

На рисунку 3.36 наведено динаміку зміни показника втрати якості за методом Тагуті.



при $d_e = 1,5$ мм – $\varepsilon_D = f(\tau)$



при $d_e = 1,5$ – $L = f(\tau)$

Загальний час, при якому забезпечується задана якість процесу при $K_w = 2,17$, рисунок 3.36 а, складає $\tau_y = 0,14$ с, тобто, індекс динамічної якості $i_y = 0,389$. При $K_w = 2,66$, рисунок 3.36 б, якісний процес забезпечується на всьому інтервалі циклу, а індекс динамічної якості $i_y = 1$, що відповідає повному забезпеченні якості гідродинамічного режиму.

Таким чином, для шару зернистого матеріалу із $d_e = 1,5$ мм та $H_0 = 0,32$ м при застосуванні розробленої конструкції камери гранулятора та ГРП реалізуються положення фізичної моделі щодо переходу та роботи у

автоколивальному неоднорідному струменево-пульсаційному режимі псевдозрідження при забезпеченні значень числа псевдозрідження у межах $2,17 \leq K_w \leq 2,66$, приведеної швидкості зріджувального агента в камері апарата $1,01 \leq w_{p(\text{прив})} \leq 1,24$ м/с та у щілинах ГРП в межах $29,4 \leq w_{\text{щ}} \leq 35,6$ м/с. Саме при цих значеннях забезпечується задовільних індекс динамічної якості гідродинамічних умов у зоні Д в межах $0,389 \leq i_a \leq 1,0$ при $L_d \leq 0,1$.

3.3 Визначення основних параметрів неоднорідного псевдозрідження у автоколивальному режимі псевдозрідження

Залежно від еквівалентного діаметра твердих частинок змінюються межі реалізації неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі. За результатами експериментальних досліджень для шару зернистого матеріалу із $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм визначено мінімальні (початкові) та максимальні (кінцеві) значення числа псевдозрідження, що забезпечують виконання умов фізичної моделі ($0,35 \leq i_a \leq 1,0$ та $0,36 \leq J_{\Delta P} \leq 0,54$). Узагальнення результатів досліджень проведено у вигляді залежності $K_w = f(aH_0/\phi)$, де a – питома поверхня шару зернистого матеріалу ($2400 \geq a \geq 900$ м²/м³ відповідно до значень $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм), $H_0 = 0,32$ м – висотою нерухомого шару зернистого матеріалу, $\phi = 4,9\%$ – коефіцієнт живого перерізу ГРП, рисунок 3.37.

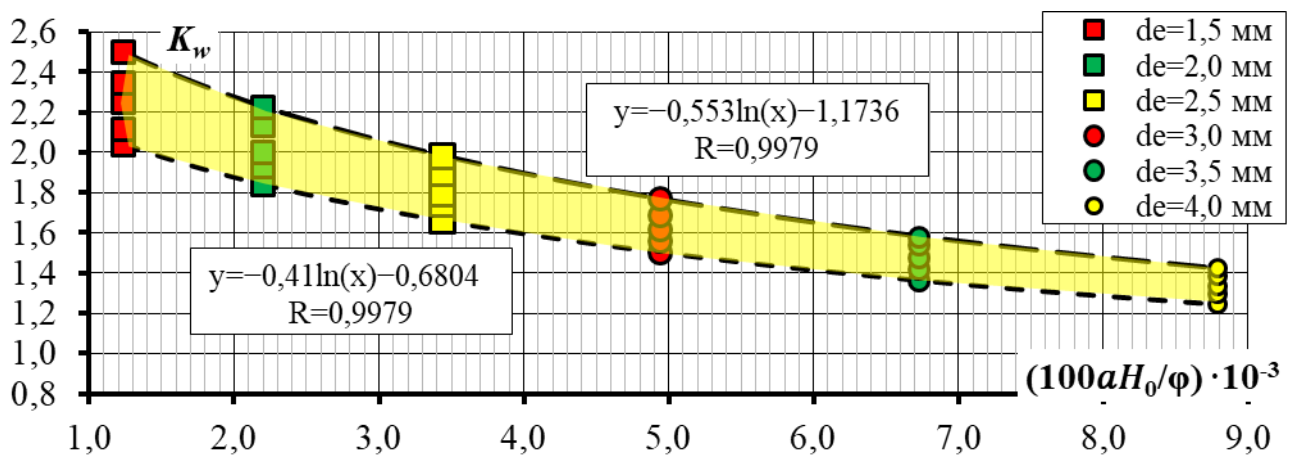


Рисунок 3.37 – Значення $K_w = f(aH_0/\phi)$ в межах існування неоднорідного

псевдозрідження в автоколивальному режимі

Тобто, неоднорідне псевдозрідження у автоколивальному режимі забезпечується при виконанні умови $K_{w(\min)} \leq K_{w(\text{роб.})} \leq K_{w(\max)}$:

$$K_{w(\min)} = -0,41 \cdot \ln\left(\frac{100aH_0}{\varphi}\right) - 0,6804 \quad (3.1)$$

$$K_{w(\max)} = -0,553 \cdot \ln\left(\frac{100aH_0}{\varphi}\right) - 1,1736 \quad (3.2)$$

Наведена на рисунку 3.38 залежність частоти пульсацій від приведенного числа Рейнольдса $f = f(\text{Re}_{\text{пр}})$ для шару із $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм показує зменшення частоти пульсацій при збільшенні $\text{Re}_{\text{пр}}$.

Аналогічне значення має експериментальна залежність частоти пульсацій від кінетичної енергії $f=f(E)$, що вводиться з газом у щілинах ГРП, рисунок 3.39.

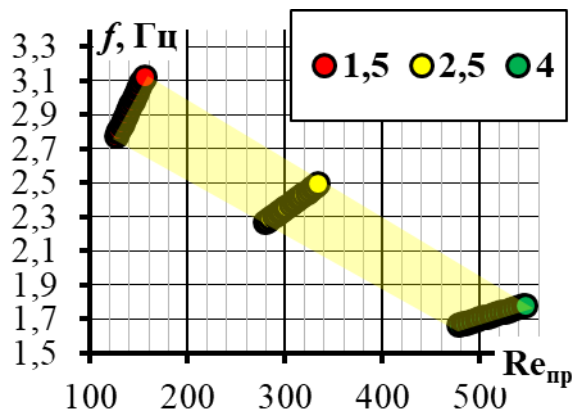


Рисунок 3.38 – Залежність $f = f(\text{Re}_{\text{пр}})$

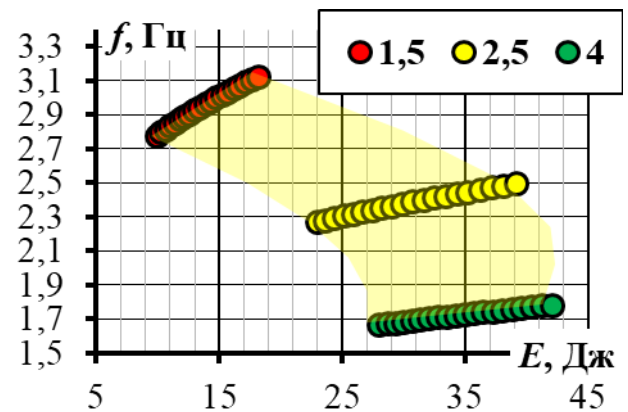


Рисунок 4.39 – Залежність $f = f(E)$

Важливим результатом для практичної реалізації процесу є залежність частоти пульсацій шару від числа псевдозрідження, рисунок 3.40.

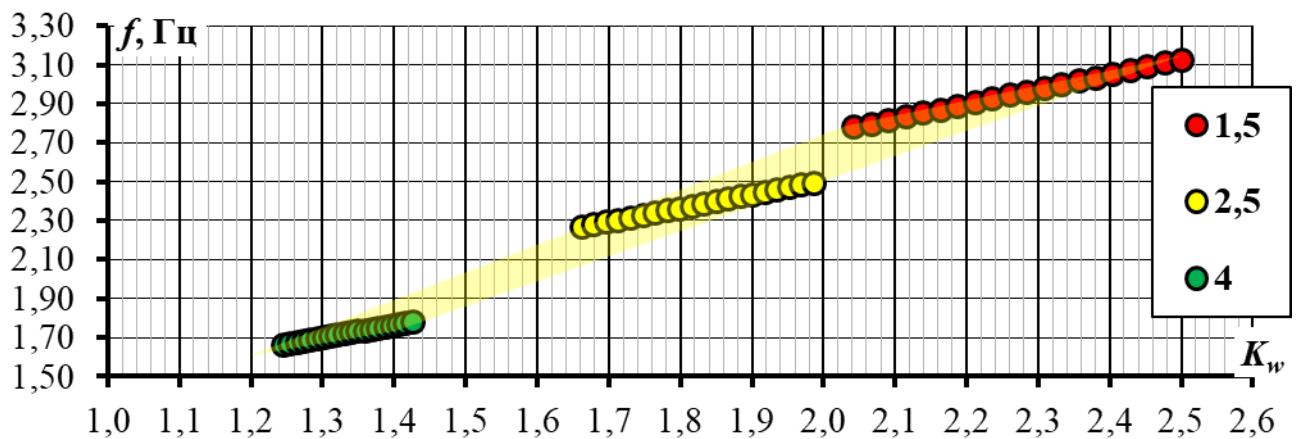


Рисунок 3.40 – Залежність частоти пульсацій від числа псевдозрідження $f=f(K_w)$

За результатами аналізу експериментальних досліджень частоти пульсацій шару встановлено вплив на неї числа псевдозрідження та конструктивних параметрів ГРП для шару із $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм:

$$f = 0,4523 \cdot \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right)^{-0,077} \cdot K_w + 1,3106 \cdot e^{-48,87 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right)} \quad (3.3)$$

За результатами проведених досліджень гідродинаміки у псевдозрідженому шарі із $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм встановлено, що зі збільшенням числа псевдозрідження збільшується індекс перемішування $J_{\Delta P}$, рисунок 3.41, та індекс динамічної якості гідродинаміки i_y , рисунок 3.42.

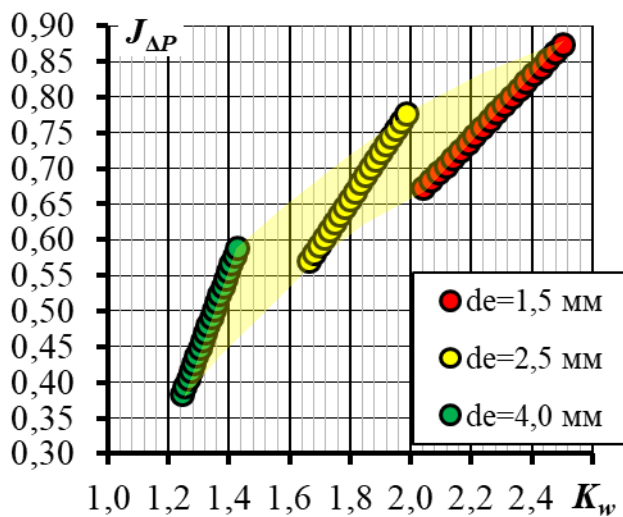


Рисунок 3.41 – Залежність $J_{\Delta P} = f(K_w)$

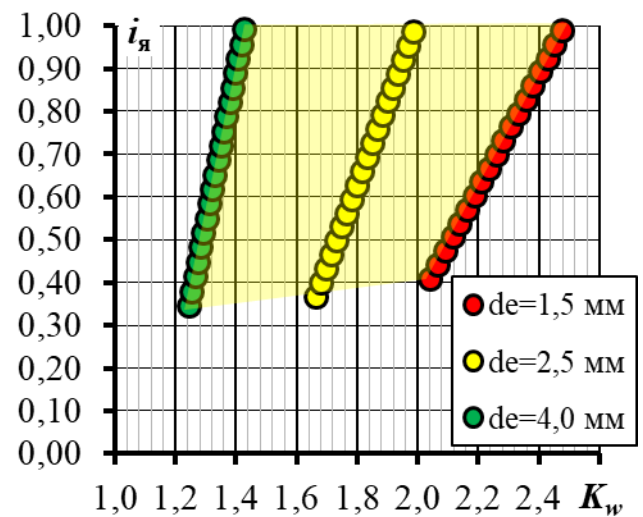


Рисунок 3.42 – Залежність $i_y = f(K_w)$

Аналіз та узагальнення одержаних результатів дозволив отримати залежність для прогнозування $J_{\Delta P}$ та i_y :

$$J_{\Delta P} = \left(91,41 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right) + 0,3247 \right) K_w - 38,554 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right)^{0,7666} \quad (3.4)$$

$$i_y = \left(298,16 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right) + 0,9187 \right) K_w - 237,4 \left(\frac{100aH_0}{\varphi} \right) + 2,003 \quad (3.5)$$

Залежність $i_y = f(K_w)$ дозволяє визначити необхідні масові витрати зріджувального агенту та його швидкість у щілинах ГРП при відомих значеннях еквівалентного діаметра частинок шару зернистого матеріалу для практично повного усунення оплавлення матеріалу на робочих поверхнях ГРП.

Отримані залежності K_w , f , $J_{\Delta P}$ та i_y доцільно використовувати при проектному розрахунку гранулятора із неоднорідним псевдозрідженням у

автоколивальному режимі для одержання органомінеральних добрив із $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм.

Відповідно до положень фізичної моделі неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі, розділ 2, пункт 2.2.2, асиметричне дворівневе введення зріджувального агенту через щілини ГРП обумовлює пульсаційне збільшення порозності шару в II та III зонах із одночасним переміщенням значної маси шару з цих зон у зону I, що спричиняє зміщення центру мас шару в крайнє положення до A_{\max} по вертикальній осі (z) на величину Δz_{\max} та горизонтальній (x) – Δx_{\max} , відносно початкового (рівноважного) стану A_0 із координатами x_0 та z_0 , рисунок 2.6.

Проведені експериментальні дослідження гідродинаміки струменево-пульсаційного псевдозрідження при висоті нерухомого шару $H_0 = 0,32$ м та геометричних розмірах камери гранулятора в горизонтальній площині $A \times B = 0,3 \times 0,11$ м показали, що індекс динамічної якості гідродинаміки $i_y \geq 0,85$ для шару із діаметром частинок $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ досягається при визначених дослідним шляхом значеннях $2,66 \leq K_w \leq 1,43$, розділ 3, пункт 3.2.

У одному циклі пульсацій відбувалось переміщення центру мас шару зернистого матеріалу в апараті, крайні (екстремальні) положення якого (A_0 та A_{\max}) наведено на рисунку 3.43.

З урахуванням положень фізичної моделі неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі, розділ 2, та результатів досліджень, розділ 3, максимальне переміщення центру мас шару A_{\max} досягається за $\tau_1 + \tau_2 = 0,75\tau_{\text{ц}}$, а повернення у початковий (рівноважний) стан A_0 – за $\tau_3 = 0,25\tau_{\text{ц}}$.

Тоді приведена швидкість переміщення Ц.М. шару до досягнення положення A_{\max} ($w_{\text{ц.м.}(\uparrow)}$) та повернення в т. A_0 ($w_{\text{ц.м.}(\downarrow)}$) відповідно, м/с:

$$w_{\text{ц.м.}(\uparrow)} = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}}{0,75\tau_{\text{ц}}}; \quad w_{\text{ц.м.}(\downarrow)} = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}}{0,25\tau_{\text{ц}}}. \quad (3.6)$$

Звідки $w_{\text{ц.м.}(\uparrow)}/w_{\text{ц.м.}(\downarrow)} = 0,75/0,25$. Тобто, приведена швидкість досягнення максимального переміщення центру мас шару A_{\max} , м/с: $w_{\text{ц.м.}(\uparrow)} = 3w_{\text{ц.м.}(\downarrow)}$.

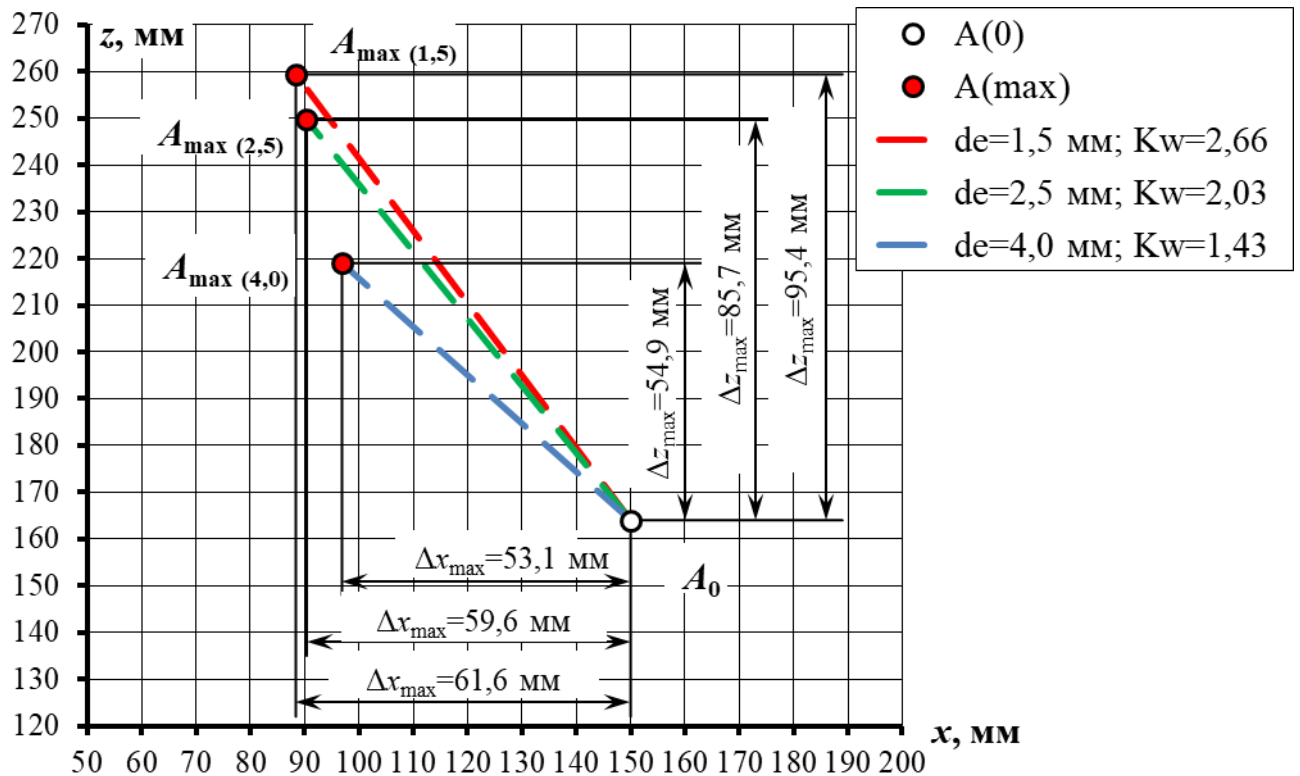


Рисунок 3.43 – Екстремальні значення координат переміщення центру мас шару для $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм із $H_0 = 0,32$ м при $i_{я} = 1,0$

Результати розрахунку приведених швидкостей переміщення центру мас для шару зернистого матеріалу з початковою висотою $H_0 = 0,32$ мм із розміром частинок $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм за гідродинамічних умов, коли індекс динамічної якості гідродинаміки $i_{я} = 1,0$ наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Приведені швидкості переміщення центру мас шару при $i_{я} = 1,0$

d_e , мм	a , $\text{м}^2/\text{м}^3$	K_w	$\tau_{ц}$, с	Δx_{\max} , мм	Δz_{\max} , мм	$w_{ц.м.(\uparrow)}$, м/с	$w_{ц.м.(\downarrow)}$, 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

Таким чином, переміщення центру мас шару в апараті має коливальний характер і здійснюється за період одного циклу. При цьому, переміщення з початкової точки A_0 до A_{\max} має циклічний характер і відбувається за $0,75\tau_{ц}$, а повернення з положення A_{\max} до A_0 відбувається за $0,25\tau_{ц}$ для зернистого

матеріалу із $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ мм. Це призводить до того, що співвідношення приведених швидкостей $w_{ц.м.(↑)}:w_{ц.м.(↓)} = 3:1$ при значенні індексу динамічної якості гідродинаміки $i_y = 1,0$.

Проведеними дослідженнями доведено, що саме такий режим коливань центру мас шару забезпечить відсутність застійних зон та оплавлення матеріалу на робочих поверхнях ГРП, що підтверджує доцільність методики розрахунку гідродинамічного режиму із застосуванням динамічної якості.

3.4 Перевірка адекватності математичної моделі неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі

Метою аналітичного розрахунку була перевірка адекватності математичної моделі неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі.

За результатами проведених досліджень отримано експериментальну залежність для визначення динаміки зміни середньої порозності шару у фіксованому об'ємі апарата:

$$\varepsilon_r(\tau_i) = \varepsilon_{r(\min)} + A + A \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} (\tau_i - \tau_{ц}(n-1)) - K_{зДВ}\right), \quad (3.7)$$

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

Аналогічний характер має динаміка зміни порозності шару в зоні II та III, які відрізняються від середньої тільки значеннями екстремальних точок.

Отримана залежність із коефіцієнтом кореляції $R \geq 0,97$ описує експериментальні дані, рисунок 3.44.

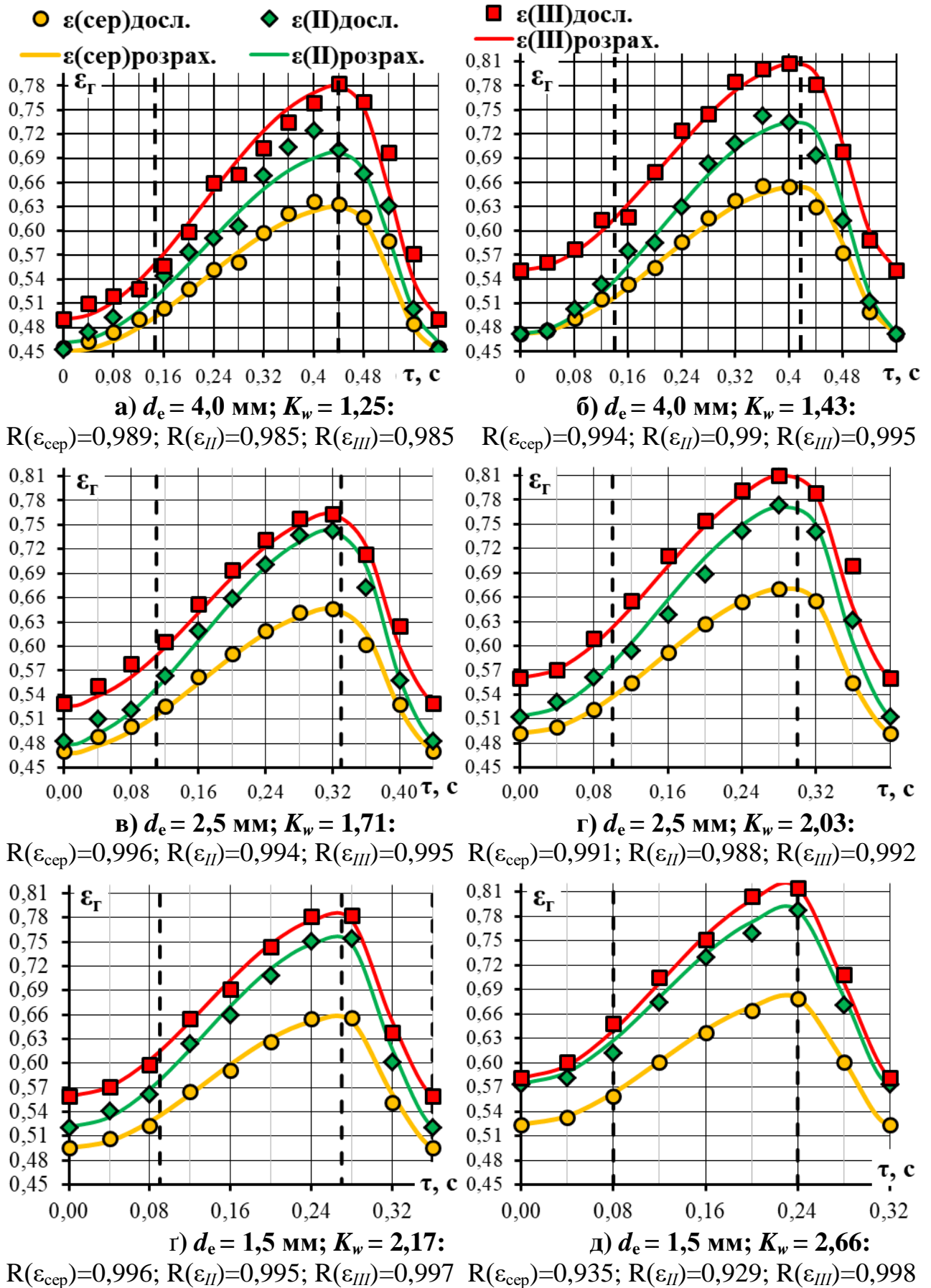


Рисунок 3.44 – Динаміка зміни порозності шару в фіксованому об'ємі камери

гранулятора отримана за результатами розрахунків – $\varepsilon_{\Gamma} = f(\tau)$

Середні значення функції $\varepsilon_{\Gamma(\text{сеп})} = f(\tau)$ визначається за виразом:

$$\varepsilon_{\Gamma(\text{сеп})}(\tau_i) = \frac{\varepsilon_{\Gamma(I)}(\tau_i) \cdot V_I + \varepsilon_{II} \cdot V_{II} + \varepsilon_{\Gamma(III)}(\tau_i) \cdot V_{III}}{V_I + V_{II} + V_{III}}, \quad (3.8)$$

де $\varepsilon_{\Gamma(II)}$ та $\varepsilon_{\Gamma(III)}$ – порозність зони II та III відповідно; V_I, V_{II}, V_{III} – об'єми зон I, II та III відповідно у фіксованому об'ємі апарата.

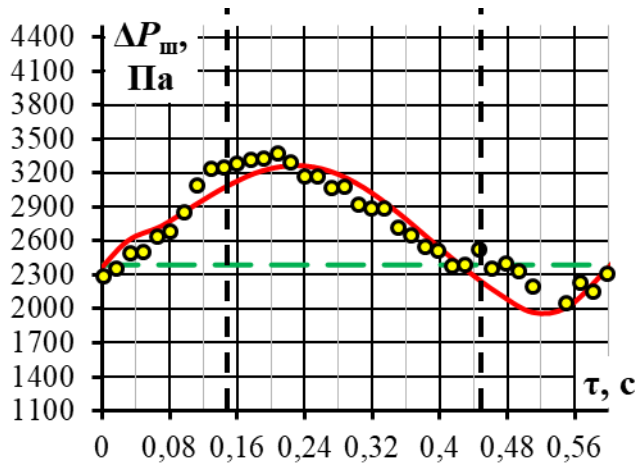
Тобто, завдяки запропонованому способу взаємодії зріджувального агенту з твердими частинками у розробленій камері апарата відбувається значне локальне перенесення зернистого матеріалу із зони II та III.

У результаті, при $d_e = 4,0$ мм миттєві максимальні значення порозності твердої фази при $K_w = 1,25$ зменшуються: у зоні II в 1,83, у зоні III в 2,32 рази, а при $K_w = 1,43$ – у зоні II в 2,06, у зоні III в 2,33 рази. Це призводить до високого ступеня неоднорідності в дисперсній системі газ-тверді частинки. На завершальній стадії, внаслідок переміщення матеріалу в утворені пустоти в зонах II та III система повертається до стану рівноваги: при $K_w = 1,25$ $\varepsilon_{II} \rightarrow 0,46$ та $\varepsilon_{III} \rightarrow 0,49$, при $K_w = 1,43$ $\varepsilon_{II} \rightarrow 0,47$ та $\varepsilon_{III} \rightarrow 0,55$.

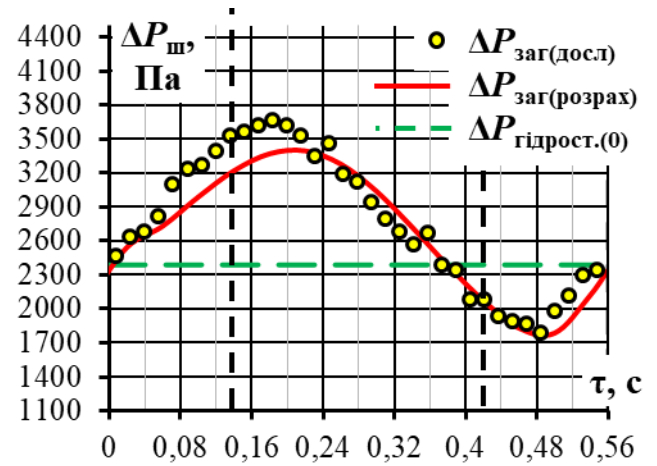
Наслідком такого характеру зміни порозності є динаміка зміни загального тиску в шарі при відповідних значеннях K_w , рисунок 3.45. Залежність $\Delta P_{\text{ш}} = f(\tau)$ має синусоїдальний циклічний характер і відрізняється тривалістю циклу та величиною амплітуди наприкінці першої стадії.

По суті, число псевдозрідження показує перевищення приведеної швидкості подачі зріджувального агенту над швидкістю фільтрації. Тобто, при локальному введенні зріджувального агенту, збільшення числа псевдозрідження від $K_w > 1$ призводить до утворення газової бульбашки, пропорційно збільшенню числа псевдозрідження.

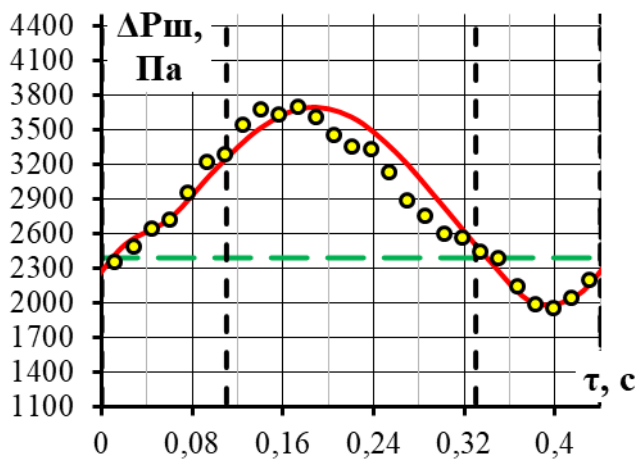
При цьому відбувається збільшення потенційної енергії, яка при виході бульбашки за межі шару спричиняє інерційний викид зернистого матеріалу. Саме це зумовлює збільшення загальної висоти шару при $K_w = 1,25$ до $1,78H_0$ та при $K_w = 1,43$ – до $2,09H_0$, рисунок 3.46.



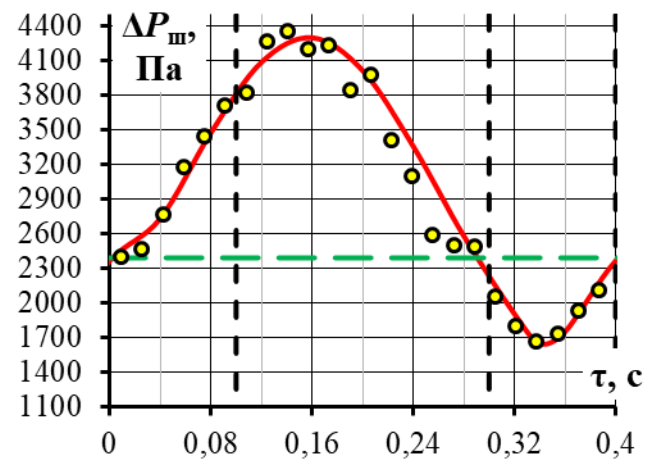
а) $d_\epsilon = 4,0 \text{ мм}; K_w = 1,25; R = 0,94$



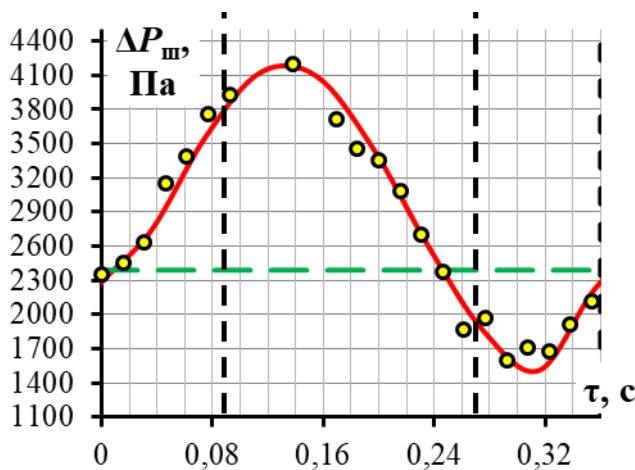
б) $d_\epsilon = 4,0 \text{ мм}; K_w = 1,43; R = 0,96$



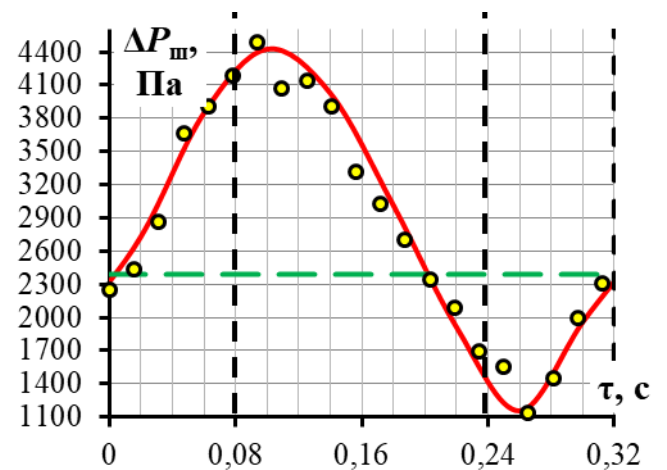
в) $d_\epsilon = 2,5 \text{ мм}; K_w = 1,71; R = 0,975$



г) $d_\epsilon = 2,5 \text{ мм}; K_w = 2,03; R = 0,962$

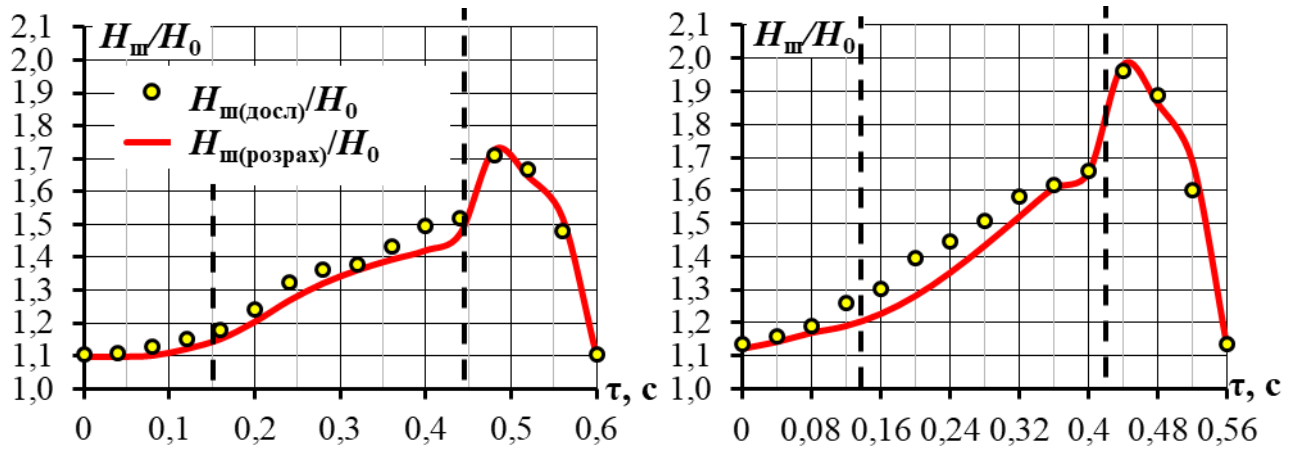


д) $d_\epsilon = 1,5 \text{ мм}; K_w = 2,17; R = 0,98$



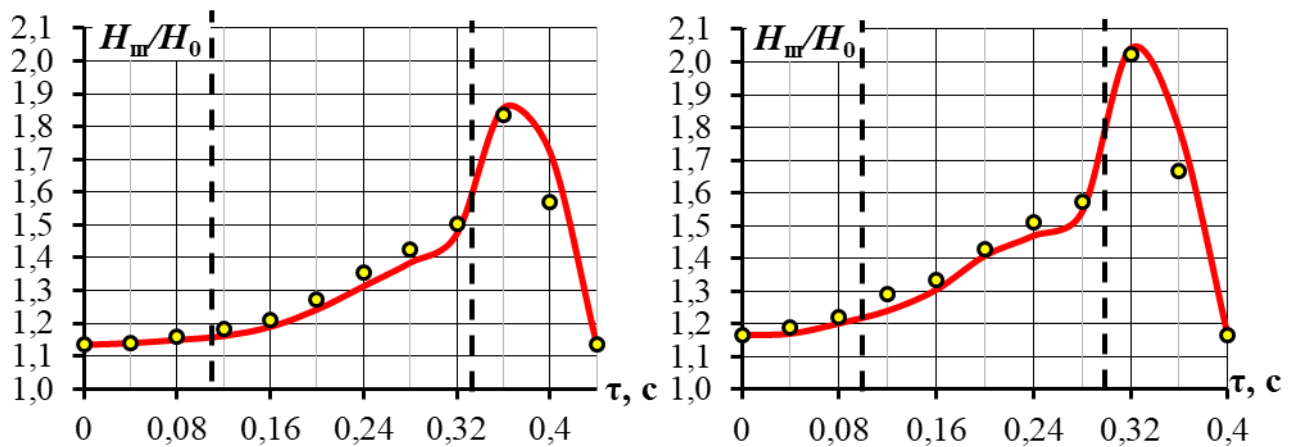
е) $d_\epsilon = 1,5 \text{ мм}; K_w = 2,66; R = 0,983$

Рисунок 3.45 – Динаміка зміни гідравлічного опору шару – $\Delta P_{\text{ш}} = f(\tau)$



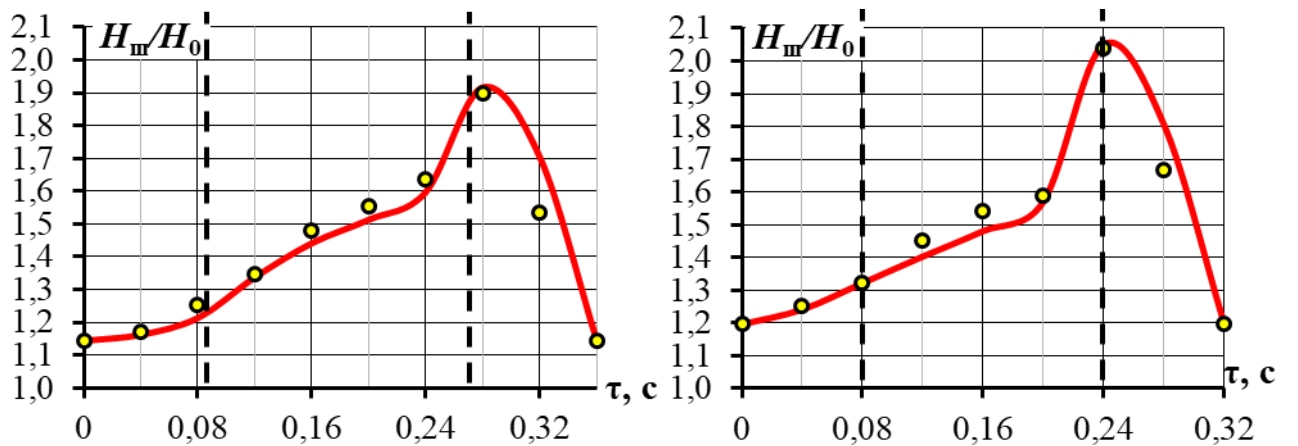
а) $d_e = 4,0$ мм; $K_w = 1,25$; $R = 0,9887$

б) $d_e = 4,0$ мм; $K_w = 1,43$; $R = 0,9866$



в) $d_e = 2,5$ мм; $K_w = 1,71$; $R = 0,9809$

г) $d_e = 2,5$ мм; $K_w = 2,03$; $R = 0,9878$



г) $d_e = 1,5$ мм; $K_w = 2,17$; $R = 0,9722$

д) $d_e = 1,5$ мм; $K_w = 2,66$; $R = 0,9818$

Рисунок 3.46 – Динаміка зміни висоти шару – $H_{\text{ш}} = f(\tau)$, $H_0 = 0,32$

Таким чином, розроблена математична модель неоднорідного струменево-пульсаційного режиму псевдозрідження адекватно описує новий спосіб взаємодії газової та твердої фаз. Експериментально перевірено положення фізичної моделі, при яких неоднорідна дисперсна система переходить у автоколивальний режим із забезпеченням заданого значення індексу динамічної якості гідродинаміки $i_y \rightarrow 1,0$.

Висновки до розділу 3

1. Експериментально перевірено положення фізичної моделі та встановлено закономірності переходу неоднорідної дисперсної системи у автоколивальний режим.

2. Встановлено, що для досягнення стабільного неоднорідного псевдозрідження у автоколивальному режимі із забезпеченням заданого значення індексу динамічної якості гідродинаміки $i_y \rightarrow 1,0$ максимальні миттєві значення потенційної енергії шару зернистого матеріалу повинні практично в 1,7...2,0 рази перевищувати цей показник у стані рівноваги.

3. Експериментально підтверджено, що забезпечення автоколивального режиму неоднорідного псевдозрідження визначається двох-струменевим підведенням зріджувального агента із приведеною швидкістю в щілинах $w_{щ} \geq 30$ м/с.

4. Експериментально встановлено циклічний характер зміни порозності в камері гранулятора та закономірності для визначення її динаміки зміни у залежності від частоти пульсацій у автоколивальному режимі.

5. Одержано функціональні залежності для визначення частоти пульсацій шару, індексу перемішування та динамічної якості гідродинаміки при неоднорідному псевдозрідженні у автоколивальному режимі.

6. Обрана та вдосконалена математична модель неоднорідного псевдозрідження у автоколивальному режимі адекватно описує новий спосіб взаємодії газової та твердої фаз.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ

Важливу роль у реалізації процесу гранулювання при зневодненні композитних розчинів у апараті з псевдозрідженим шаром відіграє спосіб взаємодії газового теплоносія (зріджувального агенту) та твердих частинок, на поверхні яких відбувається утворення композитного шару.

Доцільність застосування неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі визначалась експериментальним шляхом.

4.1 Дослідження кінетики процесу гранулювання органо-мінеральних добрив із застосуванням автоколивального режиму

Метою експериментальних досліджень була перевірка положень фізичної та математичної моделей струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі та його ефективності застосування при зневодненні та гранулюванні гетерогенної системи в псевдозрідженому шарі. Гранульований продукт повинен мати сфероподібну форму з еквівалентним діаметром $d_e = 2,5...3,5$ мм з пошаровою структурою, міцністю більше 10 Н на гранулу.

Досліди проводилися на експериментальній установці із гранулятором, спорядженим ГРП типу 2 зі звужуючими вставками, рисунок 3.1 б, та направляючою вставкою, рисунок 3.4 в, згідно методики, описаної в пункті 2.6.

З великої кількості проведених експериментальних досліджень кінетики процесу гранулювання органо-мінеральних добрив [32, 33, 36, 89, 111, 112-127] наведено результати експериментів при одержанні органо-мінеральних добрив із використанням соняшникової золи (СЗ) та сульфату амонію (С.А.), хімічний склад якої наведено у таблиці 4.1 [39,40].

Таблиця 4.1 – Хімічний склад соняшникової золи та сульфату амонію [39,40]

Компонент	Хімічний склад, %(мас.)					
	К	Са	Mg	S	P	N
СЗ	40,9	8,8	6,0	6,4	3,3	–
СА	–	–	–	24,2	–	21,1

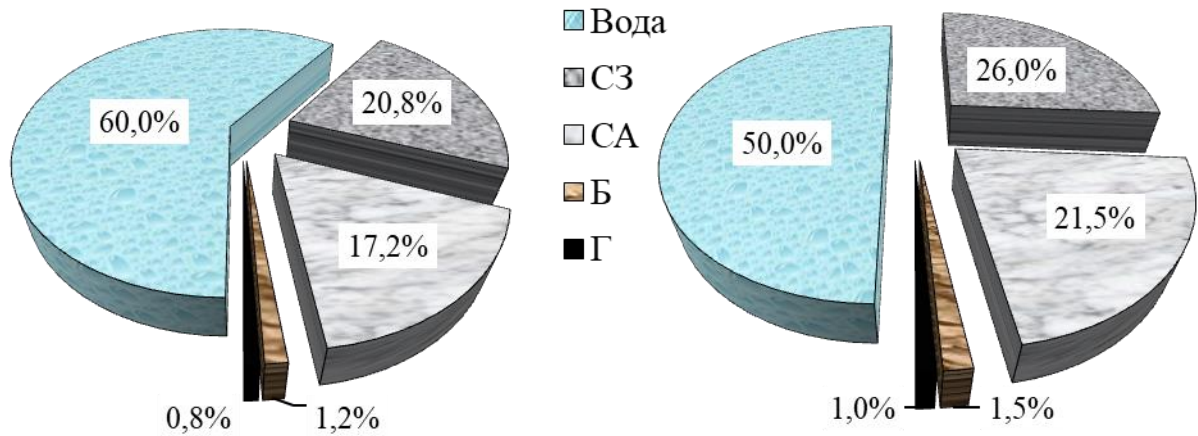
Соняшникова зола є продуктом, одержаним із відходів при переробці соняшникового насіння і в поєднанні з сульфатом амонію (СА) та гуміновими речовинами дозволяє одержати добриво із макро та мікро домішками калію, кальцію, магнію, фосфору із необхідними рослинам мікроелементами [34]. Особливість СЗ, як добрива, полягає у тому, що всі поживні компоненти, які входять до її складу, є компонентами органічного походження, а тому вони краще засвоюються рослинами та підвищують ефективність дії цього виду добрив. Проте, пилоподібна форма СЗ суттєво ускладнює її застосування у якості добрива, а відсутність азотовмісної складової та гумінових домішок знижує ефективність дії.

Тому, на замовлення фірми «EcoPlant» та ПП «АгроЗар» були проведені дослідження процесу одержання органо-мінеральних добрив, які окрім СЗ та СА містили гумінові речовини (Г) та бентоніт (Б), відповідно 1 % та 1,5 % по відношенню до сухих компонентів. Бентоніт додавався до робочого розчину для зменшення швидкості осадження суспендованих частинок СЗ і при його застосуванні в комплексному добриві забезпечує акумуляцію води в ґрунті.

Кінетичні характеристики процесу гранулювання проводились у апараті із застосуванням ГРП типу 2 та направляючої вставки. Дослідження проводились у два етапи. У дослідах 1 та 2 концентрація сухих речовин у робочій рідкій фазі, що подавалась на зневоднення, становила 40 %(мас), а у 3 та 4 дослідах – збільшена до 50 %(мас).

Склад рідкої гетерогенної системи із різним вмістом води наведено на рисунку 4.1.

Хімічний склад сухих компонентів робочого розчину та, відповідно, гранульованого продукту $[Г]:[К]:[S]:[N]:[Ca]:[Mg]:[P]=$
 $=[1,5]:[21,5]:[13,8]:[9,1]:[4,6]:[3,2]:[1,8]$.

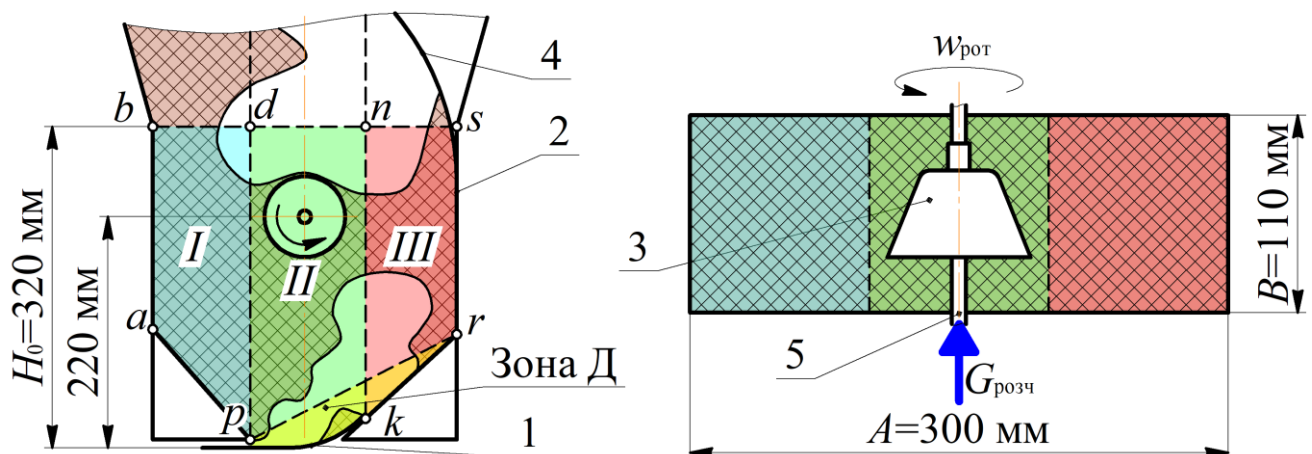


а) дослід 1 та 2 (Д1, Д2) б) дослід 3 та 4 (Д3, Д4)

Рисунок 4.1 – Склад композитної рідкої фази (мас.%)

У якості початкових центрів грануляції використовувалися гранули сульфату амонію із домішками гумінових речовин із $d_e = 1,85$ мм.

Початкова висота нерухомого шару становила $H_0 = 0,32$ м та маса шару зернистого матеріалу – $M_{ш} = 7,83$ кг підтримувалися протягом проведення дослідів постійними за рахунок постійного вивантаження шару при перевищенні $\Delta P_{\text{гідрост}(0)} = 2389$ на 400 Па. Рідка фаза подавалась всередину шару та диспергувалась за допомогою механічного конічного диспергатора [131, 132], рисунок 4.2.



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

Рисунок 4.2 – Схема введення рідкої гетерогенної фази

Механічний диспергатор конічного типу розташований на висоті 0,22 м від горизонтальної робочої поверхні ГРП 1 у зоні II діаметром крайки 0,08 м, що на 0,02 м менше умовної ширини зони II. Результати експериментальних досліджень кінетики процесу гранулювання органо-мінеральних добрив наведені на рисунках 4.3-4.25 та в додатку Г.

До визначальних параметрів процесу гранулювання відноситься динаміка зміни еквівалентного діаметра гранул у шарі, рисунок 4.3.

При проведенні дослідів спостерігалось монотонне зростання еквівалентного діаметра: дослід №1 – від 1,85 мм до 2,15 мм, дослід №2 – від 2,46 мм до 2,9 мм, дослід №3 – від 2,86 мм до 3,58 мм, дослід №4 – від 3,18 мм до 3,58 мм із середньою швидкістю росту гранул: $\lambda_{д1}=0,182$ мм/год, $\lambda_{д2}=0,243$ мм/год, $\lambda_{д3}=0,297$ мм/год, $\lambda_{д4}=0,301$ мм/год, що свідчить про позитивну кінетику грануляції.

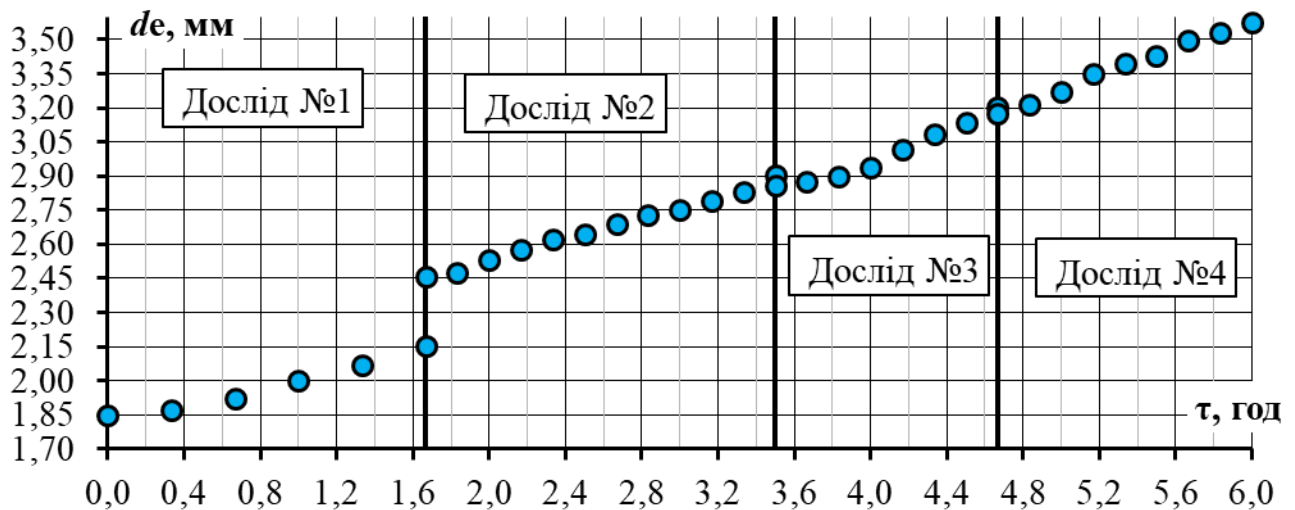


Рисунок 4.3 – Динаміка зміни еквівалентного діаметра гранул $d_e = f(\tau)$

Динаміка зміни масових відсотків окремих фракцій характеризується послідовним переходом гранул від меншої до більшої за розмірами фракції, рисунок 4.4, що підтверджує пошаровий механізм грануляції та стійку кінетику процесу без утворення агломератів, що реалізується в умовах струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі за параметрами, визначеними у розділі 2.

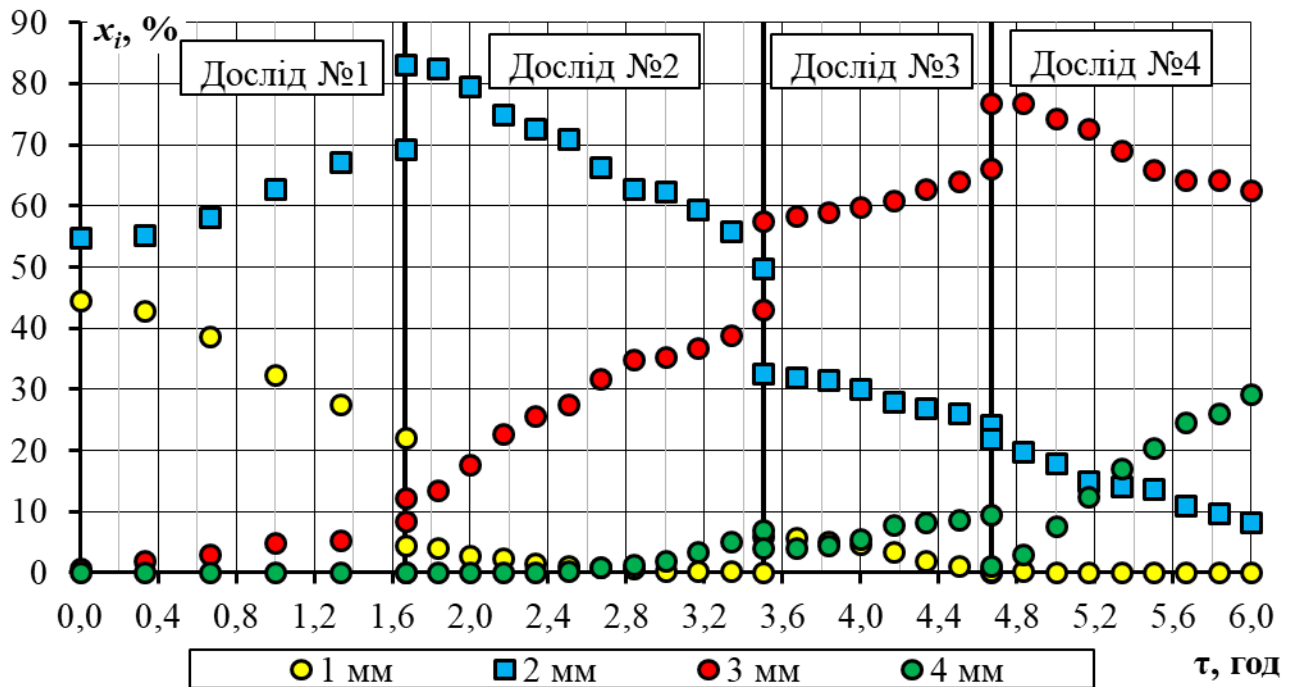


Рисунок 4.4 – Динаміка зміни масових відсотків окремих фракцій $x_i = f(\tau)$

Досліди проводилися при постійній масі шару, яка контролювалась через середні значення гідравлічного опору шару, тому при збільшенні еквівалентного діаметра частинок у шарі адекватно змінювалась загальна поверхня шару, рисунок 4.5.

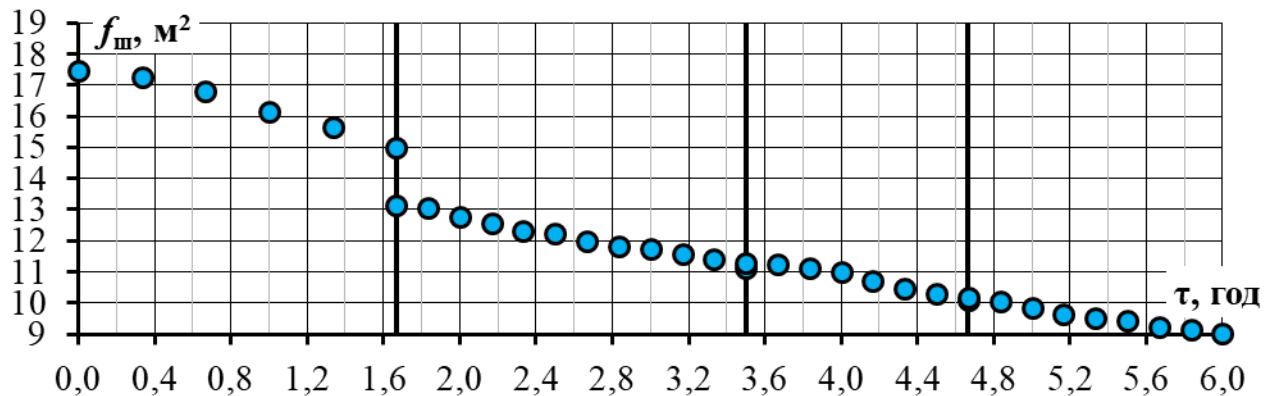


Рисунок 4.5 – Динаміка загальної поверхні шару в камері гранулятора $f_{ш} = f(\tau)$

Температура шару підтримувалася в межах $T_{ш} = (94...98) \pm 2$ °C з урахуванням властивостей мінеральних та органічних компонентів робочого розчину. Динаміку зміни температури теплоносія в щілинах ГРП (на вході в гранулятор), у шарі зернистого матеріалу та корисної різниці температур наведено на рисунку 4.6.

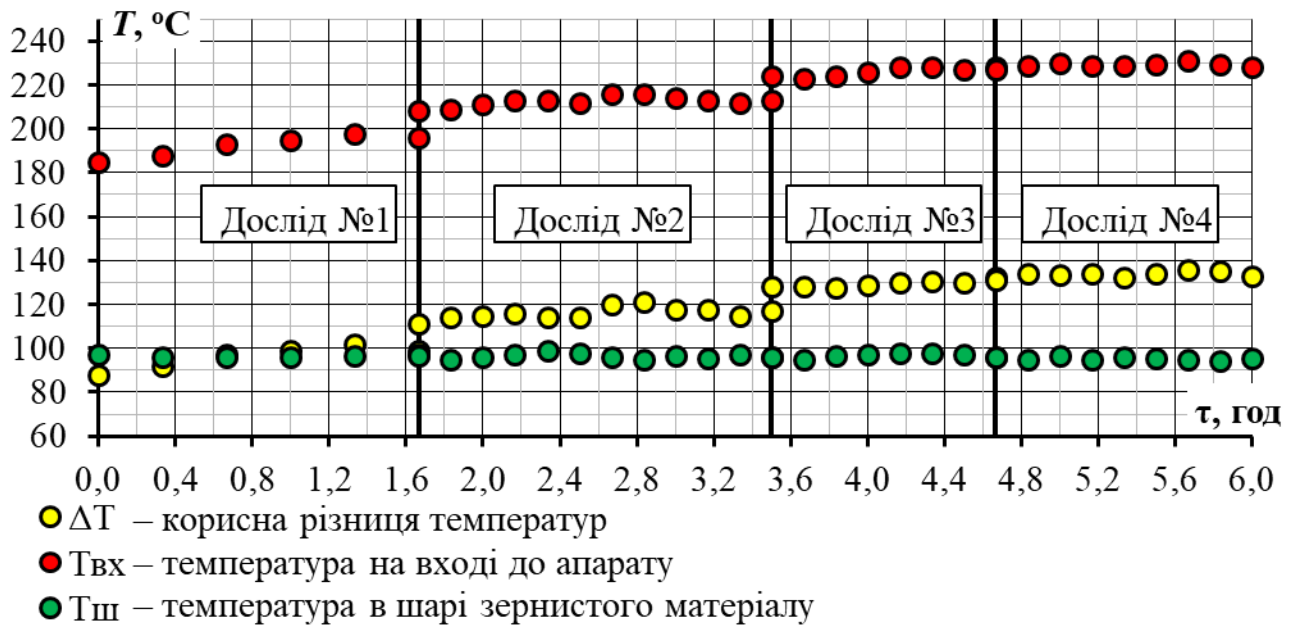


Рисунок 4.6 – Динаміка зміни температур $T = f(\tau)$

Корисна різниця температур збільшувалась пропорційно до підвищення температури теплоносія на вході до апарату та до збільшення еквівалентного діаметра твердих частинок при практично сталій температурі шару. Це підтверджує положення щодо балансового режиму по теплообміну при проведенні процесу.

Застосування неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі дозволило досягти максимальних значень питомого навантаження поверхні шару за вологою $a_f = 0,68 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{год})$, що в 1,94 рази перевищує максимальні значення a_f , отримані при застосуванні барботажного режиму, рисунок 4.7.

Відповідно до фізичної моделі струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі, це досягається за рахунок інтенсивного об'ємного перемішування зернистого матеріалу, реалізації фільтруючого режиму видалення вологи та протитечійного руху великої маси зернистого матеріалу на третій стадії пульсаційного циклу, розділ 2, рисунок 2.4.

Завдяки цьому відбувається інтенсифікація дифузійно-контрольованих процесів при одночасному збереженні рушійної сили по масообміну. Цілком

очевидною є залежність параметра a_f від величини корисної різниці температур, вираженої у вигляді $a_f/\Delta T$, рисунок 4.8.

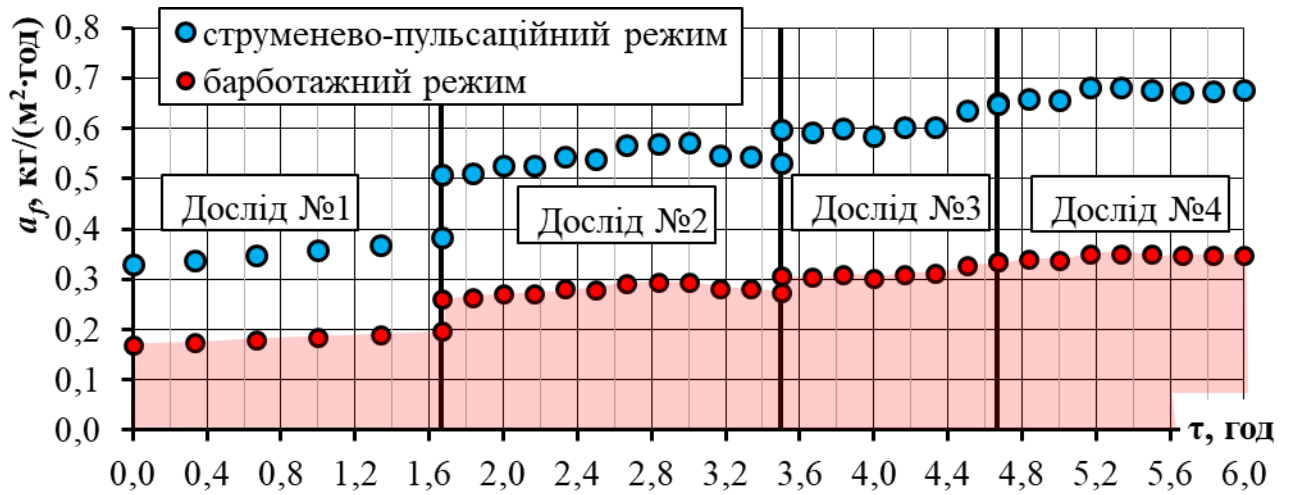


Рисунок 4.7 – Динаміка зміни питомого навантаження поверхні шару за вологою $a_f = f(\tau)$ при неоднорідному струменево-пульсаційному псевдозрідженні у автоколивальному та барботаажному режимах

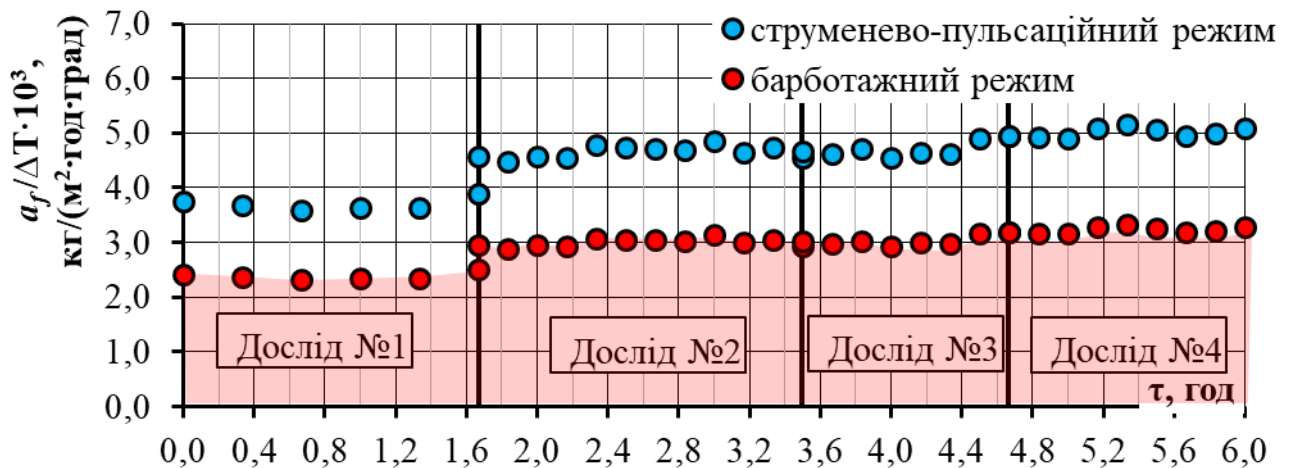


Рисунок 4.8 – Динаміка зміни відношення питомого навантаження поверхні шару за вологою до корисної різниці температур $a_f/\Delta T = f(\tau)$ при неоднорідному струменево-пульсаційному псевдозрідженні у автоколивальному та барботаажному режимах

У цьому випадку, значення питомого навантаження поверхні шару за вологою, що припадає на 1 °С рушійної сили, перевищує в 1,55 рази аналогічний показник при барботаажному режимі. Мінімальне перевищення $a_f/\Delta T$ спостерігалося в перехідній області процесу при діапазоні значень

еквівалентного діаметра частинок $1,5 \leq d_e \leq 2,0$ мм. При роботі з d_e товарної фракції, яка починається з $d_e = 2,5$ мм значення $a_f/\Delta T$ збільшується на 30 %.

Визначальною оцінкою ефективності процесу є коефіцієнт грануляції, рисунок 4.9.

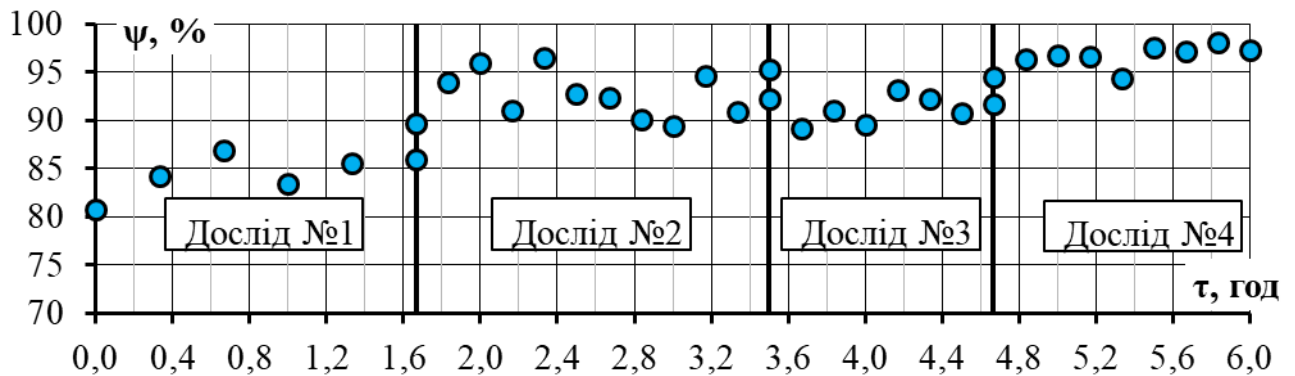


Рисунок 4.9 – Динаміка зміни коефіцієнта грануляції $\psi = f(\tau)$

Динаміка зміни коефіцієнта грануляції, рисунок 4.9, підтверджує стійкість кінетики процесу з пошаровим механізмом гранулювання при застосуванні неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі. При максимальних значеннях параметра $a_f = 0,68$ кг_{вол.}/(м²·град) коефіцієнт грануляції становив $\psi \geq 95$ %. За результатами проведених досліджень середні значення коефіцієнта грануляції становили $\psi_{Д1} = 85,1$ %, $\psi_{Д2} = 92,1$ %, $\psi_{Д3} = 91,6$ % та $\psi_{Д4} = 96,5$ %.

Для практичної реалізації процесу та для розрахунку промислового апарата, важливою є залежність коефіцієнта грануляції від приведеної висоти шару $\psi = f(\Delta P_{ш(ном.)}/(g \cdot d_e))$, рисунок 4.10, яка показує, що коефіцієнт грануляції набуває максимальних значень у діапазоні $65 \leq \Delta P_{ш(ном.)}/(g \cdot d_e) \leq 100$.

Початкові центри грануляції із $d_e = 1,85$ мм та загальний вигляд гранульованого продукту (гуміново-калійно-азотно-кальціє-сірковмісного добрива із мікродомішками магнію та фосфору) складу $[Г]:[К]:[S]:[N]:[Ca]:[Mg]:[P]=[1,5]:[21,5]:[13,8]:[9,1]:[4,6]:[3,2]:[1,8]$, одержаного при зневодненні водного розчину сульфату амонію із домішками соняшникової золи, бентоніту та гуматів наведено на рисунку 4.11 та 4.12.

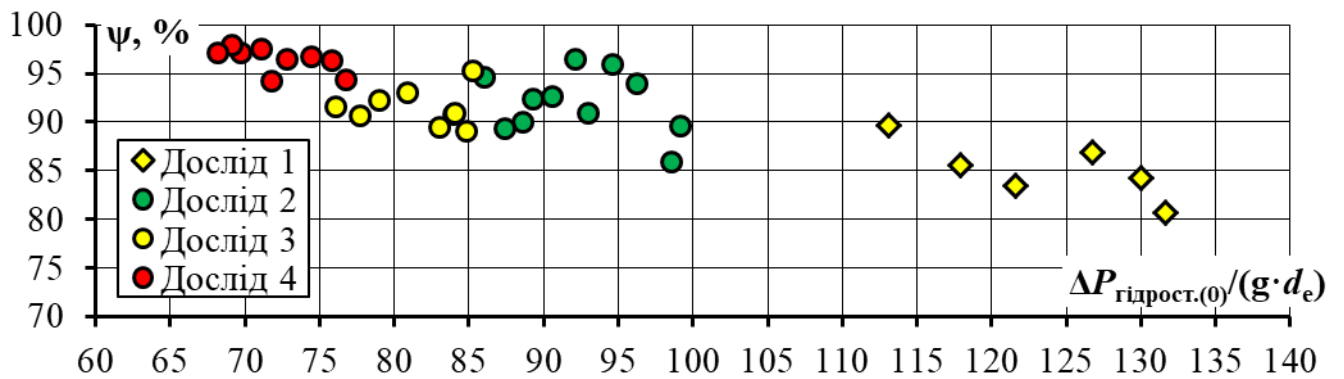


Рисунок 4.10 – Експериментальна залежність $\psi = f(\Delta P_{\text{ш(ном.)}}/(g \cdot d_e))$

Зріз гранули із розміром 3,2 мм, підтверджує пошаровий механізм грануляції, рисунок 4.13, де чітко виражений центр грануляції 1, навколо якого в коаксіальній формі утворюється багатошарова структура 2 з нового композитного нашарованого.

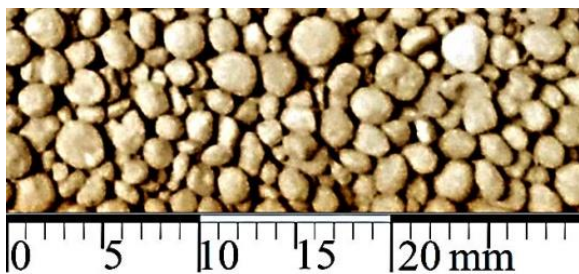


Рисунок 4.11 – Початкові центри грануляції ($d_e = 1,85$ мм)

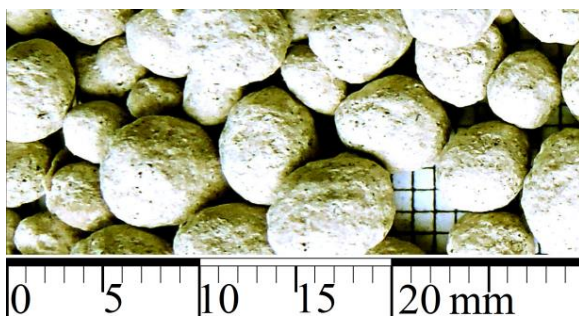
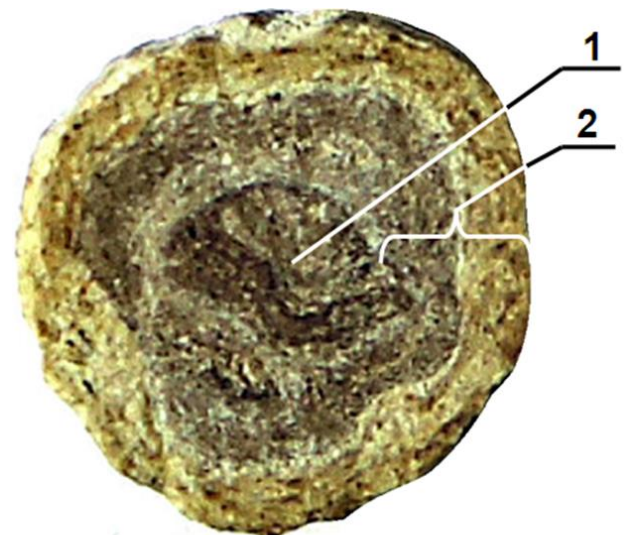


Рисунок 4.12 – Загальний вигляд гранульованого продукту ($d_e = 3,58$ мм)



1 – центр грануляції;
2 – композитні мікрошари
Рисунок 4.13 – Поперечний зріз гранули $d_e = 3,4$ мм

Наявність такої структури забезпечує міцність гранули не менше $\sigma = 16 \text{ Н} > 10 \text{ Н}$ на гранулу. Світових аналогів добрив на сьогодні не знайдено.

4.2 Аналіз гідродинамічних характеристик процесу гранулювання органо-мінеральних добрив

Досліди проводилися при значеннях числа псевдозрідження K_w у дослідно визначених межах ($K_{w(max)}$ та $K_{w(min)}$) за (3.1) та (3.2), які забезпечують реалізацію неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі, відповідно до визначених у пункті 3.3.2 розділу 3. Динаміку зміни K_w наведено на рисунку 4.14.

4.2.1 Визначення індексу перемішування та частоти пульсацій у автоколивальному режимі псевдозрідження

За методикою, наведеною у розділі 2, пункт 2.4.4, за рівнянням (3.4) з урахуванням залежності $d_e = f(\tau)$ отримано розрахункову залежність індексу перемішування $J_{\Delta P} = f(\tau)$, рисунок 4.15. Зміна цього параметра від 0,8 до 0,6 впродовж дослідів підтверджує створення потенційної енергії при локальному формуванні газової бульбашки на вершині газового факела, що виходить із щілини 2, розділ 2, пункт 2.2. Геометричні розміри бульбашок та інтенсивність їх утворення залежать від гідравлічного опору шару зернистого матеріалу, в якому відбувається їх утворення.

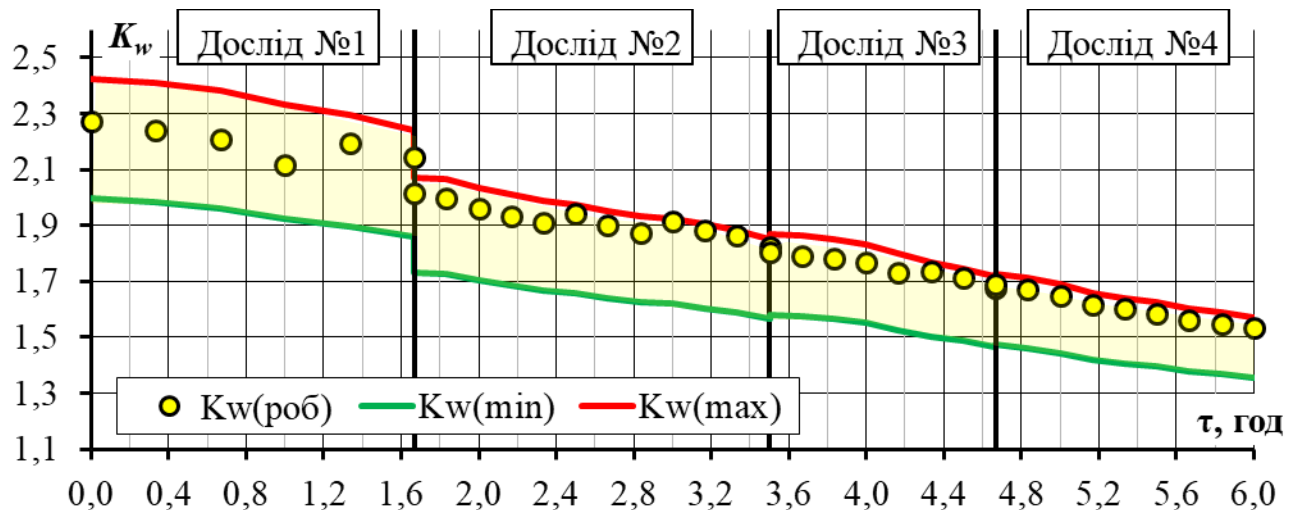


Рисунок 4.14 – Динаміка зміни числа псевдозрідження $K_w = f(\tau)$

при $\Delta P_{гидрост.(0)} = const$

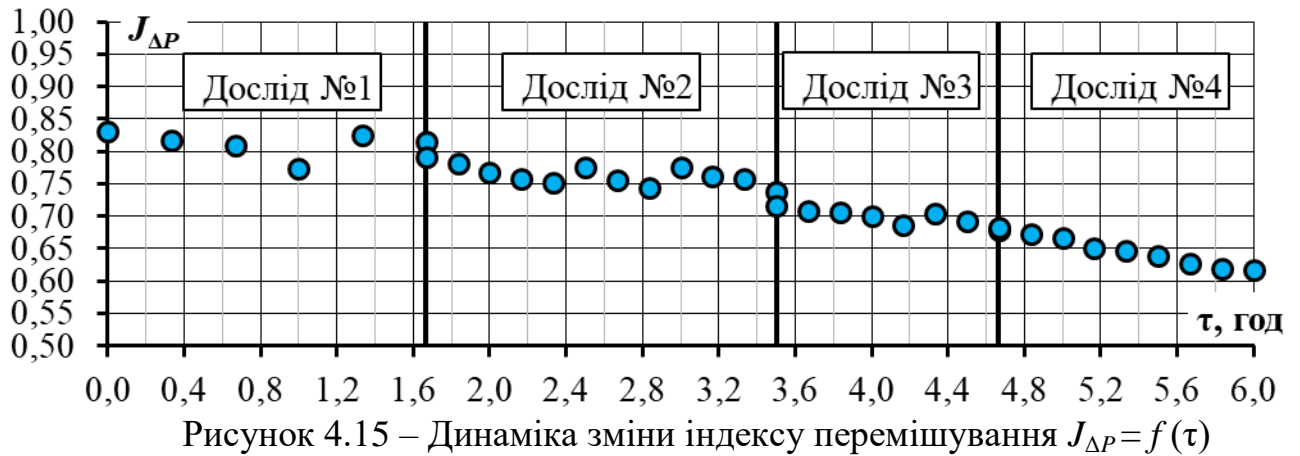


Рисунок 4.15 – Динаміка зміни індексу перемішування $J_{\Delta P} = f(\tau)$

при $\Delta P_{\text{гідрост.}(0)} = \text{const}$

Суттєве підвищення ефективності процесів перенесення при застосуванні струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі, у порівнянні з барботажем, підтверджується динамікою зміни відношення маси зернистого матеріалу, винесеного за межі початкового шару в межах одного циклу, – $\Delta M_{\text{ш}}$ до маси шару в стані рівноваги $M_{\text{ш}(0)}$ – $\Delta M_{\text{ш}}/M_{\text{ш}(0)} = f(\tau)$, рисунок 4.16, яка адекватно корелюється із залежністю $J_{\Delta P} = f(\tau)$ та підтверджує інтенсивне оновлення поверхні контакту фаз. Максимальні та мінімальні значення відношення $\Delta M_{\text{ш}}/M_{\text{ш}(0)}$ залежать від гідравлічного опору шару зернистого матеріалу.

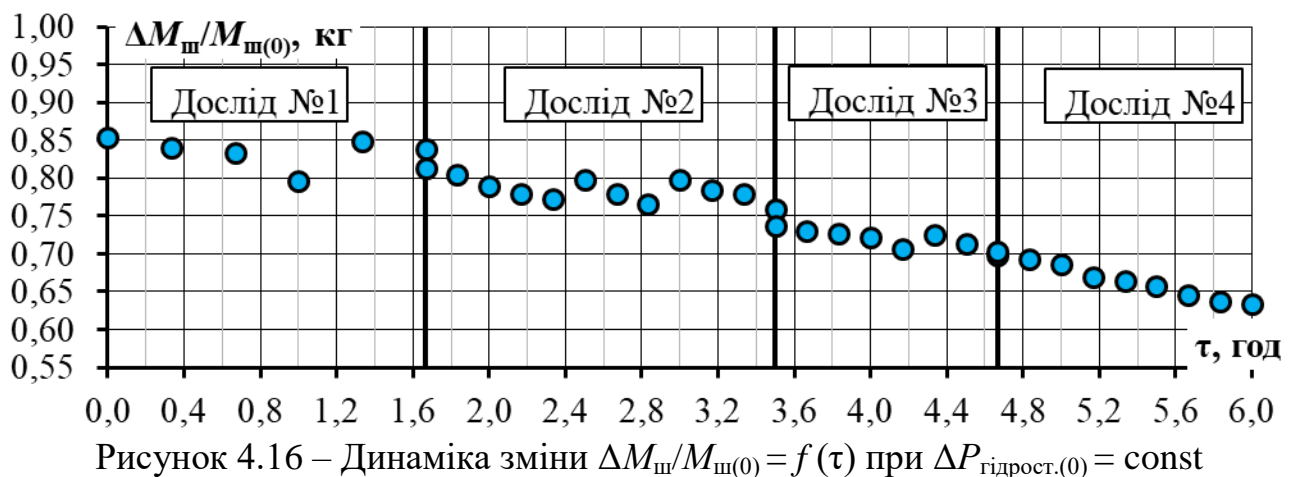
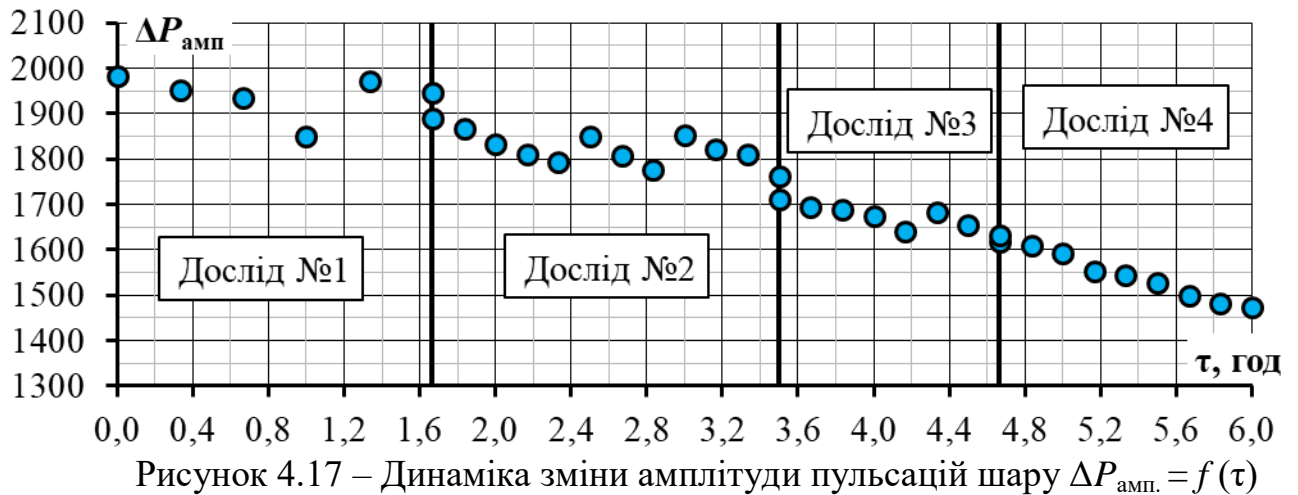


Рисунок 4.16 – Динаміка зміни $\Delta M_{\text{ш}}/M_{\text{ш}(0)} = f(\tau)$ при $\Delta P_{\text{гідрост.}(0)} = \text{const}$

Природньо, що інтенсивність винесення зернистого матеріалу в надшаровий простір пропорційна величині амплітуди пульсацій шару, рисунок 4.17. Відомо, що питомий гідравлічний опір шару зернистого

матеріалу обернено пропорційний значенню d_e^2 , тому індекс перемішування $J_{\Delta P}$ відповідно зменшується від 0,82 до 0,62 при збільшенні еквівалентного діаметру частинок у шарі від $d_e = 1,85$ до 3,2 мм.



при $\Delta P_{\text{гідрост.}(0)} = \text{const}$

Наведена динаміка пульсацій, рисунок 4.17, відбувалась із частотою, яка змінювалась у часі, рисунок 4.18, у межах $f = 1,95 \dots 2,87$ Гц. При чому, максимальні значення частоти пульсацій досягають $f = 2,87$ Гц при мінімальних значеннях $d_e = 1,85$ мм і зменшувалися по мірі збільшення d_e до 1,95 Гц. Відповідно, час пульсацій автоколивального режиму $\tau_{\text{ц}} = f^{-1}$ знаходився в межах $0,513 \dots 0,348$ с.



при $\Delta P_{\text{гідрост.}(0)} = \text{const}$

Важливим результатом для практичної реалізації процесу є залежність частоти пульсацій шару (3.3) від числа псевдозрідження, рисунок 4.19.

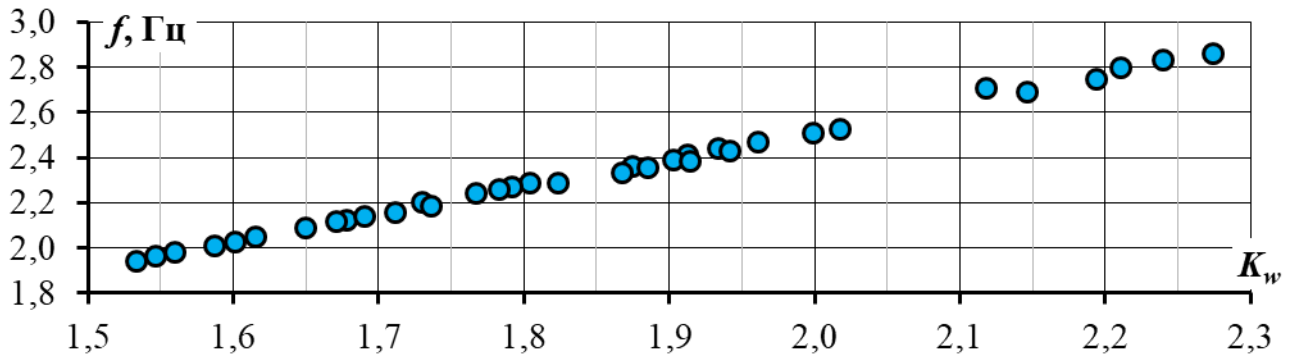


Рисунок 4.19 – Залежність частоти пульсацій від числа псевдозрідження

$$f = f(K_w) \text{ при } \Delta P_{\text{гiдрост.}(0)} = \text{const}$$

Так, при реалізації процесу зневоднення і грануляції складних гетерогенних систем із застосуванням автоколивального режиму псевдозрідження в діапазоні значень $1,85 \leq d_e \leq 2,0$ мм коефіцієнт грануляції $\psi \geq 80\%$, а при $2,0 < d_e \leq 3,58$ мм – $\psi \geq 95\%$, рисунок 4.9 та 4.10.

Це дозволяє визначити раціональні значення K_w для конкретного еквівалентного діаметру частинок в шарі.

Аналогічне значення має експериментальна залежність частоти пульсацій від кінетичної енергії $f=f(E)$, що вводиться з газом у щілинах ГРП, рисунок 4.20.

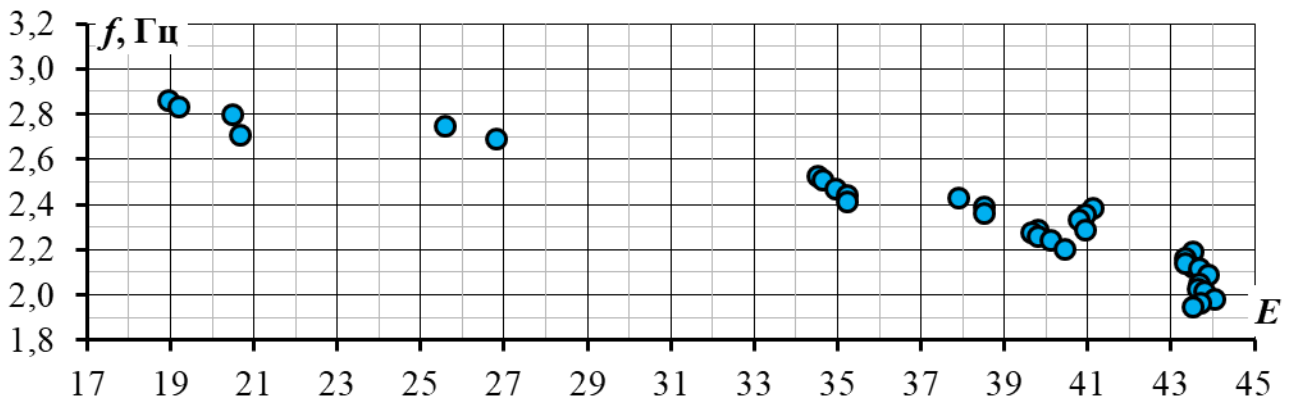


Рисунок 4.20 – Залежність частоти пульсацій від кінетичної енергії, що

$$\text{вводиться з газом через щілини ГРП } f = f(E)$$

Із наведеної залежності $f = f(E)$ випливає, що автоколивальний режим з індексом перемішування $J_{\Delta P} \geq 0,6$ забезпечується при $d_e > 3,58$ мм та $E = 43$ Вт при температурі теплоносія $T_{\text{вх}} = 230$ °С. Тобто, швидкість газу в щілинах ГРП повинна становити $w_{\text{щ}} \geq 30$ м/с за нормальних умов ($T_{\text{вх}} = 20$ °С).

Проте, основною задачею вибору гідродинамічних умов реалізації автоколивального режиму псевдозрідження являється повна протидія ризику утворення застійних зон на робочих поверхнях ГРП у зоні Д.

4.2.2 Критерії оцінки якості неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі

Оцінка якості гідродинаміки проводилась за методикою, описаною в розділі 2, пункт 2.3.

Розрахунковий індекс динамічної якості в зоні Д, отриманий за рівнянням (3.5), наведено на рисунку 4.21. Експериментально встановлено, що навіть у досліді №1 при гранулюванні $1,85 < d_e \leq 2,2$ мм значення $0,73 < i_y \leq 0,87$ забезпечили відсутність застійних зон на робочих поверхнях ГРП. Аналогічні результати були отримані і для інших дослідів при $0,87 < i_y \leq 0,98$.

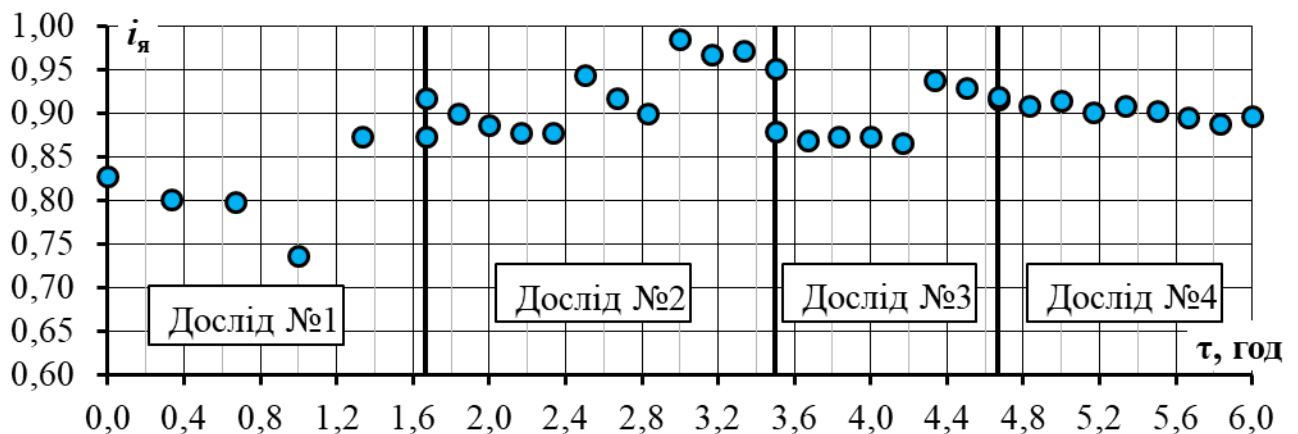


Рисунок 4.21 – Індекс динамічної якості гідродинаміки в зоні Д – $i_y = f(\tau)$

Тобто при значеннях $i_y \geq 0,8$ запропоновані технічні рішення щодо конструкції ГРП та камери гранулятора, разом зі встановленими технологічними параметрами забезпечують стійкість кінетики процесу гранулювання та надійність робочого апарату.

Для даних умов проведення експерименту $M_{ш} = \text{const}$ та $\Delta P_{\text{ном}} = 2389$ Па доцільно проаналізувати залежність індексу динамічної якості, визначеного за

одержаним рівнянням (3.5) у розділі 3, від приведенного числа Рейнольдса $Re_{пр} = w \cdot d_e / \nu_r$, рисунок 4.22.

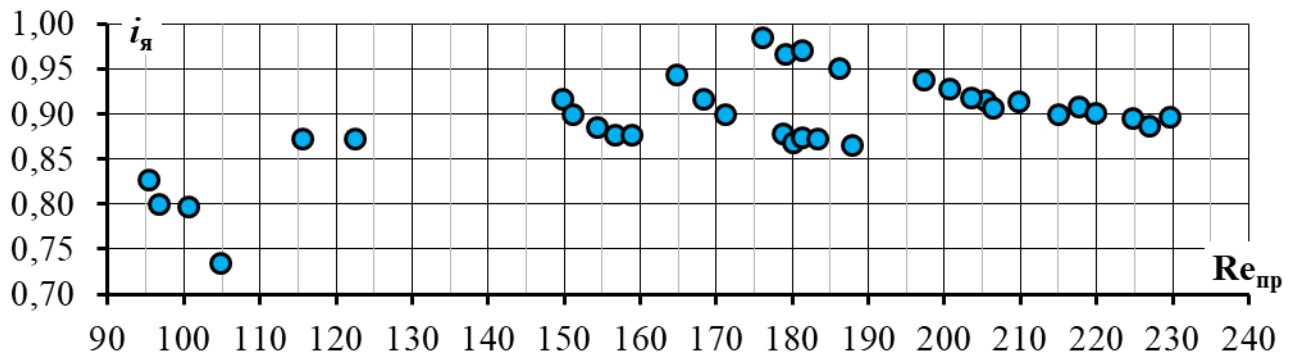


Рисунок 4.22 – Індекс динамічної якості гідродинаміки в зоні Д у залежності від приведенного числа Рейнольдса – $i_я = f(Re_{пр})$

Одержані результати показують, що у діапазоні зміни $1,85 < d_e \leq 3,58$ мм індекс динамічної якості $i_я \geq 0,85$ досягається при значеннях $Re \geq 115$, а стійкі максимальні значення $i_я \geq 0,90$ – при $Re \geq 195$.

Розрахункова залежність індексу динамічної якості від числа псевдозрідження, рисунок 4.23, підтверджує висновки із залежності $i_я = f(Re_{пр})$ в діапазоні зміни еквівалентного діаметра в межах $1,85 < d_e \leq 3,58$ мм і має важливе значення для практичної реалізації процесу.

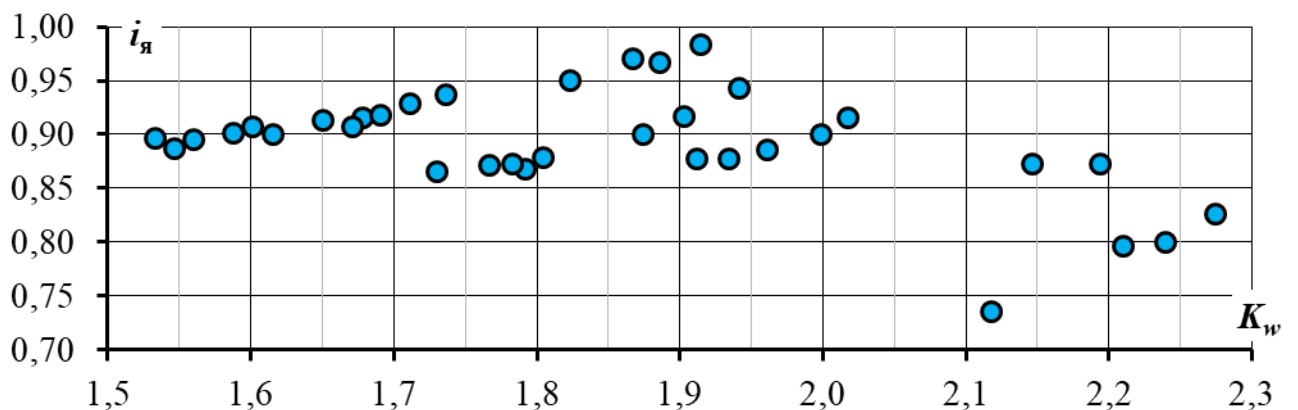


Рисунок 4.23 – Залежність індексу динамічної якості гідродинаміки в зоні Д від числа псевдозрідження $i_я = f(K_w)$

Враховуючи, що K_w це відносна величина, то експериментальна залежність індексу динамічної якості гідродинаміки від робочої кінетичної енергії теплоносія, що вводиться через щілини ГРП, рисунок 4.24, дозволяє у

кількісних значеннях встановити величину енергії введення газового теплоносія від масових витрат газу i , особливо, від швидкості газу в щілинах ГРП.

Для практичної реалізації процесу при проектуванні промислового апарата суттєвою є залежність $i_{я}$ від кінетичної енергії, що вводиться зі зріджувальним агентом-теплоносієм через щілини ГРП, рисунок 4.24.

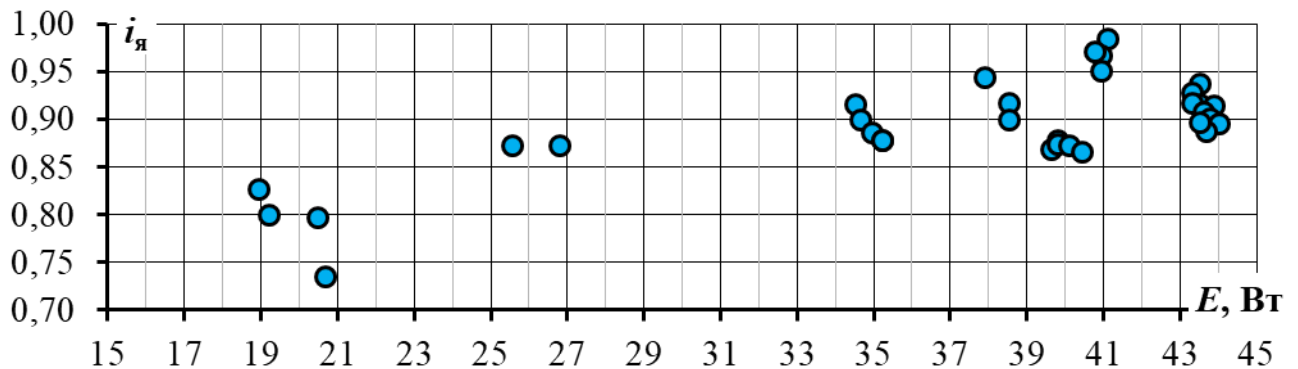


Рисунок 4.24 – Залежність $i_{я}$ від кінетичної енергії, що вводиться зріджувальним агентом-теплоносієм через щілини ГРП – $i_{я} = f(E)$

Тобто, задовільні значення $i_{я} \geq 0,9$ досягаються при $E \geq 34$ Вт. При цьому, з урахуванням результатів досліджень, розділ 3, можна зробити висновок, що середня швидкість газу в щілинах ГРП для забезпечення неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі повинна бути $w_{щ} \geq 30$ м/с.

Отримані значення $i_{я}$ свідчать про практично повне усунення малорухомих зон шару зернистого матеріалу на робочих поверхнях ГРП.

Тобто, з урахуванням коефіцієнту температурного розширення газу $\beta = (T_0 + T_{вх}) / (T_0 + T_{н.у.})$ можна стверджувати, що бажана величина динамічної якості гідродинаміки забезпечується при швидкості газу в щілинах ГРП за нормальних умов ($T_{н.у.} = 20$ °С) не менше $w_{щ} > 30$ м/с. При $d_e \leq 2,5$ мм цього можна досягти шляхом зменшення коефіцієнта живого перерізу ГРП. Враховуючи, що зміна d_e в межах $1,5 \leq d_e \leq 2,5$ мм є перехідним етапом процесу, то можливість зміни коефіцієнту живого перерізу ГРП необхідно передбачити в конструкції ГРП без зупинки апарату.

4.3 Конфігурація температурного поля в камері гранулятора при неоднорідному струменево-пульсаційному псевдозрідженні в автоколивальному режимі

Метою дослідження є визначення конфігурації температурного поля при одержанні органо-мінеральних добрив у грануляторі із струменево-пульсаційним псевдозрідженням у автоколивальному режимі.

Визначення температур проводилось при реалізації процесу зневоднення та грануляції рідкої гетерогенної фази при одержанні органо-мінеральних добрив – досліді №4, розділ 4, на експериментальній установці, описаній у розділі 2, пункт 2.6, із використанням інформаційно-вимірювального комплексу, описаного у розділі 2, пункт 2.7.

З урахуванням результатів досліджень гідродинаміки у розділі 3, у камері гранулятора сформовані уявні площини: $A(x = 0...300 \text{ мм}; y = 55 \text{ мм}; z = 0...320 \text{ мм})$ а також $B(x = 60 \text{ мм}; y = 0...110 \text{ мм}; z = 0...320 \text{ мм})$, $C(x = 150 \text{ мм}; y = 0...110 \text{ мм}; z = 0...320 \text{ мм})$ і $D(x = 240 \text{ мм}; y = 0...110 \text{ мм}; z = 0...320 \text{ мм})$, в яких розміщено термопари, рисунок 4.25.

Температура шару зернистого матеріалу, по якій проводилось регулювання процесу грануляції ($T_{\text{ш}} = 95 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) знімалась у характеристичній точці Тш ($x = 250 \text{ мм}; y = 55 \text{ мм}; z = 220 \text{ мм}$).

Координати точок виміру термопар наведено в таблиці 4.2.

У кожній точці треку термопар вимірювання проводилось протягом 300 с, що при даних гідродинамічних умовах для $d_e = 2,5 \text{ мм}$ практично у 600 раз перевищує тривалість одного циклу, розділ 3.

Середні значення температур у площині A ($y = 55 \text{ мм}$) при різних значеннях x та z наведено в таблиці 4.3. Середнє значення робочої корисної різниці температур $\Delta T = T_{\text{вх}} - T_{\text{ш}} = 179 - 95 = 84 \text{ }^\circ\text{C}$.

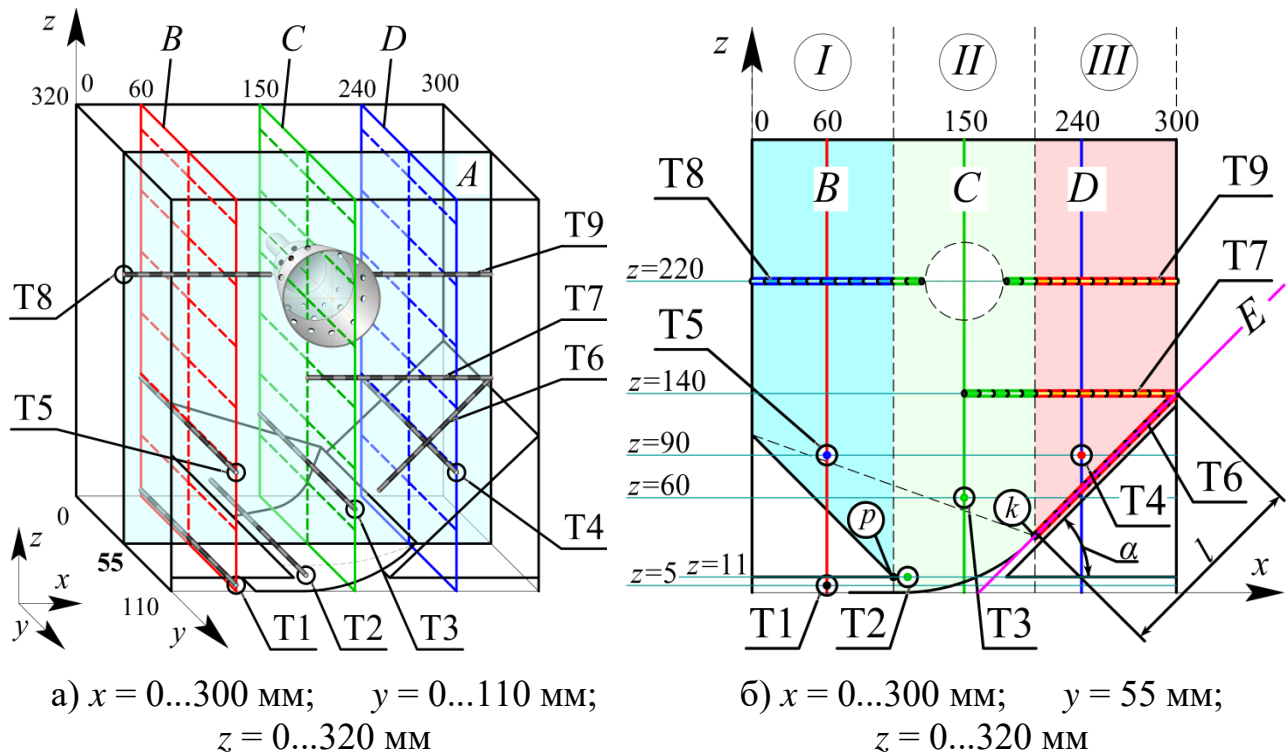


Рисунок 4.25 – Схема розміщення треків термопар у камері гранулятора експериментальної установки

Таблиця 4.2 – Координати точок виміру термопар

Термопара	Координати		
	x, мм	y, мм	z, мм
T1	50	55	5
T2	110	55	11
T3	150	55	60
T4	240	55	90
T5	60	55	90
T6	200...300	55	40...140
T7	150...300	55	140
T8	0...110	55	220
T9	190...300	55	220

Таблиця 4.3 – Покази термопар при $x = \text{const}$, $y = \text{const}$ та $z = \text{const}$

Термопара	Координати			Температура, °C
	x, мм	y, мм	z, мм	
T1	50	55	5	187
T2	110	55	11	179,4
T3	150	55	60	122,7
T4	240	55	90	127,2
T5	60	55	90	85,07

Аналіз результатів показує, що при початкових значеннях температури теплоносія $T_1 = 187 \text{ }^\circ\text{C}$ у зоні I ($z = 5 \text{ мм}$) і $T_2 = 179 \text{ }^\circ\text{C}$ у зоні II ($z = 60 \text{ мм}$) температура зменшується на $54 \text{ }^\circ\text{C}$ до $T_3 = 122,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (зона II), рисунок 4.25 б, що становить 0,64 від робочого температурного перепаду та підтверджує наявність високого потенціалу теплопередачі та майже в 2 рази перевищує зону інтенсивного тепломасообміну при $d_e = 2,5 \text{ мм}$ ($\Delta z = 20d_e = 50 \text{ мм}$). Це пояснюється введенням потужного струменя зріджувального агенту через точку p , рисунок 4.25 б, із температурою $179 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ із пульсаційною флуктуацією у вертикальній площині, розділ 2, пункт 2.2.

У той же час, у зоні I на висоті $z = 90 \text{ мм}$ температура шару становить $T_5 = 85,07 \text{ }^\circ\text{C}$, що свідчить про відсутність суттєвого надходження в цю зону нагрітого теплоносія.

Зміну температур по довжині l площини E , зняту термопарою T_6 , рисунок 4.25 б, паралельно до верхньої грані правого колосника ГРП під кутом до горизонтальної осі $x \alpha = 45^\circ$, починаючи з координати $x = 200 \text{ мм}$, $z = 40 \text{ мм}$, ($z = 40 + l \cdot \sin(\alpha)$ та $x = 200 + l \cdot \cos(\alpha)$), наведено на рисунку 4.26.

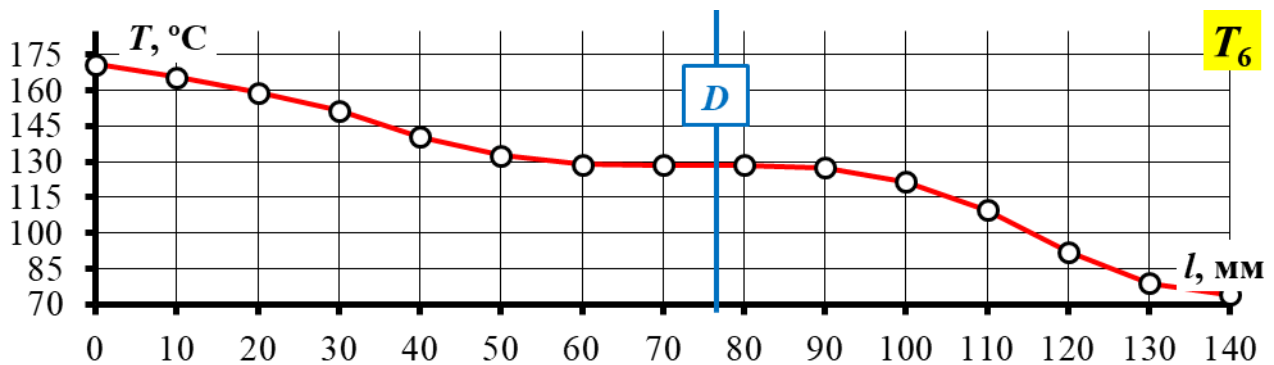


Рисунок 4.26 – Загальне розподілення температур по довжині термопары T_6

$$z = 40 + l \cdot \sin(\alpha); x = 200 + l \cdot \cos(\alpha)$$

Одержані значення показують, що початкова температура нагрітого теплоносія на висоті введення у т.к ($z = 40 \text{ мм}$, $x = 200 \text{ мм}$) становить $172 \text{ }^\circ\text{C}$ і лінійно зменшується до $130 \text{ }^\circ\text{C}$ на висоті $z = 40 + 50 \cdot \sin(\alpha) = 83 \text{ мм}$ та довжині $x = 200 + 50 \cdot \cos(\alpha) = 243$, рисунок 4.27, і практично не змінюється до $z = 40 + 90 \cdot \sin(\alpha) = 112$. При цьому відбувається переміщення по ширині зони III

в $x = 200$ мм до $x = 200 + 90 \cdot \cos(\alpha) = 272$ мм. У подальшому відбувається зниження температури T_6 до 80 °С.

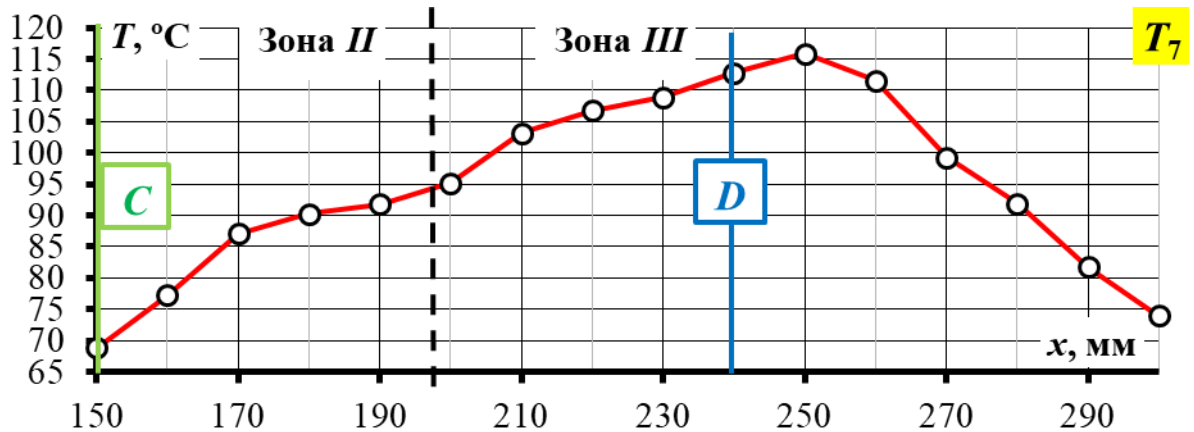


Рисунок 4.27 – Загальне розподілення температур по довжині термопар

$$T_7 (z = 140 \text{ мм}; y = 55 \text{ мм})$$

Це пояснюється наявністю в зоні III ($200 \leq x \leq 300$ мм) зони інтенсивного тепло-масообміну шляхом поєднання газових струменів, розділ 2, пункт 2.2.

Таким чином, на висоті $z = 40 + 50 \cdot \sin(\alpha) = 83$ мм відбувається зниження температури від 170 °С до 130 °С.

Такий характер зміни підтверджують і значення, одержані термопарою T_7 , трек якої розташований на висоті $z = 140$ мм і проходить через зони II і III, рисунок 4.27.

Дія диспергатора підтверджується дослідними даними, одержаними термопарою T_7 ($z = 140$ мм; $y = 55$ мм), розташованою на 60 мм нижче крайки диспергатора і на 80 мм вище термопар T_3 ($x = 150$ мм; $y = 55$ мм; $z = 60$ мм), оскільки її покази на довжині $x = 150$ мм (площина C) становлять $T_7 = 68$ °С.

Тобто, на площині C зони II при $60 \leq z \leq 140$ мм відбувається зміна температури від 122 °С до 68 °С. Наявність інтенсивного струменево-пульсаційного перемішування зернистого матеріалу в шарі призводить до підвищення температури дисперсної системи на уявній межі зон II та III ($x = 200$ мм) до температури шару $T_{III} = 95$ °С, рисунок 4.27.

У діапазоні значень $200 \leq x \leq 250$ мм температура збільшується до 115 °С, що на 20 °С перевищує $T_{III} = 95$ °С і свідчить про наявність значного потенціалу

по теплообміну, що практично відповідає положенню площини D , рисунок 4.27. Зменшення температури T_7 від 115 до 75 при $250 \leq x \leq 300$ мм підтверджує припущення щодо тепломасообміну та наявності теплових втрат через бічну стінку.

Треки термопар T_8 і T_9 розташовані на висоті $z = 220$ мм, що співпадає із горизонтальною віссю обертання диспергатора, рисунок 4.25. Конфігурацію зміни температур наведено на рисунку 4.28.

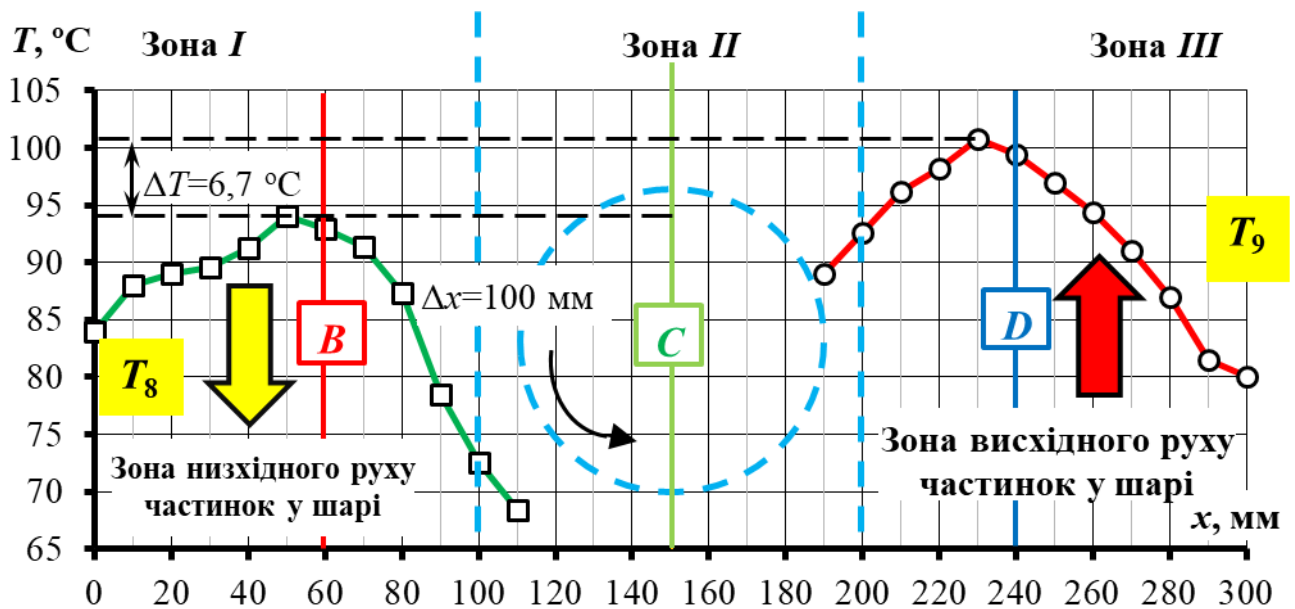


Рисунок 4.28 – Розподіл температур у зоні зрошення

(T_8 та T_9 : $z = 220$ мм; $y = 55$ мм)

У зоні низхідного потоку шару (із порозністю $\varepsilon = \varepsilon_0 = 0,4$) на межі зон I та II при $x = 100$ мм температура становить $T_8 = 72,5$ °С, що на 4,5 °С більше, порівняно з точкою на відстані $x = 110$ мм ($T_8 = 68$ °С), що практично співпадає із зовнішньою бічною крайкою диспергатора, рисунок 4.28.

Максимального значення температура в зоні I (низхідній) досягає $T_8 = 94,1$ °С при $x = 50$ мм. При $0 \leq x \leq 50$ мм відбувається зменшення температури від 94,1 °С до 84,3 °С за рахунок теплових втрат, рисунок 4.28.

У висхідній зоні (на межі зон II і III) температура $T_9 = 89$ °С безпосередньо біля крайки диспергатора ($x = 190$ мм). Максимальне значення температури у зоні III (висхідній) $T_9 = 100,8$ °С ($x = 230$ мм), що свідчить про наявність $\Delta T = 6,7$ °С на висоті $z = 220$ мм. Ці значення в безпосередній близькості від

вертикальної площини C ($x = 150$ мм), рисунок 4.28. Подальше зниження температури до $T_0 = 80$ °С також викликане вище викладеними факторами.

Накладання конфігурації поля температур на фотофіксацію гідродинамічного стану шару при струменево-пульсаційному псевдозрідженні у автоколивальному режимі, розділ 3, наведено на рисунку 4.29.

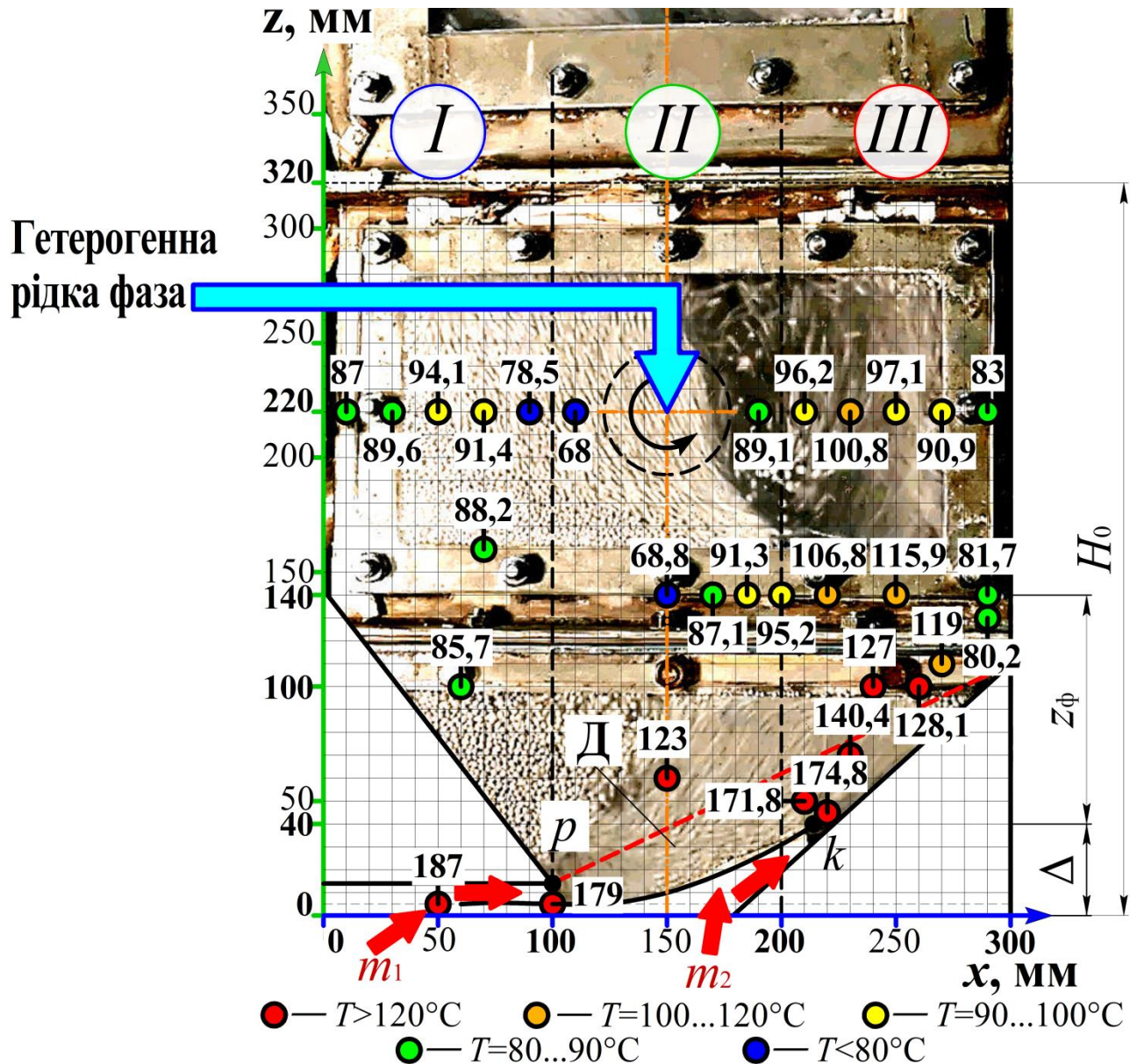


Рисунок 4.29 – Накладання температурного поля на гідродинаміку неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі на третій стадії циклу при $d_e \leq 4,0$ мм

При цьому розрахункові значення індексу динамічної якості становили $i_d \geq 85$, що свідчить про практичне усунення застійних зон на робочих поверхнях

ГРП. Підтвердженням цих припущень є фото ГРП після проведення досліду, рисунок 4.30.



Рисунок 4.30 – Фото робочих поверхонь ГРП після проведення досліду №4

Таким чином, наведені результати підтверджують положення фізичної моделі щодо значного збільшення розмірів зони з підвищеним потенціалом температур аж до висоти $z = 220$ мм ($z/H_0 = 0,087$) зі сталим асиметричним зміщенням, рисунок 4.29. Це, у поєднанні з переміщенням більше 45 % маси шару за межі початкового положення, дозволяє зберегти рушійну силу по масообміну, що виражається через питоме навантаження поверхні шару за вологою $a_f = 0,6 \dots 0,7$ кг_{вол.}/(м²год), який у 1,5 рази більший, ніж при застосуванні звичайного барботажного режиму – $a_f = 0,35$ кг_{вол.}/(м²год).

Висновки до розділу 4

1. Експериментально підтверджено, що застосування струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі у діапазоні значень параметрів, визначених у розділі 2, дозволила забезпечити стійку кінетику процесу з пошаровим механізмом гранулювання та одержання сферо-подібних гранул із $d_e = 2,5 \dots 3,5$ мм, міцністю $\sigma \geq 16$ Н на гранулу при коефіцієнті грануляції $\psi \geq 95$ %.

2. Дослідним шляхом встановлено, що застосування автоколивального режиму із частотою пульсацій $1,95 \leq f \leq 2,83$ Гц та індексом перемішування $0,6 \leq J_{\Delta P} \leq 0,85$ сприяє інтенсивному оновленню поверхні контакту фаз та забезпечує достатню величину рушійної сили по масообміну, внаслідок чого питоме навантаження поверхні шару за вологою становило $a_f > 0,68$ кг_{вол.}/(м²·год), що у 1,9 разу перевищує цей показник при барботажному режимі, а швидкість росту гранул λ при цьому змінювалась від 0,18 до 0,308 мм/год.

3. Проведені дослідження підтверджують одержані у розділі 2 залежності впливу числа псевдозрідження K_w на індекс перемішування $J_{\Delta P}$, частоту пульсацій f та інші параметри, які можуть бути використані для методики розрахунку апарата.

4. Використання теплоносія на вході до ГРП із температурою 180...230 °С підтвердили ефективність технічних рішень щодо спорядження камери гранулятора ГРП типу 2 та встановлення направляючої вставки, що дозволяє практично усунути ризики оплавлення матеріалу на робочих поверхнях ГРП та забезпечити умови реалізації струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі, який супроводжується збільшенням потенційної енергії шару в апараті у 1,8...2 рази.

5. За результатами досліджень встановлено, що для забезпечення динамічного індексу якості гідродинаміки $i_y \geq 0,8$ у зоні Д, швидкість газу в щілинах ГРП типу 2 повинна бути $w_{щ} \geq 30$ м/с (за нормальних умов).

РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Конструктивно-технологічні засади промислового гранулятора

За результатами теоретико-експериментальних досліджень гідродинаміки струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі сформульовано принцип будови апарата у вигляді базових модулів.

Основні геометричні співвідношення базового модуля гранулятора наведено на рисунку 5.1.

Базовий модуль має форму паралелепіпеда з частковим розширенням у сепараційній зоні в надшаровому просторі, рисунок 5.1. Враховуючи особливості моделювання гідродинаміки, запропоновано 3-х кратне збільшення базового промислового модуля, відносно розмірів пілотної установки ($A=3A_{\text{екс}}$).

Таким чином, камера гранулятора 1, рисунок 5.1, у нижній частині споряджена щілинним ГРП 2 типу 2, розділ 3. Горизонтальні координати щілин введення теплоносія (зріджувального агенту) умовно поділяють камеру на зони I, II та III, рисунок 5.1, у яких, відповідно до фізичної моделі, розділ 2, при заданих значеннях K_w та швидкості газу в щілинах ГРП реалізується спеціальний спосіб введення зріджувального агенту. У результаті, на границі зон II та III на висоті z_ϕ утворюється газова бульбашка циліндричної форми, діаметр якої має розмір, щонайменше, $d_\phi = A/3$.

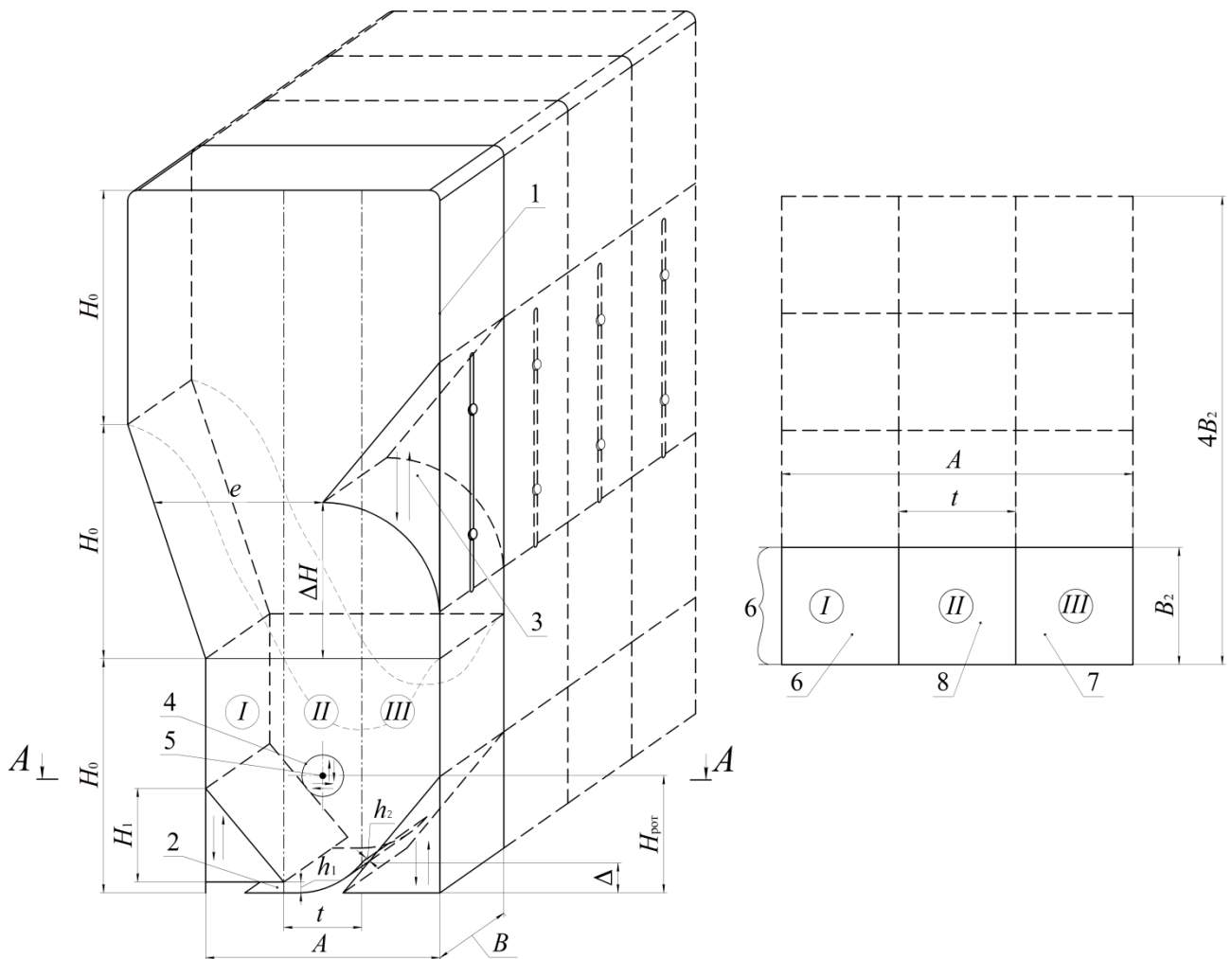
Отже, при збільшенні висоти шару зернистого матеріалу до $H_{\text{ш}} = 3H_0$ діаметр бульбашки, м:

$$d_\phi = \left(\frac{3H_0 - y_\phi - \Delta}{1 + \frac{\pi}{4}} \right) K_a. \quad (5.1)$$

У надшаровому просторі, на висоті ΔH від поверхні нерухомого шару H_0 та на відстані e від лівої бічної стінки встановлено направляючу вставку 3, рисунок 5.1, яка сприяє переміщенню інерційно винесеного гранульованого

матеріалу за межі шару в зону *I*. У результаті цього, миттєва висота зернистого матеріалу в зоні *I* вкінці другої стадії автоколивального режиму подвоюється. З метою зменшення стирання матеріалу при контакті зі вставкою 3 передбачено можливість її переміщення на величину ± 100 мм у вертикальному напрямку.

Введення рідкої фази в апарат 5, рисунок 5.1, проводиться механічним диспергатором, діаметр якого знаходиться в межах 180...240 мм. Доцільно передбачити можливість переміщення диспергатора по вертикальній осі на величину ± 100 мм і по горизонтальній на величину ± 50 мм.



- 1 – камера гранулятора; 2 – ГРП типу 2; 3 – направляюча вставка;
 4 – механічний диспергатор; 5 – точка введення робочого розчину;
 6, 7 – колосники; 8 – пластина; 9 – модуль ГРП

Рисунок 5.1 – Основні геометричні співвідношення базового модульного гранулятора

Ширину камери гранулятора у робочій зоні II приймаємо $B=0,3A$.

Об'єм шару твердого матеріалу в камері одного модуля гранулятора, m^3 :

$$V_{ш(0)} = ABH_0K_a = 0,3A^3K_a. \quad (5.2)$$

Загальний об'єм шару в блоці з кількістю модулів $n_{\text{мод.}}$ становитиме, m^3 :

$$V_{ш(\text{блок})} = n_{\text{мод.}} V_{ш(0)}. \quad (5.3)$$

Для шару зернистого матеріалу із заданим d_e питома поверхня шару зернистого матеріалу, m^2/m^3 :

$$\sigma_f = \frac{6(1 - \varepsilon_0)}{d_e}. \quad (5.4)$$

Отже, загальна поверхня шару в апараті, m^2 :

$$\Sigma F_{ш} = V_{ш(\text{блок})} \sigma_f. \quad (5.5)$$

У випадку, коли відношення питомого навантаження поверхні шару за вологою a_f [$kg_{\text{вол.}}/(m^2 \cdot \text{год})$] до корисної різниці температур $\Delta T_{ш} = T_{\text{вх}} - T_{ш}$ становитиме $a_{f(\Delta T)} = a_f / \Delta T_{ш} = 5,6 \cdot 10^{-3} kg_{\text{вол.}}/(m^2 \cdot \text{год} \cdot \text{град})$, тоді годинна масова продуктивність за вологою, $kg_{\text{вол.}}/(\text{год} \cdot \text{град})$:

$$M_{\text{вол.}} = \Sigma F_{ш} a_{f(\Delta T)}. \quad (5.6)$$

Для водяного розчину продуктивність по сухих компонентах, $kg_{\text{сух.}}/(\text{год} \cdot \text{град})$:

$$M_{\text{сух.}} = \frac{M_{\text{вол.}} x_p}{100 - x_p}, \quad (5.7)$$

де x_p – масова концентрація сухих речовин.

Відносна продуктивність гранулятора по гранульованому продукту з урахуванням коефіцієнта грануляції $\psi = 90\%$ (при температурі газу на вході $T_{\text{вх.}} = 220$ °C), $kg/(\text{год} \cdot \text{град})$:

$$M'_{\text{прод.}} = \frac{M_{\text{сух.}} \psi}{100}. \quad (5.8)$$

Отже, при заданому значенні $\Delta T_{ш}$ забезпечується продуктивність по гранульованому продукту, $kg/\text{год}$:

$$M_{\text{прод.}} = M'_{\text{прод.}} \Delta T_{ш} \quad (5.9)$$

Таким чином, прогнозована питома продуктивність блоку модулів за гранульованим продуктом при заданому $\Delta T_{\text{ш}}$ визначається як, $\text{кг}/(\text{м}^2\text{год})$:

$$q_{\text{прод.}} = \frac{M_{\text{прод.}}}{A0,3An_{\text{мод.}}} \quad (5.10)$$

Подальше збільшення продуктивності доцільно проводити шляхом збільшення кількості модулів для випадку, коли до композитного розчину входять термолабільні компоненти, такі як сульфат амонію, або при підвищенні температури теплоносія на вході до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Прогнозована продуктивність по гранульованому продукту – $q_{\text{прод.}} \approx 625\text{ кг}/(\text{м}^2\text{год})$.

У процесі промислової експлуатації буде остаточно перевірено доцільність наведених технічних рішень, але принциповим є створення прямокутної комірки у бічній стінці зони III для формування газового циліндра, що має непроникні стінки із 3-х сторін. Ця вимога буде виконуватись у поєднанні з конструктивними змінами камери гранулятора.

Опис технологічного процесу одержання органо-мінеральних добрив наведено в додатку Е1.

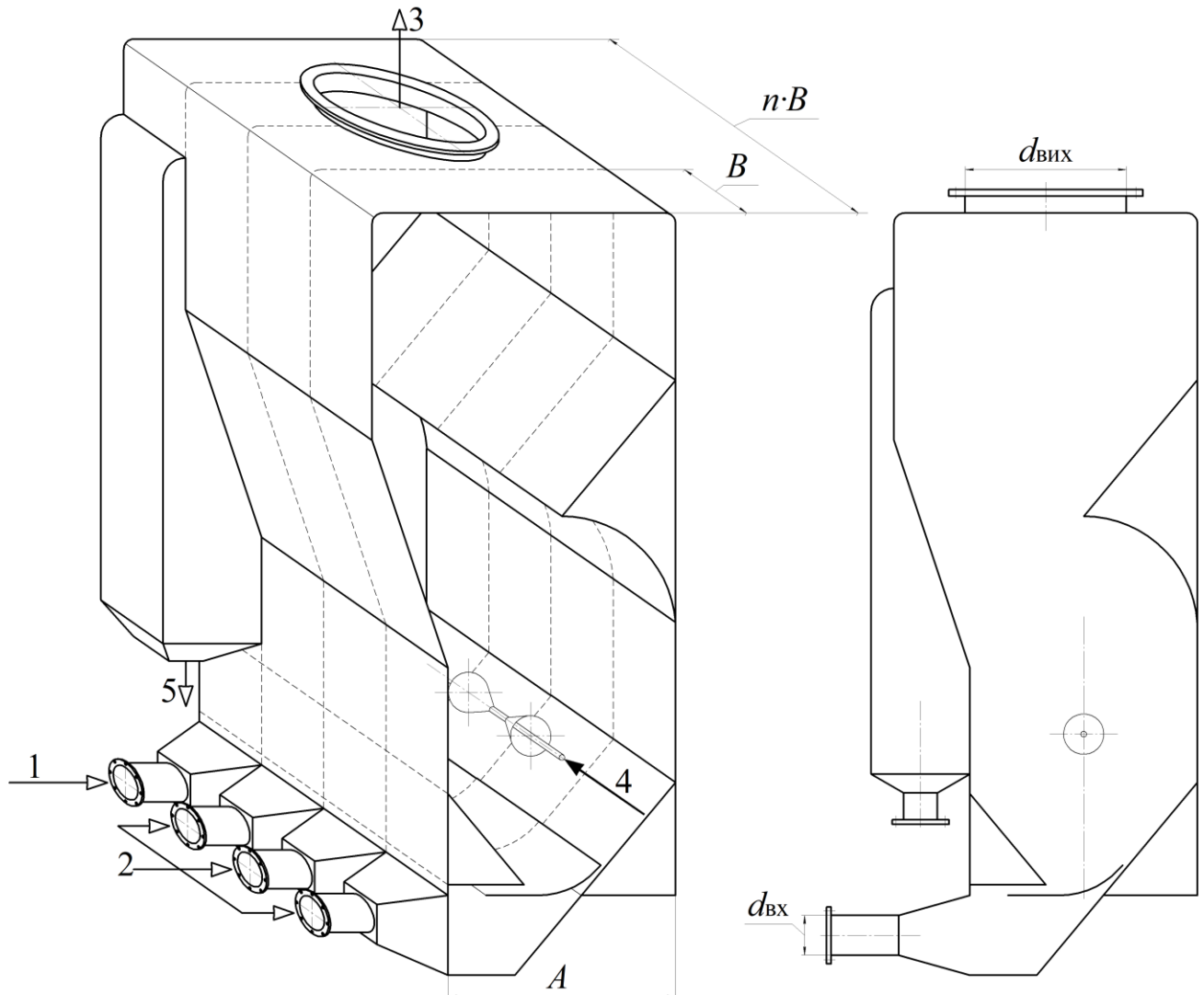
5.2 Методика розрахунку апарата для одержання органо-мінеральних добрив із пошаровою структурою

Метою розрахунку є визначення технологічних параметрів процесу та основних розмірів апарату.

При розрахунку використовувалась методика [51, 127-129]. Загальну методику розрахунку гранулятора із псевдозрідженим шаром наведено у додатку Е, алгоритм та програму розрахунку – у додатку Є.

Конструктивну схему гранулятора із чотирьох модулів наведено на рисунку 5.2.

Процес гранулювання багат шарових органо-мінеральних добрив передбачається проводити згідно результатів експериментальних досліджень кінетики процесу.



- 1 – повітря для зони охолодження; 2 – нагрітий теплоносій;
 3 – відпрацьований теплоносій; 4 – подача робочого розчину;
 5 – вивантаження гранульованого продукту

Рисунок 5.2 – Конструктивна схема гранулятора із чотирьох модулів

Хімічний склад гранул визначається хімічним складом композитного розчину, який подається на зневоднення. Рідка фаза вводиться всередину псевдозрідженого шару механічним диспергатором.

Характеристики апарата:

Витрата вихідного розчину – $G_1 = 500$ кг/год;

Тепловий ККД гранулятора – $\eta_t = 62,25$ %;

Температура теплоносія на вході в апарат – $T_{вх} = 300$ °С;

Температура шару в апараті – $T_{\text{ш}} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
 Загальна витрата теплоносія – $L = 23130 \text{ м}^3/\text{год}$;
 Кількість електрокалориферів – $n_K = 2 \text{ шт}$;
 Константа вивантаження – $K = 1,347 \text{ 1/год}$;
 Вихід гранульованого продукту – $\psi = 99 \text{ \%}$;
 Середній час перебування часток в шари – $\tau = 0,742 \text{ год}$;
 Критична швидкість початку псевдозрідження – $w_{\text{кр}} = 0,994 \text{ м/с}$;
 Прийнята площа апарату – $F = 1,08 \text{ м}^2$;
 Реальна швидкість псевдозрідження – $w_p = 2,35 \text{ м/с}$;
 Питома продуктивність по волозі – $A_f = 600 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год}$;
 Гідравлічний опір газорозподільного пристрою (ГРП) – $\Delta P_2 = 2943,3 \text{ Па}$;
 Висота псевдозрідженого шару – $H_p = 0,733 \text{ м}$;
 Гідравлічний опір псевдозрідженого шару – $\Delta P_{\text{ш}} = 7681,23 \text{ Па}$;
 Сумарний гідравлічний опір гранулятора (без циклонів) – $\Sigma \Delta P = 10625 \text{ Па}$;
 Витрати потужності – $N = 45,48 \text{ кВт}$;
 Кількість диспергаторів – $N = 4$.

5.4 Ефективність від впровадження результатів дисертації

1. Соціальна

1.1 Створення технологічних засад одержання комплексних органо-мінеральних добрив на основі екологічно чистої сировини сприятиме підвищенню врожайності сільсько-господарської культури на 30 % з підвищенням якості продуктивної частини врожаю без порушення екологічної рівноваги. Це сприятиме впровадженню принципів сталого розвитку при землекористуванні.

1.2 Створення нових робочих місць.

2. Технічна

2.1 Підвищення продуктивності промислових грануляторів у 1,6 рази, що дозволить зменшити енергозатрати на реалізацію процесу гранулювання.

2.2 Підвищити надійність роботи гранулятора з псевдозрідженим шаром та у 2 рази зменшити термін роботи без промивки (1 раз на 14 днів).

2.3 Запропонована блочна технологія дозволяє збільшувати продуктивність промислового гранулятора при збереженні умов реалізації струменево-пульсаційного автоколивального режиму.

2.4 Розроблення технології одностадійного перероблення відходів хімічної та харчової промисловостей підвищить екологічну безпеку в промисловості.

2.5 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.

3. Економічна

Розрахунок окупності проекту та повернення інвестицій.

Станом на 23.05.2018 за даними ВАТ «Азот» м. Черкаси вартість 1 т сульфату амонію $C_{C.A.} = 5280$ грн, або 203 \$.

З урахуванням того, що мінімальна маркетингова ціна гумусованого сульфату амонію на першому етапі освоєння буде не менше $C_{Г.С.А.} = 7700$ грн за 1 т, або 296 \$ тоді при обсязі виробництва гранульованого гумусованого сульфату амонію за рік $V = 8000$ т прибуток за рік становитиме:

$$\Pi = (C_{Г.С.А.} - C_{C.A.})V = (7700 - 5280)8000 = 19,36 \text{ млн грн.}$$

Тоді розрахункова окупність при обсязі інвестицій $I = 12$ млн. грн визначиться як:

$$O = I/\Pi = 12 \cdot 10^6 / 19,36 \cdot 10^6 = 0,61 \text{ року} \approx 8 \text{ місяців.}$$

З урахуванням кризових явищ в економіці (сфери виробництва, споживачів та просування продукції на ринках збуту) термін окупності збільшується в два рази до 16 місяців.

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

Висновки до розділу 5

1. Розроблено конструктивно-технологічну схему модуля промислового гранулятора при масштабному переході $M = 3$.

2. Обґрунтовано конструкцію промислового апарату, що складається із 4-х модулів з направляючою вставкою для забезпечення струменево-пульсаційного псевдозрідження в автоколивальному режимі.

3. Розраховано прогнозовану питому продуктивність апарату по гранульованому продукту $G_{\text{прод.}} = 600 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ при $T_{\text{вх}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. Обґрунтовано технологічну схему промислової установки для одержання органо-мінеральних добрив.

5. Удосконалено методику розрахунку гранулятора органо-мінеральних добрив при зневодненні водяних розчинів сульфату амонію із домішками соняшникової золи та гумінових компонентів із застосуванням промислових електрокалориферів для нагріву теплоносія.

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 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 $i_{я}$, 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 агенту на вході $T_{\text{вх}} = 230$ °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 методіку 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цілі сталого розвитку 2016-2030 [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу: <http://www.un.org.ua/ua/tsili-rozvytku-tysiacholittia/tsili-staloho-rozvytku>.
2. Багорка М. О. Комплексна екологічно-економічна оцінка землекористування в Україні / Багорка М. О. // Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. – 2017. – Вип. № 27. – С. 55-59.
3. Забарна Ю. В. Вплив основних факторів світової продовольчої проблеми на стан і перспективи продовольчої безпеки України / Ю. В. Забарна // Економіка та держава. – №5. – 2015. – С. 145-148.
4. «Zero Net Land Degradation» – політичний огляд, підготовлений Секретаріатом КБО у 2012 році [Електронний ресурс]. – 2012. – / Режим доступу: http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/UNCCD_PolicyBrief_ZeroNetLandDegradation.pdf.
5. Структура Українських земель та співвідношення кількості чорноземів в Україні та інших європейських країнах [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу: <http://land.gov.ua/info/infohrafika-struktura-ukrainskykh-zemel-ta-spivvidnoshennia-kilkosti-chornozemiv-v-ukraini-ta-inshykh-ievropeiskykh-krainakh>.
6. Камінська М. Б. економічні та облікові аспекти екологобезпечного розвитку аграрних підприємств / Молодий вчений. – 2017. – №4 (44). – С. 662-665.
7. Поважнюк С. В. Аграрна супер-країна чи ілюзія зростання / С. В. Поважнюк // Економічна правда [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/columns/2017/07/31/627430>.
8. Топ-10 товарів аграрного експорту з України у 2017 [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу: – http://www.poultryukraine.com/ru/poultry/news/2018/02/news_6459.html.

9. Лісова Т. В. Забезпечення відновлення земель з урахуванням європейського досвіду / Т. В. Лісова // Сучасний стан та перспективи розвитку екологічного, земельного й аграрного права в умовах євроінтеграції: зб. матеріали наук.-практ. конф. Харків. – 2017. – С. 178-180.

10. Медведєв В. В. Досвід реалізації “європейської ґрунтової політики”. Рациональне використання ґрунтових ресурсів і відтворення родючості ґрунтів: організаційно-економічні, екологічні й нормативно-правові аспекти: монографія / ред. С. А. Балюк, А. В. Кучер. Харків: Смугаста типографія. – 2015. – С. 368-379.

11. Деградація українських ґрунтів набуває загрозливих масштабів [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу: <https://agropolit.com/6835-degradatsiya-ukrayinskih-gruntiv-nabuvaye-zagrozlivih-masshtabiv>.

12. Markina I. A. The use of nature in the agrarian sphere on the principles of sustainable development / I. A. Markina, M. I Somych // Scientific Papers of the Legislation Institute of the Verkhovna Rada of Ukraine. – 2018. – №1. – PP. 76–86.

13. Городній М. М. Біотехнологічний енергетично-автономний комплекс переробки й утилізації органічних відходів / М. М. Городній // Матеріали науково-педагогічної конференції «Вищі навчальні заклади – Києву». – Київ. – 2004. – Ч. 1. – С. 66-72.

14. Головка А. М. Використанні мікроміцетів для одержання біологічних препаратів з фунгіцидними властивостями / А. М. Головка, Г. П. Лемещенко, В. Г. Скрипник // Вісник аграрної науки УААН. – 2004. – №3. – С. 43-45.

15. Кузьменко А. С. Вплив мікробіологічних препаратів на врожайність суцвіть / А. С. Кузьменко // Вісник аграрної науки УААН. – 2004. – №3. – С. 76-78.

16. Гаврилюк В. Б. Вплив органічного добрива Преформ на еколого-агрохімічний стан ґрунту та врожайність картоплі / В. Б. Гаврилюк, Г. М. Гаврилюк, Ю. М. Кух, В. А. Бортняк // Агроекологічний журнал. – 2009. – №2. – С. 58-63.

17. Якушко С. І. Органо-мінеральні добрива: переваги та способи виробництва / С. І. Якушко, В. П. Іванов // Хімічна промисловість України. – 2008. – № 3(86). – С.38-43

18. Малюга Ю. Е. Комплексная переработка твердых бытовых и некоторых промышленных отходов в универсальное органоминеральное удобрение мелиорант / Ю. Е. Малюга, А. С. Торосов, П. Б. Тарнопильский, Н. П. Шостко, А. А. Мостепанюк, И. И. Смольянов, В. В. Дегтярев, А. Ю. Чекарь // Вестн. науки и техники: Х. – 2002. – Вып. 6. – С. 66-73.

19. Очеретнюк О. Р. Енерготехнологія одержання органо-мінеральних добрив із осадів стічних вод, курячого посліду та шламу хімводопідготовки / Очеретнюк О. Р., Волошин М. Д., Іванченко А. В., Макарченко Н. П. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Хімія, хімічна технологія та екологія №31 – Вестник НТУ "ХПИ". – 2011. – С. 104-114.

20. Белянська О. Р. Технологія одержання комплексного добрива на основі диспергованого активного мулу / О. Р. Белянська, А. В. Іванченко, М. Д. Волошин. // Восточный журнал передовых технологий. –2015.–№3.–С.43.

21. Городній М. М. Отримання органо-мінерального добрива пролонгованої дії / М. М. Городній, О. В. Грищенко, О. М. Генгало. // Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2013. – № 2. – С. 63-67.

22. Андрєянов В. В. “Загальна хімічна технологія. Курс лекцій” / Андрєянов В. В. – Херсон, ХНТУ. – 2006. – 139 С.

23. Классен П. В. Гранулирование / Классен П. В., Гришаев И. Г., Шомин И. П. – М.: Химия. – 1991. – 238 С.

24. Технология производства гранулированных удобрений из сверхвлажного мелкого сырья [Електрон. ресурс]. – 2015. – Режим доступу: http://www.ecologyenergy.ru/technology/fertilizers_production_technology/from_su_perdamp_small_raw_materials.

25. Кочетков В. Н. Гранулирование минеральных удобрений / Кочетков В. Н. – М.: Химия. – 1975. – 224 С.

26. Гранулирование [Электронный ресурс]. – 2014. – <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/1143.html>.

27. Земледелие. Состав и свойства гумусовых веществ (часть 1) [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: – <http://raceshrono.ru/pochvovedenie/3054-sostav-i-svoystva-gumusovyh-veschestv-chast-1.html>.

28. Орлов Д. С. Свойства и функции гуминовых веществ. Гуминовые вещества в биосфере / РАН Науч. совет по пробл. почвоведения, МГУ им. М. В. Ломоносова, Моск. с-х. акад. им. К. А. Тимирязева МСХ РФ. Тюмень. с.-х. ин-т МСХ РФ и др. – М.: Наука. – 1993. – 236 С.

29. Гороя А. И. Роль физиологически активных гуминовых веществ в адаптации растений к действию ионизирующей радиации и пестицидов. Гуминовые вещества в биосфере / РАН. Научн. совет по пробл. почвоведения, МГУ им. М. В. Ломоносова, Моск. с-х. акад. им. К. А. Тимирязева МСХ РФ. Тюмень. с.-х. ин-т МСХ РФ и др. – М.: Наука. – 1993. – 236 С.

30. Перминова И. В. Гуминовые вещества – вызов химикам XXI века / И. В. Перминова // Химия и жизнь. – 2008. – № 1. – С. 51-55.

31. Корнієнко Я. М. Створення гуміново-мінеральних добрив для забезпечення екологічної рівноваги / Я. М. Корнієнко, А. Р. Степанюк, / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ. – 2008. – №2. – С. 48-52.

32. 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.

33. 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, серія: Технічні науки. – 2015. – Вип. 47, том 1. – С. 167-170.

34. Патент № 120841 Україна МПК C05G 3/00 (2017.01) Спосіб виготовлення гранульованого органомінерального 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.

35. 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.

36. 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 (1). – PP.144-154.

37. Державна підтримка українського експорту [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу: <http://ukrexport.gov.ua/ukr/prom/ukr/156.html>.

38. Michalik M. Mineral and chemical composition of biomass ash / European Mineralogical Conference // Michalik M., Wilczynska-Michalik W. – 2012. – Vol. 1. – PP. 423.

39. Руднева Л. Л. Складові використання та дослідження відходів переробки насіння соняшника / Руднева Л. Л., Бухкало С. І. // «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» тези доповідей XXV міжн. н/практ. конф. MicroCAD-2017. – Х.: НТУ «ХПІ».. – 2017. – Ч.ІІІ. – С. 53.

40. Rasa P. Complex Fertilizers Produced from the Sunflower Husk Ash / Rasa Paleckiene, Alfredas M. Sviklas, Rasa Slinksiene, Virjinijus Streimikis // Polish J. of Environ. Stud. – 2010. – Vol. 19. – №5. – PP. 973-979.

41. Манастирний М. М. Оцінка ефективності роботи механічного диспергатора / М. М. Манастирний, Я. М. Корнієнко, А. М. Любека // Науковий журнал «Молодий вчений». – 2017. – №11 (51). – С. 6-9.

42. Манастирний М. М. Математична модель руху рідини по поверхні механічного диспергатора / М. М. Манастирний, Я. М. Корнієнко, А. М. Любека, Р. В. Сачок, О. В. Мартинюк // Науковий журнал «Молодий вчений». – 2018. – №4 (56). – С.8-12.

43. Овчинников Л. Н. Грануляция минеральных удобрений во взвешенном слое: монография / Овчинников Л. Н. // ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново. – 2010. – 168 С.

44. Continuous Technologies [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: http://www.glatt.com/fileadmin/user_upload/content/pdf_downloads/Glatt-Continuous-Technologies_en_131106.pdf.

45. The ProCell LabSystem [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: http://www.glatt.com/fileadmin/user_upload/content/pdf_downloads/ProCell_LabSystem_neu_en.pdf.

46. Развитие техники псевдооживленного слоя компании Глатт [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: http://www.pharmtech-expo.ru/www_pharmtech/files/ff/fff21ad1-8aaf-420b-9be2-cdcd090964f1.pdf.

47. Bottom Nozzle Type Continuous Fluid Bed Spray Dryer and Granulator [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.okawara-mfg.com/eng/mfg/product/sprude.html>.

48. Развитие техники псевдооживленного слоя компании Глатт [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа: http://www.pharmtech-expo.ru/www_pharmtech/files/ff/fff21ad1-8aaf-420b-9be2-cdcd090964f1.pdf.

49. Wurster Technology [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <http://www.freund-vector.com/technology/wurster.asp>.

50. Flo-Coater Fluid Bed Production Systems [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: http://www.freund-vector.com/products/fluidbed_prod.asp.

51. Патент України №а 200608137 МПК 7В01 J2/16. Спосіб гранулювання рідкого матеріалу та пристрій для його здійснення / Артюхов А. Є., Склабінський В. І // Від 20.07.2006.

52. Тодес О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем / О. М. Тодес, О. Б. Цитович // Л.: «Химия». – 1981. – 296 С.

53. Аэров М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес // Л.: Химия. – 1968. – 510 С.

54. Hadi Wahyudi 3D particle-scale modeling of gas–solids flow and heat transfer in fluidized beds with an immersed tube / Hadi Wahyudi, Kaiwei Chu, Aibing Yu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – Vol. 97. – PP. 521-537.
55. Godlieb W. A Discrete Particle Simulation Study of Solids Mixing in a Pressurized Fluidized Bed / W. Goldieb, N. G. Deen, J. A. M. Kuipers // *The 12th International Conference on Fluidization – New Horizons in Fluidization Engineering*. – 2007. – Vol. RP4. – PP. 749-758.
56. Sidorenko I. Influence of pressure on fluidization properties / I. Sidorenko, M. I. Rhodes // *Powder Technology*. – 2004. – Vol. 141 (1-2). – PP. 137-154.
57. Bokkers G. A. Mixing and segregation in a bidisperse gas-solid fluidised bed: A numerical and experimental study / G. A. Bokkers, M. V. S. Annaland, J. A. M. Kuipers // *Powder Technology*. – 2004. – Vol. 140 (3). – PP. 176-186.
58. Deen N. G. Detailed computational and experimental fluid dynamics of fluidized beds / N. G. Deen, M. V. S. Annaland, J. A. M. Kuipers // *Applied Mathematical Modelling*. – 2006. – Vol. 30 (11). – PP. 1459-147.
59. Романков П. Г. Сушка во взвешенном состоянии / П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская // *Изд. 3-е, перераб. и дол.* — Л.: Химия. – 1979. – 272 С.
60. Wang Y. A new drag model for TFM simulation of gas-solid bubbling fluidized beds with Geldart-B particles / Y. Wang, Z. Zou, H. Li, Q. Zhu // *Particuology*. – 2013. – PP. 193-206.
61. Behjat Y. CFD modeling of hydrodynamic and heat transfer in fluidized bed reactors / Y. Behjat, S. Shahhosseini, S. H. Hashemabadi // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2008. – Vol. 35 (3). – PP. 357-368.
62. Wiley J. *Gas fluidization technology* (Ed. By D. Geldart) / J. Wiley, Sons Ltd. – 1986. – 468 P.
63. Wang Q. CFD simulation of pressure fluctuation characteristics in the gas-solid fluidized bed: Comparisons with experiments / Q. Wang, K. Zhang, H. Gu // *Petroleum Science*. – 2011. – Vol. 8 (№2). – PP. 211-218.

64. Wang T. Analysis of particle behaviors using a region-dependent method in a jetting fluidized bed / T. Wang, T. Tang, Y. He, H. Yi // *Chemical Engineering Journal*. – 2016. – Vol. 283. – PP. 127-140.
65. Hiraoka S. Properties of pressure fluctuations in gas-solid fluidized bed under a free bubbling condition / S. Hiraoka, K. S. Kim, S. H. Shin, L. T. Fan // *Powder Technology*. – 1989. – Vol.45. – PP. 245-265.
66. Sasic S. Fluctuations and waves in fluidized bed systems: the influence of the air-supply system / S. Sasic, B. Lecner, F. Johnsson // *Powder technology*. – 2005. – Vol. 153. – PP. 176-195.
67. Saidi M. Hydrodynamic investigation of gas-solid flow in rectangular spout-fluid bed using CFD-DEM modeling / M. Saidi, H. B. Tabrizi, J. R. Grace, C. J. Lim // *Powder Technology*. – 2015. – Vol. 284. – PP. 355-364.
68. Link J. M. Flow regimes in a spout-fluid bed: A combined experimental and simulation study / J. M. Link, L. A. Cuypers, N. G. Deen, J. A. M. Kuipers // *Chemical Engineering Science*. – 2005. – Vol. 60 (13). – PP. 3425-3442.
69. Ergun S. Fluid flow through packed column / Ergun, S. // *Chemical Engineering Progress*. – 1952. – Vol. 48. – PP. 89-94.
70. Tsuji Y. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe / Y. Tsuji, T. Tanaka, T. Ishida // *Powder Technology*. – 1992. – Vol. 71 (3). – PP. 239-250.
71. Tsuji Y. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed/ Y. Tsuji, T. Kawaguchi, T. Tanaka // *Powder Technology*. – 1993. – Vol.77. – PP. 79-87.
72. Буевич Ю. А. Стуйное псевдооживление / Буевич Ю. А., Минаев Г. А // М.: Химия. – 1984. – 136 С.
73. Taghipour F. Experimental and computational study of gas–solid fluidized bed hydrodynamics / F. Taghipour, N. Ellis, C. Wong // *Chemical Engineering Science*. – 2005. – Vol. 60. – PP. 6857-6867.
74. Min J. Experimental Validation of CFD Simulations of a Lab-Scale Fluidized-Bed Reactor with and Without Side-Gas Injection / J. Min, J. Drake, T.

Heindel, R. Fox // *AICHE Journal "Particle Technology and Fluidization"*. – 2010. – Vol. 56 (№6). – PP. 1434-1446.

75. Inder R. CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification / R. Inder, A. Brink, M. Hupa // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – Vol. 52 (№2). – PP. 585-614.

76. Maronga S. J. Growth kinetics in particle coating by top-spray fluidized bed systems / S. J. Maronga, P. Wnukowski // *Advanced Powder Technology*. – 2001. – Vol. 12 (3). – PP. 371-391.

77. Bouffard J. Influence of Process Variable and Physicochemical Properties on the Granulation Mechanism of Mannitol in a Fluid Bed Top Spray Granulator / J. Bouffard, M. Kaster, H. Dumont // *Drug Development and Industrial Pharmacy*. – 2005. – Vol. 31 (9). – PP. 923-933.

78. Dhanarajan A. An energy-based population-balance approach to model granule growth and breakage in high-shear wet granulation processes / A. Dhanarajan, R. Bandyopadhyay // *AAPS PharmSciTech*. – 2007. – Vol. 8 (3). – PP. E118-E125.

79. Ramachandran R. Model-based design and control of a continuous drum granulation process / R. Ramachandran, A. Chaudhury // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2012. – Vol. 90 (8). – PP. 1063-1073.

80. Srivastava S. Fluid Bed Technology Overview and Parameters for Process Selection/ S. Srivastava, G. Mishra // *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Drug Research*. – 2010. – Vol. 2 (4). – PP. 236-246.

81. Stroh A. Comparison of three different CFD methods for dense fluidized beds and validation by a cold flow experiment / A. Stroh, F. Alobaid, M. T. Hasenzahl, J. Hilz, J. Ströhle, B. Epple // *Elsevier B.V.* – 2015. – Vol. 10. – PP. 14-26.

82. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions with applications / D. Gidaspow // *United Kingdom Edition, London*. – 1994. – 467 P.

83. Тупоногов В. Г. Релаксационные автоколебания в псевдооживленном слое / В. Г. Тупоногов, А. Ф. Рыжков, А. Н. Баскаков, О. А. Обожин // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Том 15. – №4 – С. 643-657.

84. Тупоногов В. Г. Моделирование колебаний псевдооживленного слоя / В. Г. Тупоногов, А. Ф. Рыжков, А. Н. Баскаков, О. А. Обожин, А. М. Дубинин // Дисперсные потоки и простые среды. Интенсификации теплообмена: Тр. IV Росс. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ. – 2008. – Том 6. – С.133-136.

85. Gidaspow D. Fluidization in two-dimensional beds with a jet. Experimental porosity distributions / D. Gidaspow, C. Lin, Y. C. Seo // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. – 1983. – Vol. 22. – PP. 187-193.

86. Gidaspow D. Computational Transport Phenomena of Fluid-Particle Systems / D. Gidaspow, H. Arastoopour, E. Abbasi // Springer International Publishing. – 2017. – 192 P.

87. Gidaspow D. In-depth system parameters of transition flow pattern between turbulent and fast fluidization regimes in high solid particle density circulating fluidized bed reactor / D. Gidaspow, B. Chalermssinsuwan, P. Piumsomboon // Powder Technology. – 2014. – Vol. 253. – PP. 522-536.

88. Корнієнко Я. М. Підвищення ефективності процесу одержання гранульованих гуміново-мінеральних добрив / Я. М. Корнієнко, С. С. Гайдай, О. В. Мартинюк // НТУУ «КПІ». – Електронні текстові дані (1 файл: 11,5 Мбайт). – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – 349 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/11943>.

89. Патент № 109509 МПК В01J 8/44 Україна МПК В01J 8/44 (2006.01) 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.

90. Davidson J. F. Bubble formation at an orifice in an inviscid liquid / J. F. Davidson, B. O. G. Schuler // Chemical Engineering Research and Design. – 1960. – Vol. 38. – PP. 335-342.

91. Harrison D. Bubble formation at an orifice in a fluidised bed / D. Harrison, L. S. Leung // *Chemical Engineering Research and Design*. – 1961. – Vol. 39. – PP. 409-414.
92. Bokkers G. A. Multi-level Modelling of the Hydrodynamics in Gas Phase Polymerisation Reactors / G. A. Bokkers // Ph. D. Dissertation, Twente University, Enschede. – 2005.
93. Wu C. L. Three-dimensional discrete particle model for gas-solid fluidized beds on unstructured mesh / C. L. Wu, A. S. Berrouk, K. Nandakumar // *Chemical Engineering Journal*. – 2009. – Vol. 152. – PP. 514-529.
94. Rong L. W. Investigation on the microscopic structure of bubble in dense particle system / L. W. Rong, J. M. Zhan // *Acta Physica Sinica*. – 2010. – Vol. 59. – PP. 5572-5580.
95. Shen L. Digital image analysis of hydrodynamics two-dimensional bubbling fluidized beds / L. Shen, F. Johnson, B. Leckner // *Chemical Engineering Research Science*. – 2004. – Vol. 59. – PP. 2604-2617.
96. Gidaspow D. Hydrodynamics of fluidization: experimental and theoretical bubble sizes in a two-dimensional bed with a jet / D. Gidaspow, Y. C. Seo, B. Etehadieh // *Chemical Engineering Communications*. – 1983. – Vol. 22. – PP. 253-272.
97. Van der Hoef M. A. Computational fluid dynamics for dense gas-solid fluidized beds: a multi-scale modeling strategy/ M. A. van der Hoef, M. van Sint Annaland and J. A. M. Kuipers // *Chemical Engineering Science*. – 2004. – Vol. 59. – PP. 5157-5165.
98. Van der Hoef M. A. Computational fluid dynamics for dense gas-solid fluidized beds: a multi-scale modeling strategy/ M. A. van der Hoef, M. van Sint Annaland and J. A. M. Kuipers // *China Particuology*. – 2005. – Vol. 3 (1-2). – PP. 69-77.
99. Rong L. Effect of various parameters on bubble formation due to a single jet pulse in two-dimensional coarse-particle fluidized beds / *Advanced Powder Technology* // L. Rong, J. Zhan, C. L. Wu. – 2012. – Vol. 23. – PP. 398-405.

100. Delnoij E. Computational fluid dynamics applied to gas-liquid contactors / E. Delnoij, J. A. M. Kuipers, W. P. M. van Swaaij // *Chemical Engineering Science*. – 1997. – Vol. 52. – PP. 3623-3631.

101. Kobayashi N. A study on the behavior of bubbles and solids in bubbling fluidized beds. / N. Kobayashi, R. Yamazaki, S. Mori // *Powder Technology*. – 2000. – Vol. 113. – PP. 327-239.

102. Zhuang Y. Stochastic bubble developing model combined with Markov process of particles for bubbling fluidized beds / Y. Zhuang, X. Chen, D. Liu // *Chemical Engineering Journal*. – 2016. – Vol. 291. – PP. 206-214.

103. Gordillo E. D. A two phase model of high temperature stream-only gasification of biomass char in bubbling fluidized reactors using nuclear heat / E. D. Gordillo, A. Belghit // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2011. – Vol. 36.–PP.374-381.

104. Ding J. A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow / J. Ding, D. Gidaspow // *AIChE J*. – 1990. – Vol. 36. – PP. 526-538.

105. Патент № 95432 Україна МПК В01J 8/44 (2006.01) 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.

106. Патент № 95430 Україна МПК В01J 8/44 (2006.01) 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.

107. Патент № 95431 Україна МПК В01J 8/44 (2006.01) 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.

108. Патент № 106422 Україна МПК В01J 8/44 (2006.01) 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.

109. Патент № 107903 МПК В01J 8/44 Україна МПК В01J 8/44 (2006.01) 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.

110. 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» – Електронні текстові дані (1 файл: 6,92 Мбайт). – Київ: НТУУ «КПІ». – 2015. – 167 С. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/11944>.

111. Корнієнко Я. М. Процес одержання модифікованих гранульованих гуміново-мінеральних добрив / Я. М. Корнієнко, А. М. Любека, С. С. Гайдай // КПІ ім. Ігоря Сікорського – Електронні текстові дані (1 файл: 8,79 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2017. – 210 С. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/12411>.

112. Kornienko Y. Pulse jet-mode hydrodynamics fluidization with directed circulation / Y. Kornienko, S. Haidai, A. Liubek, S. Turko // “International scientific journal”. – 2016. – №5. – Vol. 2. – PP. 102-106.

113. Korniyenko Y. Modelling of pulsating mode of fluidization when obtaining organic-mineral fertilizers / Y. Korniyenko, S. Haidai, A. Liubek, S. Turko, O. Martynyuk // Ukrainian Food Journal. – 2016. – Vol. 5. – Issue 4. – PP.781-794.

114. Kornienko Y. Non-uniform fluidization in auto-oscillating mode / Y. Kornienko, S. Haidai // Ukrainian Food Journal. – 2017. – Vol. 6. – Issue 3. – PP. 562-576.

115. 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.

116. 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.

117. 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.

118. 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.

119. 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.

120. 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.

121. 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.

122. 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.

123. 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.

124. 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.

125. 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.

126. 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.

127. Баскаков А. П. Расчеты аппаратов кипящего слоя / А. П. Баскаков, Б. П. Лукачевский, И. П. Мухленов, А. А. Ойгенблик, А. Н. Прокопенко, Н. Б. Рашковская, Б. С. Сажин, О. М. Тодес, Н. Ф. Филиповский, В. Ф. Фролов,

О. Б. Цитович // Справочник. Под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. – Л.: Химия. – 1986. – 352 С.

128. Корнієнко Я. М. Технічні способи грануляції. Навч посібник. – К.: ІЗМН. – 1997. – 128 С.

129. Атаманюк В. М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів: монографія / В. М. Атаманюк, Я. В. Гумницький. – Львів: Видавництво Львівської політехніки. – 2013. – 276 С.

130. Клячкин В. Н. Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии: учеб. пособие / В. Н. Клячкин. – М.: Финансы и статистика; ИНФРА-М. – 2009. – 304 С.

131. Патент № 122623 Україна МПК В05В 3/02 (2006.01) В01J 8/18 (2006.01) 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.

132. Патент № 122624 Україна МПК В05В 3/00 В01J 8/44 (2006.01) Механічний диспергатор / Монастирний 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.

ДОДАТОК А.
РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

А.1 Розрахунок похибки вимірювання теплоносія на вході до гранулятора

Гранична похибка $\Delta T_{\text{вх}}$ включає систематичну похибку приладу σ_{Σ} і похибку термопари Δ_T , визначену при її таруванні в діапазоні температур 150-210 °С, °С :

$$\Delta T_{\text{вх}} = |\sigma_{\Sigma}| + |\Delta_T| \quad (\text{A.1})$$

Сумарна систематична похибка приладу визначається за формулою, °С:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{прил}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2}, \quad (\text{A.2})$$

де $\sigma_{\text{прил}}^2$ – похибка приладу А-565-002-01, класу точності $r=0,15/0,05$ і визначається за виразом, °С:

$$\sigma_{\text{прил}} = \pm \frac{\Delta}{3}, \quad (\text{A.3})$$

де Δ – гранична абсолютна паспортна похибка, °С:

$$\Delta = \pm \left(\frac{0,15 - 0,05}{100} \cdot |T_{\text{вх}}| + \frac{0,05}{100} \cdot |T_{\text{к}}| \right) \quad (\text{A.4})$$

де $T_{\text{вх}}$ – значення найбільшої температури теплоносія, $T_{\text{вх}} = 230$ °С; $T_{\text{к}}$ – найбільша по абсолютній величині, гранична температура виміру приладом, $T_{\text{к}} = 800$ °С.

Тоді похибка приладу розраховується:

$$\sigma_{\text{прил}} = \pm \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{0,15 - 0,05}{100} \cdot 230 + \frac{0,05}{100} \cdot 800 \right) = \pm 0,2 \text{ °С}$$

Похибка зчитування розраховується за формулою:

$$\sigma_{\text{окр}}^2 = \frac{\delta}{\sqrt{12}} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} = 0,029 \text{ °С},$$

де δ – значення одиниці найменшого розряду цифрового табло приладу А565-002-0, $\delta = 0,1$ °С.

Тоді числове значення систематичної похибки приладу за формулою (А.2) дорівнює:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{прил}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,2^2 + 0,029^2} = 0,202 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Величина похибки показань термомпери $\Delta_T = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$. Тоді похибка вимірювання теплоносія на вході до гранулятора за формулою (А.1) становитиме:

$$\Delta T_{\text{вх}} = |\sigma_{\Sigma}| + |\Delta_T| = 0,202 + 0,2 = 0,402 \text{ } ^\circ\text{C}$$

А.2 Розрахунок похибки вимірювання температури псевдозрідженого шару

Температура $T_{\text{ш}}$ визначається приладом А 565-003-01 класу точності $r = 0,15 / 0,05$. Гранична похибка $T_{\text{ш}}$ аналогічно формулі А.1, складається із σ_{Σ} та Δ_T , що визначалась при значенні температур 80-110 $^\circ\text{C}$.

Величина похибки показань даної термомпери $\Delta_T = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Розраховуючи відповідні величини за формулами (А.1-А.4) похибка вимірювання температури в псевдозрідженому шарі складатиме $\Delta T_{\text{ш}} = 0,302 \text{ } ^\circ\text{C}$.

А.3 Розрахунок похибки вимірювання загального тиску в псевдозрідженому шарі $\Delta P_{\text{ш}}$

Загальний тиск у псевдозрідженому шарі $\Delta P_{\text{ш}}$ вимірювали за допомогою датчиків малих тисків (MPXV7007DP) та ПК.

Гранична похибка вимірювання складається з похибок вимірювань Δh і похибок приладу $\sigma_{\text{прил}}$, Па:

$$\Delta P = \Delta h + \sigma_{\text{прил}} \tag{А.5}$$

Похибка вимірювань розраховується за формулою:

$$\Delta h = \frac{1}{2} \cdot \delta = \frac{1}{2} \cdot 0,0000001 = 0,00000005 \text{ Па,}$$

де δ – значення одиниці найменшого розряду цифрового табло, $\delta = 0,0000001$ Па.

Похибка приладу $\sigma_{\text{прил}} = 0,1$ Па.

Виконавши підстановку значень $\sigma_{\text{прил}}$ та Δh у формулу (А.5) отримаємо:

$$\Delta P = \Delta h + \sigma_{\text{прил}} = 0,00000005 + 0,1 = 1,00000005 \text{ Па}$$

Тобто значення граничної похибки дорівнює:

$$\Delta P = \pm 0,1 \text{ Па}$$

А.4 Розрахунок похибки вимірювання маси гранульованого продукту, який вивантажується з гранулятора

Гранична похибка визначення маси гранул складається з похибки терезів $\sigma_{\text{прил}}$ і похибки зчитування показань $\sigma_{\text{окр}}$, кг:

$$\Delta M_{\text{гр.пр.}} = \sqrt{\sigma_{\text{прил}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} \quad (\text{А.6})$$

Похибка терезів $\sigma_{\text{прил}}$ розраховується за формулою:

$$\sigma_{\text{прил}} = \frac{\delta}{6} = \frac{0,005}{6} = 0,0008 \text{ кг,} \quad (\text{А.7})$$

де δ – ціна поділок шкали терезів, $\delta = 0,005$ кг.

Похибка зчитувань дорівнює:

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{\delta}{\sqrt{12}} = \frac{0,005}{\sqrt{12}} = 0,0014 \text{ кг,} \quad (\text{А.8})$$

Виконавши підстановку отриманих значень у вираз (А.6) одержимо числове значення граничної похибки терезів:

$$\Delta M_{\text{гр.пр.}} = \sqrt{0,0008^2 + 0,0014^2} = 0,0016 \text{ кг}$$

Тобто значення граничної похибки дорівнює:

$$\Delta M_{\text{гр.пр.}} = \pm 0,002 \text{ кг}$$

Якщо прийняти, що середня величина маси гранул при вивантаженні складає $M_{\text{гр.пр.}} = 0,5$ кг, то гранична відносна похибка визначиться:

$$\delta(M_{\text{гр.пр.}}) = \frac{\Delta M_{\text{гр.пр.}}}{M_{\text{гр.пр.}}} \cdot 100\% = \frac{0,002}{0,5} \cdot 100\% = 0,4 \quad (\text{A.9})$$

А.5 Розрахунок похибки визначення дисперсного складу частинок у псевдозрідженому шарі

Масові відсотки окремих фракцій X_i визначається за виразом, %:

$$X_i = \frac{M_i}{M_{\text{ш}}} \cdot 100\% , \quad (\text{A.10})$$

де M_i – маса окремої i -тої фракції, яка має розміри частинок $D_{o_1} < D < D_{o_2}$, кг; D_{o_1} та D_{o_2} – розміри отворів двох сусідніх сит при проведенні ситового аналізу, мм; D – поточний діаметр гранул, мм.

Маса окремої фракції M_i визначається на терезах з точністю $\delta = 0,001$ кг. Тоді гранична похибка визначення маси зразка окремої фракції розраховується за формулою:

$$\Delta M_i = \frac{\delta}{2} = \frac{0,001}{2} = 0,0005 \text{ кг} \quad (\text{A.11})$$

Згідно методики маса зразка, для ситового аналізу дорівнює 0,1 кг, тобто,

$$\sum_{i=1}^n M_i = 0,1 \text{ кг.}$$

Виконавши підстановку отриманих величин до виразу (А.10) одержимо вираз для розрахунку масового відсотка i -тої фракції X_i :

$$X_i = \frac{M_i}{0,1} \cdot 100\% = M_i \cdot 1000\%$$

Із досліджу маємо, що до 1% від маси окремої фракції становлять частинки, які застрягли в отворах сит, і не пройшли отвори сита по випадковій причині.

Таким чином гранична похибка визначення масового відсотка i -тої фракції розраховується за виразом:

$$\Delta X_i = 0,5 + 0,01 \cdot X_i \% \quad (\text{A.12})$$

Звідси випливає, що гранична абсолютна похибка визначення процентного вмісту буде для найбільшої фракції, тобто коли вміст фракції становить 80%:

$$\Delta X_i = 0,5 + 0,01 \cdot 80 = 1,3\%$$

А.6 Визначення похибки масових витрат робочого розчину

Гранична похибка різниці маси в ємності робочого розчину ΔL дорівнює, кг:

$$\Delta L = \Delta L_i + \Delta L_{i+1}, \quad (\text{A.13})$$

де ΔL_i – похибка одного вимірювання маси робочого розчину в ємності, яка визначається за виразом:

$$\Delta L_i = \frac{\delta}{2} = \frac{0,05}{2} = 0,025 \text{ кг} \quad (\text{A.14})$$

де δ – ціна поділки шкали вимірювання маси в ємності робочого розчину, $\delta = 0,05$ кг.

Приймаємо, що $\Delta L_i = \Delta L_{i+1}$. Тоді:

$$\Delta L = 0,025 + 0,025 = 0,05 \text{ кг}$$

Тоді гранична відносна похибка, при мінімальній витраті $\Delta L_i = 1,5$ кг становить:

$$\delta(L) = \frac{\Delta L}{\Delta L_i} \cdot 100\% = \frac{0,05}{1,5} \cdot 100\% = 3,3\% \quad (\text{A.15})$$

А.7 Розрахунок похибки визначення маси зернистого матеріалу у псевдозрідженому шарі

Маса зернистого матеріалу визначалась за формулою:

$$M_{\text{ш}} = 1,25 \cdot \frac{\Delta P_{\text{ш}} \cdot S}{g}, \quad (\text{A.16})$$

де $\Delta P_{\text{ш}}$ – загальний тиск у шарі, що має граничну похибку $\Delta P_{\text{ш}} = 0,1$ Па;
 g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с²; S – площа поперечного перерізу апарата в зоні ГРП, що визначається за виразом, м²:

$$S = A \cdot B, \quad (\text{A.16})$$

де A та B – геометричні розміри поперечного перерізу апарата в зоні ГРП, м.

Відносна гранична похибка маси гранул у псевдозрідженому шарі визначається за виразом:

$$\delta(M_{\text{ш}}) = \delta(\Delta P_{\text{ш}}) + \delta(S) + \delta(g), \quad (\text{A.18})$$

де $\delta(\Delta P_{\text{ш}})$ – відносна гранична похибка гідравлічного опору псевдозрідженого шару при найменшому значенні значення $P_{\text{ш}} = 2000$ Па розраховується за виразом:

$$\delta(\Delta P_{\text{ш}}) = \frac{\Delta P_{\text{ш}}}{P_{\text{ш}}} \cdot 100\% = \frac{0,1}{2000} \cdot 100\% = 0,005\% \quad (\text{A.19})$$

$\delta(S)$ – відносна гранична похибка площі перерізу апарата:

$$\delta(S) = \delta(A) + \delta(B) = 0,3 + 0,9 = 1,2\%, \quad (\text{A.20})$$

де $\delta(A)$ – відносна похибка довжини перерізу апарату:

$$\delta(A) = \frac{1}{A} \cdot 100\% = \frac{1}{300} \cdot 100\% = 0,3\%, \quad (\text{A.21})$$

де A – довжина перерізу апарату, $A = 300$ мм; $\delta(B)$ – відносна похибка ширини перерізу апарату:

$$\delta(B) = \frac{1}{B} \cdot 100\% = \frac{1}{110} \cdot 100\% = 0,9\%, \quad (\text{A.22})$$

де B – ширина перерізу апарату, $B = 110$ мм; $\delta(g)$ – відносна гранична похибка величини прискорення сили земного тяжіння:

$$\delta(g) = \frac{\Delta g}{g} \cdot 100\% = \frac{0,005}{9,81} \cdot 100\% = 0,05\%, \quad (\text{A.23})$$

де Δg – абсолютна гранична похибка прискорення, що визначається як половина одиниці десяткового розряду, що відповідає останній достовірній цифрі значення прискорення, $\Delta g = 0,005$ м/с².

Виконавши підстановку одержаних значень відносних похибок у виразі (A.18) одержимо числове значення відносної граничної похибки визначення маси гранул у апараті:

$$\delta(M_{\text{ш}}) = 0,005 + 1,2 + 0,05 = 1,255\%$$

Гранична похибка маси гранул в шарі при масі $M_{\text{ш}} = 7,7$ кг, буде розраховуватись за виразом:

$$\Delta M_{\text{ш}} = \frac{\delta(\Delta M_{\text{ш}})}{100\%} \cdot M_{\text{ш}} = \frac{1,9}{100\%} \cdot 7,7 = 0,146 \text{ кг} \quad (\text{A.24})$$

А.8 Розрахунок похибки визначення еквівалентного діаметра частинок у псевдозрідженому шарі

Розрахунки в різних дослідах показали, що відносна похибка визначення еквівалентного діаметра частинок у псевдозрідженому шарі не перевищує 6%:

$$\delta(D_e) = 6\%$$

А.9 Розрахунок похибки визначення загальної поверхні твердих частинок у псевдозрідженому шарі

Загальна площа поверхні частинок у псевдозрідженому шарі визначається за формулою:

$$f_{\text{ш}} = \frac{6 \cdot M_{\text{ш}}}{D_{\text{е}} \cdot \rho_{\text{т}}} \quad (\text{A.25})$$

де $D_{\text{е}}$ – еквівалентний діаметр частинок у псевдозрідженому шарі, м;
 $\rho_{\text{т}}$ – густина твердих частинок у шарі, кг/м³.

Відносна похибка визначення загальної поверхні частинок у псевдозрідженому шарі визначиться за виразом:

$$\delta(f_{\text{ш}}) = \delta(M_{\text{ш}}) + \delta(D_{\text{е}}) + \delta(\rho_{\text{т}}) = 1,9 + 6 + 0,04 = 7,94\%, \quad (\text{A.26})$$

де $\delta(M_{\text{ш}})$ – відносна гранична похибка визначення маси гранул в апараті, $\delta(M_{\text{ш}}) = 1,9\%$;

$\delta(D_{\text{е}})$ – відносна гранична похибка визначення еквівалентного діаметра частинок у псевдозрідженому шарі, $\delta(D_{\text{е}}) = 6\%$; $\delta(\rho_{\text{т}})$ – відносна гранична похибка визначення густини твердих частинок:

$$\delta(\rho_{\text{т}}) = \frac{\Delta\rho_{\text{т}}}{\rho_{\text{т}}} \cdot 100\% = \frac{0,5}{1450} \cdot 100\% = 0,04\%, \quad (\text{A.27})$$

$\Delta\rho_{\text{т}}$ – величина абсолютної граничної похибки густини гранул визначається половиною одиниці десяткового розряду, що відповідає останній вірній цифрі значення густини гранул, $\Delta\rho_{\text{т}} = 0,5$ кг/м³; $\rho_{\text{т}}$ – густина твердих частинок у шарі, $\rho_{\text{т}} = 1450$ кг/м³.

Чисельне значення граничної похибки визначення загальної поверхні частинок у псевдозрідженому шарі при найбільшому значенні $f_{\text{ш}} = 12$ м² становить:

$$\Delta f_{\text{ш}} = \frac{\delta(f_{\text{ш}}) \cdot f_{\text{ш}}}{100\%} = \frac{7,94 \cdot 12}{100\%} = 0,952 \text{ м}^2 \quad (\text{A.28})$$

А.10 Розрахунок похибки визначення маси твердих речовин, що надходять до гранулятора з робочим розчином

Маса твердих речовин в розчині, що надходить до апарату, визначається за формулою:

$$M_m = L \cdot C \quad (\text{A.29})$$

де L – витрата робочого розчину, кг; C – концентрація твердих частинок в робочому розчині, що подається в апарат для зневоднення та грануляції.

Концентрація визначається як:

$$C = \frac{M_c}{M_c + M_b}, \quad (\text{A.30})$$

де M_c – маса сухих речовин у робочому розчині, кг; M_b – маса води у робочому розчині, кг.

Відносна похибка визначення маси твердих речовин, що надходять до гранулятора з робочим розчином визначиться за виразом:

$$\delta(M_m) = \delta(L) + \delta(C) = 3,3 + 0,35 = 3,65\%, \quad (\text{A.31})$$

де $\delta(L)$ – гранична відносна похибка визначення похибки масових витрат робочого розчину, $\delta(L) = 3,3\%$; $\delta(C)$ – відносна гранична похибка визначення концентрації робочого розчину:

$$\delta(C) = 2 \cdot \delta(M_c) + \delta(M_b) = 2 \cdot 0,1 + 0,25 = 0,35\%, \quad (\text{A.32})$$

де $\delta(M_c)$ – відносна гранична похибка виміру маси сухих речовин, %:

$$\delta(M_c) = \frac{\Delta M_c}{M_c} \cdot 100 = \frac{0,01}{10} \cdot 100 = 0,1\%, \quad (\text{A.33})$$

де ΔM_c – гранична похибка зважування сухих речовин, $\Delta M_c = 0,01$ кг; M_c – маса сухих речовин, що витрачається на приготування робочого розчину, $M_c = 10$ кг; $\delta(M_b)$ – відносна гранична похибка виміру маси води, %:

$$\delta(M_b) = \frac{\Delta M_b}{M_b} \cdot 100 = \frac{0,05}{20} \cdot 100 = 0,25\%, \quad (\text{A.34})$$

де ΔM_b – гранична похибка зважування води, $\Delta M_b = 0,05$ кг; M_b – маса води, що витрачається на приготування робочого розчину, $M_b = 20$ кг.

Тоді абсолютна похибка виміру маси твердих речовин, що надходять до гранулятора з робочим розчином:

$$\Delta M_m = \frac{\delta(M_m)}{100\%} \cdot M_m = \frac{3,65}{100\%} \cdot M_m = 0,0365 \cdot M_m \quad (\text{A.35})$$

А.11 Розрахунок похибки визначення коефіцієнта грануляції

Коефіцієнт грануляції розраховується за виразом, %:

$$\psi = \frac{M_{\text{гр.пр.}}}{M_m}, \quad (\text{A.36})$$

де $M_{\text{гр.пр.}}$ – маса вивантаженого гранульованого продукту за час $\Delta\tau$, кг/ $\Delta\tau$;

M_m – маса сухих речовин, що подаються в апарат із робочим розчином за час $\Delta\tau$, кг/ $\Delta\tau$.

Гранична відносна похибка визначення коефіцієнта грануляції:

$$\delta(\psi) = \delta(M_{\text{гр.пр.}}) + \delta(M_m) = 0,4 + 3,65 = 4,05\% , \quad (\text{A.37})$$

де $\delta(M_{\text{гр.пр.}})$ – відносна похибка вимірювання маси гранульованого продукту, який вивантажується з гранулятора, $\delta(M_{\text{гр.пр.}}) = 0,4\%$; $\delta(M_m)$ – відносна похибка визначення маси твердих речовин, що надходять до гранулятора з робочим розчином, $\delta(M_m) = 3,65\%$.

Тоді абсолютна похибка визначення коефіцієнта грануляції:

$$\Delta\psi = \frac{\delta(\psi)}{100\%} \cdot \psi = \frac{4,05}{100\%} \cdot \psi = 0,0405 \cdot \psi \quad (\text{A.38})$$

ДОДАТОК Б.
ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН ТА ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕННІ
КОМПЛЕКСНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Б.1 Розрахункові величини при обробці комплексних експериментальних досліджень

У загальному випадку, гідростатичного опору нерухомого шару зернистого матеріалу можна виразити як:

$$\Delta P_{\text{гідрост.}(0)} = H_0(1 - \varepsilon_0)\rho_{\text{ш}}g \quad (\text{Б. 1})$$

З іншого боку, тиск зернистого шару на ГРП можна записати як:

$$\Delta P_{\text{гідрост.}(0)} = \frac{M_{\text{ш}}}{F_a} K_a \quad (\text{Б. 2})$$

Маса шару зернистого матеріалу визначається:

$$M_{\text{ш}} = \frac{\pi d_e^3}{6} n \rho_{\text{ш}} \quad (\text{Б. 3})$$

де n – кількість твердих частинок.

Якщо загальна поверхня шару зернистого матеріалу $f_{\text{ш}} = \pi d_e^2 n$, тоді маса шару запишеться як:

$$M_{\text{ш}} = f_{\text{ш}} \frac{d_e}{6} \rho_{\text{ш}} \quad (\text{Б. 4})$$

Якщо $f_{\text{ш}}$ необхідна поверхня контакту фаз для ефективного масообміну, то прирівнявши праві частини виразів (Б.3) і (Б.4) одержимо вираз для визначення висоти нерухомого шару зернистого матеріалу, який впливає з необхідних умов проведення масообміну:

$$H_0 = \frac{f_{\text{ш}} \cdot d_e}{6 \cdot F_a \cdot (1 - \varepsilon_0)} \quad (\text{Б.5})$$

Еквівалентний діаметр частинок у псевдозрідженому шарі:

$$d_e = \frac{1}{\sum \frac{X_i}{d_i}} \quad (\text{Б.6})$$

де X_i – масова частка i -тої фракції (визначається за даними ситового аналізу) [88, 111]; d_i – середній діаметр i -тої фракції визначається як середнє геометричне [88, 111]:

$$d_i = \sqrt{d_1 \cdot d_2} \quad (\text{Б.7})$$

де d_1, d_2 – розміри отворів двох сусідніх сит при проведенні ситового аналізу.

Розподіл маси гранул за розміром визначався за результатами ситового аналізу за виразом [88, 111]:

$$g_i = \frac{m_i}{\Delta d_i M_{\text{ш}}} \quad (\text{Б.8})$$

де m_i – маса i -тої фракції шару, кг; $\Delta d_i = (d_2 - d_1)$ – діапазон існування фракції, м.

Число псевдозрідження визначається за виразом [88, 111]:

$$K_w = \frac{w_p}{w_{\text{кр}}} \quad (\text{Б.9})$$

де w_p – приведена робоча швидкість в апараті та критична, м/с:

$$w_p = \frac{V}{3600 \cdot F_a} \quad (\text{Б.10}) \quad w_{\text{кр}} = \frac{\text{Re}_{\text{кр}} \cdot \nu_{\Gamma}}{d_e} \quad (\text{Б.11})$$

де $\text{Re}_{\text{кр}}$ – критерій Рейнольдса для початку псевдозрідження частинок з еквівалентним діаметром d_e :

$$\text{Re}_{\text{кр}} = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}} \quad (\text{Б.12})$$

де ε – порозність шару; Ar – критерій Архімеда:

$$Ar = \frac{gd_e^3 (\rho_{\Gamma} - \rho_{\Gamma})}{\nu_{\Gamma}^2 \rho_{\Gamma}} \quad (\text{Б.13})$$

Щільність зрошення поверхні частинок у псевдозрідженому шарі за вологою a_f , кг_{вол.}/(м²·год.) [88, 111], характеризує інтенсивність тепло- та масообмінних процесів і розраховується за виразом:

$$a_f = \frac{M_{\text{в}}}{f_{\text{ш}}} \quad (\text{Б.14})$$

де $M_{\text{в}}$ – кількість вологи, яка надходить до апарату з рідкою фазою [88, 111], кг/год:

$$M_{\text{в}} = \frac{(L_1 - L_2) \rho_{\text{р}} (1 - x_{\text{р}})}{\Delta \tau} \quad (\text{Б.15})$$

де L_1 та L_2 – маса рідини в ємності на початку і кінці заданого інтервалу часу, кг.

Загальна поверхня частинок у псевдозрідженому шарі [88, 111]:

$$f_{\text{ш}} = \frac{6F \Delta P_{\text{ш}}}{d_e \cdot \rho_{\text{т}} g} \quad (\text{Б.16})$$

Коефіцієнт грануляції, %:

$$\psi = \frac{G_{\text{вив}}}{G_{\text{м}}} \cdot 100\% \quad (\text{Б.17})$$

Константа вивантаження, 1/год:

$$K = \frac{G_{\text{вив}}}{M_{\text{ш}}} \quad (\text{Б.18})$$

Відповідно, середній час перебування розраховується за виразом:

$$\tau_{\text{сер}} = \frac{1}{K} \quad (\text{Б.19})$$

Б.2 Опис експериментальної установки

Установка призначена для дослідження процесів грануляції багат шарових твердих композитів шляхом зневоднення рідких гетерогенних систем, рисунок Б.1. Конструктивно і технологічно виконана таким чином, що технологічна схема установки і конструкція основних вузлів гранулятора дозволяє проводити безперервний процес зневоднення і грануляції композитних розчинів в широкому діапазоні зміни основних технологічних параметрів [88, 111].

Гранулятор 1 має прямокутну камеру, яка з метою зменшення швидкості відвідних газів, у верхній частині виконана з розширенням з двох боків, яка з'єднана з циклоном 5 [88, 111].

Вузол для вивантаження гранульованого продукту з апарату розташований у нижній частині, та дозволяє вести загальне і селекційне

вивантаження гранул заданого розміру. Для перенесення матеріалу в надшаровому просторі, камера гранулятора 1 у верхній частині споряджена направляючою вставкою 4. У нижній частині камери гранулятора встановлено ГРП щілинного типу 2, рисунок 2.7 б, який реалізує асиметричне-дворівневе введення теплоносія, тим самим забезпечуючи направлений рух теплоносія та зернистого матеріалу з активним його перемішуванням [88, 111].

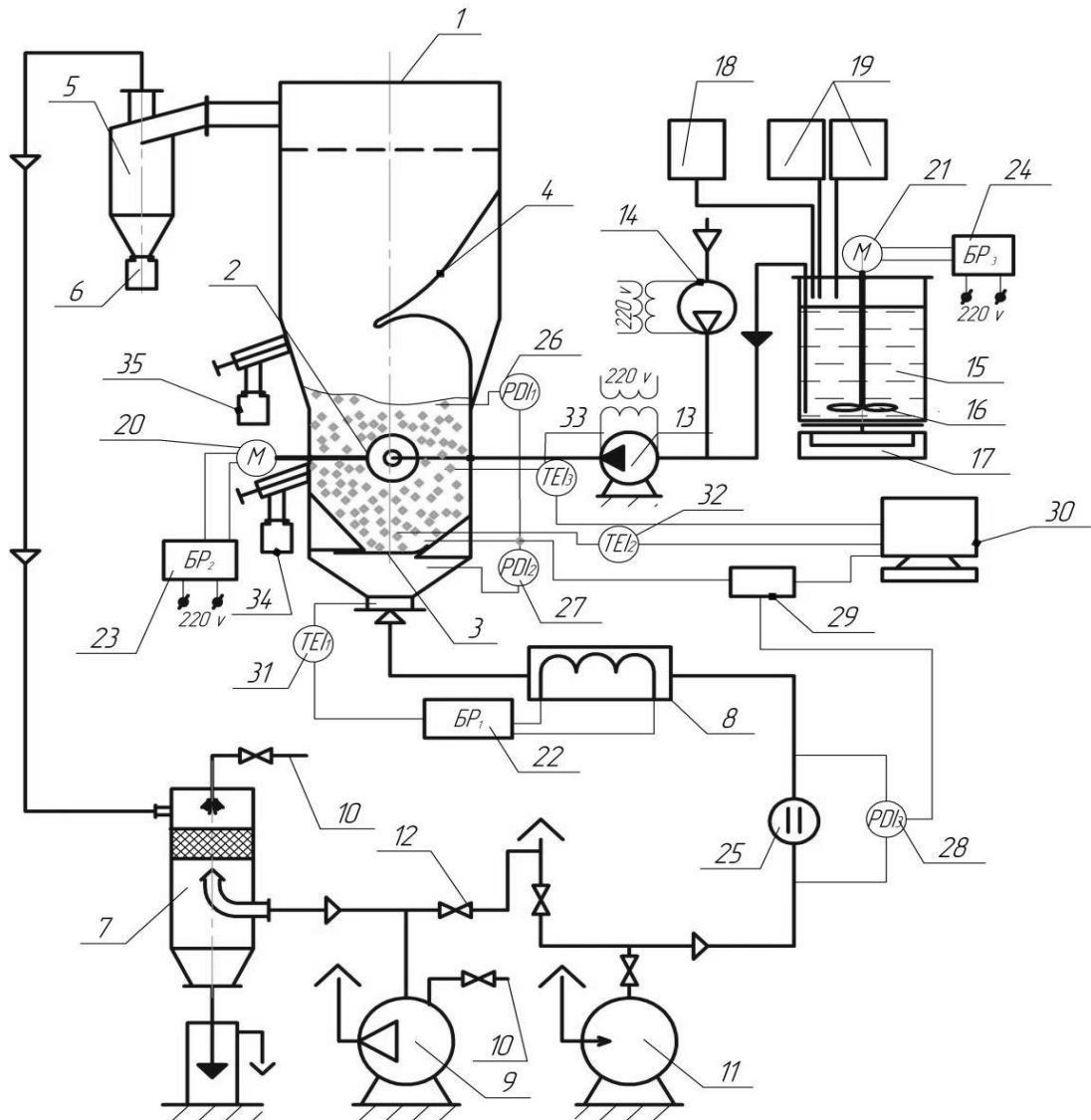


Рисунок Б.1 – Установа для дослідження процесів грануляції багатшарових твердих композитів

Нагрів теплоносія, який подається до гранулятора [88, 111], проводиться в калорифері 8. Підтримання температури нагрітого теплоносія з точністю $\pm 2^{\circ}\text{C}$ здійснюється за вимірами безінерційної хромель-копелевої терморпарі 31 .

Підтримання заданого значення температури шару в зоні зрошення проводилось за показанням безінерційної хромель-копелевої термопари 33 із точністю $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ шляхом зміни витрат робочого розчину, який подається до гранулятора за допомогою шлангових насосів 13, 14 [88, 111].

Температура в робочій зоні ГРП вимірювалася за допомогою безінерційної хромель-копелевої термопари 32. Покази термопар 32, 33 виводилися на монітор комп'ютера 30 [88, 111].

Витрати теплоносія вимірювались камерною діафрагмою 25 із точністю $\pm 0,005 \text{ м}^3/\text{год}$ [88, 111].

Для сухої очистки відпрацьованого теплоносія використовується циклон типу "НИИОГАЗ" 5, діаметром 0,15 м. Кінцева очистка газів, які відходять, проводиться в прямоточному насадковому скрубєрі 7 [88, 111].

При роботі установки за допомогою вакуум-насосу 9 повітря через вимірювальну діафрагму 25 надходить до калорифера 8 [88, 111].

Після калорифера теплоносій із заданою температурою через ГРП 3 подається до камери гранулятора, де відбувається безпосередній контакт із частинками зернистого шару. При досягненні температури шару $95\text{-}100^{\circ}\text{C}$ до псевдозрідженого шару подається робочий розчин, який диспергується конічним диспергатором 2. При цьому в апараті створюється ефективний струменево-пульсаційний режим з направленою циркуляцією зернистого матеріалу [88, 111].

Застосування конічного диспергатора обумовлено використанням при роботі гетерогенних рідких систем [88, 111].

Відбір проб для ситового аналізу товарної фракції проводиться через вивантажувальний пристрій гранулятора в ємності готового продукту 34, 35 .

При проведенні експериментальних досліджень проводилось безперервне вимірювання [88, 111]:

- температури теплоносія на вході до апарату $T_{\text{вх}}, ^{\circ}\text{C}$;
- температури псевдозрідженого шару в робочій зоні ГРП $T_{\text{ш}}, ^{\circ}\text{C}$;

- температури псевдозрідженого шару в зоні зрошення T_3 , °C;
- витрати теплоносія за допомогою камерної діафрагми ($P_{дз}$), м³/год;
- витрати розчину, який вводиться у псевдозріджений шар, кг/год. за допомогою електронних ваг, кг;
- перепади тиску на ГРП, на діафрагмі, у псевдозрідженому шарі, тиск у апараті – за допомогою датчиків малих тисків MPXV7007DP з точністю $\pm 0,1$ Па (26, 27, 28) які під'єднані до комп'ютера 30 через контроллер 29.

ДОДАТОК В.
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІДРОДИНАМІКИ НЕОДНОРІДНОГО
ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ
КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

Таблиця В.1 – Результати експериментальних досліджень загального тиску в шарі зернистого матеріалу із $d_e=4,0$ мм при $K_w=1,25$, $w_r=1,43$ м/с, $T_{вх}=20^\circ\text{C}$

№	τ , с	$\Delta P_{ш}$, Па	№	τ , с	$\Delta P_{ш}$, Па	№	τ , с	$\Delta P_{ш}$, Па
1	0,00000	2273,879	38	0,59763	2313,972	75	1,214514	2485,696
2	0,001754	2291,029	39	0,613507	2298,225	76	1,24	2534,248
3	0,017394	2359,627	40	0,629384	2418,271	77	1,256129	2615,649
4	0,033271	2491,029	41	0,645261	2463,972	78	1,272257	2897,052
5	0,049147	2505,282	42	0,661137	2679,673	79	1,288386	2997,052
6	0,065024	2639,58	43	0,677014	2809,811	80	1,304514	3097,052
7	0,080901	2679,673	44	0,692891	3111,305	81	1,320643	3075,558
8	0,096778	2849,719	45	0,708768	3129,673	82	1,336771	3228,454
9	0,112654	3085,466	46	0,724644	3248,5	83	1,3529	3188,362
10	0,128531	3239,811	47	0,740521	3231,35	84	1,369028	3297,052
11	0,144408	3248,454	48	0,756398	3299,949	85	1,385157	3267,052
12	0,160285	3284,248	49	0,772275	3313,5	86	1,401285	3297,052
13	0,176161	3315,649	50	0,788152	3334,248	87	1,417414	3225,558
14	0,192038	3324,248	51	0,804028	3215,649	88	1,433542	3178,454
15	0,207915	3374,294	52	0,819905	3334,248	89	1,449671	3138,362
16	0,223792	3291,489	53	0,835782	3212,753	90	1,4658	2928,454
17	0,239669	3172,891	54	0,851659	3245,603	91	1,481928	2838,362
18	0,255545	3172,891	55	0,867535	3231,35	92	1,498057	2754,064
19	0,271422	3072,891	56	0,883412	2959,856	93	1,514185	2788,362
20	0,287299	3075,788	57	0,899289	2805,512	94	1,530314	2702,615
21	0,303176	2921,443	58	0,915166	2874,109	95	1,546442	2599,719
22	0,319052	2888,592	59	0,925	2909,856	96	1,562571	2685,466
23	0,334929	2891,489	60	0,935	2755,512	97	1,578699	2635,466
24	0,350806	2718,592	61	0,950877	2518,316	98	1,594828	2535,466
25	0,366683	2645,696	62	0,966754	2655,512	99	1,610956	2468,316
26	0,38256	2548,5	63	0,98263	2474,109	100	1,627085	2385,42
27	0,398436	2511,305	64	0,998507	2454,064	101	1,643214	2422,569
28	0,414313	2379,902	65	1,014384	2404,064	102	1,659342	2434,018
29	0,43019	2389,811	66	1,030261	2456,96	103	1,675471	2348,271
30	0,446067	2524,109	67	1,045901	2462,753	104	1,691599	2175,328
31	0,461943	2355,512	68	1,062029	2481,35	105	1,707728	2142,478
32	0,47782	2402,615	69	1,11	2262,753	106	1,723856	2191,029
33	0,493697	2331,121	70	1,126129	2419,995	107	1,739985	2343,926
34	0,509574	2193,926	71	1,15	2199,949	108	1,756113	2305,282
35	0,55	2051,367	72	1,166129	2148,5	109	1,772242	2356,73
36	0,565877	2232,569	73	1,182257	2282,799	110	1,78837	2613,972
37	0,581754	2148,271	74	1,198386	2368,547			

Таблиця В.2 – Результати експериментальних досліджень загального тиску в шарі зернистого матеріалу із $d_e=4,0$ мм при $K_w=1,43$, $w_r=1,64$ м/с, $T_{\text{вх}}=20^\circ\text{C}$

№	τ , с	$\Delta P_{\text{ш}}$, Па	№	τ , с	$\Delta P_{\text{ш}}$, Па
1	0,00000	2387,764	39	0,595238	2693,787
2	0,007937	2473,511	40	0,611111	2810,936
3	0,02381	2640,661	41	0,626984	2813,603
4	0,039683	2687,81	42	0,642857	2947,902
5	0,055556	2813,603	43	0,65873	3099,35
6	0,071429	3099,35	44	0,674603	3239,442
7	0,087302	3239,442	45	0,690476	3276,638
8	0,103175	3276,638	46	0,706349	3393,787
9	0,119048	3393,787	47	0,722222	3510,936
10	0,134921	3528,086	48	0,738095	3578,086
11	0,150794	3568,178	49	0,753968	3588,178
12	0,166667	3621,028	50	0,769841	3651,028
13	0,18254	3668,178	51	0,785714	3606,729
14	0,198413	3618,132	52	0,801587	3548,132
15	0,214286	3535,327	53	0,81746	3535,327
16	0,230159	3345,235	54	0,833333	3405,235
17	0,246032	3465,281	55	0,849206	3415,281
18	0,261905	3193,787	56	0,865079	3193,787
19	0,277778	3125,189	57	0,880952	3125,189
20	0,293651	2942,339	58	0,896825	3028,086
21	0,309524	2798,04	59	0,912698	2708,04
22	0,325397	2685,189	60	0,928571	2625,189
23	0,34127	2573,741	61	0,944444	2573,741
24	0,357143	2673,741	62	0,960317	2416,499
25	0,373016	2393,557	63	0,97619	2493,557
26	0,388889	2342,109	64	0,992063	2337,764
27	0,404762	2087,764	65	1,007937	2087,764
28	0,420635	2084,868	66	1,02381	1933,42
29	0,436508	1933,42	67	1,039683	1850,569
30	0,452381	1887,764	68	1,055556	1787,764
31	0,468254	1873,511	69	1,071429	1850,661
32	0,484127	1787,81	70	1,087302	1987,81
33	0,5	1979,304	71	1,103175	2079,304
34	0,515873	2113,603	72	1,119048	2347,902
35	0,531746	2299,35	73	1,134921	2479,35
36	0,547619	2339,442	74	1,150794	2606,638
37	0,563492	2476,638	75	1,166667	2693,787
38	0,579365	2610,936	76	1,18254	2710,936

Таблиця В.3 – Результати експериментальних досліджень загального тиску в шарі зернистого матеріалу із $d_e=2,5$ мм при $K_w=1,71$, $w_r=1,34$ м/с, $T_{вх}=20^\circ\text{C}$

№	τ , с	$\Delta P_{ш}$, Па	№	τ , с	$\Delta P_{ш}$, Па	№	τ , с	$\Delta P_{ш}$, Па
1	0,00000	2667,921	39	0,610352	3182,404	77	1,213379	1974,749
2	0,016113	2959,461	40	0,626221	3008,013	78	1,229248	1959,002
3	0,032227	3225,162	41	0,64209	2846,197	79	1,245117	2056,105
4	0,04834	3285,301	42	0,657959	2770,587	80	1,260986	2210,45
5	0,064453	3545,438	43	0,673828	2590,634	81	1,276855	2307,553
6	0,080566	3674,174	44	0,689697	2687,967	82	1,292725	2564,794
7	0,09668	3639,875	45	0,705566	2508,013	83	1,308594	2719,139
8	0,112793	3703,921	46	0,721436	2305,116	84	1,324463	2830,726
9	0,128906	3617,162	47	0,737305	2282,404	85	1,340332	2859,461
10	0,14502	3453,61	48	0,753174	2211,139	86	1,356201	2806,565
11	0,161133	3351,231	49	0,769043	2031,185	87	1,37207	2939,415
12	0,177246	3336,979	50	0,784912	2145,438	88	1,387939	3322,496
13	0,193359	3131,185	51	0,800781	2196,886	89	1,403809	3476,84
14	0,209473	2885,301	52	0,81665	2299,783	90	1,419678	3511,139
15	0,225586	2759,461	53	0,83252	2334,082			
16	0,241699	2602,22	54	0,848389	2489,645			
17	0,257813	2567,783	55	0,864258	2622,496			
18	0,273926	2439,139	56	0,880127	2771,048			
19	0,290039	2390,404	57	0,895996	2787,967			
20	0,306152	2138,956	58	0,911865	2908,013			
21	0,322266	1988,91	59	0,927734	3005,116			
22	0,338379	1950,657	60	0,943604	3282,404			
23	0,354492	2041,852	61	0,959473	3411,139			
24	0,370605	2196,197	62	0,975342	3545,438			
25	0,386719	2401,99	63	0,991211	3631,185			
26	0,402832	2439,186	64	1,00708	3596,886			
27	0,419922	2582,174	65	1,022949	3699,783			
28	0,435791	2673,485	66	1,038818	3534,082			
29	0,45166	2824,933	67	1,054688	3439,645			
30	0,467529	2982,404	68	1,070557	3322,496			
31	0,483398	3239,645	69	1,086426	3071,048			
32	0,499268	3556,886	70	1,102295	2853,898			
33	0,515137	3511,139	71	1,118164	2628,059			
34	0,531006	3631,185	72	1,134033	2793,76			
35	0,546875	3694,082	73	1,149902	2556,565			
36	0,562744	3645,438	74	1,165771	2465,025			
37	0,578613	3422,496	75	1,181641	2190,634			
38	0,594482	3371,048	76	1,19751	2050,542			

Таблиця В.4 – Результати експериментальних досліджень загального тиску в шарі зернистого матеріалу із $d_e=2,5$ мм при $K_w=2,03$, $w_r=1,60$ м/с, $T_{\text{вх}}=20^\circ\text{C}$

№	τ , с	$\Delta P_{\text{ш}}$, Па	№	τ , с	$\Delta P_{\text{ш}}$, Па
1	0,00000	2762,358	39	0,621416	2376,381
2	0,018511	3173,714	40	0,637529	2553,438
3	0,034929	3442,312	41	0,653643	1993,3
4	0,051348	3711,139	42	0,669756	2070,358
5	0,067766	3825,392	43	0,685869	1813,346
6	0,084185	4265,255	44	0,701982	1654,703
7	0,100603	4353,898	45	0,718096	1687,508
8	0,117021	4208,243	46	0,734209	1830,496
9	0,13344	4233,852	47	0,750322	1947,645
10	0,149858	3842,312	48	0,766436	2267,691
11	0,166277	3979,508	49	0,782549	2467,691
12	0,182695	3413,806	50	0,798662	2639,186
13	0,199114	3099,323	51	0,814775	2882,174
14	0,215532	2582,174	52	0,830889	3427,829
15	0,231951	2493,53	53	0,847002	3799,323
16	0,248369	2490,634	54	0,863115	3699,323
17	0,264788	2053,438	55	0,879229	4030,726
18	0,281206	1796,197	56	0,895342	4233,622
19	0,297625	1664,794	57	0,911455	4133,622
20	0,314043	1734,794	58	0,927568	4330,956
21	0,330461	1933,392	59	0,943682	4051,002
22	0,34688	2104,887	60	0,959795	3945,208
23	0,363298	2482,174	61	0,975908	3842,312
24	0,379717	2705,116	62	0,992021	3487,967
25	0,396135	2756,565	63	1,008135	3199,323
26	0,412554	3322,496	64	1,024248	2396,427
27	0,428972	3356,795	65	1,040361	2636,288
28	0,445391	3785,53	66	1,056475	2464,794
29	0,460283	3768,38	67	1,072588	1990,496
30	0,476396	4214,266	68	1,088701	1764,794
31	0,49251	4074,174	69	1,104814	1830,496
32	0,508623	4306,979	70	1,120928	1933,392
33	0,524736	4054,128	71	1,137041	1899,093
34	0,54085	4085,53	72	1,153154	2036,288
35	0,556963	3879,737	73	1,169268	2430,726
36	0,573076	3642,542	74	1,185381	2550,772
37	0,589189	3345,208			
38	0,605303	2967,921			

Таблиця В.5 – Результати експериментальних досліджень загального тиску в шарі зернистого матеріалу із $d_e=1,5$ мм при $K_w=2,17$, $w_r=1,01$ м/с, $T_{\text{вх}}=20^\circ\text{C}$

№	τ , с	$\Delta P_{\text{ш}}$, Па	№	τ , с	$\Delta P_{\text{ш}}$, Па	№	τ , с	$\Delta P_{\text{ш}}$, Па
1	0,00000	2350,569	39	0,441745	1933,42	77	0,91336	2842,339
2	0,00862	2487,764	40	0,453235	1850,569	78	0,92485	2708,04
3	0,01961	2573,511	41	0,464725	1887,764	79	0,93634	2625,189
4	0,0306	2590,661	42	0,476215	1873,511	80	0,94783	2673,741
5	0,04159	2687,81	43	0,487705	1787,764	81	0,95932	2573,741
6	0,052579	2779,304	44	0,499194	1787,81	82	0,970809	2416,499
7	0,064069	2813,603	45	0,510684	1979,304	83	0,982299	2493,557
8	0,075559	2947,902	46	0,522174	2113,603	84	0,993789	2342,109
9	0,087049	3099,35	47	0,533664	2247,902	85	1,005279	2337,764
10	0,098539	3239,442	48	0,545154	2299,35	86	1,016769	2087,764
11	0,110029	3276,638	49	0,556644	2339,442	87	1,028259	1984,868
12	0,121519	3393,787	50	0,568134	2476,638	88	1,039749	1933,42
13	0,133009	3410,936	51	0,579624	2593,787	89	1,051239	1850,569
14	0,144498	3528,086	52	0,591113	2610,936	90	1,062728	1787,764
15	0,155988	3532,431	53	0,602603	2606,638	91	1,074218	1873,511
16	0,167478	3568,178	54	0,614093	2693,787	92	1,085708	1850,661
17	0,178968	3621,028	55	0,625583	2810,936	93	1,097198	1987,81
18	0,190458	3668,178	56	0,637073	2813,603	94	1,108688	2079,304
19	0,201948	3686,729	57	0,658563	2947,902	95	1,120178	2213,603
20	0,213438	3618,132	58	0,675053	3099,35	96	1,131668	2347,902
21	0,224927	3535,327	59	0,686542	3239,442	97	1,143157	2479,35
22	0,236417	3451,028	60	0,698032	3276,638	98	1,154647	2559,442
23	0,247907	3345,235	61	0,709522	3393,787	99	1,166137	2606,638
24	0,259397	3465,281	62	0,731012	3510,936	100	1,177627	2693,787
25	0,270887	3193,787	63	0,742502	3578,086	101	1,189117	2710,936
26	0,282377	3125,189	64	0,753992	3552,431	102	1,200607	3099,35
27	0,293867	3028,086	65	0,765482	3588,178	103	1,212097	3239,442
28	0,305357	2942,339	66	0,776972	3651,028	104	1,223587	3276,638
29	0,316846	2798,04	67	0,788461	3668,178	105	1,235076	3393,787
30	0,338336	2685,189	68	0,799951	3606,729	106	1,246566	3410,936
31	0,349826	2573,741	69	0,811441	3548,132	107	1,258056	3528,086
32	0,361316	2673,741	70	0,822931	3535,327	108	1,269546	3532,431
33	0,372806	2416,499	71	0,834421	3451,028	109	1,281036	3568,178
34	0,384296	2393,557	72	0,845911	3405,235	110	1,292526	3651,028
35	0,395786	2342,109	73	0,857401	3415,281	111	1,304016	3668,178
36	0,407276	2407,764	74	0,87889	3193,787	112	1,315505	3586,729
37	0,418765	2087,764	75	0,89038	3125,189	113	1,326995	3498,132
38	0,430255	2084,868	76	0,90187	3028,086	114	1,338485	3535,327

Таблиця В.6 – Результати експериментальних досліджень загального тиску в шарі зернистого матеріалу із $d_e=1,5$ мм при $K_w=2,66$, $w_r=1,24$ м/с, $T_{вх}=20^\circ\text{C}$

№	τ , с	$\Delta P_{ш}$, Па	№	τ , с	$\Delta P_{ш}$, Па	№	τ , с	$\Delta P_{ш}$, Па
1	0	2245,326	39	0,59375	1553,326	77	1,1875	1862,016
2	0,015625	2433,51	40	0,609375	1916,131	78	1,203125	1241,97
3	0,03125	2865,142	41	0,625	2496,544	79	1,21875	1187,855
4	0,046875	3662,705	42	0,640625	2113,924	80	1,234375	1696,314
5	0,0625	3911,487	43	0,65625	2496,544	81	1,25	1947,763
6	0,078125	4182,751	44	0,671875	2685,188	82	1,265625	2119,257
7	0,09375	4488,774	45	0,6875	3611,257	83	1,28125	2633,74
8	0,109375	4074,292	46	0,703125	3851,348	84	1,296875	2822,383
9	0,125	4142,889	47	0,71875	3765,601	85	1,3125	2959,579
10	0,140625	3902,797	48	0,734375	4588,774	86	1,328125	3474,061
11	0,15625	3319,717	49	0,75	4503,026	87	1,34375	3868,498
12	0,171875	3028,177	50	0,765625	4211,487	88	1,359375	3662,705
13	0,1875	2702,337	51	0,78125	3851,348	89	1,375	4005,694
14	0,203125	2342,2	52	0,796875	3542,659	90	1,390625	4314,383
15	0,21875	2084,958	53	0,8125	3096,775	91	1,40625	4331,532
16	0,234375	1690,521	54	0,828125	2650,889	92	1,421875	4331,532
17	0,25	1559,119	55	0,84375	2462,246	93	1,4375	3954,246
18	0,265625	1141,97	56	0,859375	1999,211	94	1,453125	3817,05
19	0,28125	1447,763	57	0,875	1759,119	95	1,46875	3302,567
20	0,296875	1990,752	58	0,890625	1621,924	96	1,484375	3062,476
21	0,3125	2307,901	59	0,90625	1467,579	97	1,5	3011,028
22	0,328125	2427,947	60	0,921875	1610,567	98	1,515625	2547,993
23	0,34375	2770,935	61	0,9375	1925,05	99	1,53125	1947,763
24	0,359375	3079,625	62	0,953125	2170,706			
25	0,375	3131,073	63	0,96875	2393,648			
26	0,390625	3868,498	64	0,984375	2856,682			
27	0,40625	4245,786	65	1	2856,682			
28	0,421875	4503,026	66	1,015625	3628,406			
29	0,4375	4382,981	67	1,03125	4417,28			
30	0,453125	4142,889	68	1,046875	3954,246			
31	0,46875	3594,107	69	1,0625	4074,292			
32	0,484375	3251,119	70	1,078125	4211,487			
33	0,5	2668,039	71	1,09375	3885,648			
34	0,515625	2290,752	72	1,109375	3594,107			
35	0,53125	2187,855	73	1,125	2993,877			
36	0,546875	1827,717	74	1,140625	2684,958			
37	0,5625	1553,326	75	1,15625	2102,107			
38	0,578125	1193,418	76	1,171875	2136,407			

Таблиця В.7 – Результати експериментальних досліджень порозності шару зернистого матеріалу із $d_e=4,0$, $T_{вх}=20^\circ\text{C}$

$K_w=1,25; w_r=1,43 \text{ м/с}$					$K_w=1,43; w_r=1,64 \text{ м/с}$				
$\tau, \text{с}$	ε_I	ε_{II}	ε_{III}	$\varepsilon_{(ср)}$	$\tau, \text{с}$	ε_I	ε_{II}	ε_{III}	$\varepsilon_{(ср)}$
0,00	0,4	0,453	0,713	0,507	0,00	0,4	0,474	0,484	0,450
0,04	0,4	0,474	0,612	0,489	0,04	0,4	0,489	0,504	0,453
0,08	0,4	0,500	0,541	0,481	0,08	0,4	0,517	0,531	0,462
0,12	0,4	0,528	0,528	0,490	0,12	0,4	0,535	0,569	0,476
0,16	0,4	0,544	0,557	0,504	0,16	0,4	0,567	0,597	0,495
0,20	0,4	0,574	0,599	0,529	0,20	0,4	0,595	0,623	0,517
0,24	0,4	0,590	0,659	0,552	0,24	0,4	0,624	0,659	0,540
0,28	0,4	0,606	0,670	0,562	0,28	0,4	0,639	0,689	0,563
0,32	0,4	0,639	0,667	0,575	0,32	0,4	0,651	0,702	0,585
0,36	0,4	0,704	0,734	0,622	0,36	0,4	0,658	0,728	0,604
0,40	0,4	0,725	0,741	0,632	0,40	0,4	0,683	0,745	0,618
0,44	0,4	0,701	0,762	0,627	0,44	0,4	0,692	0,776	0,627
0,48	0,4	0,671	0,770	0,617	0,48	0,4	0,690	0,789	0,630
0,52	0,4	0,631	0,751	0,594	0,52	0,4	0,613	0,675	0,604
0,56	0,4	0,453	0,713	0,507	0,56	0,4	0,557	0,571	0,540
0,60	0,4	0,474	0,612	0,489	0,60	0,4	0,506	0,520	0,477
0,64	0,4	0,500	0,541	0,481	0,64	0,4	0,480	0,496	0,450
0,68	0,4	0,528	0,528	0,490	0,68	0,4	0,474	0,484	0,453
0,72	0,4	0,544	0,557	0,504	0,72	0,4	0,489	0,504	0,462
0,76	0,4	0,574	0,599	0,529	0,76	0,4	0,517	0,531	0,476
0,80	0,4	0,590	0,659	0,552	0,80	0,4	0,535	0,569	0,495
0,84	0,4	0,606	0,670	0,562	0,84	0,4	0,567	0,597	0,517
0,88	0,4	0,639	0,667	0,575	0,88	0,4	0,595	0,623	0,540
0,92	0,4	0,704	0,734	0,622	0,92	0,4	0,624	0,659	0,563
0,96	0,4	0,725	0,741	0,632	0,96	0,4	0,639	0,689	0,585
1,00	0,4	0,701	0,762	0,627	1,00	0,4	0,651	0,702	0,604
1,04	0,4	0,671	0,770	0,617	1,04	0,4	0,658	0,728	0,618
1,08	0,4	0,631	0,751	0,594	1,08	0,4	0,683	0,745	0,627
1,12	0,4	0,453	0,713	0,507	1,12	0,4	0,692	0,776	0,630
1,16	0,4	0,474	0,612	0,489	1,16	0,4	0,690	0,789	0,604
1,20	0,4	0,500	0,541	0,481	1,20	0,4	0,613	0,675	0,540
1,24	0,4	0,528	0,528	0,490	1,24	0,4	0,557	0,571	0,477
1,28	0,4	0,544	0,557	0,504	1,28	0,4	0,506	0,520	0,450
1,32	0,4	0,574	0,599	0,529	1,32	0,4	0,480	0,496	0,453
1,36	0,4	0,590	0,659	0,552	1,36	0,4	0,474	0,484	0,462
1,40	0,4	0,606	0,670	0,562	1,40	0,4	0,489	0,504	0,476
1,44	0,4	0,639	0,667	0,575	1,44	0,4	0,517	0,531	0,495
1,48	0,4	0,704	0,734	0,622	1,48	0,4	0,535	0,569	0,517

Таблиця В.8 – Результати експериментальних досліджень порозності шару зернистого матеріалу із $d_e=2,5$, $T_{вх}=20^\circ\text{C}$

$K_w=1,71$; $w_r=1,34$ м/с					$K_w=2,03$; $w_r=1,60$ м/с				
τ , с	ε_I	ε_{II}	ε_{III}	$\varepsilon_{(сеп)}$	τ , с	ε_I	ε_{II}	ε_{III}	$\varepsilon_{(сеп)}$
0,00	0,4	0,514	0,590	0,501	0,00	0,4	0,513	0,560	0,492
0,04	0,4	0,550	0,601	0,519	0,04	0,4	0,530	0,571	0,502
0,08	0,4	0,582	0,628	0,540	0,08	0,4	0,562	0,608	0,526
0,12	0,4	0,615	0,645	0,559	0,12	0,4	0,594	0,655	0,553
0,16	0,4	0,669	0,672	0,589	0,16	0,4	0,639	0,712	0,587
0,20	0,4	0,709	0,694	0,613	0,20	0,4	0,689	0,754	0,620
0,24	0,4	0,731	0,712	0,627	0,24	0,4	0,741	0,792	0,653
0,28	0,4	0,738	0,718	0,631	0,28	0,4	0,774	0,810	0,672
0,32	0,4	0,731	0,723	0,630	0,32	0,4	0,740	0,788	0,652
0,36	0,4	0,632	0,701	0,581	0,36	0,4	0,632	0,698	0,581
0,40	0,4	0,568	0,615	0,530	0,40	0,4	0,513	0,560	0,492
0,44	0,4	0,514	0,590	0,501	0,44	0,4	0,53	0,57	0,50
0,48	0,4	0,550	0,601	0,519	0,48	0,4	0,56	0,61	0,53
0,52	0,4	0,582	0,628	0,540	0,52	0,4	0,59	0,66	0,55
0,56	0,4	0,615	0,645	0,559	0,56	0,4	0,64	0,71	0,59
0,60	0,4	0,669	0,672	0,589	0,60	0,4	0,69	0,75	0,62
0,64	0,4	0,709	0,694	0,613	0,64	0,4	0,74	0,79	0,65
0,68	0,4	0,731	0,712	0,627	0,68	0,4	0,77	0,81	0,67
0,72	0,4	0,738	0,718	0,631	0,72	0,4	0,74	0,79	0,65
0,76	0,4	0,731	0,723	0,630	0,76	0,4	0,63	0,70	0,58
0,80	0,4	0,632	0,701	0,581	0,80	0,4	0,51	0,56	0,49
0,84	0,4	0,568	0,615	0,530	0,84	0,4	0,53	0,57	0,50
0,88	0,4	0,514	0,590	0,501	0,88	0,4	0,56	0,61	0,53
0,92	0,4	0,550	0,601	0,519	0,92	0,4	0,59	0,66	0,55
0,96	0,4	0,582	0,628	0,540	0,96	0,4	0,64	0,71	0,59
1,00	0,4	0,615	0,645	0,559	1,00	0,4	0,69	0,75	0,62
1,04	0,4	0,669	0,672	0,589	1,04	0,4	0,74	0,79	0,65
1,08	0,4	0,709	0,694	0,613	1,08	0,4	0,77	0,81	0,67
1,12	0,4	0,731	0,712	0,627	1,12	0,4	0,74	0,79	0,65
1,16	0,4	0,738	0,718	0,631	1,16	0,4	0,63	0,70	0,58
1,20	0,4	0,731	0,723	0,630	1,20	0,4	0,51	0,56	0,49
1,24	0,4	0,632	0,701	0,581	1,24	0,4	0,53	0,57	0,50
1,28	0,4	0,568	0,615	0,530	1,28	0,4	0,56	0,61	0,53
1,32	0,4	0,534	0,590	0,509	1,32	0,4	0,59	0,66	0,55
1,36	0,4	0,570	0,601	0,528	1,36	0,4	0,64	0,71	0,59
1,40	0,4	0,602	0,628	0,549	1,40	0,4	0,69	0,75	0,62
1,44	0,4	0,685	0,645	0,589	1,44	0,4	0,74	0,79	0,65
1,48	0,4	0,718	0,672	0,610	1,48	0,4	0,77	0,81	0,67

Таблиця В.9 – Результати експериментальних досліджень порозності шару зернистого матеріалу із $d_e=1,5$, $T_{вх}=20^\circ\text{C}$

$K_w=2,17; w_r=1,01$ м/с					$K_w=2,66; w_r=1,24$ м/с				
$\tau, \text{с}$	ε_I	ε_{II}	ε_{III}	$\varepsilon_{(сеп)}$	$\tau, \text{с}$	ε_I	ε_{II}	ε_{III}	$\varepsilon_{(сеп)}$
0,00	0,4	0,521	0,559	0,495	0,00	0,4	0,574	0,581	0,524
0,04	0,4	0,541	0,571	0,507	0,04	0,4	0,582	0,601	0,533
0,08	0,4	0,562	0,598	0,523	0,08	0,4	0,612	0,648	0,558
0,12	0,4	0,624	0,655	0,566	0,12	0,4	0,674	0,705	0,601
0,16	0,4	0,660	0,692	0,591	0,16	0,4	0,730	0,752	0,637
0,20	0,4	0,709	0,744	0,626	0,20	0,4	0,759	0,804	0,664
0,24	0,4	0,751	0,782	0,655	0,24	0,4	0,787	0,815	0,679
0,28	0,4	0,754	0,783	0,656	0,28	0,4	0,671	0,708	0,600
0,32	0,4	0,601	0,638	0,551	0,32	0,4	0,574	0,581	0,524
0,36	0,4	0,521	0,559	0,495	0,36	0,4	0,574	0,601	0,529
0,40	0,4	0,541	0,571	0,507	0,40	0,4	0,582	0,648	0,533
0,44	0,4	0,562	0,598	0,523	0,44	0,4	0,612	0,705	0,558
0,48	0,4	0,624	0,655	0,566	0,48	0,4	0,674	0,752	0,601
0,52	0,4	0,660	0,692	0,591	0,52	0,4	0,730	0,804	0,637
0,56	0,4	0,709	0,744	0,626	0,56	0,4	0,759	0,815	0,664
0,60	0,4	0,751	0,782	0,655	0,60	0,4	0,787	0,708	0,679
0,64	0,4	0,754	0,783	0,656	0,64	0,4	0,671	0,581	0,600
0,68	0,4	0,601	0,638	0,551	0,68	0,4	0,574	0,601	0,524
0,72	0,4	0,521	0,559	0,495	0,72	0,4	0,574	0,648	0,529
0,76	0,4	0,541	0,571	0,507	0,76	0,4	0,582	0,705	0,533
0,80	0,4	0,562	0,598	0,523	0,80	0,4	0,612	0,752	0,558
0,84	0,4	0,624	0,655	0,566	0,84	0,4	0,674	0,804	0,601
0,88	0,4	0,660	0,692	0,591	0,88	0,4	0,730	0,815	0,637
0,92	0,4	0,709	0,744	0,626	0,92	0,4	0,759	0,708	0,664
0,96	0,4	0,751	0,782	0,655	0,96	0,4	0,787	0,581	0,679
1,00	0,4	0,754	0,783	0,656	1,00	0,4	0,671	0,601	0,600
1,04	0,4	0,601	0,638	0,551	1,04	0,4	0,574	0,648	0,524
1,08	0,4	0,521	0,559	0,495	1,08	0,4	0,574	0,705	0,529
1,12	0,4	0,541	0,571	0,507	1,12	0,4	0,582	0,752	0,533
1,16	0,4	0,562	0,598	0,523	1,16	0,4	0,612	0,804	0,558
1,20	0,4	0,624	0,655	0,566	1,20	0,4	0,674	0,815	0,601
1,24	0,4	0,660	0,692	0,591	1,24	0,4	0,730	0,708	0,637
1,28	0,4	0,709	0,744	0,626	1,28	0,4	0,759	0,581	0,664
1,32	0,4	0,751	0,782	0,655	1,32	0,4	0,787	0,601	0,679

ДОДАТОК Г.
ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ДИНАМІЧНОЇ ЯКОСТІ ГІДРОДИНАМІКИ
У ГРАНУЛЯТОРІ ІЗ ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ ПРИ
НЕОДНОРІДНОМУ ПСЕВДОЗРІДЖЕННІ У АВТОКОЛИВАЛЬНОМУ
РЕЖИМІ

$$d_e := 1.7$$

$$t_g := 20$$

$$\rho_t := 1450$$

$$w_r := 1.24$$

$$\rho_g := 1.293 \cdot \frac{273}{273 + t_g} = 1.205$$

$$v_g := t_g \cdot 1.064 \cdot 10^{-7} + 1.258 \cdot 10^{-5} = 1.471 \times 10^{-5}$$

$$Ar := \frac{9.81 \cdot (d_e \cdot 10^{-3})^3 \cdot (\rho_t - \rho_g)}{v_g^2 \cdot \rho_g} = 2.679 \times 10^5$$

$$Re_{kr} := \frac{Ar}{1400 + 5.22 \cdot \sqrt{Ar}} = 65.317$$

$$w_{kr} := \frac{Re_{kr} \cdot v_g}{(d_e \cdot 10^{-3})} = 0.565$$

$$K_w := \frac{w_r}{w_{kr}} = 2.194$$

$$K_{wmin} := -0.41 \cdot \ln\left(\frac{F_{gr}}{F_{sch}}\right) - 0.6804 = 1.962$$

$$K_{wmax} := -0.553 \cdot \ln\left(\frac{F_{gr}}{F_{sch}}\right) - 1.1736 = 2.391$$

$$w_{min} := K_{wmin} \cdot w_{kr} = 1.109$$

$$w_{max} := K_{wmax} \cdot w_{kr} = 1.351$$

$$krok := 0.01$$

$$w := w_{min}, w_{min} + krok .. w_{max}$$

$$V_{sec}(w) := w \cdot F_a$$

$$w_{sch}(w) := \frac{V_{sec}(w)}{F_{sch}}$$

$$K_{wi}(w) := \frac{w}{w_{kr}}$$

Індекс перемішування:

$$J_{\Delta P}(w) := \left(91.944 \cdot \frac{F_{gr}}{F_{sch}} + 0.3247\right) \cdot K_w(w) - 38.554 \cdot \left(\frac{F_{gr}}{F_{sch}}\right)^{0.7666}$$

$$A := 0.3$$

$$B := 0.11$$

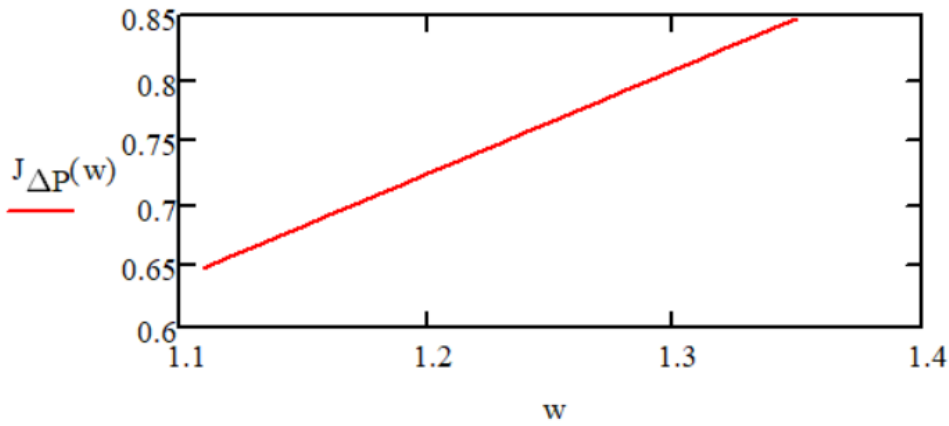
$$F_a := A \cdot B = 0.033$$

$$h_1 := 11 \cdot 10^{-3} \quad h_2 := 6 \cdot 10^{-3}$$

$$B_1 := 0.636 \cdot B = 0.07 \quad B_2 := B = 0.11$$

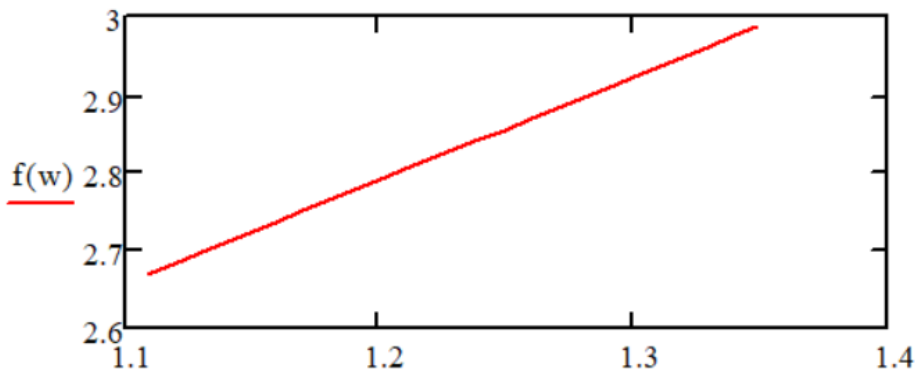
$$F_{sch} := h_1 \cdot B_1 + h_2 \cdot B_2 = 1.43 \times 10^{-3}$$

$$F_{gr} := \frac{3.14 \cdot (d_e \cdot 10^{-3})^2}{4} = 2.269 \times 10^{-6}$$



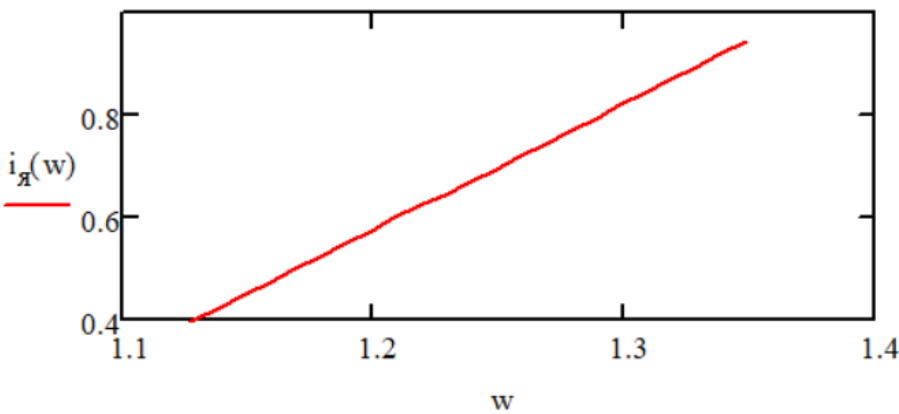
Частота пульсацій:

$$f(w) := 0.4523 \cdot \left(\frac{F_{gr}}{F_{sch}} \right)^{-0.077} \cdot K_w(w) + 1.3106 \cdot e^{-48.87 \cdot \left(\frac{F_{gr}}{F_{sch}} \right)}$$



Індекс динамічної якості іродинаміки:

$$i_{\text{Я}}(w) := \left[298.16 \cdot \left(\frac{F_{gr}}{F_{sch}} \right) + 0.9187 \right] \cdot K_w(w) - \left[237.4 \cdot \left(\frac{F_{gr}}{F_{sch}} \right) + 2.003 \right]$$



ДОДАТОК Г.
ПРОГРАМА РОЗВ'ЯЗКУ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ
НЕОДНОРІДНОГО ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ У АВТОКОЛИВАЛЬНОМУ
РЕЖИМІ

$$\begin{aligned}
1 \quad \Delta P_{d,1} &:= 320 & \tau_{st,1.1} &:= 0.25 \cdot \tau_{u,1} = 0.15 \\
2 \quad \tau_{u,1} &\equiv 0.6 & \tau_{st,2.1} &:= 0.5 \cdot \tau_{u,1} = 0.3 \\
3 \quad \varepsilon_{ser,min,1} &:= 0.45 & \tau_{st,3.1} &:= 0.75 \cdot \tau_{u,1} = 0.45 \\
4 \quad \varepsilon_{ser,max,1} &:= 0.64 & \tau_{st,4.1} &:= \tau_{u,1} = 0.6 \\
5 \quad \varepsilon_{3,min,1} &:= 0.49 \\
6 \quad \varepsilon_{3,max,1} &:= 0.785 \\
7 \quad d_e &\equiv 4.0 \cdot 10^{-3} \\
8 \quad t &\equiv 0.001 \\
9 \quad n_{max} &\equiv 4 \\
10 \quad t_{puls} &\equiv 1 \\
11 \quad t_{rob} &\equiv 20 \\
12 \quad T_0 &\equiv 273 \\
13 \quad A &\equiv 0.3 \\
14 \quad B &\equiv 0.11 \\
15 \quad H_0 &\equiv 0.32 \\
16 \quad V_1 &\equiv 0.024432 \cdot B \\
17 \quad V_2 &\equiv 0.035336 \cdot B \\
18 \quad V_3 &\equiv 0.022082 \cdot B \\
19 \quad \varepsilon_0 &\equiv 0.4 \\
20 \quad \rho_t &\equiv 1450 \\
21 \quad g &\equiv 9.81 \\
22 \quad f_g &\equiv 0.05857 \\
23 \quad V_0 &\equiv V_1 + V_2 + V_3 = 9.004 \times 10^{-3} \\
24 \quad \rho_g &\equiv 1.293 \cdot \frac{T_0}{T_0 + t_{rob}} = 1.205 \\
25 \quad v_g &\equiv t_{rob} \cdot 1.064 \cdot 10^{-7} + 1.258 \cdot 10^{-5} = 1.471 \times 10^{-5} \\
26 \quad \mu_g &\equiv v_g \cdot \rho_g = 1.772 \times 10^{-5} \\
27 \quad V_{sec,1} &:= 4.927 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\Delta P_{d,1} \cdot 9.81 \cdot (273 + 20)} = 0.047 \\
28 \quad K_a &\equiv \frac{V_0}{A \cdot B \cdot H_0} = 0.853 \\
29 \quad D_a &\equiv \frac{4 \cdot A \cdot B}{2 \cdot (A + B)} = 0.161 \\
30 \quad Ar &\equiv \frac{g \cdot d_e^3 \cdot (\rho_t - \rho_g)}{v_g^2 \cdot \rho_g} = 3.49 \times 10^6
\end{aligned}$$

$$31 \quad Re_{kr} \equiv \frac{Ar}{1400 + 5.22 \cdot \sqrt{Ar}} = 312.967$$

$$32 \quad w_{kr} \equiv \frac{Re_{kr} \cdot v_g}{d_e} = 1.151$$

$$33 \quad A_1 \equiv \frac{\varepsilon_{ser,max.1} - \varepsilon_{ser,min.1}}{2} = 0.095$$

$$34 \quad A_{3,1} \equiv \frac{\varepsilon_{3,max.1} - \varepsilon_{3,min.1}}{2} = 0.148$$

$$35 \quad K_{zdv} \equiv \frac{5 \cdot 3.14}{10} = 1.57$$

$$36 \quad n_1 := 1 \quad n_2 := 2$$

$$37 \quad \tau_{1,1} := \tau_{u,1} \cdot (n_1 - 1), \left[\tau_{u,1} \cdot (n_1 - 1) \right] + t \cdot \left[0.75 \cdot \tau_{u,1} + \tau_{u,1} \cdot (n_1 - 1) \right]$$

$$\tau_{3,1} := \tau_{u,1} \cdot (n_2 - 1), \left[\tau_{u,1} \cdot (n_2 - 1) \right] + t \cdot \left[0.75 \cdot \tau_{u,1} + \tau_{u,1} \cdot (n_2 - 1) \right]$$

$$38 \quad \tau_{2,1} := 0.75 \cdot \tau_{u,1} + \tau_{u,1} \cdot (n_1 - 1), \left[0.75 \cdot \tau_{u,1} + \tau_{u,1} \cdot (n_1 - 1) \right] + t \cdot \left[\tau_{u,1} + \tau_{u,1} \cdot (n_1 - 1) \right]$$

$$\tau_{4,1} := 0.75 \cdot \tau_{u,1} + \tau_{u,1} \cdot (n_2 - 1), \left[0.75 \cdot \tau_{u,1} + \tau_{u,1} \cdot (n_2 - 1) \right] + t \cdot \left[\tau_{u,1} + \tau_{u,1} \cdot (n_2 - 1) \right]$$

$$39 \quad T_{1,1} := 1.5 \cdot \tau_{u,1} = 0.9 \quad T_{3,1} := 1.5 \cdot \tau_{u,1} = 0.9$$

$$T_{2,1} := 0.5 \cdot \tau_{u,1} = 0.3 \quad T_{4,1} := 0.5 \cdot \tau_{u,1} = 0.3$$

$$40 \quad \varepsilon_{ser.1,1}(\tau_{1,1}) := \varepsilon_{ser,min.1} + A_1 + A_1 \cdot \sin \left[\frac{2 \cdot \pi}{T_{1,1}} \cdot \left[\tau_{1,1} - \tau_{u,1} \cdot (n_1 - 1) \right] - K_{zdv} \right]$$

$$\varepsilon_{ser.2,1}(\tau_{2,1}) := \varepsilon_{ser,min.1} + A_1 + A_1 \cdot \sin \left[\frac{2 \cdot \pi}{T_{2,1}} \cdot \left[\tau_{2,1} - \tau_{u,1} \cdot (n_1 - 1) \right] - K_{zdv} \right]$$

$$\varepsilon_{ser.3,1}(\tau_{3,1}) := \varepsilon_{ser,min.1} + A_1 + A_1 \cdot \sin \left[\frac{2 \cdot \pi}{T_{3,1}} \cdot \left[\tau_{3,1} - \tau_{u,1} \cdot (n_2 - 1) \right] - K_{zdv} \right]$$

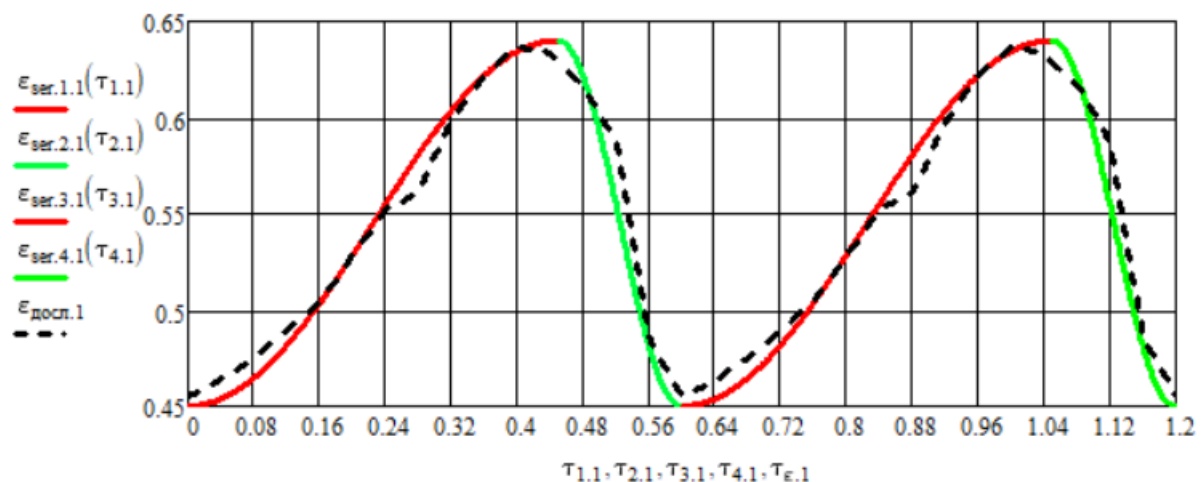
$$\varepsilon_{ser.4,1}(\tau_{4,1}) := \varepsilon_{ser,min.1} + A_1 + A_1 \cdot \sin \left[\frac{2 \cdot \pi}{T_{4,1}} \cdot \left[\tau_{4,1} - \tau_{u,1} \cdot (n_2 - 1) \right] - K_{zdv} \right]$$

$\tau_{e,1} :=$

$\varepsilon_{досл.1} :=$

... \0.00 Час (0.04).xlsx

З...\0,01 Порозн. сер.xlsx



$$41 \quad \varepsilon_{3.1.1}(\tau_{1.1}) := \varepsilon_{3.\min.1} + A_{3.1} + A_{3.1} \cdot \sin\left[\frac{2 \cdot \pi}{T_{1.1}} \cdot [\tau_{1.1} - \tau_{u.1} \cdot (n_1 - 1)] - K_{2dv}\right]$$

$$\varepsilon_{3.2.1}(\tau_{2.1}) := \varepsilon_{3.\min.1} + A_{3.1} + A_{3.1} \cdot \sin\left[\frac{2 \cdot \pi}{T_{2.1}} \cdot [\tau_{2.1} - \tau_{u.1} \cdot (n_1 - 1)] - K_{2dv}\right]$$

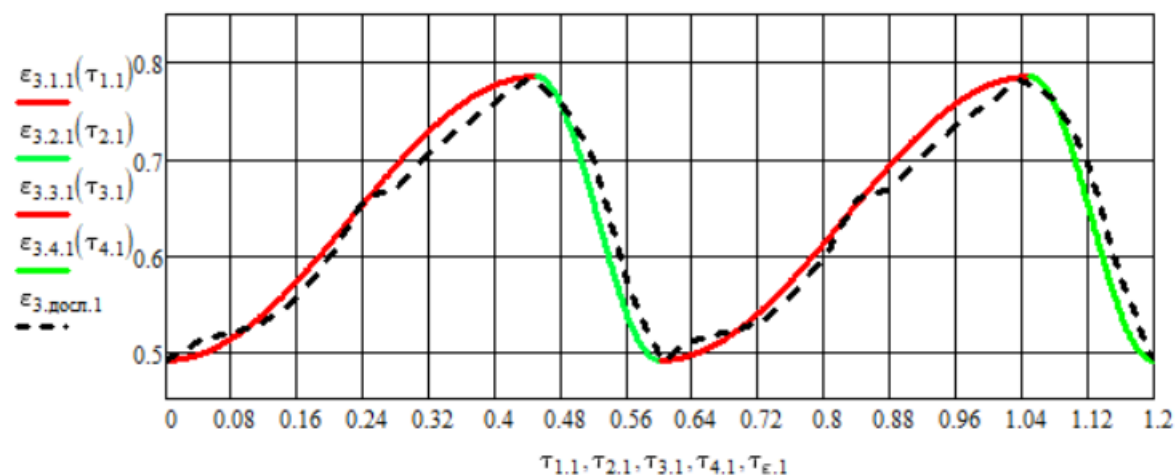
$$\varepsilon_{3.3.1}(\tau_{3.1}) := \varepsilon_{3.\min.1} + A_{3.1} + A_{3.1} \cdot \sin\left[\frac{2 \cdot \pi}{T_{3.1}} \cdot [\tau_{3.1} - \tau_{u.1} \cdot (n_2 - 1)] - K_{2dv}\right]$$

$$\varepsilon_{3.4.1}(\tau_{4.1}) := \varepsilon_{3.\min.1} + A_{3.1} + A_{3.1} \cdot \sin\left[\frac{2 \cdot \pi}{T_{4.1}} \cdot [\tau_{4.1} - \tau_{u.1} \cdot (n_2 - 1)] - K_{2dv}\right]$$

$\varepsilon_{3.\text{досл.1}} :=$



З...Ю.02 Порозн. 3.xlsx



$$42 \quad \varepsilon_{2.1.1}(\tau_{1.1}) := \frac{\varepsilon_{\text{сер.1.1}}(\tau_{1.1}) \cdot V_0 - \varepsilon_0 \cdot V_1 - \varepsilon_{3.1.1}(\tau_{1.1}) \cdot V_3}{V_2}$$

$$\varepsilon_{2.2.1}(\tau_{2.1}) := \frac{\varepsilon_{\text{сер.2.1}}(\tau_{2.1}) \cdot V_0 - \varepsilon_0 \cdot V_1 - \varepsilon_{3.2.1}(\tau_{2.1}) \cdot V_3}{V_2}$$

$$\varepsilon_{2.3.1}(\tau_{3.1}) := \frac{\varepsilon_{\text{сер.3.1}}(\tau_{3.1}) \cdot V_0 - \varepsilon_0 \cdot V_1 - \varepsilon_{3.3.1}(\tau_{3.1}) \cdot V_3}{V_2}$$

$$\varepsilon_{2.4.1}(\tau_{4.1}) := \frac{\varepsilon_{\text{сер.4.1}}(\tau_{4.1}) \cdot V_0 - \varepsilon_0 \cdot V_1 - \varepsilon_{3.4.1}(\tau_{4.1}) \cdot V_3}{V_2}$$

$$\varepsilon_{2.1.1}(0.0 \cdot \tau_{u.1}) = 0.46$$

$$\varepsilon_{2.1.1}(0.75 \cdot \tau_{u.1}) = 0.715$$

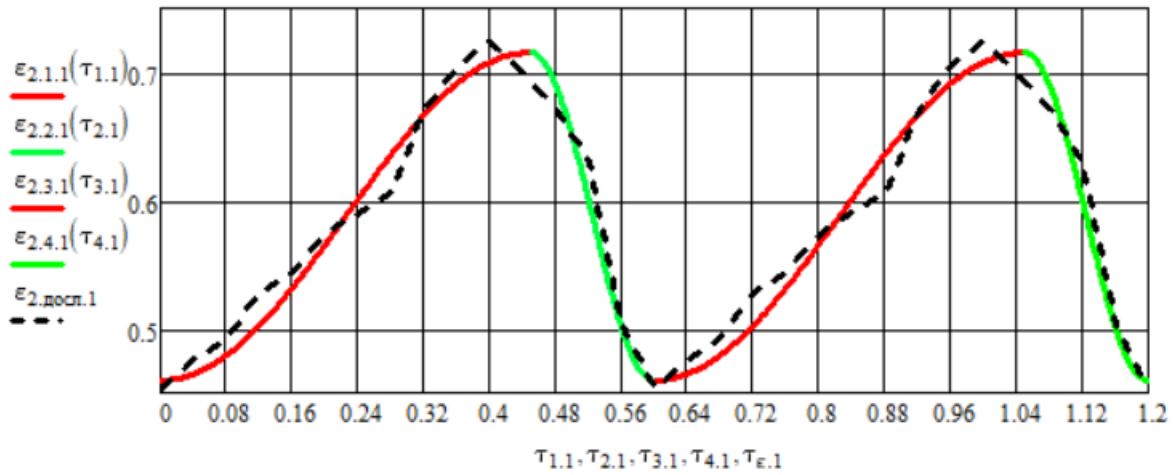
$$\varepsilon_{2.1.2}(0.0 \cdot \tau_{u.2}) = 0.472$$

$$\varepsilon_{2.1.2}(0.75 \cdot \tau_{u.2}) = 0.736$$

$\varepsilon_{2.\text{досл.1}} :=$



З...Ю.03 Порозн. 2.xlsx

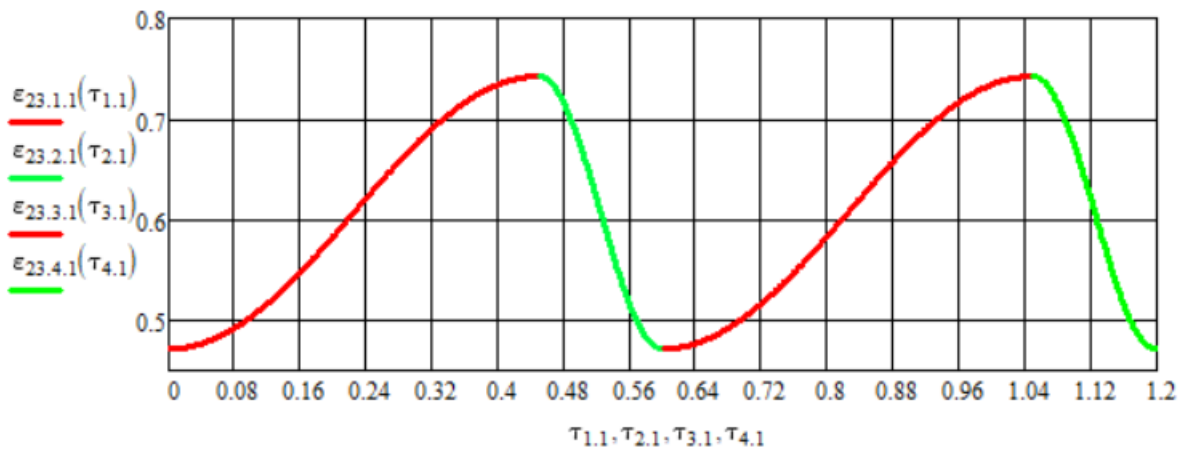


$$43 \quad \varepsilon_{23.1.1}(\tau_{1.1}) := \frac{\varepsilon_{2.1.1}(\tau_{1.1}) \cdot V_2 + \varepsilon_{3.1.1}(\tau_{1.1}) \cdot V_3}{V_2 + V_3}$$

$$\varepsilon_{23.2.1}(\tau_{2.1}) := \frac{\varepsilon_{2.2.1}(\tau_{2.1}) \cdot V_2 + \varepsilon_{3.2.1}(\tau_{2.1}) \cdot V_3}{V_2 + V_3}$$

$$\varepsilon_{23.3.1}(\tau_{3.1}) := \frac{\varepsilon_{2.3.1}(\tau_{3.1}) \cdot V_2 + \varepsilon_{3.3.1}(\tau_{3.1}) \cdot V_3}{V_2 + V_3}$$

$$\varepsilon_{23.4.1}(\tau_{4.1}) := \frac{\varepsilon_{2.4.1}(\tau_{4.1}) \cdot V_2 + \varepsilon_{3.4.1}(\tau_{4.1}) \cdot V_3}{V_2 + V_3}$$

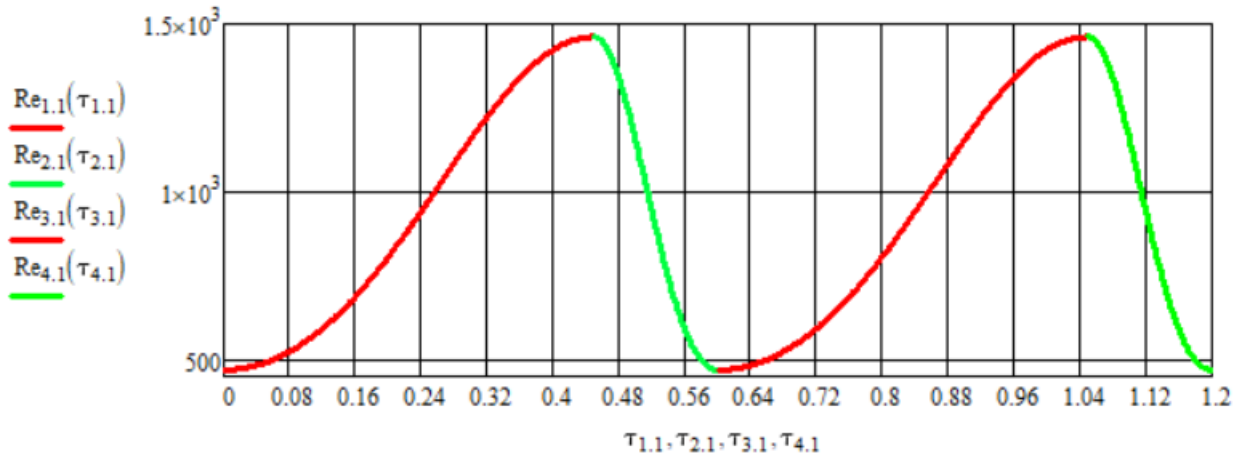


$$44 \quad \text{Re}_{1.1}(\tau_{1.1}) := \frac{\text{Ar} \cdot \varepsilon_{23.1.1}(\tau_{1.1})^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{\text{Ar} \cdot \varepsilon_{23.1.1}(\tau_{1.1})^{4.75}}}$$

$$\text{Re}_{2.1}(\tau_{2.1}) := \frac{\text{Ar} \cdot \varepsilon_{23.2.1}(\tau_{2.1})^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{\text{Ar} \cdot \varepsilon_{23.2.1}(\tau_{2.1})^{4.75}}}$$

$$\text{Re}_{3.1}(\tau_{3.1}) := \frac{\text{Ar} \cdot \varepsilon_{23.3.1}(\tau_{3.1})^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{\text{Ar} \cdot \varepsilon_{23.3.1}(\tau_{3.1})^{4.75}}}$$

$$\text{Re}_{4.1}(\tau_{4.1}) := \frac{\text{Ar} \cdot \varepsilon_{23.4.1}(\tau_{4.1})^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{\text{Ar} \cdot \varepsilon_{23.4.1}(\tau_{4.1})^{4.75}}}$$

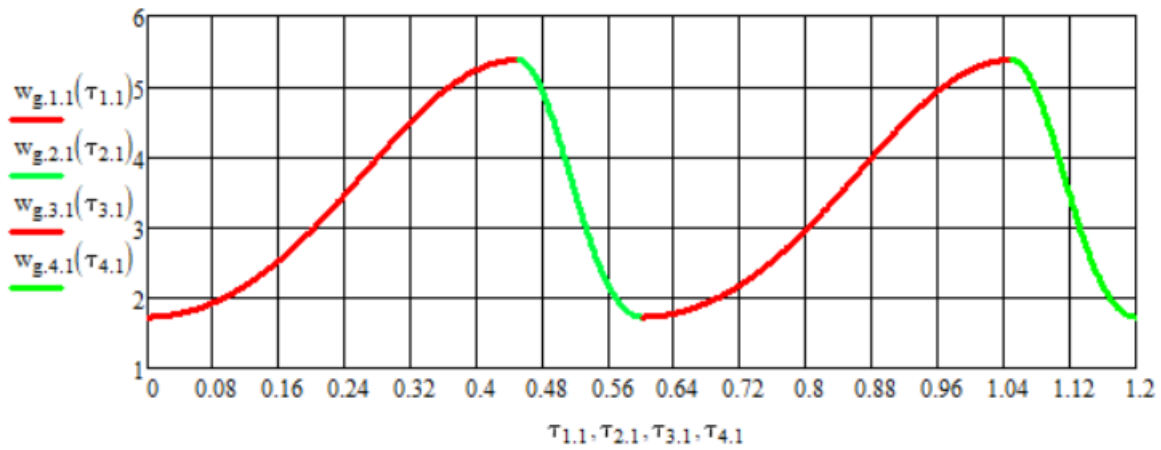


$$45 \quad w_{g,1.1}(\tau_{1.1}) := \frac{Re_{1.1}(\tau_{1.1}) \cdot u_g}{d_g}$$

$$w_{g,2.1}(\tau_{2.1}) := \frac{Re_{2.1}(\tau_{2.1}) \cdot u_g}{d_g}$$

$$w_{g,3.1}(\tau_{3.1}) := \frac{Re_{3.1}(\tau_{3.1}) \cdot u_g}{d_g}$$

$$w_{g,4.1}(\tau_{4.1}) := \frac{Re_{4.1}(\tau_{4.1}) \cdot u_g}{d_g}$$

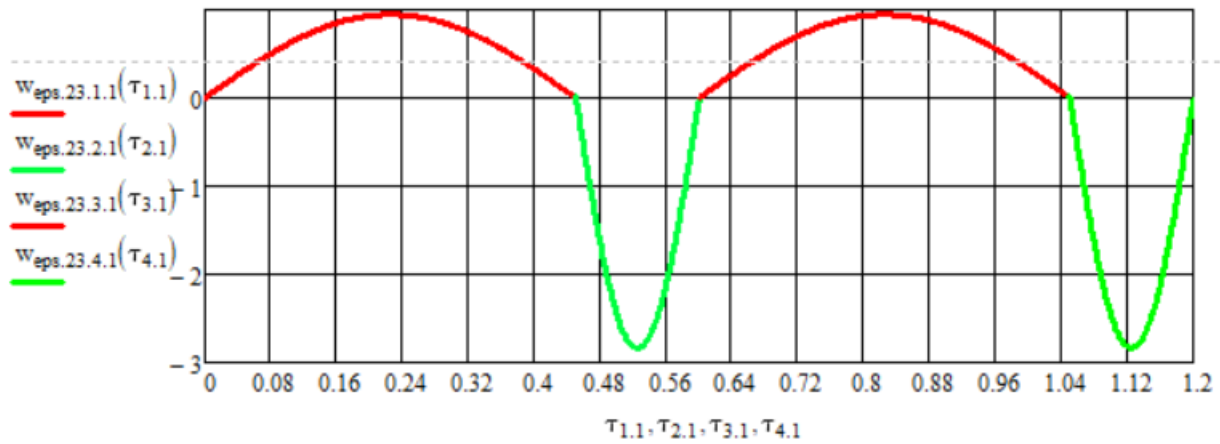


$$46 \quad w_{eps,23.1.1}(\tau_{1.1}) := \frac{\epsilon_{23.1.1}(\tau_{1.1}) - \epsilon_{23.1.1}(\tau_{1.1} - t)}{t}$$

$$w_{eps,23.2.1}(\tau_{2.1}) := \frac{\epsilon_{23.2.1}(\tau_{2.1}) - \epsilon_{23.2.1}(\tau_{2.1} - t)}{t}$$

$$w_{eps,23.3.1}(\tau_{3.1}) := \frac{\epsilon_{23.3.1}(\tau_{3.1}) - \epsilon_{23.3.1}(\tau_{3.1} - t)}{t}$$

$$w_{eps,23.4.1}(\tau_{4.1}) := \frac{\epsilon_{23.4.1}(\tau_{4.1}) - \epsilon_{23.4.1}(\tau_{4.1} - t)}{t}$$



$$47 \quad K_{\Delta} := 0.875$$

$$48 \quad \Delta h_{\max,1} := \frac{3 \cdot K_a \cdot K_{\Delta} \cdot H_0 \cdot (\epsilon_{\text{ser},1,1}(0.75 \cdot \tau_{u,1}) - \epsilon_0)}{(1 - \epsilon_0)} = 0.286$$

$$49 \quad w_{zs,1} := \frac{\Delta h_{\max,1}}{(0.25 \cdot \tau_{u,1})} = 1.91$$

$$50 \quad \tau_{K,1} := 0.5 \cdot \tau_{u,1} - \frac{0.5 \cdot \tau_{u,1}}{4} = 0.225$$

$$K_{\text{eps},1} := w_{zs,1} - w_{\text{eps},23,1,1}(\tau_{K,1}) = 0.964$$

$$51 \quad w_{t,1,1}(\tau_{1,1}) := K_{\text{eps},1} + w_{\text{eps},23,1,1}(\tau_{1,1})$$

$$w_{t,2,1} := w_{zs,1}$$

$$w_{t,3,1}(\tau_{3,1}) := K_{\text{eps},1} + w_{\text{eps},23,3,1}(\tau_{3,1})$$

$$w_{t,4,1} := w_{zs,1}$$

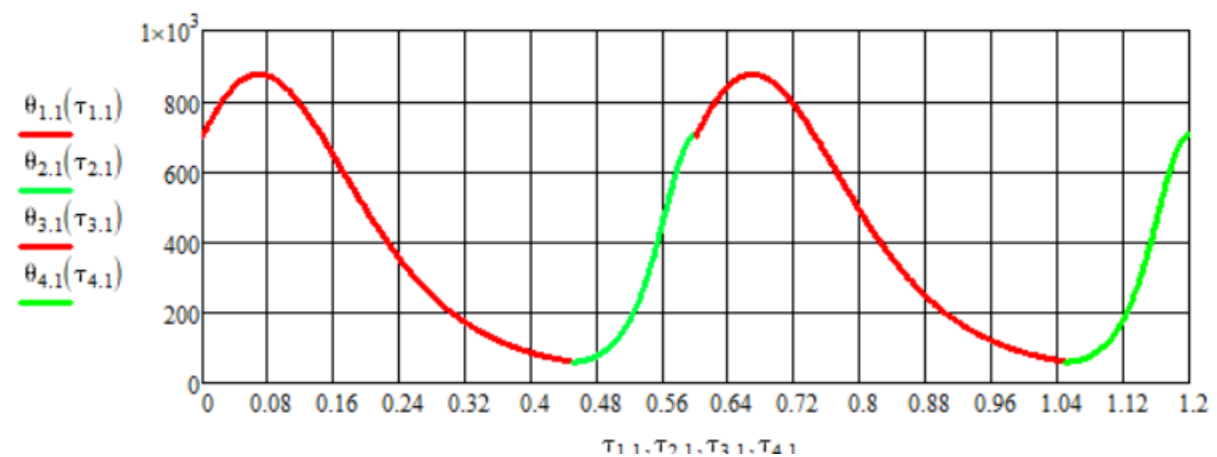
$$51 \quad K_{zs,1} := w_{zs,1} - w_{t,1,1}(0.75 \cdot \tau_{u,1}) = 0.943$$

$$52 \quad \theta_{1,1}(\tau_{1,1}) := \frac{(1 - \epsilon_{3,1,1}(\tau_{1,1})) \cdot \rho_t \cdot w_{t,1,1}(\tau_{1,1})}{\epsilon_{3,1,1}(\tau_{1,1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g,1,1}(\tau_{1,1})}$$

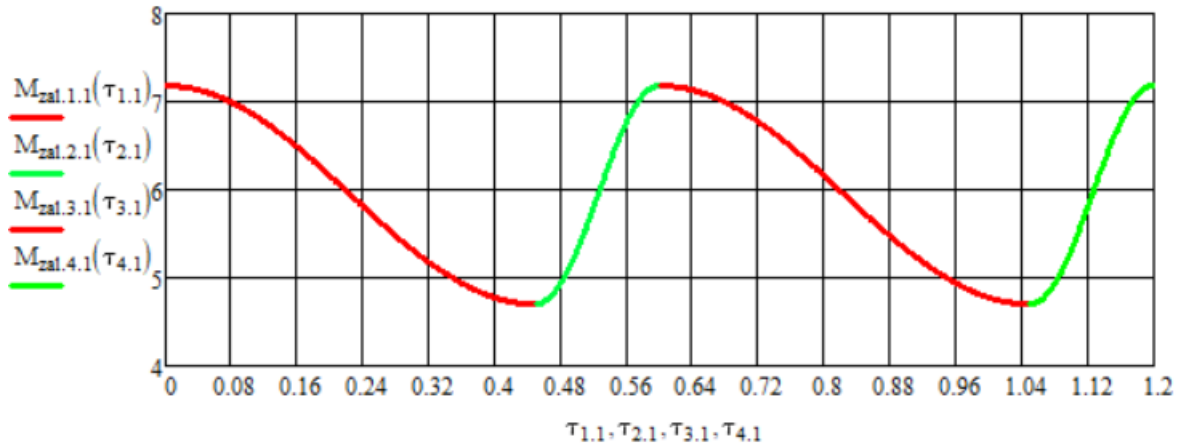
$$\theta_{2,1}(\tau_{2,1}) := \frac{(1 - \epsilon_{3,2,1}(\tau_{2,1})) \cdot \rho_t \cdot (w_{t,2,1} - K_{zs,1})}{\epsilon_{3,2,1}(\tau_{2,1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g,2,1}(\tau_{2,1})}$$

$$\theta_{3,1}(\tau_{3,1}) := \frac{(1 - \epsilon_{3,3,1}(\tau_{3,1})) \cdot \rho_t \cdot w_{t,3,1}(\tau_{3,1})}{\epsilon_{3,3,1}(\tau_{3,1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g,3,1}(\tau_{3,1})}$$

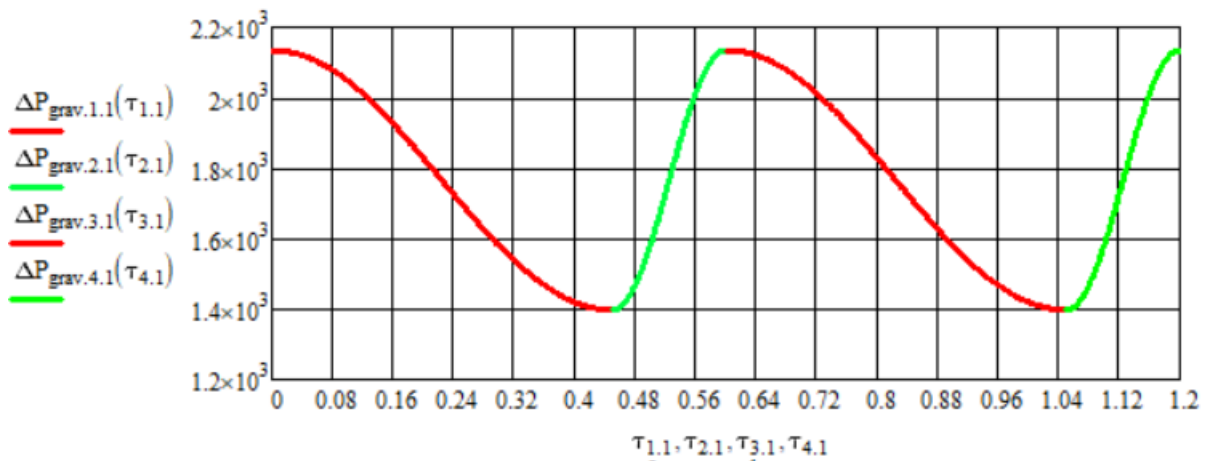
$$\theta_{4,1}(\tau_{4,1}) := \frac{(1 - \epsilon_{3,4,1}(\tau_{4,1})) \cdot \rho_t \cdot (w_{t,4,1} - K_{zs,1})}{\epsilon_{3,4,1}(\tau_{4,1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g,4,1}(\tau_{4,1})}$$



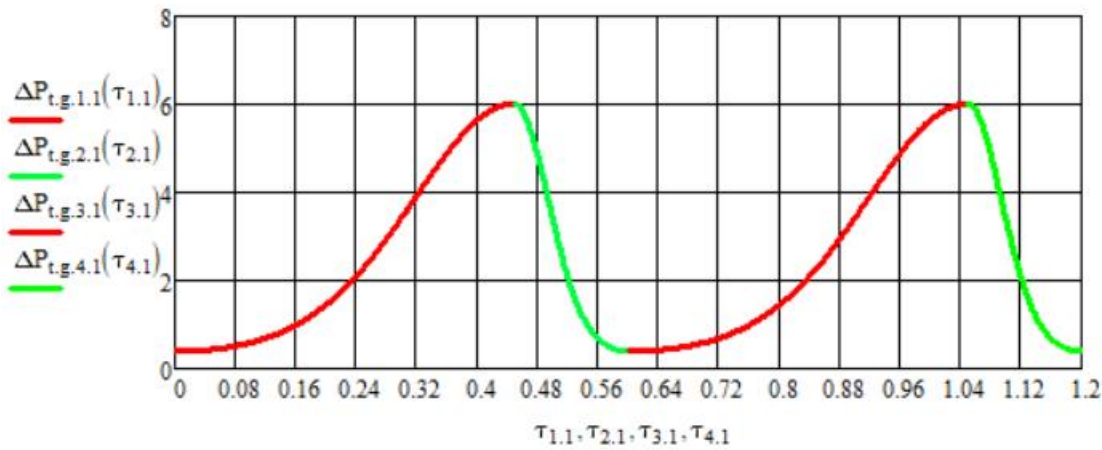
$$\begin{aligned}
 53 \quad M_{zal.1.1}(\tau_{1.1}) &:= V_0 \cdot (1 - \varepsilon_{ser.1.1}(\tau_{1.1})) \cdot \rho_t \\
 M_{zal.2.1}(\tau_{2.1}) &:= V_0 \cdot (1 - \varepsilon_{ser.2.1}(\tau_{2.1})) \cdot \rho_t \\
 M_{zal.3.1}(\tau_{3.1}) &:= V_0 \cdot (1 - \varepsilon_{ser.3.1}(\tau_{3.1})) \cdot \rho_t \\
 M_{zal.4.1}(\tau_{4.1}) &:= V_0 \cdot (1 - \varepsilon_{ser.4.1}(\tau_{4.1})) \cdot \rho_t
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 54 \quad \Delta P_{grav.1.1}(\tau_{1.1}) &:= \frac{M_{zal.1.1}(\tau_{1.1}) \cdot g}{A \cdot B} \\
 \Delta P_{grav.2.1}(\tau_{2.1}) &:= \frac{M_{zal.2.1}(\tau_{2.1}) \cdot g}{A \cdot B} \\
 \Delta P_{grav.3.1}(\tau_{3.1}) &:= \frac{M_{zal.3.1}(\tau_{3.1}) \cdot g}{A \cdot B} \\
 \Delta P_{grav.4.1}(\tau_{4.1}) &:= \frac{M_{zal.4.1}(\tau_{4.1}) \cdot g}{A \cdot B}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 55 \quad \Delta P_{t.g.1.1}(\tau_{1.1}) &:= 2 \cdot f_g \cdot \varepsilon_{23.1.1}(\tau_{1.1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g.1.1}(\tau_{1.1})^2 \cdot H_0 \cdot \frac{1}{D_a} \\
 \Delta P_{t.g.2.1}(\tau_{2.1}) &:= 2 \cdot f_g \cdot \varepsilon_{23.2.1}(\tau_{2.1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g.2.1}(\tau_{2.1})^2 \cdot H_0 \cdot \frac{1}{D_a} \\
 \Delta P_{t.g.3.1}(\tau_{3.1}) &:= 2 \cdot f_g \cdot \varepsilon_{23.3.1}(\tau_{3.1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g.3.1}(\tau_{3.1})^2 \cdot H_0 \cdot \frac{1}{D_a} \\
 \Delta P_{t.g.4.1}(\tau_{4.1}) &:= 2 \cdot f_g \cdot \varepsilon_{23.4.1}(\tau_{4.1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g.4.1}(\tau_{4.1})^2 \cdot H_0 \cdot \frac{1}{D_a}
 \end{aligned}$$

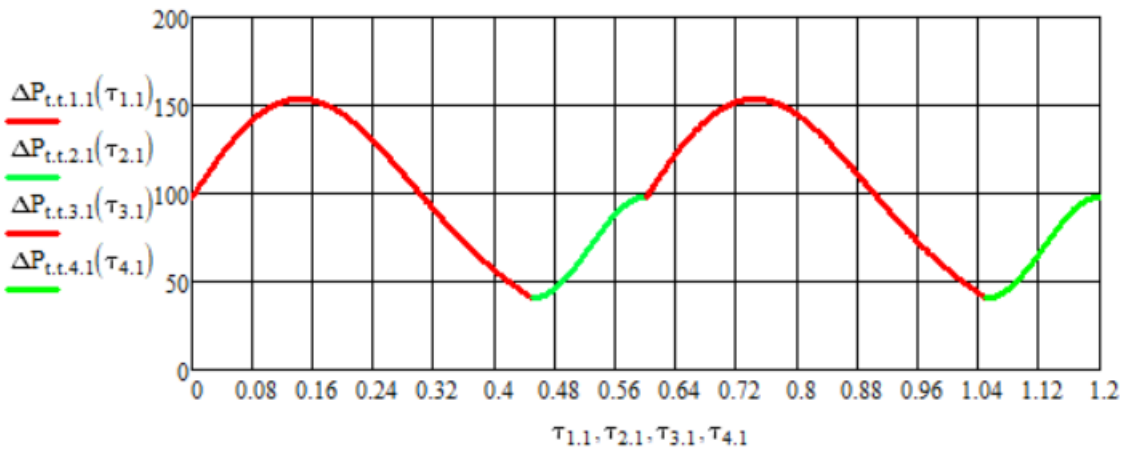


$$56 \quad \Delta P_{t,t,1,1}(\tau_{1,1}) = 5.7 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{D_a} \cdot \varepsilon_{23,1,1}(\tau_{1,1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g,1,1}(\tau_{1,1}) \cdot \theta_{1,1}(\tau_{1,1}) \cdot H_0 \cdot \sqrt{g \cdot D_a}$$

$$\Delta P_{t,t,2,1}(\tau_{2,1}) = 5.7 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{D_a} \cdot \varepsilon_{23,2,1}(\tau_{2,1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g,2,1}(\tau_{2,1}) \cdot \theta_{2,1}(\tau_{2,1}) \cdot H_0 \cdot \sqrt{g \cdot D_a}$$

$$\Delta P_{t,t,3,1}(\tau_{3,1}) = 5.7 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{D_a} \cdot \varepsilon_{23,3,1}(\tau_{3,1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g,3,1}(\tau_{3,1}) \cdot \theta_{3,1}(\tau_{3,1}) \cdot H_0 \cdot \sqrt{g \cdot D_a}$$

$$\Delta P_{t,t,4,1}(\tau_{4,1}) = 5.7 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{D_a} \cdot \varepsilon_{23,4,1}(\tau_{4,1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g,4,1}(\tau_{4,1}) \cdot \theta_{4,1}(\tau_{4,1}) \cdot H_0 \cdot \sqrt{g \cdot D_a}$$

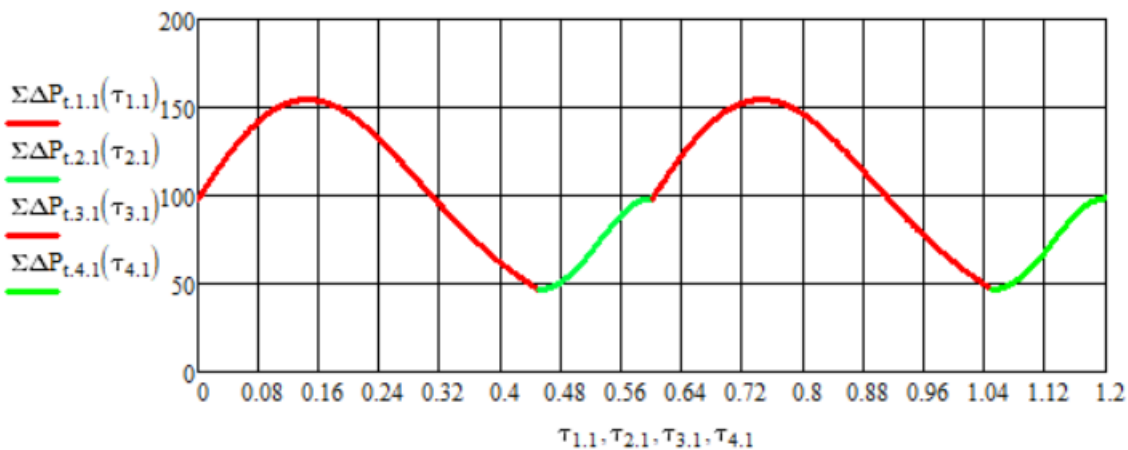


$$57 \quad \Sigma \Delta P_{t,1,1}(\tau_{1,1}) = \Delta P_{t,g,1,1}(\tau_{1,1}) + \Delta P_{t,t,1,1}(\tau_{1,1})$$

$$\Sigma \Delta P_{t,2,1}(\tau_{2,1}) = \Delta P_{t,g,2,1}(\tau_{2,1}) + \Delta P_{t,t,2,1}(\tau_{2,1})$$

$$\Sigma \Delta P_{t,3,1}(\tau_{3,1}) = \Delta P_{t,g,3,1}(\tau_{3,1}) + \Delta P_{t,t,3,1}(\tau_{3,1})$$

$$\Sigma \Delta P_{t,4,1}(\tau_{4,1}) = \Delta P_{t,g,4,1}(\tau_{4,1}) + \Delta P_{t,t,4,1}(\tau_{4,1})$$

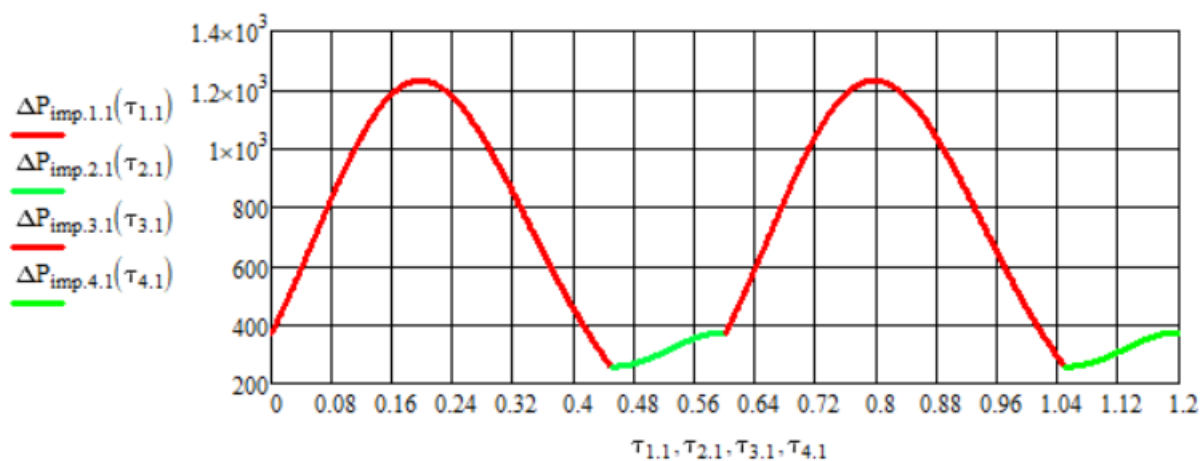


$$58 \quad \Delta P_{imp.1.1}(\tau_{1.1}) := \frac{1}{2} \cdot \left[(1 - \epsilon_{ser.1.1}(\tau_{1.1})) \cdot \rho_t \cdot w_{t.1.1}(\tau_{1.1})^2 + \epsilon_{23.1.1}(\tau_{1.1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g.1.1}(\tau_{1.1})^2 \right]$$

$$\Delta P_{imp.2.1}(\tau_{2.1}) := \frac{1}{2} \cdot \left[(1 - \epsilon_{ser.2.1}(\tau_{2.1})) \cdot \rho_t \cdot (w_{t.2.1} - K_{2s.1})^2 + \epsilon_{23.2.1}(\tau_{2.1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g.2.1}(\tau_{2.1})^2 \right]$$

$$\Delta P_{imp.3.1}(\tau_{3.1}) := \frac{1}{2} \cdot \left[(1 - \epsilon_{ser.3.1}(\tau_{3.1})) \cdot \rho_t \cdot w_{t.3.1}(\tau_{3.1})^2 + \epsilon_{23.3.1}(\tau_{3.1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g.3.1}(\tau_{3.1})^2 \right]$$

$$\Delta P_{imp.4.1}(\tau_{4.1}) := \frac{1}{2} \cdot \left[(1 - \epsilon_{ser.4.1}(\tau_{4.1})) \cdot \rho_t \cdot (w_{t.4.1} - K_{2s.1})^2 + \epsilon_{23.4.1}(\tau_{4.1}) \cdot \rho_g \cdot w_{g.4.1}(\tau_{4.1})^2 \right]$$



$$59 \quad \Delta P_{total.1.1}(\tau_{1.1}) := \Delta P_{imp.1.1}(\tau_{1.1}) + \Sigma \Delta P_{t.1.1}(\tau_{1.1}) + \Delta P_{grav.1.1}(\tau_{1.1})$$

$$\Delta P_{total.2.1}(\tau_{2.1}) := \Delta P_{imp.2.1}(\tau_{2.1}) + \Sigma \Delta P_{t.2.1}(\tau_{2.1}) + \Delta P_{grav.2.1}(\tau_{2.1})$$

$$\Delta P_{total.3.1}(\tau_{3.1}) := \Delta P_{imp.3.1}(\tau_{3.1}) + \Sigma \Delta P_{t.3.1}(\tau_{3.1}) + \Delta P_{grav.3.1}(\tau_{3.1})$$

$$\Delta P_{total.4.1}(\tau_{4.1}) := \Delta P_{imp.4.1}(\tau_{4.1}) + \Sigma \Delta P_{t.4.1}(\tau_{4.1}) + \Delta P_{grav.4.1}(\tau_{4.1})$$

 $\tau_{досл.1} :=$

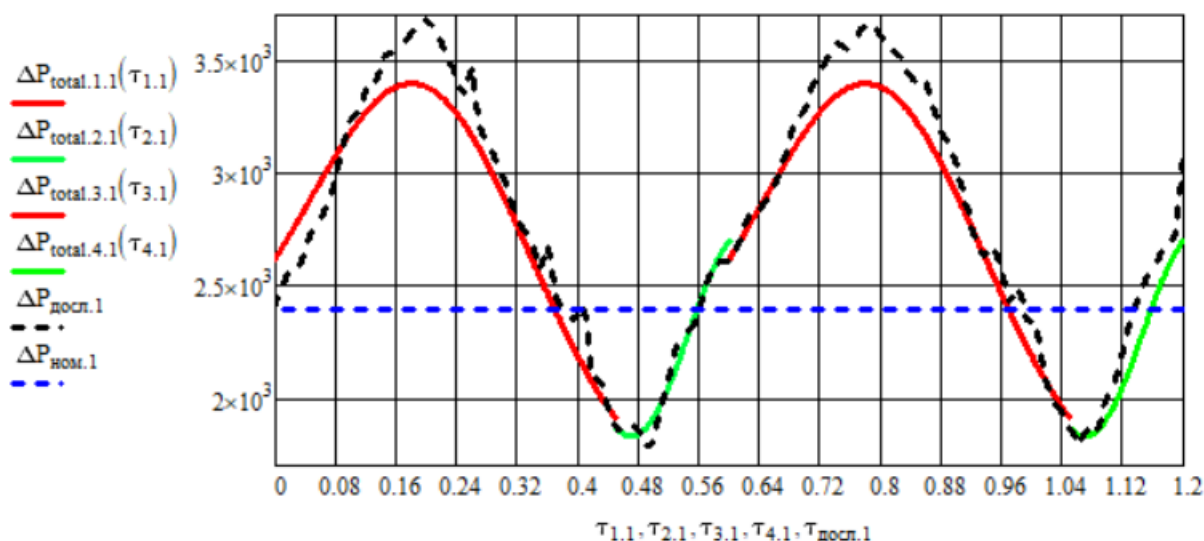

...._06 час до тиску.xlsx

 $\Delta P_{досл.1} :=$


..._07 тиск.xlsx

 $\Delta P_{ном.1} :=$


Заг...\0,06 Тиск (ном).xlsx



ДОДАТОК Д.
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КІНЕТИКИ
ПРОЦЕСУ ГРАНУЯЦІЇ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ У
ГРАНУЛЯТОРІ ІЗ ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ ПРИ
ЗАСТОСУВАННІ НЕОДНОРІДНОГО ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ У
АВТОКОЛИВАЛЬНОМУ РЕЖИМІ

Таблиця Д.1 – Результати експериментальних досліджень кінетики процесу грануляції органо-мінеральних добрив

№	Час	Температура			В'язкість газу	Густина газу		Витрати робочого розчину		
		Вх.	Ш.	Кор. різн.		роб.	в щілинах ГРП	Поч. знач.	Кінц. знач.	Витр.
	$\tau_{пр.},$ ГОД	$T_{вх.},$ С	$T_{ш.},$ °С	$\Delta T,$ °С	$\nu_{(r)},$	$\rho_{(r)ш.},$ кг/м ³	$\rho_{(r)},$ кг/м ³	$L_{поч.},$ кг	$L_{кін.},$ кг	$\Delta L,$ кг/ГОД
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,000	185,0	97,0	88,0	0,0000229	0,771	0,954	22,10	18,89	3,21
2	0,333	188,0	96,0	92,0	0,0000228	0,766	0,957	18,89	15,64	3,25
3	0,667	193,0	96,0	97,0	0,0000228	0,757	0,957	15,64	12,39	3,26
4	1,000	195,0	96,2	98,8	0,0000228	0,754	0,956	12,39	9,17	3,22
5	1,333	198,0	96,4	101,6	0,0000228	0,749	0,956	9,17	5,97	3,20
6	1,667	196,0	97,1	98,9	0,0000229	0,753	0,954	5,97	2,76	3,21
7	1,667	208,0	96,5	111,5	0,0000228	0,734	0,955	18,30	16,44	1,86
8	1,833	209,0	95,0	114,0	0,0000227	0,732	0,959	16,44	14,58	1,86
9	2,000	211,0	96,0	115,0	0,0000228	0,729	0,957	14,58	12,71	1,87
10	2,167	213,0	97,0	116,0	0,0000229	0,726	0,954	12,71	10,88	1,84
11	2,333	213,0	99,0	114,0	0,0000231	0,726	0,949	10,88	9,01	1,87
12	2,500	212,0	98,0	114,0	0,0000230	0,728	0,951	17,14	15,31	1,83
13	2,667	216,0	96,0	120,0	0,0000228	0,722	0,957	15,31	13,42	1,89
14	2,833	216,0	95,0	121,0	0,0000227	0,722	0,959	13,42	11,54	1,87
15	3,000	214,0	96,5	117,5	0,0000228	0,725	0,955	11,54	9,68	1,87
16	3,167	213,0	95,3	117,7	0,0000227	0,726	0,958	9,68	7,92	1,76
17	3,333	212,0	97,0	115,0	0,0000229	0,728	0,954	7,92	6,19	1,72
18	3,500	213,0	96,0	117,0	0,0000228	0,726	0,957	6,19	4,55	1,64
19	3,500	224,0	96,0	128,0	0,0000228	0,710	0,957	20,05	17,80	2,25
20	3,667	223,0	95,0	128,0	0,0000227	0,712	0,959	17,80	15,58	2,22
21	3,833	224,0	96,4	127,6	0,0000228	0,710	0,956	15,58	13,35	2,23
22	4,000	226,0	97,1	128,9	0,0000229	0,707	0,954	13,35	11,20	2,15
23	4,167	228,0	98,0	130,0	0,0000230	0,705	0,951	11,20	9,05	2,15
24	4,333	228,0	97,6	130,4	0,0000230	0,705	0,952	9,05	6,94	2,11
25	4,500	227,0	97,0	130,0	0,0000229	0,706	0,954	6,94	4,76	2,18
26	4,667	228,0	96,0	132,0	0,0000228	0,705	0,957	4,76	2,56	2,19
27	4,667	227,0	96,0	131,0	0,0000228	0,706	0,957	22,40	20,20	2,20
28	4,833	228,9	95,0	133,9	0,0000227	0,703	0,959	20,20	17,99	2,21
29	5,000	230,1	96,4	133,7	0,0000228	0,702	0,956	17,99	15,83	2,16
30	5,167	229,0	95,1	133,9	0,0000227	0,703	0,959	15,83	13,64	2,19
31	5,333	228,7	96,3	132,4	0,0000228	0,704	0,956	13,64	11,48	2,16
32	5,500	229,6	95,6	134,0	0,0000228	0,702	0,958	11,48	9,35	2,13
33	5,667	231,0	95,0	136,0	0,0000227	0,700	0,959	9,35	7,28	2,07
34	5,833	229,1	94,0	135,1	0,0000226	0,703	0,962	7,28	5,22	2,06
35	6,000	228,0	95,2	132,8	0,0000227	0,705	0,959	5,22	3,18	2,04

Продовження таблиці Д.1

№	Ситовий аналіз									
	Маса i -тої фракції				$m_{(\Sigma)}$, Г	Частка i -тої фракції				$x_{(\Sigma)}$, Г
	$m_{(d=4)}$, Г	$m_{(d=3)}$, Г	$m_{(d=2)}$, Г	$m_{(d=1)}$, Г		$x_{(d=4)}$, Г	$x_{(d=3)}$, Г	$x_{(d=2)}$, Г	$x_{(d=1)}$, Г	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	0,0	1,7	115,4	93,9	211	0,0	0,8	54,7	44,5	100
2	0,0	4,3	123,9	95,9	224	0,0	1,9	55,3	42,8	100
3	0,0	6,1	115,3	76,7	198	0,0	3,1	58,2	38,7	100
4	0,0	9,8	126,1	65,1	201	0,0	4,9	62,7	32,4	100
5	0,0	11,2	140,4	57,4	209	0,0	5,3	67,2	27,5	100
6	0,0	16,8	136,5	43,7	197	0,0	8,5	69,3	22,2	100
7	0,0	26,8	180,5	9,7	217	0,0	12,3	83,2	4,5	100
8	0,0	28,5	174,8	8,7	212	0,0	13,5	82,4	4,1	100
9	0,0	31,3	139,9	4,8	176	0,0	17,8	79,5	2,7	100
10	0,0	46,0	152,1	4,8	203	0,0	22,7	74,9	2,4	100
11	0,4	55,2	156,3	3,1	215	0,2	25,7	72,7	1,5	100
12	0,8	57,3	147,5	2,5	208	0,4	27,5	70,9	1,2	100
13	1,9	63,7	133,4	2,0	201	0,9	31,7	66,4	1,0	100
14	3,0	74,5	133,8	1,8	213	1,4	35,0	62,8	0,8	100
15	4,0	72,4	127,8	0,8	205	1,9	35,3	62,3	0,4	100
16	7,3	77,1	124,5	0,5	209,4	3,5	36,8	59,4	0,2	100
17	11,2	85,7	123,2	0,5	220,6	5,1	38,8	55,9	0,2	100
18	14,8	90,3	104,5	0,4	210	7,1	43,0	49,8	0,2	100
19	9,7	139,6	79,3	14,5	243	4,0	57,4	32,6	6,0	100
20	8,0	115,5	63,3	11,2	198	4,1	58,3	32,0	5,7	100
21	9,2	121,9	65,4	10,5	207	4,4	58,9	31,6	5,1	100
22	11,1	121,3	61,2	9,4	203	5,5	59,8	30,1	4,6	100
23	16,8	132,0	60,5	7,6	217	7,7	60,9	27,9	3,5	100
24	16,5	126,3	54,1	4,0	201	8,2	62,9	26,9	2,0	100
25	17,2	125,6	51,1	2,2	196	8,8	64,1	26,1	1,1	100
26	19,8	136,1	49,8	0,4	206	9,6	66,1	24,2	0,2	100
27	2,6	167,4	47,5	0,5	218	1,2	76,8	21,8	0,2	100
28	6,4	160,7	41,4	0,4	209	3,1	76,9	19,8	0,2	100
29	14,7	143,5	34,6	0,2	193	7,6	74,4	17,9	0,1	100
30	25,9	150,9	31,1	0,1	208	12,4	72,6	15,0	0,0	100
31	37,5	152,5	31,0	0,0	221	17,0	69,0	14,0	0,0	100
32	39,1	126,7	26,2	0,0	192	20,4	66,0	13,6	0,0	100
33	45,4	118,2	20,4	0,0	184	24,7	64,3	11,1	0,0	100
34	51,0	125,8	19,2	0,0	196	26,0	64,2	9,8	0,0	100
35	60,8	130,0	17,3	0,0	208	29,2	62,5	8,3	0,0	100

Продовження таблиці Д.1

№	Еквівал. діаметр частинки	Поверхня шару	Ar	Re _(пр)	Re _(кр)	Перепад тиску			$\Delta P_{ш}/(g \cdot d_e)$
	d_e , мм	$f_{ш}$, м ²				Шару	ГРП	Діафра- гми	
						$\Delta P_{ш}$, Па	$\Delta P_{ГРП}$, Па	$\Delta P_{д}$, Па	
	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1	1,851	17,460	1962	75	1334,2	1962	75	1334,2	131,607
2	1,873	17,254	1962	75	1334,2	1962	75	1334,2	130,055
3	1,922	16,814	1962	75	1373,4	1962	75	1373,4	126,743
4	2,003	16,133	1962	75	1373,4	1962	75	1373,4	121,604
5	2,066	15,639	1962	75	1569,6	1962	75	1569,6	117,884
6	2,154	15,006	1962	75	1628,5	1962	75	1628,5	113,113
7	2,458	13,150	1962	75	1863,9	1962	75	1863,9	99,124
8	2,473	13,069	1962	75	1863,9	1962	75	1863,9	98,512
9	2,531	12,768	1962	75	1863,9	1962	75	1863,9	96,243
10	2,575	12,548	1962	75	1863,9	1962	75	1863,9	94,584
11	2,620	12,333	1962	75	1863,9	1962	75	1863,9	92,960
12	2,644	12,221	1962	75	1962,0	1962	75	1962,0	92,119
13	2,691	12,010	1962	75	1962,0	1962	75	1962,0	90,530
14	2,730	11,839	1962	75	1962,0	1962	75	1962,0	89,237
15	2,750	11,751	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	88,576
16	2,789	11,586	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	87,329
17	2,833	11,409	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	86,000
18	2,904	11,129	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	83,892
19	2,857	11,311	1962	75	1962,0	1962	75	1962,0	85,256
20	2,874	11,245	1962	75	1962,0	1962	75	1962,0	84,764
21	2,900	11,144	1962	75	1962,0	1962	75	1962,0	84,000
22	2,936	11,007	1962	75	1962,0	1962	75	1962,0	82,968
23	3,015	10,719	1962	75	1962,0	1962	75	1962,0	80,797
24	3,087	10,469	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	78,911
25	3,137	10,302	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	77,657
26	3,204	10,087	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	76,034
27	3,175	10,178	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	76,720
28	3,213	10,058	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	75,812
29	3,273	9,873	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	74,419
30	3,348	9,651	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	72,749
31	3,396	9,515	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	71,721
32	3,428	9,428	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	71,069
33	3,498	9,239	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	69,643
34	3,528	9,161	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	69,057
35	3,577	9,036	1962	75	2060,1	1962	75	2060,1	68,110

Продовження таблиці Д.1

№	Об'ємні витрати газу	Швидкість газу			Енергія газу	Число псевдозрідження		
		Критична	Робоча	Щілин		мін.	макс.	роб.
	$V_{(сек)},$ $м^3/с$	$w_{(кр)},$ $м/с$	$w_p,$ $м/с$	$w_{щ},$ $м/с$	$E,$ $Дж$	$K_{w(min)}$	$K_{w(max)}$	K_w
	30	31	32	33	34	35	36	37
1	0,0308	0,62	1,18	31,95	18,94	2,00	2,43	2,27
2	0,0308	0,62	1,18	32,16	19,19	1,99	2,41	2,24
3	0,0313	0,64	1,19	32,99	20,48	1,96	2,38	2,21
4	0,0313	0,67	1,19	33,13	20,66	1,93	2,33	2,12
5	0,0334	0,69	1,28	35,64	25,57	1,90	2,29	2,19
6	0,0340	0,72	1,30	36,15	26,79	1,86	2,24	2,15
7	0,0364	0,82	1,39	39,66	34,50	1,73	2,07	2,02
8	0,0364	0,82	1,39	39,75	34,65	1,73	2,06	2,00
9	0,0364	0,84	1,39	39,91	34,94	1,70	2,03	1,96
10	0,0364	0,86	1,39	40,08	35,23	1,69	2,01	1,93
11	0,0364	0,87	1,40	40,08	35,23	1,67	1,99	1,91
12	0,0374	0,88	1,43	41,03	37,89	1,66	1,98	1,94
13	0,0374	0,89	1,43	41,37	38,51	1,64	1,95	1,90
14	0,0374	0,90	1,42	41,37	38,51	1,63	1,93	1,87
15	0,0383	0,91	1,46	42,22	41,10	1,62	1,92	1,91
16	0,0383	0,92	1,46	42,13	40,93	1,61	1,90	1,89
17	0,0383	0,93	1,46	42,05	40,76	1,59	1,88	1,87
18	0,0383	0,95	1,46	42,13	40,93	1,56	1,85	1,82
19	0,0374	0,94	1,43	42,05	39,78	1,58	1,87	1,80
20	0,0374	0,94	1,42	41,96	39,62	1,58	1,86	1,79
21	0,0374	0,95	1,43	42,05	39,78	1,57	1,85	1,78
22	0,0374	0,96	1,43	42,22	40,11	1,55	1,83	1,77
23	0,0374	0,99	1,43	42,39	40,43	1,53	1,80	1,73
24	0,0383	1,00	1,47	43,43	43,50	1,50	1,77	1,74
25	0,0383	1,02	1,46	43,35	43,32	1,49	1,75	1,71
26	0,0383	1,04	1,46	43,43	43,50	1,46	1,72	1,68
27	0,0383	1,03	1,46	43,35	43,32	1,47	1,73	1,69
28	0,0383	1,04	1,46	43,51	43,65	1,46	1,71	1,67
29	0,0383	1,05	1,46	43,61	43,86	1,44	1,69	1,65
30	0,0383	1,07	1,46	43,52	43,67	1,42	1,66	1,62
31	0,0383	1,09	1,46	43,49	43,62	1,41	1,64	1,60
32	0,0383	1,09	1,46	43,57	43,78	1,40	1,63	1,59
33	0,0383	1,11	1,46	43,70	44,03	1,38	1,60	1,56
34	0,0383	1,12	1,45	43,53	43,69	1,37	1,59	1,55
35	0,0383	1,13	1,46	43,43	43,50	1,36	1,57	1,53

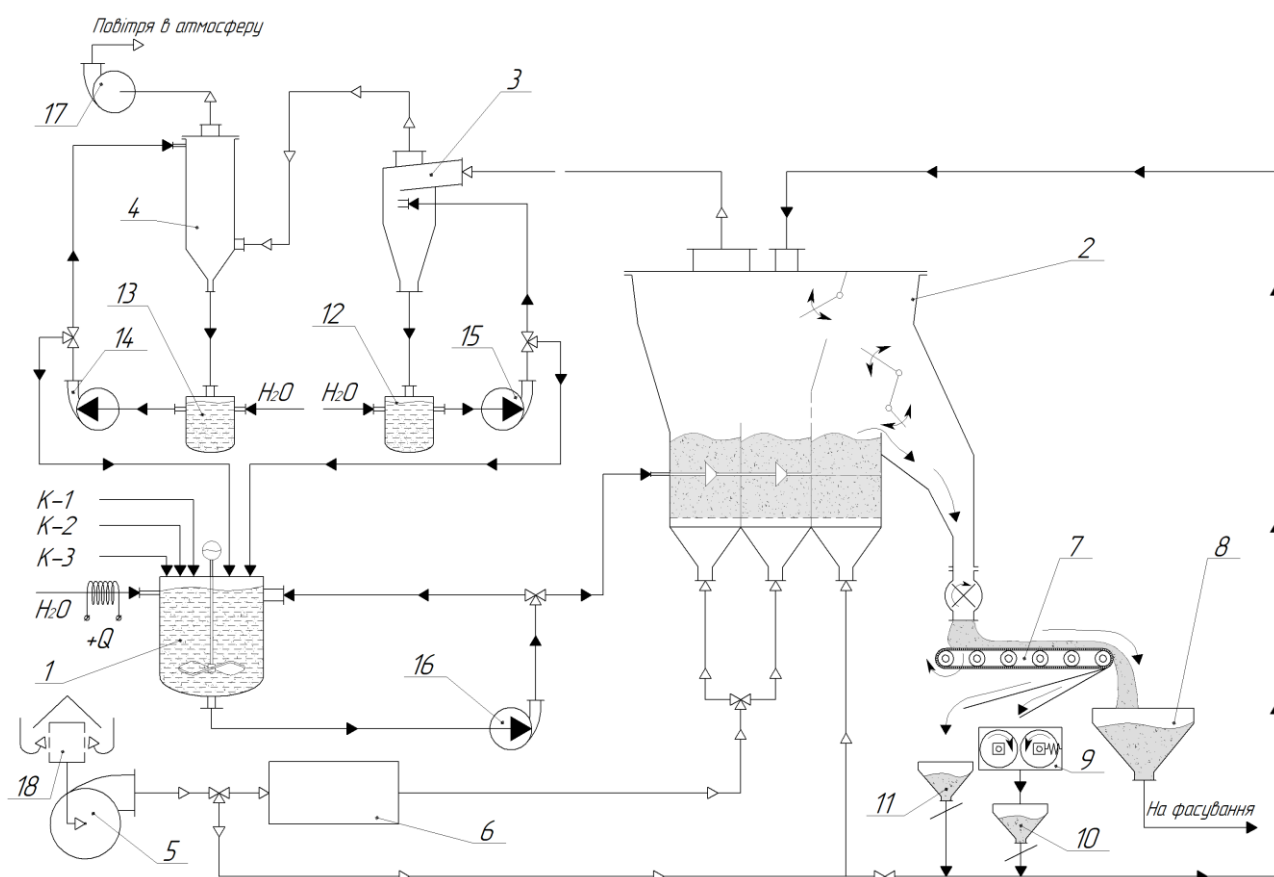
Продовження таблиці Д.1

№	Коефіцієнт грануляції	Питоме навантаження поверхні шару за вологою	Питоме навантаження поверхні шару за вологою віднесене до корисної різниці температур	Частота пульсацій шару	Індекс перемішування	Амплітудне перевищення $\Delta P_{ш(ном)}$	Маса перенесених гранул	Індекс динамічної якості гідродинаміки
	Ψ	$a_f, \frac{кг_{(вол.)}}{м^2 \cdot год}$	$a_{f(\Delta T)} \cdot 10^3, \frac{кг_{(вол.)}}{м^2 \cdot год \cdot град}$	$f, Гц$	$J_{\Delta P}$	$\Delta P_{ш(амп)}, Па$	ΔM	i_y
	38	39	40	41	42	43	44	45
1	80,73	0,331	3,760	2,86	0,830	1983,5	3,34	0,83
2	84,17	0,339	3,682	2,83	0,816	1950,5	3,28	0,80
3	86,93	0,349	3,595	2,80	0,809	1934,5	3,25	0,80
4	83,41	0,359	3,632	2,71	0,774	1849,1	3,11	0,74
5	85,53	0,368	3,626	2,75	0,825	1971,8	3,32	0,87
6	89,64	0,384	3,888	2,69	0,814	1945,9	3,27	0,87
7	85,99	0,509	4,564	2,53	0,791	1889,9	3,18	0,92
8	93,98	0,512	4,488	2,51	0,782	1868,1	3,14	0,90
9	95,95	0,527	4,583	2,47	0,767	1833,6	3,08	0,89
10	90,98	0,527	4,540	2,44	0,757	1810,1	3,04	0,88
11	96,50	0,545	4,778	2,42	0,751	1793,8	3,02	0,88
12	92,70	0,540	4,735	2,43	0,775	1851,0	3,11	0,94
13	92,38	0,567	4,726	2,39	0,756	1807,7	3,04	0,92
14	90,04	0,569	4,701	2,37	0,744	1776,8	2,99	0,90
15	89,36	0,572	4,864	2,39	0,775	1852,8	3,12	0,98
16	94,63	0,548	4,655	2,36	0,762	1821,4	3,06	0,97
17	90,86	0,544	4,733	2,34	0,757	1809,0	3,04	0,97
18	92,18	0,532	4,546	2,29	0,738	1763,2	2,97	0,95
19	95,29	0,598	4,672	2,29	0,716	1710,0	2,88	0,88
20	89,11	0,592	4,621	2,28	0,709	1694,0	2,85	0,87
21	90,96	0,600	4,704	2,26	0,707	1689,4	2,84	0,87
22	89,56	0,586	4,546	2,24	0,701	1675,0	2,82	0,87
23	93,09	0,603	4,636	2,20	0,687	1640,7	2,76	0,87
24	92,27	0,603	4,627	2,19	0,704	1682,9	2,83	0,94
25	90,71	0,636	4,894	2,16	0,693	1655,8	2,78	0,93
26	91,64	0,652	4,940	2,13	0,678	1619,3	2,72	0,92
27	94,47	0,648	4,950	2,14	0,683	1631,7	2,74	0,92
28	96,37	0,659	4,921	2,12	0,673	1608,3	2,71	0,91
29	96,77	0,655	4,901	2,09	0,667	1592,8	2,68	0,91
30	96,58	0,681	5,084	2,05	0,650	1553,7	2,61	0,90
31	94,34	0,682	5,151	2,03	0,646	1543,7	2,60	0,91
32	97,52	0,678	5,059	2,02	0,639	1527,3	2,57	0,90
33	97,19	0,673	4,945	1,98	0,627	1498,1	2,52	0,90
34	98,03	0,675	4,997	1,97	0,620	1480,9	2,49	0,89
35	97,22	0,676	5,092	1,95	0,616	1473,0	2,48	0,90

ДОДАТОК Е.
ОПИС РОБОТИ ПРОМИСЛОВОЇ УСТАНОВКИ ВИРОБНИЦТВА
ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ

За результатами теоретико-експериментальних досліджень розроблено технологічну схему промислової установки [88, 111] для одержання органо-мінеральних твердих композитів, рисунок Е.1. Установка призначена для переробки водяних розчинів сульфату амонію виробництва капролактаму.

Установка для безперервного одержання органо-мінеральних добрив повинна забезпечувати стійку кінетику процесу грануляції розчинів, отримання готового продукту заданого фракційного складу, оперативне керування процесом, зміни необхідних експериментальних величин і технологічних параметрів процесу, тому впровадження систем автоматизації є дуже доцільним [88, 111].



1 – ємність для робочого розчину; 2 – гранулятор блочно-модульного типу; 3 – мокрий циклон; 4 – скруббер; 5 – вентилятор ВВГ (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.

Рисунок Е.1 – Технологічна схема установки

Процес грануляції в установці із псевдозрідженим шаром проходить наступним чином. Суміш повітря потрапляє в електрокалорифер 6 та нагрівається. Теплоносій при температурі 280...300°C подається до гранулятора 2, проходить крізь щілини його ГРП, надходить до шару зернистого матеріалу (гранули або кристали) і переводить його у автоколивальний струменево-пульсаційний режим псевдозрідження.

У ємність 1 подається водяний розчин сульфату амонію, соняшникова зола, бентоніт і гумінові речовини та перемішуються до утворення однорідної гетерогенної система. Після досягнення шару температури 90°C, робочий розчин із ємності 1 насосом 16 подається у гранулятор 2 на зневоднення і грануляцію та диспергується у псевдозріджений шар. Після контакту з нагрітим теплоносієм відбувається видалення вологи і на поверхні гранул утворюється мікрокристалічний шар сухого матеріалу. Цикл повторюється багатократно, що призводить до збільшення розмірів гранул [88, 111].

Витрати розчину, що подається до гранулятора 2, визначаються за температурою шару в характеристичній точці і регулюється автоматично. При досягненні визначеного розміру гранули вивантажуються з апарату [88, 111].

Маса шару в апараті підтримується автоматично. У разі необхідності в установці передбачено подачу зовнішнього рециклу.

Відпрацьований теплоносій проходить першу ступінь очистки в мокрому циклоні 3. Друга ступінь очистки проходить у скрубєрі 4. Рідина на мокрий циклон 3 подається насосом 15 із ємності 12, на скрубєр 4 – насосом 13 із ємності 13. Уловлений у мокрому циклоні 3 та скрубєрі 4 водою пил повертається до ємності для робочого розчину 1, де змішується та повторно подається на зневоднення у гранулятор 2.

Товарна фракція гранульованого продукту (розмір $d_e=1,5...4,5$ мм) виводиться з гранулятора 2 через секторний живильник і за допомогою стрічкового транспортера 7 подається на класифікацію, після чого гранули, що перевищують заданий розмір подрібнюються у валковій дробарці 9 та знову

повертаються до гранулятора 2 у якості зовнішнього рециклу, а ті, що відповідають заданим розмірам направляються на установку для фасування.

Після фасування гранульований продукт у мішках, вагою до 50 кг, прямує до складу готової продукції [88, 111].

На установці передбачено пневматичне вивантаження і завантаження центрів грануляції в гранулятор 2.

ДОДАТОК Є.
МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПРОМИСЛОВОГО ГРАНУЛЯТОРА

Є.1 Вихідні дані до розрахунку гранулятора

Продуктивність по гранульованому продукту, кг/год	$G_{2(\text{год})}$;
Еквівалентний діаметр частинок у псевдозрідженому шарі, м	d_e ;
Масова частка частинок заданого розміру в готовому продукті, %	S_i ;
Кінцева вологість гранульованого продукту, %	u_2 ;
Концентрація початкового розчину, %	x_p ;
Температура теплоносія на вході в шар матеріалу, °С	t_1 ;
Температура в шарі матеріалу, °С	t_2 ;
Температура теплоносія на виході із шару матеріалу, °С	t_{12} ;
Температура гранул після апарата, °С	t_{22} ;
Масова частка гумінових речовин у перерахунку на чисту речовину, %	Γ ;
Густина матеріалу, кг/м ³	ρ_T ;
Насипна густина матеріалу, кг/м ³	ρ_H ;
Густина повітря, кг/м ³	ρ_T ;
Кінематична в'язкість повітря при температурі шару t_2 , м ³ /с	ν ;
Температура повітря на вході до калорифера, °С	t_0 ;
Вологовміст повітря на вході в калорифер, кг/кг	x_0 ;
Напруга калорифера, В	U ;
Потужність одного калорифера, кВт	E ;
Питома теплоємність сухого гранульованого матеріалу, кДж/(кг·К)	C_M ;
Питома теплоємність повітря, кДж/(кг·К)	C_B ;
Абсолютний тиск у грануляторі, Па	P ;
Тиск насичення, Па	$P_{\text{нас}}$;
Коефіцієнт кінематичної в'язкості газу, при $t_{\text{ш}}$, м ² /с	ν_2 .

Є.2 Матеріальний баланс гранулятора

Задана продуктивність в кг/с:

$$G_2 = \frac{G_{2(\text{год})}}{3600} \quad (\text{Є.1})$$

Витрата вихідного розчину з урахуванням заданої продуктивності G_2 та коефіцієнта грануляції $\psi=0,9=90\%$, кг/с:

$$G_1 = \frac{G_2(1 + \alpha)(100 - u_2)}{(100 - (100 - x_p)) \psi} \quad (\text{Є.2})$$

де $\alpha=0,03$ – коефіцієнт, що враховує втрати розчину в магістралі.

Отже обираємо насос для дозування плунжерний серії. Насос призначений для роботи в хімічно агресивних середовищах [88, 111], або шлангові насоси [88, 111].

Тоді кількість випареної води, кг/с:

$$W = G_1 - G_2 \quad (\text{Є. 3})$$

Кількість гумінових речовин у перерахунку на чисту речовину, кг/с:

$$G_{\text{гум}}=G \cdot \Gamma. \quad (\text{Є. 4})$$

Є.3 Тепловий розрахунок

Втрати теплоти з висушеним матеріалом, кДж/кг:

$$q_m = \frac{G_2 C_m (t_2 - t_0)}{W} \quad (\text{Є.5})$$

Витрати в оточуюче середовище приймаємо 5% від загальних [88, 111], кДж/кг:

$$q_{\text{п}} = 1,05(2480 + 1,69t_2 + q_m - 4,19t_0) \quad (\text{Є.6})$$

Теплові втрати віднесені до 1 кг випареної води, кДж/кг:

$$\Delta = q_m + q_{\text{п}} - C_{\text{в}}(t_{12} - t_0) \quad (\text{Є. 7})$$

Ентальпія теплоносія на вході в гранулятор, кДж/кг:

$$i_1 = 1,01t_1 + x_0(2493 + 1,97t_1) \quad (\text{Є. 8})$$

Вологовміст повітря після гранулятора, кг/кг:

$$x_2 = \frac{i_1 + x_0 \Delta - t_2}{\Delta + 1,92t_2 + 2480} \quad (\text{Є. 9})$$

Абсолютні витрати теплоти, кДж/кг:

$$q_{\text{м(вих)}} = q_m + q_{\text{п}} - C_{\text{в}}(t_{12} - t_0) \quad (\text{Є.10})$$

Ентальпія теплоносія на виході з гранулятора, кДж/кг:

$$i_2 = (1 + 1,96x_2)t_2 + 2480x_2 \quad (\text{Є.11})$$

Питомі витрати теплоти, кДж/кг:

$$q = \frac{i_1 + i_2}{x_2 - x_0} \quad (\text{Є.12})$$

Тепловий ККД гранулятора, %:

$$\eta_T = \frac{r}{q} 100 \quad (\text{Є.13})$$

Загальні витрати теплоти, кВт:

$$Q = q \cdot W \quad (\text{Є.14})$$

Кількість електрокалориферів:

Приймаємо калорифер типу СФО 16/3Т-М1 із потужністю $E=15$ кВт та коефіцієнтом використання тепла $\eta=0,5\dots0,7$:

$$n_K = \frac{Q}{E\eta} \quad (\text{Є.15})$$

Остаточна кількість калориферів приймається у більшу сторону.

Питомі витрати абсолютно сухого повітря, кг/кг:

$$l = \frac{1}{x_2 - x_0} \quad (\text{Є.16})$$

Загальна витрата теплоносія, кг/с:

$$L = l \cdot W \quad (\text{Є.17})$$

Відносна вологість відпрацьованого теплоносія, %:

$$\varphi_2 = \frac{x_2 \cdot P \cdot 100}{P_{\text{нас}}(x_2 + 0,622)} \quad (\text{Є.18})$$

Тоді об'ємні витрати теплоносія після гранулятора з температурою t_2 і відносною вологістю φ_2 при $P \approx 10^5$ Па розраховується, м³/с:

$$V_{\text{ВТ}} = \frac{L \cdot R_r \cdot (T_0 + t_2) 100}{P_{\text{нас}} \cdot (100 - \varphi_2)} \quad (\text{Є.19})$$

Об'ємна продуктивність нагнітаючого вентилятора, м³/с:

$$V_B = \frac{L}{\rho} \quad (\text{Є.20})$$

Отже обираємо вентилятор (<http://www.spicom.ru/vgd.htm>).

Є.4 Розрахунок гранулометричного складу готового продукту

Константа вивантаження для промислового апарата становить [128],
1/год:

$$K = 0,00664 \cdot t_1 - 0,645 = 0,00664 \cdot 200 - 0,645 = 0,683 \quad (\text{Є.21})$$

Визначення параметрів γ -розподілення [128]:

$$z = \gamma + a \cdot K, \quad (\text{Є.22})$$

$$n = (p + q \cdot K)b + c, \quad (\text{5.33})$$

де $a=2,695$; $b=2,873$; $c=6,809$; $p=0,1995$; $q=2,409$; $\gamma=3,506$ – коефіцієнти визначені дослідним шляхом [128].

Приведений діаметр частинок [128], мм:

$$D^* = D - D_y, \quad (\text{Є.24})$$

де $D=3,0$ мм – поточне значення діаметра частинок у шарі; $D_y=0,25$ мм – максимальне значення діаметру часток, що будуть винесені теплоносієм із шару.

Розподілення маси гранул по їх розміру в апараті псевдозрідженого шару в стаціонарному процесі з вірогідністю 0,99 по критерію Фішера, що описується статистичним γ -розподіленням [88, 111, 128]:

$$g(D) = \frac{z^n}{(n-1)!} D^{*(n-1)} e^{-zD^*} \quad (\text{Є.25})$$

Середній розмір часток в шарі [128], мм:

$$\bar{D} = \frac{n}{z} \quad (\text{Є.26})$$

Є.5 Розрахунок гранулометричного складу готового продукту

З урахуванням масової частки гранул із мінімальним розміром, поріг гранулометричного продукту, мм [128]:

$$S = \frac{\bar{D}^5}{\bar{D}^5 + D_0^5}, \quad (\text{Є.27})$$

де D_0 – поріг сепарації, середній розмір часток готового продукту [128], мм:

$$D_0 = \sqrt[5]{\frac{D^5 (1 - S_i)}{S_i}} \quad (\text{Є.28})$$

Коефіцієнт грануляції [128], %:

$$\psi = \frac{G_2}{G_1} 100 \quad (\text{Є.29})$$

Лінійна швидкість росту гранул [128], мм/год:

$$\Lambda = \frac{K}{6} \psi D \quad (\text{Є.30})$$

Функція потужності внутрішнього джерела центрів грануляції, який реалізується за рахунок подрібнення гранул, розраховується за виразом [88, 111, 128]:

$$\varphi(D) = \frac{Z^n}{(n-1)!} D^{*(n-1)} e^{-zD} \left[\frac{2\Lambda}{D^*} [(n-1) - zD^*] + K\eta S - \frac{6\Lambda}{D^*} \right] \quad (\text{Є.31})$$

Функція потужності джерела нових центрів грануляції має синусоїдальну форму. Область, в якій $\varphi(D)$ набуває значень більше нуля, свідчить про утворення нових центрів грануляції з розподіленням маси за розміром частинок в інтервалі $0 \leq d \leq d_{\text{ст}}$ [88, 111].

Область, де функція $\varphi(D)$ набуває значень менше нуля, характеризується розподіленням маси частинок за розміром в інтервалі $d_{\text{ст}} \leq d \leq d_{\text{мак}}$, у якому відбувається вивантаження великих гранул з апарату та їх подрібнення [88, 111]. Середній час перебування частинки в робочому циклі [128], год:

$$\bar{\tau} = 1 / K \quad (\text{Є.32})$$

Є.6 Розрахунок робочої швидкості теплоносія при струменево-пульсаційному псевдозрідженні в автоколивальному режимі

Критерій Архімеда:

$$Ar = \frac{g \cdot \bar{D}^3 \cdot (\rho_{\tau} - \rho_{t2})}{v_2^2 \cdot \rho_{t2}} \quad (\text{Є.33})$$

де ρ_{t_2} – густина теплоносія при температурі шару t_2 , що визначається, кг/м³:

$$\rho_{t_2} = \frac{\rho \cdot 273}{273 + t_2} \quad (\text{Є.34})$$

Критерій Рейнольдса початку псевдозрідження ($\varepsilon_0=0,4$) [128]:

$$\text{Re}_{\text{кр}} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (\text{Є.35})$$

Критична швидкість початку псевдозрідження [128], м/с:

$$W_{\text{кр}} = \frac{\text{Re} \cdot v_{t_2}}{D} \quad (\text{Є.36})$$

Критерій Рейнольдса для робочого режиму псевдозрідження ($\varepsilon_p=0,7$) [128]:

$$\text{Re}_p = \frac{Ar \cdot \varepsilon_p^{4,75}}{18 + 0,61\sqrt{Ar \cdot \varepsilon_p^{4,75}}} \quad (\text{Є.37})$$

Для визначення робочої швидкості псевдозрідження визначається число псевдозрідження – K_w . За результатами досліджень гідродинаміки у камері гранулятора встановлено, що для шару зернистого матеріалу із d_e у діапазоні $1,5 \leq d_e \leq 4,0$ число псевдозрідження, яке відповідає початку струменево-пульсаційного псевдозрідження у автоколивальному режимі при індексі динамічної якості гідродинаміки $i_{\text{я}}=0,4$ ($K_{w(\text{min})}$) та його завершенню при $i_{\text{я}}=1$ ($K_{w(\text{max})}$) визначаються як:

$$\begin{aligned} K_{w(\text{min})} &= 0,0574 \cdot d_e^2 - 0,6827 \cdot d_e + 3,063 \\ K_{w(\text{max})} &= 0,078 \cdot d_e^2 - 0,9162 \cdot d_e + 3,8549 \end{aligned} \quad (\text{Є.38})$$

або за отриманими кореляційними залежностями (3.1) та (3.2).

Тобто, робоче значення числа псевдозрідження повинно знаходитися в межах $K_{w(\text{min})} \leq K_w \leq K_{w(\text{max})}$.

Для забезпечення найбільш ефективного гідродинамічного режиму псевдозрідження приймається, що $K_w \approx K_{w(\text{max})}$.

Тоді робоча швидкість псевдозрідження [128], м/с:

$$W_p = W_{\text{кр}} \cdot K_w \quad (\text{Є.39})$$

Приведене значення критерія Рейнольдса для робочих умов:

$$\text{Re}_{\text{пр}} = \frac{W_p \cdot d_e}{\nu_r} \quad (\text{Є.40})$$

Індекс динамічної якості гідродинаміки:

$$i_{\text{я}} = \left(-0,00265 \cdot \left(\frac{d_e}{d_{2,5}} \right)^3 + 0,1072 \cdot \left(\frac{d_e}{d_{2,5}} \right)^2 - 0,00265 \cdot \frac{d_e}{d_{2,5}} + 0,0757 \right) \cdot \text{Re}_{\text{пр}} - 1,6 \cdot e^{0,58 \cdot \left(\frac{d_e}{d_{2,5}} \right)} \quad (\text{Є.41})$$

Критерій Рейнольдса для умови виносу часток ($\varepsilon=1$) [128]:

$$\text{Re}_B = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} \quad (\text{Є.42})$$

Швидкість виносу частинок, м/с:

$$W_B = \frac{\text{Re}_B \cdot \nu_{t2}}{D} \quad (\text{Є.43})$$

Перевіряється умова виносу матеріалу – $W_p < W_B$.

Є.7 Розрахунок площі газорозподільного пристрою, розмірів щілин та відстані між ними

Площа перерізу апарату на рівні газорозподільного пристрою, м²:

$$F_a = \frac{L}{\rho_r \cdot 3600 W_p}, \quad (\text{Є.44})$$

де L – масові витрати повітря на процес зневоднення і грануляції, визначеного із теплового розрахунку, кг/год.

Для визначення температури теплоносія на вході до апарату задаємося питомою продуктивністю по випаруваній волозі площі ГРП $A_f = 500 \dots 1500$ кг вол./(м²·год.) і визначаємо площу ГРП, м²:

$$F_2 = W_1 / A_f, \quad (\text{Є.45})$$

де W_1 – кількість вологи, яку належить випарувати в апараті, кг/год.

Проводимо порівняння F_a та F_2 . Якщо $F_a < F_2$, то необхідно підвищувати температуру теплоносія на вході в апарат t_1 поступово на 20-40 °С і відповідно A_f до тих пір, поки не буде виконана умова:

$$F_a \geq F_2.$$

(Є.46)

Після цього визначаємо швидкість теплоносія безпосередньо біля газорозподільного пристрою, м/с:

$$\bar{W}'_p = W_p \frac{273+t_1}{273+t_2}, \quad (\text{Є.47})$$

де t_1 та t_2 – відповідно температура теплоносія на виході з ГРП та у псевдозрідженому шарі.

Експериментально встановлено, що коефіцієнт живого перерізу ГРП:

$$\varphi = \frac{F_{\text{щ}}}{F_a} \cdot 100\% = 4,9\%, \quad (\text{Є.48})$$

де $F_{\text{щ}}$ – загальна площа щілин ГРП у апараті, м²:

$$F_{\text{щ}} = \frac{F_a \cdot \varphi}{100\%} \quad (\text{Є.49})$$

Площа щілин одного модуля, м²:

$$F_{\text{щ}(i)} = \frac{F_{\text{щ}}}{n_{\text{мод.}}} \quad (\text{Є.50})$$

Тоді швидкість газу в щілинах ГРП, м/с:

$$w_{\text{щ}} = W_p \cdot \frac{\varphi}{100} \quad (\text{Є.51})$$

Є.8 Розрахунок робочої висоти шару зернистого матеріалу

Загальна поверхня шару з умов масообміну, м²:

$$\Sigma F_{\text{щ}} = \frac{M_{\text{вол.}}}{a_f}, \quad (\text{Є.52})$$

де a_f – питоме навантаження поверхні шару за вологою (приймається за результатами експериментальних досліджень), кг/(м²год).

Об'єм шару зернистого матеріалу з умов масообміну, м³:

$$V_{\text{щ}} = \frac{\Sigma F_{\text{щ}} \cdot a_f}{a} \quad (\text{Є.53})$$

Враховуючи, що об'єм шару в грануляторі можна визначити як (5.3), тоді висота нерухомого шару зернистого матеріалу з умов масообміну, м:

$$H_{0(\text{м.о.})} = \frac{V_{\text{ш}}}{F_a \cdot K_a} = \frac{\Sigma F_{\text{ш}} \cdot a_f}{a \cdot F_a \cdot K_a} \quad (\text{Є.54})$$

Висота псевдозрідженого шару за умов автоколивального режиму визначається за умови, що діаметр газової бульбашки (5.1) $d_6=1/3A$. Тоді висота шару за умов автоколивального режиму, м:

$$H_{0(A)} = \frac{d_6 \left(1 + \frac{\pi}{4}\right)}{K'} + y_f + \Delta = \frac{\frac{1}{3}A \left(1 + \frac{\pi}{4}\right)}{K'} + y_f + \Delta \quad (\text{Є.55})$$

Експериментально встановлено, що при застосуванні конструкції ГРП щілинного типу, рисунок 4.2, із коефіцієнтом живого перерізу 4,9% значення коефіцієнта грануляції $\psi \geq 90\%$ можна отримати при значеннях комплексу $\Delta P_{\text{ш}}/gd_e$ у межах $80 \leq \Delta P_{\text{ш}}/gd_e \leq 100$.

Звідси, прийнявши, що $\Delta P_{\text{ш}}/gd_e=100$, гідравлічний опір псевдозрідженого шару, Па:

$$\Delta P_{\text{ш}} = 100 \cdot g \cdot d_e \quad (\text{Є.56})$$

Гідравлічний опір псевдозрідженого шару гранулятора також визначається як (2.64) та (2.65), тоді робоча висота псевдозрідженого шару, м:

$$H_{0(\text{грав})} = \frac{100 \cdot d_e}{(1 - \varepsilon_0) \cdot \rho_r \cdot K_a} \quad (\text{Є.57})$$

За результатами розрахунків у якості робочої висоти нерухомого шару зернистого матеріалу обирається максимальне із розрахованих значень:

$$H_0 = \max\{H_{0(\text{м.о.})}; H_{0(A)}; H_{0(\text{грав})}\}$$

Тоді, частота пульсацій шару (3.3), Гц:

$$f = K_{\text{пульс.}} \cdot \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{H_{\text{р(м.о.)}}}} \quad (\text{Є.58})$$

де $K_{\text{пульс.}}$ – коефіцієнт, який із коефіцієнтом кореляції $R_f=0,99$ описує вплив d_e та $Re_{\text{пр.}}$ на частоту пульсацій:

$$K_{\text{пульс.}} = 0,0024 \cdot \left(\frac{d_e}{[d_e]} \right)^{-2} \cdot \text{Re}_{\text{пр}} - 0,2158 \cdot \frac{d_e}{[d_e]} + 0,8374 \quad (\text{Є.59})$$

де $[d_e]=2,5$ – номінальний еквівалентний діаметр твердих частинок у шарі, м.

Частоту пульсацій шару також можна визначати за рівнянням (3.3).

Тривалість пульсації шару (час одного циклу), с:

$$\tau_{\text{ц}} = \frac{1}{f} \quad (\text{Є.60})$$

Є.9 Гідравлічний розрахунок апарата

Гідравлічний опір вхідного штуцера визначається за формулою, Па:

$$\Delta P_{\text{вх}} = \xi_1 \frac{W_{\text{вх}}^2 \cdot \rho_{t_1}}{2}, \quad (\text{Є.61})$$

де $\xi_1 = 0,5$ – коефіцієнт гідравлічного опору штуцера, обирається із довідника;

ρ_{t_1} – густина теплоносія при температурі на вході в апарат, кг/м^3 :

$$\rho_{t_1} = \frac{\rho \cdot 273}{273 + t_1}, \quad (\text{Є.62})$$

$W_{\text{вх}}$ – швидкість теплоносія у вхідному штуцері, м/с:

$$W_{\text{вх}} = \frac{L}{\rho_{t_1} \cdot F_{\text{вх}}}, \quad (\text{Є.63})$$

де $F_{\text{вх}}$ – поперечний переріз вхідного штуцера, м^2 .

Гідравлічний опір ГРП, Па:

$$\Delta P_2 = \xi_2 \frac{W_{\text{ш}}^2 \cdot \rho_{t_1}}{2}, \quad (\text{Є.64})$$

де ξ_2 – коефіцієнт гідравлічного опору ГРП (для розробленого ГРП типу 2 $\xi_2=1,82$).

Гідравлічний опір шару зернистого матеріалу, Па:

$$\Delta P_{\text{ш}} = H_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot \rho_{\text{т}} \cdot g \cdot K_a \quad (\text{Є.65})$$

Висота сепараційної зони, м:

$$H_c = 2H_0 \quad (\text{Є.66})$$

Висота камери гранулятора, м:

$$H_a = H_c + H_0 = 3H_0 \quad (\text{Є.67})$$

Гідравлічний опір вихідних штуцерів, Па:

$$\Delta P_{\text{вих}} = 2 \cdot \xi_1 \frac{W_{\text{вих}}^2 \cdot \rho_{t2}}{2}, \quad (\text{Є.68})$$

де $W_{\text{вих}}$ – швидкість теплоносія у вихідних штуцерах, м/с:

$$W_{\text{вих}} = \frac{L}{\rho_{t2} \cdot F_{\text{вих}}} \quad (\text{Є.69})$$

Тоді загальний гідравлічний опір гранулятора (без циклонів) буде, Па:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_2 + \Delta P_{\text{ш}} + \Delta P_{\text{вих}} \quad (\text{Є.70})$$

Витрати потужності на подолання загального гідравлічного опору, кВт:

$$N = \frac{\sum \Delta P \cdot V_B}{1000} \quad (\text{Є.71})$$

ДОДАТОК Ж.
АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ПРОМИСЛОВОГО
ГРАНУЛЯТОРА

Алгоритмічна схема програми для розрахунку промислового гранулятора псевдозрідженого шару в середовищі Microsoft Excel зображена на рисунку Ж.1.

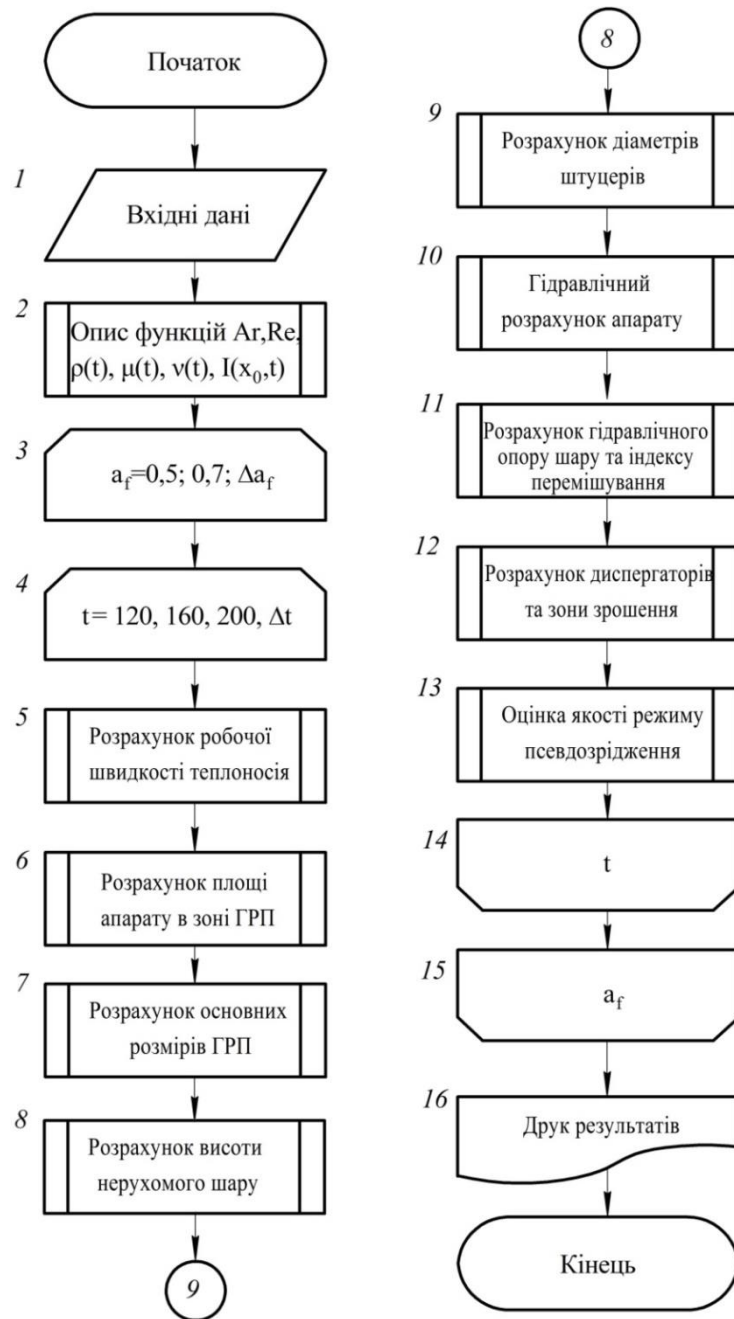


Рисунок Ж.1 – Алгоритмічна схема розрахунку промислового гранулятора псевдозрідженого шару

На рисунку Ж.2 зображено загальний вигляд програми для розрахунку промислового гранулятора псевдозрідженого шару в середовищі Microsoft Excel.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
4	Висотні дані:		Темперія пром.:																				
5	$G = 0,1388$	кг/с	$I_{h(0)} = 40,6833$	кДж/кг		Матеріальний баланс			$G_1 = 0,2856$	Мг/кг/с													
6	$w = 90$	%	$I_{h(1)} = 248,24496$	кДж/кг					$G_2 = 0,2468$	Мг/кг/с													
7	$a = 0,03$		$r(t_0) = 2281,334$	кДж/кг		Темповий розрахунок			$t_a = 93$	$\theta_2 = 93$	$q_1, \text{кДж/кг}$	$q_2, \text{кДж/кг}$	$q_3, \text{кДж/кг}$	$q_4, \text{кДж/кг}$	$q_5, \text{кДж/кг}$	$q_6, \text{кДж/кг}$	$q_7, \text{кДж/кг}$	$q_8, \text{кДж/кг}$	$q_9, \text{кДж/кг}$	$q_{10}, \text{кДж/кг}$	$q_{11}, \text{кДж/кг}$	$q_{12}, \text{кДж/кг}$	
8	$u = 0,1$	%	$\rho(t) = 0,7143$	кг/м ³							$112,7191$	$113,7235$	$169,0575$	$0,05456$	$454,5998$	$50,188$	$667,485$	$4,4499$	$21,90$	$3,2158$	$157,5$	$0,03173$	
9	$x = 50$	%	$\rho(t_{ca}) = 0,81804878$	кг/м ³																		$4,502$	
10	$t_2 = 95$	°C	$\rho(t_{ca}) = 2,494E-05$	Па·с																		$16206,5747$	
11	$C_p = 1,59$	кДж/кг·K	$\rho(t_{ca}) = 3,049E-05$	м ² /с		Розрахунок роботи швидкоплинності теплоносія			$A_1 = 282039,32$	$R_{exp} = 69,189$	$W_{пр, м/с} = 0,8439$	$R_{sp} = 222,4630$	$W_{пр, м/с} = 2,7134$	$K_w = 3,215$	$R_{ext} = 840,043$	$W_{ext, м/с} = 10,25$							
12	$\theta_1 = 18$	°C	$\rho(t_2) = 0,9570$	кг/м ³																			
13	$C_B = 1,005$	кДж/кг·K	$\rho(t_{ш}) = 0,9652$	кг/м ³																			
14	$f = 2,880$	кДж/кг	$\rho(t_{ш}) = 2,184E-05$	Па·с																			
15	$\theta_2 = 18$	°C	$\rho(t_{ш}) = 2,268E-05$	м ² /с		Розрахунок площі апарату в зоні ППД			$F_{пл, м^2} = 892,29$	$S_{пл, м^2} = 1440$	$V_{пл, м^3} = 0,6156$	$V_{пл, м^3} = 1,377$	$V_{пл, м^3} = 3,9342$	$\rho_{пл} = 4$	$F_{пл, м^2} = 1,26$	$F_{ext, м^2} = 3,78$	$W_{пр, м/с} = 3,573$	$K_w = 4,23$					
16	$x_0 = 0,0089$	кг/кг	$\rho(t_1) = 2,788E-05$	Па·с																			
17	$t_1 = 220$	°C	$\rho(t_1) = 3,903E-05$	м ² /с					$\rho_{пл, кг/м^3} = 0,56$	$H_{пл, м} = 0,5$	$A_{пл, м} = 0,90$	$b_{пл, м} = 0,35$											
18	$E = 250$	кВт																					
19	$\rho_k = 0,6$																						
20	$\rho = 9,81$	м/с ²																					
21	$\rho^* = 1,450$	кг/м ³																					
22	$D_e = 0,0023$	м																					
23	$q_p = 0,6$																						
24	$e_0 = 0,4$																						
25	$P_{ext} = 1100$	кг/м ³																					
26																							
27																							
28																							
29																							
30																							
31																							
32																							
33																							
34																							
35																							
36																							
37																							
38																							
39																							
40																							
41																							
42																							

Рисунок Ж.2 – Загальний вигляд програми

№	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA								
№											$\epsilon_{\text{до}} = \epsilon_{\text{ном}} + A + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t - \frac{\pi}{3T}\right)$																						
№											$\epsilon_{\text{ном}} = 0,630$	$\epsilon_{\text{до}}(\%)$	$\epsilon_{\text{до}}(\%)$	A	$\gamma_{\text{ном}}, \text{ МПа}$	$R_{\text{в}}$	$W_{\text{г}}, \text{ МПа}$	$\Delta n_{\text{н}}$	$\Delta P_{\text{ном}}, \text{ Па}$	$\Delta P_{\text{до}}, \text{ Па}$	θ	$\Delta P_{\text{ном}}, \text{ Па}$	$\Delta P_{\text{до}}, \text{ Па}$	$\Delta P_{\text{ном}}, \text{ Па}$	$\Delta P_{\text{до}}, \text{ Па}$	$\Delta P_{\text{ном}}, \text{ Па}$	$\Delta P_{\text{до}}, \text{ Па}$						
№											$\epsilon_{\text{ном}} = 0,530$	$A_{\text{ном}} = 0,055$	$T(\text{с}) = 0,6$	$f_{\text{д}} = 0,05857$	$D = 1,089$																		
43																																	
44																																	
45																																	
46																																	
47																																	
48																																	
49																																	
50																																	
51																																	
52																																	
53																																	
54																																	
55																																	
56																																	
57																																	
58																																	
59																																	
60																																	
61																																	
62																																	
63																																	
64																																	
65																																	
66																																	
67																																	
68																																	
69																																	
70																																	
71																																	
72																																	
73																																	
74																																	
75																																	
76																																	
77																																	
78																																	
79																																	
80																																	
81																																	
82																																	
83																																	
84																																	
85																																	
86																																	
87																																	
88																																	
89																																	
90																																	
91																																	
92																																	

Рисунок Ж.2, лист 2 – Загальний вигляд програми

ДОДАТОК 3.
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА 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. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/11943>. *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». – Електронні текстові дані (1 файл: 6,92 Мбайт). – Київ: НТУУ «КПІ». – 2015. – 167 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/11944>. *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 Сікорського – Електронні текстові дані (1 файл: 8,79 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2017. – 210 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/12411>. *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. – P. 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. – P. 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. – P. 562-576. (Входить до наукометричних баз Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, 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 органо-мінерального 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 / Монастирний 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 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. *Особистий внесок здобувача: експериментальне визначення впливу особливостей газорозподільного пристрою щільного 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 органічно-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, EJL, RePEc, InfoBase Index, IOR,

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.*

ДОДАТОК И.
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

"Затверджую"
 Директор ПП «АгроЗАР»
 _____ Гладун Л.П.

 _____ (підпис, Л.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 органо-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:N:K=1:10:19:11:2, який визначався замовником, розміром $1,8 \div 4,5$ 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»

Перший проректор

КПІ ім. Ігоря Сікорського



Ю.І. Якименко

« 9 листопада

2017 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертації Гайдая Сергія Сергійовича

«Гідродинаміка у грануляторах із псевдозрідженим шаром

при одержанні органо-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 органо-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