

УДК 66.099

№ держреєстрації 0116U006812

Інв. N

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
40007, м. Суми, вул. Р–Корсакова, буд. 2;
тел. (0542) 33-41-08/33-40-49

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з наукової роботи

д-р. фіз.-мат. наук, професор

А.М. Черноус

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

Підвищення ефективності грануляторів і сушарок з активними гідродинамічними режимами
для отримання, модифікації і капсулювання добрив

РОЗРОБКА ТА СТВОРЕННЯ ДОСЛІДНОГО УСТАТКУВАННЯ ВУЗЛА ГРАНУЛЮВАННЯ З
ВИКОРИСТАННЯМ ВИХРОВОГО ГРАНУЛЯТОРА ЗВАЖЕНОГО ШАРУ ТА
БАГАТОСТУПЕНЕВОГО СУШІННЯ, ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ
(проміжний)

Начальник НДЧ

канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.

Д.І. Курбатов

Керівник НДР

канд. техн. наук, доцент

А.Є. Артюхов

2017

Рукопис закінчено 22 грудня 2017 р.

Результати цієї роботи розглянуті науковою радою, протокол від 2017.11.29 №2

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР

канд. техн. наук, доцент

А. Артюхов

(розд. 1, висновки)

Відповідальний виконавець,

молодший науковий співробітник

А. Іванія

(вступ)

Старший науковий співробітник

канд. техн. наук

Н. Артюхова

(розд. 2)

Старший науковий співробітник

канд. техн. наук

Р. Острога

(розд. 3, реферат)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 53 с., 41 рис., 29 джерел.

ВИХРОВІ ПОТОКИ, ГІДРОДИНАМІКА, ГРАНУЛЮВАННЯ, КІНЕТИКА, ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ.

Об'єкт дослідження – процеси отримання та термообробки гранульованих модифікованих та капсульованих добрив.

Мета роботи – дослідження впливу гідро- та термодинамічних показників здійснення процесу гранулювання (у тому числі капсулювання і модифікації) на якість гранульованої продукції, розробка науково обґрунтованої методики розрахунку грануляційних та сушильних пристроїв з активними гідродинамічними режимами.

Методи дослідження. В основу фізичного моделювання покладено методи теорії подібності. Експериментальні дослідження проведено з метою перевірки адекватності запропонованої математичної моделі. Адекватність отриманих розрахункових залежностей обумовлена застосуванням математичних моделей, що базуються на загальних положеннях гідрогазодинаміки та кінетики зневоднення, а також зіставленням розрахункових та експериментальних даних.

Вперше проведено теоретичний опис та програмно реалізовано розрахунок гідродинамічних умов руху потоків та кінетики зміни температури і маси гранули у вихрових грануляторах, експериментально визначено вплив гідродинамічних показників руху газового потоку на термодинамічні показники робочого простору вихрового гранулятора. На базі теоретичного опису та експериментальних досліджень запропоновано модель визначення часу перебування гранул у робочому просторі вихрового гранулятора в умовах зміни її маси та стисненого руху. Одержано критеріальне рівняння, яке дозволяє визначити масообмінні характеристики процесу видалення вологи з гранули під час гранулювання у вихровому газовому потоці.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| Вступ..... | 5 |
| 1 Теоретичні основи розрахунку гідродинамічних умов руху потоків та кінетики зміни температури і маси гранули у вихрових грануляторах..... | 7 |
| 1.1 Гідродинаміка руху потоків..... | 7 |
| 1.2 Фізична модель процесів перенесення тепла і маси при гранулюванні..... | 13 |
| 1.3 Кінетика прогріву та зневоднення гранули..... | 17 |
| 2 Експериментальні дослідження термо- та гідродинамічних умов роботи вихрових грануляторів. масообмін у вихровому газовому потоці..... | 25 |
| 2.1 Вплив ступеню закрутки газового потоку на розподіл температур у робочому просторі вихрового гранулятора..... | 25 |
| 2.2 Визначення часу перебування гранули у вихровому грануляторі в умовах стисненого руху і зміни маси..... | 31 |
| 2.3 Масообмін в системі «газ-гранула» у вихровому грануляторі..... | 35 |
| 3 Програмна реалізація розрахунків..... | 37 |
| Висновки..... | 50 |
| Перелік джерел посилання..... | 51 |

ВСТУП

«Енергетична стратегія України в період до 2030 року» передбачає підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, економію палива та енергії і забезпечення на основі цих заходів значного зниження енергоємності виробництв хімічної галузі промисловості. Такі завдання обумовлені енергетичною кризою кінця XX – початку XXI століття, а також різким збільшенням вартості матеріалів. Хімічна промисловість України є одним з основних споживачів паливно-енергетичних ресурсів та характеризується низькими коефіцієнтами використання енергії. Перед дослідниками постає проблема розробки нових енергозберігаючих та, особливо, енергоефективних технологій, пов'язаних з розробкою апаратів великої питомої потужності та інтенсивної дії. Актуальним є питання розробки багатфункціональних апаратів суміщеної дії, в яких стає можливим одночасне проведення кількох процесів. В таких апаратах ефективність використання робочого об'єму повинна бути у 2-3 рази вищою, ніж в існуючих аналогах.

Значна кількість галузей хімічної промисловості застосовують гетерогенні процеси, які протікають в системі «газ-рідина-тверде тіло» і займають особливе місце серед інших процесів, адже швидкість їх протікання визначається закономірностями переносу маси і тепла у фазах, які взаємодіють. До таких процесів відносяться різноманітні способи гранулювання. Перспективним напрямом підвищення енергоефективності процесу гранулювання є застосування принципу зваженого (киплячого, псевдозрідженого) шару. Основні переваги такої гідродинамічної системи відзначено в роботах вітчизняних та зарубіжних науковців. Незважаючи на численні переваги, апарати з класичним псевдозрідженим шаром характеризуються рядом недоліків, серед яких виділяють нерівномірність часу перебування дисперсної фази та низьку стабільність шару в широкому діапазоні зміни навантажень по рідкій, твердій і газовій фазах. Ці

недоліки призводять до зниження інтенсивності тепломасообмінних процесів при гранулюванні.

Серед різноманіття способів інтенсифікації процесів хімічної технології закрутка потоків робочих середовищ є одним з найбільш простих і поширених способів. Це пов'язано з тим, що застосування закручених потоків призводить до поліпшення ефективності тепломасообміну а також вирівнюванню температурних нерівномірностей і стабілізації течій. В грануляторах закручування потоку за допомогою різноманітних пристроїв (завихрювачів) призводить до великомасштабного впливу на всі характеристики поля течії, а, отже, і тепломасообмін. При цьому характерна для закручених течій тривимірність поля швидкості і сумірність тангенціального і осьового компонента швидкості обумовлює формування тривимірного поля тиску з радіальним і поздовжнім градієнтом. Завдяки наявності поперечних складових швидкості - тангенційної і радіальної, посилюється конвективний перенос імпульсу, енергії і маси і змінюється вихрова структура внутрішніх закручених потоків. З цим і пов'язані такі необхідні в технічних додатках властивості закручених течій, що виражаються в їх здатності інтенсифікувати процеси тепломасообміну, вирівнювати локальні температурні неоднорідності за рахунок конвективного перемішування.

В теперішній час практично відсутні відомості про механізм руху, структуру, гідродинаміку та тепломасообмін у вихровому зваженому шарі при проведенні гранулювання, які б лягли в основу методики інженерного розрахунку обладнання такого типу. Необхідність проведення досліджень з метою створення математичних моделей гідродинаміки і тепломасообміну у вихрових потоках при гранулюванні, створення методів розрахунку та нових високоефективних конструкцій вихрових грануляторів визначають актуальність цієї роботи.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ГІДРОДИНАМІЧНИХ УМОВ РУХУ ПОТОКІВ ТА КІНЕТИКИ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ І МАСИ ГРАНУЛИ У ВИХРОВИХ ГРАНУЛЯТОРАХ

1.1 Гідродинаміка руху потоків

Безпосереднє моделювання турбулентних течій шляхом кількісного рішення рівнянь Нав'є-Стокса, записаних для миттєвих швидкостей, на сьогодні є невіршеним завданням. Однак для вирішення окремих завдань стає можливе застосування цього фундаментального рівняння гідродинаміки при виконанні ряду умов:

- а) робота з усередненими по часу значеннями швидкостей при моделюванні турбулентних течій;
- б) вибір системи координат, максимально задовольняє конкретного випадку і полегшує запис рівнянь.

Для проведення моделювання вирішувати зазначені рівняння зручно числовими методами (DEM - Discrete Element Method), визначаючи замість безперервного рішення дискретний набір шуканих значень в певному місці (осередку, вузлі сітки) просторі (при стаціонарному режимі руху потоків). Для досягнення максимальної точності рішення вибирається такий спосіб представлення дискретних значень, яка з цього приводу дискретизації відповідає аналогам алгебраїчних рівнянь. В результаті математичну задачу рішення системи диференціальних або інтегральних рівнянь можна звести до задачі розв'язання системи алгебраїчних рівнянь.

На практиці використовуються різні моделі чисельного рішення класичних рівнянь гідродинаміки для турбулентних течій, які з тих чи іншим успіхом використовуються в різних випадках, мають свої переваги і недоліки [1]: Direct numerical simulation (DNS), Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), Large Eddy Simulation (LES).

Враховуючи, що на практиці інтерес представляють, як правило, не миттєві, а усереднені за часом значення швидкостей, для математичного опису турбулентного руху закрученого газового потоку використовують рівняння Рейнольдса як модифікацію рівнянь Нав'є-Стокса [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{V}_i) + \frac{\partial}{\partial q_j}(\rho \bar{V}_i \bar{V}_j) + \frac{\partial}{\partial q_j}(\rho \overline{V'_i V'_j}) = -\frac{\partial p}{\partial q_i} + \frac{\partial}{\partial q_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial q_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial q_i} \right) \right] + f_i \quad (1.1)$$

де \bar{V} – усереднені за часом значення швидкостей; $\overline{V'}$ – складові пульсацій швидкостей; μ – коефіцієнт турбулентної в'язкості; t – час; ρ – густина газу; p – тиск; f_i – член, що характеризує дію масових сил; q_j – координатні осі (для випадку моделювання гідродинаміки в робочому об'ємі гранулятора, як показано вище, доцільно використовувати криволінійну систему координат), $i, j = 1 \dots 3$; для циліндричної системи координат (рисунок 1.1) індекс «1» - осьовий напрямок (z), індекс «2» - радіальний напрямок (r), індекс «3» - коловий напрямок (ϕ).

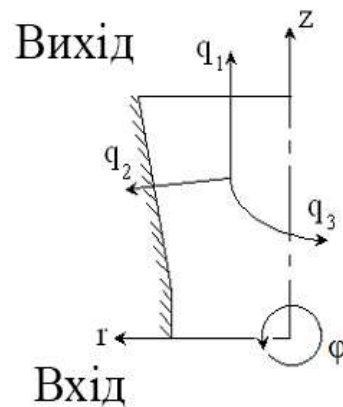


Рисунок 1.1 – Схема робочого простору ВГВС і система координат

Система рівнянь Рейнольдса доповнюється рівнянням нерозривності потоку:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial q_j}(\rho V_j) = 0. \quad (1.2)$$

Основна перевага методу опису і рішення задач гідродинаміки, заснованого на числовому рішенні повних рівнянь Рейнольдса, - точність і універсальність.

Для вирішення рівнянь Рейнольдса (1.1) використовується гіпотеза Бусінеска [3]. Відповідно до цієї гіпотези члени з пульсаціями швидкості $(\rho \overline{V_i V_j'})$ в рівнянні (1.3) пов'язані з усередненими характеристиками потоку таким співвідношенням:

$$\rho \overline{V_i V_j'} = -\mu \left(\frac{\partial \overline{V}_i}{\partial q_j} + \frac{\partial \overline{V}_j}{\partial q_i} \right) + \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k, \quad (1.3)$$

де $k = 0,5 (\overline{V_j V_j'})$ – кінетична енергія турбулентності, $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$, $\delta_i = 0$ при $i \neq j$.

Система рівнянь Рейнольдса є еліптичною. Вона застосовується для розрахунку течій в тих випадках, коли характеристики течії в довільній точці області залежать від структури течії як вище, так і нижче по потоку, тобто коли домінуючий напрямок руху рідини є відсутнім або слабо вираженим. Еліптичність системи рівнянь означає, що для її вирішення необхідно ставити граничні умови по всім змінним на всіх кордонах розрахункової області.

У разі моделювання вісесиметричних течій рівняння руху (1.1) і нерозривності потоку (1.2) істотно спрощуються. Для криволінійної (циліндричної) системи координат вони виглядають наступним чином (при введенні в рівняння (1.1) числа Рейнольдса $Re = V_0 D / \nu$ де характерні параметри D – діаметр вхідного перерізу розрахункової області; V_0 – середня витратна швидкість у вхідному перерізі; ν - кінематична в'язкість):

– рівняння Рейнольдса в проекції на осьовий напрямок q_1 :

$$\begin{aligned} & \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} - \frac{V_2^2}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} - \frac{V_3^2}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial (\overline{V_1' V_2'})}{\partial q_2} + \frac{(\overline{V_1' V_2'})}{H_1^2 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1^2 H_3)}{\partial q_2} + \\ & + \frac{1}{H_1} \frac{\partial (\overline{V_1' V_1'})}{\partial q_1} + \frac{(\overline{V_1' V_1'})}{H_1^2 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1 H_2 H_3)}{\partial q_1} - \frac{(\overline{V_2' V_2'})}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} - \frac{(\overline{V_3' V_3'})}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} = - \frac{1}{H_1} \frac{\partial p}{\partial q_1} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_1^2} \frac{\partial^2 V_1}{\partial q_1^2} + \frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_1}{\partial q_2^2} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} \frac{\partial(H_2 H_3 / H_1)}{\partial q_1} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} \frac{\partial(H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} + \right. \\
& \quad - \frac{2}{H_1 H_2^2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} + \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial(H_2 H_3)}{\partial q_1} \right) + \\
& \quad \left. + \frac{V_2}{H_1} \frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial(H_1 H_3)}{\partial q_2} \right) - \frac{V_2}{H_2 H_3} \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{H_3}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} \right) \right); \quad (1.4)
\end{aligned}$$

– рівняння Рейнольдса в проекції на радіальний напрямок q_2 :

$$\begin{aligned}
& \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_2}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} - \frac{V_1 V_2}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} - \frac{V_3^2}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} + \frac{1}{H_1} \frac{\partial \left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{\partial q_1} + \frac{\left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{H_1 H_2^2 H_3} \frac{\partial(H_2^2 H_3)}{\partial q_1} + \\
& \quad + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \left(\overline{V_2' V_2'} \right)}{\partial q_2} + \frac{\left(\overline{V_2' V_2'} \right)}{H_1 H_2^2 H_3} \frac{\partial(H_1 H_2 H_3)}{\partial q_2} - \frac{\left(\overline{V_3' V_3'} \right)}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} = - \frac{1}{H_2} \frac{\partial p}{\partial q_2} + \\
& \quad + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_1^2} \frac{\partial^2 V_2}{\partial q_1^2} + \frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_2}{\partial q_2^2} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_2}{\partial q_1} \frac{\partial(H_2 H_3 / H_1)}{\partial q_1} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} \frac{\partial(H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} + \right. \\
& \quad \left. + \frac{2}{H_1 H_2^2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial(H_1 H_3)}{\partial q_2} \right) \right); \quad (1.5)
\end{aligned}$$

– рівняння Рейнольдса в проекції на коловий напрямок q_3 :

$$\begin{aligned}
& \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_3}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_3}{\partial q_2} + \frac{V_1 V_3}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} + \frac{V_2 V_3}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \left(\overline{V_2' V_3'} \right)}{\partial q_2} + \frac{\left(\overline{V_2' V_3'} \right)}{H_1 H_2 H_3^2} \frac{\partial(H_1 H_3^2)}{\partial q_2} + \\
& \quad + \frac{1}{H_1} \frac{\partial \left(\overline{V_1' V_3'} \right)}{\partial q_1} + \frac{\left(\overline{V_1' V_3'} \right)}{H_1 H_2 H_3^2} \frac{\partial(H_2 H_3^2)}{\partial q_1} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_1^2} \frac{\partial^2 V_3}{\partial q_1^2} + \frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_3}{\partial q_2^2} + \right. \\
& \quad \left. + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_3}{\partial q_1} \frac{\partial(H_2 H_3 / H_1)}{\partial q_1} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_3}{\partial q_2} \frac{\partial(H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} + \frac{V_3}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{H_1}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} \right) \right); \quad (1.6)
\end{aligned}$$

- рівняння нерозривності:

$$\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \left(V_1 \frac{\partial(H_2 H_3)}{\partial q_1} + V_2 \frac{\partial(H_3 H_1)}{\partial q_2} \right) + \frac{1}{H_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} = 0, \quad (1.7)$$

де H_1, H_2, H_3 – коефіцієнт Ламе [2].

Подальше спрощення системи рівнянь (1.5-1.8) для моделювання вихрового потоку газової фази в робочому просторі гранулятора можливо при використанні таких припущень [4, 5]:

– передбачається наявність домінуючого напрямку течії, уздовж якого осьова складова швидкості газового потоку усюди позитивна і набагато перевищує радіальну;

– складова швидкості руху газового потоку в осьовому напрямку змінюється значно повільніше, ніж в радіальному;

– величини швидкостей і тиску в кожному елементарному обсязі газового потоку залежать тільки від умов нижче по потоку і не залежать від умов вище по потоку.

Ці припущення дозволяють провести аналіз порядків складових в рівняннях (1.4) - (1.7) і відкинути ті з них, які надають помітного впливу на результат розрахунку.

Після обліку припущень для вісесиметричного газового потоку рівняння (1.4) - (1.7) запишуться у вигляді

$$\begin{aligned} & \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} - \frac{V_3^2}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{\partial q_2} + \frac{\left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{H_1^2 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1^2 H_3)}{\partial q_2} = \\ & = - \frac{1}{H_1} \frac{\partial p}{\partial q_1} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_1}{\partial q_2^2} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} \frac{\partial (H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} \right); \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial p_r}{\partial q_2} = \frac{V_3^2}{H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2}; \quad (1.9)$$

$$\frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_3}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_3}{\partial q_2} + \frac{V_1 V_3}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} + \frac{V_2 V_3}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \left(\overline{V_2' V_3'} \right)}{\partial q_2} + \frac{\left(\overline{V_2' V_3'} \right)}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1 H_3^2)}{\partial q_2} =$$

$$= \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_3}{\partial q_2^2} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_3}{\partial q_2} \frac{\partial (H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} + \frac{V_3}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{H_1}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} \right) \right); \quad (1.10)$$

$$\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \left(V_1 \frac{\partial (H_2 H_3)}{\partial q_1} + V_2 \frac{\partial (H_3 H_1)}{\partial q_2} \right) + \frac{1}{H_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} = 0. \quad (1.11)$$

Ця система рівнянь замикається рівнянням сталості витрати:

$$\int_0^{Q_2} V_1 H_2 H_3 dq_2 = \text{const}, \quad (1.12)$$

де Q_2 – координата q_2 на стінці робочого об'єму ВГВС.

Отримана система рівнянь (1.8) - (1.12) має параболічний характер, і її рішення базується на методі, запропонованому Патанкармом і Сполдінгом [6-9] і реалізованому в процедурі SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) і його модифікаціях.

Чисельне рішення рівнянь математичної моделі виконується за один маршовий прохід від вхідного перерізу робочого об'єму до вихідного з використанням методу скінченних об'ємів з елементами кінцево-елементного підходу. Перед виконанням розрахунку будується розрахункова сітка (рисунок 1.2), і невідомі значення швидкостей і тиску відшукуються в вузлах цієї сітки.

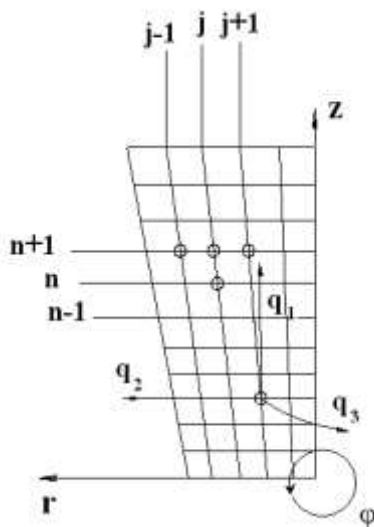


Рисунок 1.2 – Побудова розрахункової сітки

2.2 Фізична модель процесів перенесення тепла і маси при гранулюванні

Отримання пористої аміачної селітри здійснюється наступними методами [10-13]:

1. Введення в розплав (розчин) пороутворюючих і модифікаційних домішок.
2. Термообробка гранул.
3. Зволоження та висушування гранул.

Кожен з цих методів забезпечує необхідну поглинаючу і утримувальну здатність гранул по відношенню до солярного масла; при цьому знижуються екологічні показники гранул (метод 1), відбувається втрата їх міцності (метод 2), ускладнюється схема виробництва (метод 3).

Для отримання якісних промислових вибухових речовин необхідно в основі мати пористу аміачну селітру з рівномірно розподіленою по структурі гранули пористістю, яка забезпечує не тільки високу здатність вбирати масло, але ще і володіє високою утримувальною здатністю, при цьому зберігаючи властивості міцності.

Переваги способу отримання гранул пористої структури в вихровому потоці:

- зменшення часу перебування гранул в об'ємі апарату і збереження їх міцності;
- зменшення циклів термообробки гранул;
- поєднання в одному апараті стадій зволоження і висушування гранул;

В основу способу зволоження гранули з наступною її термообробкою у вихровому газовому потоці покладено процес видалення вологи з матеріалу гранули. Цей процес повинен протікати дуже інтенсивно, щоб влага, яка видаляється під час термообробки у вигляді пари при виході із гранул утворювала пори - розгалужену мережу капілярів [11].

На основі даних досліджень [14-17] є підстави припустити, що об'єм пор буде співрозмірним з об'ємом пари вологи, яка видаляється. Проте слід врахувати, що

пари вологи, що видаляються з шарів розташованих ближче до центру гранули, віддалятимуться за межі гранули через пори, що утворилися, які були отримані в наслідок видалення вологи з більш віддалених шарів від центру гранули [18].

У загальному вигляді процес одержання пористої структури можна представити у вигляді послідовності таких стадій:

- насичення (зволоження) гранули рідким наповнювачем. Найпростіший спосіб це зволоження гранул водою. На цій стадії необхідно визначити такі параметри як вологовміст повітря, гранули і необхідний час перебування гранули у вологому середовищі (від цього залежить вологовміст гранул, розподіл вологи уздовж радіуса гранули, показники міцності гранули, при зменшенні яких можливий процес руйнування гранули);

- транспортування вологих гранул у зону видалення вологи - зону формування пористої структури в гранулі;

- видалення гранул із зони формування пористої структури.

Як показують попередні дослідження в області одержання гранул пористої аміачної селітри, термодинамічні й гідродинамічні умови (температура, швидкість газового потоку, час контакту гранул з гарячим газовим (повітряним) середовищем) є основними факторами формування пористої структури. Крім того, після видалення основної кількості вологи й утворення пор, гранулу необхідно певний час піддати процесу сушіння для забезпечення необхідної міцності гранул. В іншому випадку гранули можуть істотно втратити свою міцність.

Таким чином, у розрахунках необхідно передбачити опис кінетики прогріву гранули і визначення мінімального часу її сушіння, значення якого по своїй величині, звичайно, перевищує час, який потрібний на прогрів гранули до необхідної температури.

Гранула являє собою кулясте тіло з порами (рисунок 1.3), характерним розміром якого є радіус "R" і з погляду врахування фізико-хімічних властивостей у розрахунках - склад речовини гранули (у тому числі, як головний показник, вологовміст).

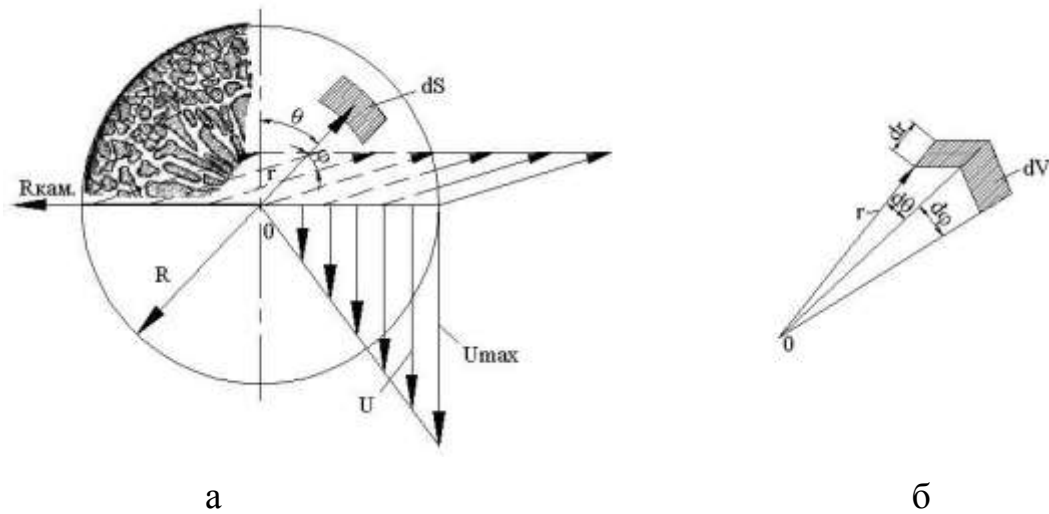


Рисунок 1.3 – Схема розподілу вологи в гранулі й вплив газового потоку на гранулу: а - основні геометричні параметри гранули; б - до визначення величини елемента об'єму d усередині гранули

З метою опису впливу термодинамічних параметрів потоку газу на зволожену гранулу розроблена фізична модель в основу якої покладені наступні припущення:

- для всієї сукупності гранул, що перебувають у робочій зоні певний обраний діаметр гранул є визначальним, тобто формування пористої структури гранул, які мають зоні певний обраний діаметр, переважно визначає пористу структуру всього потоку гранул;

- гранула обмивається потоком газу (повітря), що має постійну температуру. З цього твердження з достатнім ступенем точності можна припустити, що температура поверхні гранули протягом всього часу перебування в робочій зоні буде постійною;

- у зв'язку з тим, що гранула має малі розміри від 1 мм до 4 мм, а переважну частину гранул, що одержуються на азотних підприємствах, складають гранули розміром від 2 мм до 3 мм, можна припустити, що у зв'язку з гігроскопічністю гранул процес зволоження гранул необхідно зводити до мінімуму, що дозволяє припустити, що насичення вологою відбувається за лінійним законом уздовж радіуса;

- пороутворення починається послідовно від верхнього шару й фронт пороутворення рухається уздовж радіуса гранули до її центра, являючи собою сферичну поверхню;

- волога, що випаровується, безперешкодно видаляється із гранули через утворені пори в попередніх шарах речовини з більшим діаметром, «зовнішніх» шарів (ці шари розташовуються ближче до поверхні гранули) з якого складається гранула;

- співрозмірність об'єму утворених пор у гранулі з об'ємом пари вилученої вологи є причиною того, що утримуюча здатність гранул більше значення вологовмісту.

Виходячи з допущень, що наводяться вище, можна створювати математичну модель для визначення основних гідро- й термодинамічних параметрів, вплив яких на гранулу дозволяє створити в ній пористу структуру.

Важливим аспектом при проектуванні вихрових грануляторів для одержання пористої аміачної селітри є врахування при розрахунках явища стисненого руху гранул. Автори [18-23] пропонують враховувати умови стисненого руху при обчисленні часу перебування частинок в робочому просторі пристрою

$$\tau_{cm} = \tau f_{er}(\psi), \quad (1.13)$$

де τ_{cm} - швидкість стисненого руху частинок дисперсної фази; τ - швидкість руху одиночної частинки; $f_{er}(\psi)$ - емпірична функція впливу стисненості на час перебування частинки в робочому просторі пристрою.

Функція $f_{er}(\psi)$ має вигляд:

$$f_{er}(\psi) = (1 - \psi)^{-m}, \quad (1.14)$$

де m – емпіричний показник ступеню (коефіцієнт стисненості для обчислення часу).

На даний час літературні дані щодо визначення емпіричних показника m у формулі (1.14) відповідно для випадку вихрового зваженого шару відсутні.

Завдання визначення емпіричних показників також ускладнене через наявність у вихровому зваженому шарі окремих зон за висотою з різною інтенсивністю та переважним напрямом руху гранул.

1.3 Кінетика прогріву та зневоднення гранули

Виходячи з вищевказаних припущень, вважаємо гранулу суцільним кулястим тілом. Розподіл температур у такому тілі описується диференціальним рівнянням [24]:

$$\frac{d}{d\tau}(rT(r, \tau)) = a \left(\frac{d^2}{dr^2}(rT(r, \tau)) \right) \quad (1.15)$$

де r - поточне значення радіуса, a - коефіцієнт теплопровідності.

Рішенням цього рівняння буде:

$$T(r, \tau) = T_C - (T_C - T_0) \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2(\sin(n\pi) - n\pi \cos(n\pi))R \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{n^2 \pi^2 a \tau}{R^2}\right)}}{(n\pi - \sin(n\pi) \cos(n\pi))n\pi} \right) \right) \quad (1.16)$$

У результаті сушіння діаметр гранули збільшується завдяки модифікаційним переходам і утворенню пористої структури.

На рисунках 1.4–1.7 представлено результати обрахунку кінетики зміни температури гранули за радіусом в певний проміжок часу та температури гранули в заданому часовому діапазоні. Гранули різного діаметру прогриваються з різною інтенсивністю, що дає підстави до визначення загального часу прогріву гранул у полідисперсній системі на рівні максимального часу прогріву для гранули найбільшого діаметра. Зважаючи на те, що, як показали результати експериментальних досліджень, в нижній частині вихрового гранулятора розподіл вологих гранул за розміром має нечіткий характер, рівномірний прогрів всієї полідисперсної системи можливий лише за дотримання вказаного вище часу.

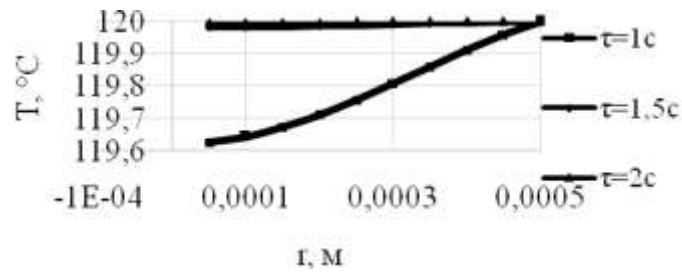


Рисунок 1.4 – Кінетика прогріву гранули аміачної селітри за радіусом при $T_c=120^\circ\text{C}$ $T_0=30^\circ\text{C}$, $d=1$ мм

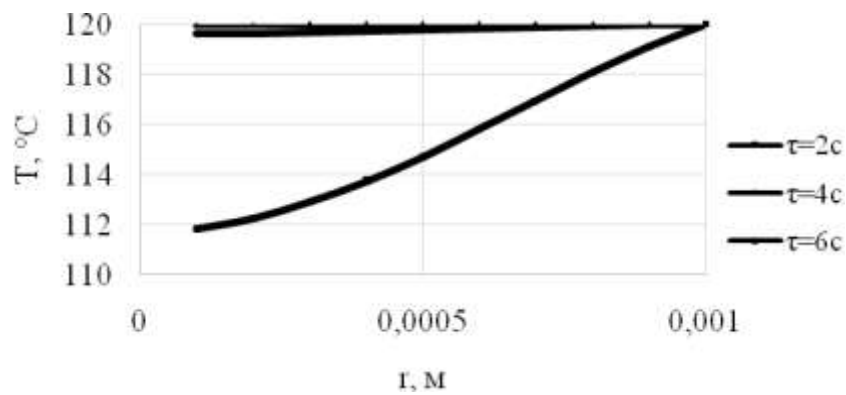


Рисунок 1.5 – Кінетика прогріву гранули аміачної селітри за радіусом при $T_c=120^\circ\text{C}$ $T_0=30^\circ\text{C}$, $d=2$ мм

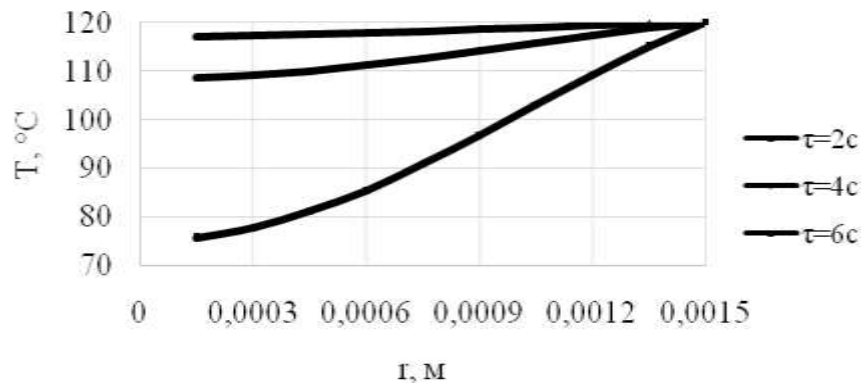
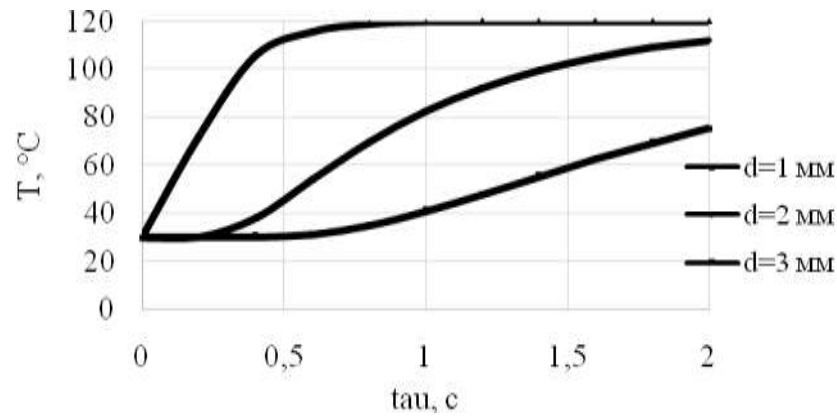


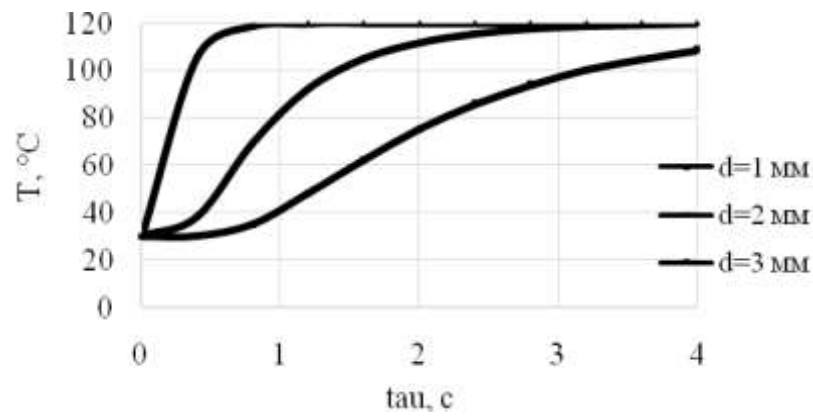
Рисунок 1.6 – Кінетика прогріву гранули аміачної селітри за радіусом при $T_c=120^\circ\text{C}$ $T_0=30^\circ\text{C}$, $d=3$ мм

Представлені розрахунки справедливі для теплоносія з постійною температурою і не враховують вплив температури гранул (наприклад, при

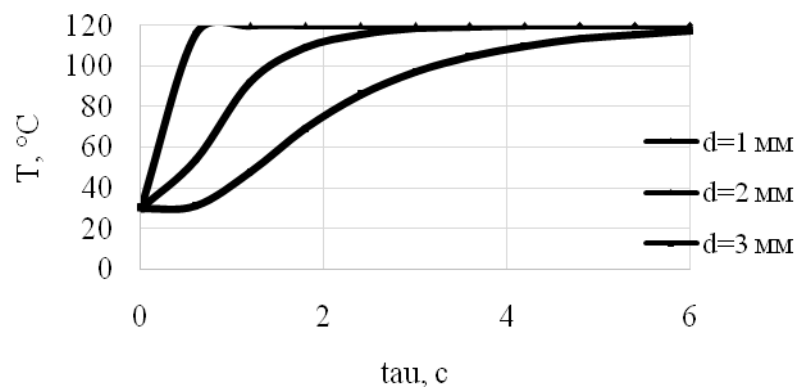
введенні ретура) і рідкої фази (зволожуючого агента), які вводяться в апарат на зміну температури теплоносія.



а



б



в

Рисунок 1.7 – Кінетика прогріву гранули аміачної селітри при $T_c = 120^\circ\text{C}$ $T_0 = 30^\circ\text{C}$:
а – $\tau = 2 \text{ c}$; б – $\tau = 4 \text{ c}$; в – $\tau = 6 \text{ c}$.

Таким чином гранула буде прогріватись разом з теплоносієм до певної визначеної температури, а лише потім почнеться інтенсивне видалення вологи.

Цей фактор збільшує загальний необхідний час перебування гранул в апараті. Розрахунки за наведенню вище математичною моделлю показали, що для повного прогріву гранули з $d=2$ мм від температури 20°C до 120°C в потоці теплоносія з температурою до 120° необхідно 8 секунд.

Якщо проводити поступеневий розрахунок з урахуванням того, що теплоносій при введенні гранул або зволоження охолоджується, то поступовий прогрів гранули до температури 120° буде займати проміжок часу у 3-3,5 разів більший, ніж у попередньому випадку. Результати експериментальних досліджень кінетики прогріву робочого простору вихрового гранулятора за різних умов, що будуть наведені в наступних підрозділах дисертаційної роботи, є підґрунтям для визначення температури теплоносія при поступовому прогріві гранули одночасно з потоком теплоносія.

Одночасно з урахуванням впливу поступового прогріву гранули разом з теплоносієм на загальний час перебування гранули в робочому просторі вихрового тгранулятора необхідно встановити закономірності зміни часу перебування гранули в апараті залежно від умов взаємодії з іншими гранулами (коефіцієнта стисненості частинки f_{er}). Цей показник буде впливати на траєкторію руху гранули в кожній зоні гранулятора та на загальний час її перебування в робочому просторі гранулятора [25]. Визначенню часу перебування гранули в апараті залежно від величини стисненості руху за умов зміни її маси під час видалення вологи буде представлено в окремому підрозділі дисертаційної роботи.

Виходячи зі схеми [26, 27] і величини dm сухої речовини, вага елементарного об'єму dV гранули з урахуванням наявності вологи дорівнює:

$$dm = \rho_{zp}(1+U(r,\tau))r^2 \sin\theta d\theta d\phi dr, \quad (1.17)$$

де $dV = r^2 \sin\theta d\theta d\phi dr$ - величина елементарного об'єму [14].

З іншого боку, маса «сухої» гранули радіусом R у загальному випадку дорівнює

$$M_{sr} = 2 \int_0^R \int_0^\pi \int_0^\pi \rho_{2p} r^2 \sin(\Theta) d\Theta d\phi dr, \quad (1.18)$$

або після інтегрування

$$M_s = \frac{4}{3} \cdot \rho_{2p} \cdot \pi \cdot R^3. \quad (1.19)$$

З урахуванням, що U є функцією від r і часу сушіння τ

$$Mg_{n=\infty}(\tau) = \frac{4}{3} \rho_2 \times \left(1 + \frac{\int_0^R U_p + (U_0 - U_p) \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin(n\pi) - n\pi \cos(n\pi)) R \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) e^{\left(-\frac{n\pi m \tau}{R}\right)}}{(n\pi - \sin(n\pi) \cos(n\pi)) r n \pi} \right) dr}{R} \right) \pi R^3 \quad (1.20)$$

де m - коефіцієнт дифузії.

Крім цього, у вищенаведеному рівнянні враховувалося, що в кожний момент часу вологовміст у гранулі приймає деяке середнє значення, що обчислюється виходячи із властивостей інтеграла.

Проведені розрахунки показують, що в розв'язанні диференціального рівняння, що описує процес масопередачі в процесі сушіння, визначною є сума перших двох складових. Подальше обчислення суми призводить до зміни отриманого результату в сьомому знаку дробової частини. На підставі цього висновку є можливість обмежитись обчисленням двох перших коефіцієнтів суми. Таким чином, рівняння для визначення зміни вологості в часі набуває вигляду:

$$U_s(\tau) = \frac{\int_0^R U_p + (U_0 - U_p) \left(\frac{2R \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{-\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} - R \sin\left(\frac{2\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{-4\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} \right) dr}{R} \quad (1.21)$$

Інтегруючи отриманий вираз, стає можливим отримання залежності для визначення маси гранули в будь-який момент часу в процесі сушіння

$$Mg(\tau) = \frac{4}{3} \rho_2 \pi R^3 \times \left(1 + \frac{\int_0^R U_p + (U_0 - U_p) \left(\frac{2R \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{-\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} - R \sin\left(\frac{2\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{-4\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} \right) dr}{R} \right) + 2R \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) (-\sin(n\pi) + n\pi \cos(n\pi)) e^{\left(\frac{-n^2 \pi^2 m \tau}{R^2}\right)}}{(n\pi - \sin(n\pi) \cos(n\pi)) n} \right) U_p dr. \quad (1.22)$$

На рисунках 1.8, 1.9 показано кінетику зміни відносної маси гранули аміачної селітри різного діаметра за різних умов зволоження і вимог до вологовмісту кінцевого продукту.

Слід зазначити, що в першому періоді сушіння з постійною швидкістю у зоні інтенсивного вихрового руху гранул видаляється до 60% необхідної вологи.

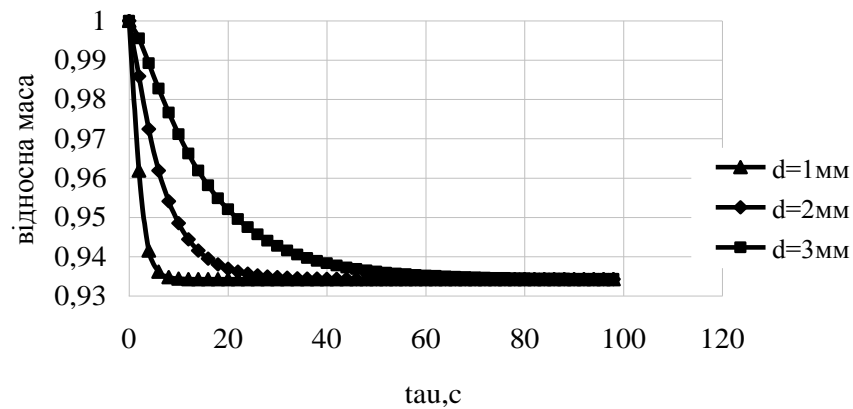


Рисунок 1.8 – Кінетика зміни відносної маси гранули аміачної селітри при $T_c = 100^\circ\text{C}$, $U_{\text{ноч}} = 0,01$ кг вологи/кг матеріалу, $U_{\text{кін}} = 0,003$ вологи/кг матеріалу

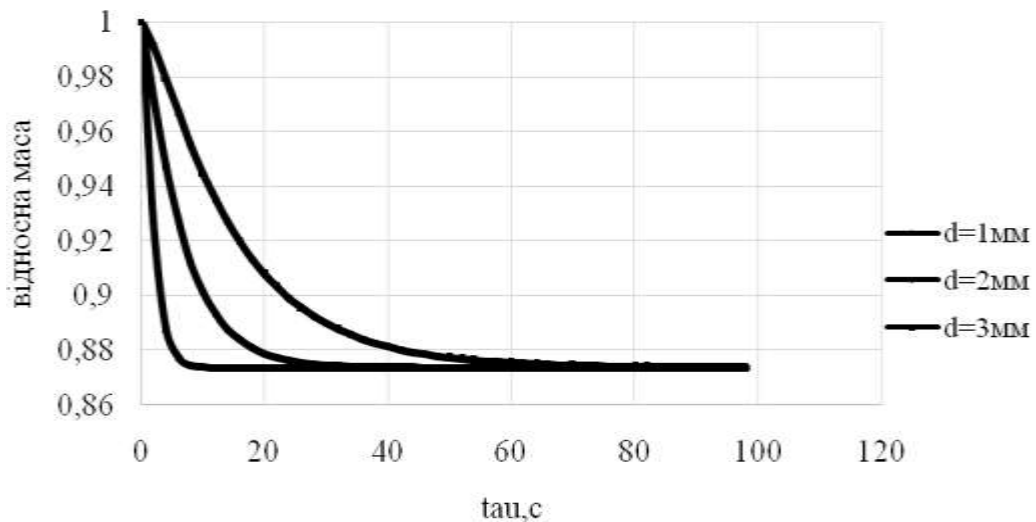


Рисунок 1.9 – Кінетика зміни відносної маси гранули аміачної селітри при $T_c = 100^\circ\text{C}$, $U_{\text{ноч}} = 0,02$ кг вологи/кг матеріалу, $U_{\text{кін}} = 0,001$ вологи/кг матеріалу

Кількість вологи, що залишилась, послідовно видаляється переважно в зоні комбінованого висхідного та вихрового руху гранул. У третій зоні - переважного висхідного руху – волога видаляється незначно, що підтвердили результати експериментальних досліджень залежності ступеню закрутки газового потоку на відносну інтенсивність видалення вологи з гранули, що будуть наведені нижче.

Зміна маси гранули аміачної селітри різного діаметру з початковим і кінцевим вологовмістом $U_{ноч}=0,02$ кг води/кг матеріалу і $U_{кін}=0,001$ кг води/кг матеріалу відповідно представлені на рисунку 1.10.

В умовах зміни маси процес класифікації гранул у робочому просторі вихрового гранулятора сповільнюється внаслідок стисненого руху гранул. Вплив цього явища на загальний час перебування гранул в апараті представлено в наступних розділах дисертаційної роботи.

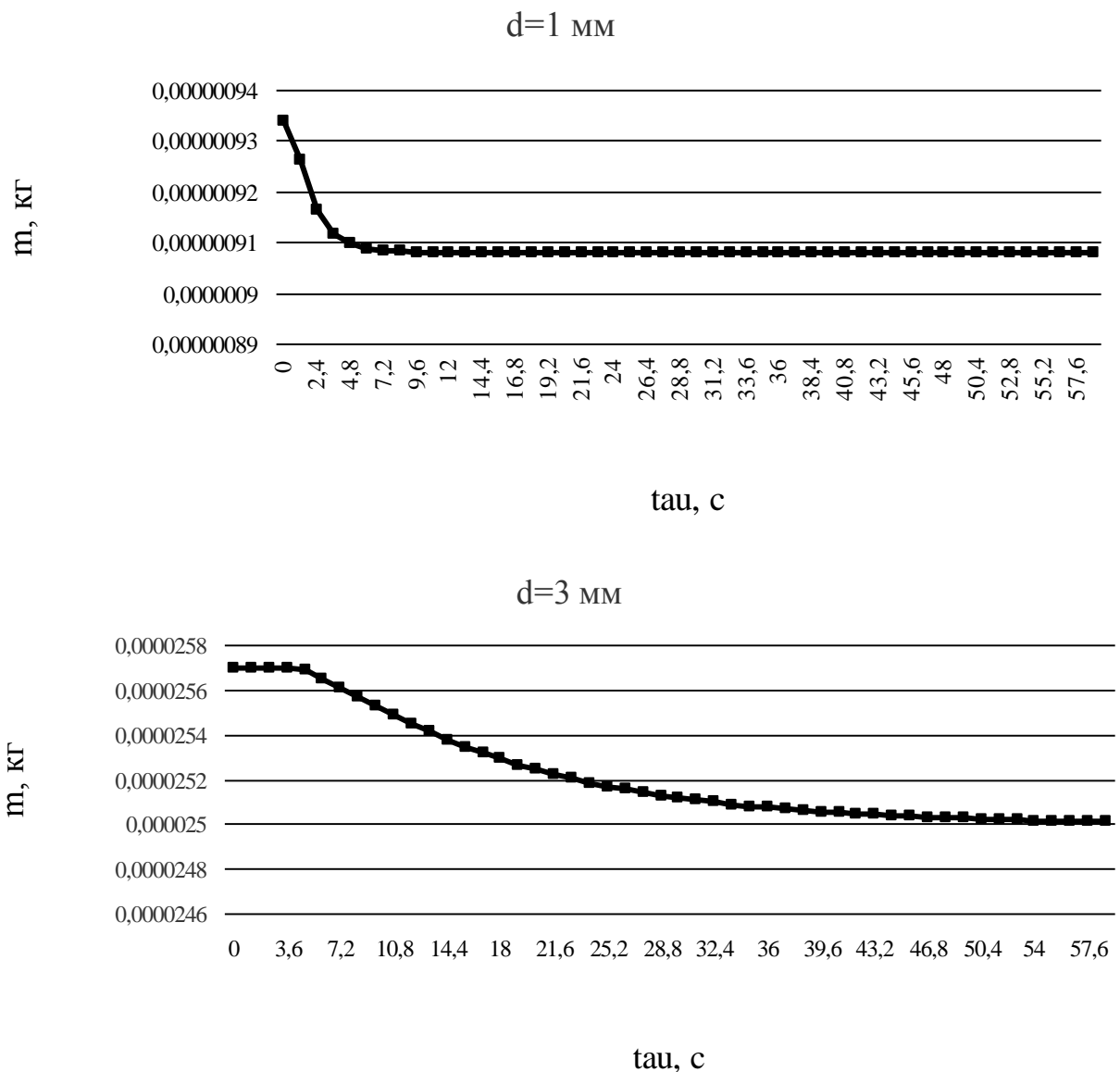


Рисунок 1.10 – Кінетика зміни маси гранули аміачної селітри при $T_c=100^\circ\text{C}$, $U_{ноч}=0,02$ кг води/кг матеріалу, $U_{кін}=0,001$ води/кг матеріалу

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМО- ТА ГІДРОДИНАМІЧНИХ УМОВ РОБОТИ ВИХРОВИХ ГРАНУЛЯТОРІВ. МАСООБМІН У ВИХРОВОМУ ГАЗОВОМУ ПОТОЦІ

2.1 Вплив ступеню закрутки газového потоку на розподіл температур у робочому просторі вихрового гранулятора

На рисунках 2.1–2.3 показано результати визначення поля температур теплоносія в робочому просторі вихрового гранулятора.

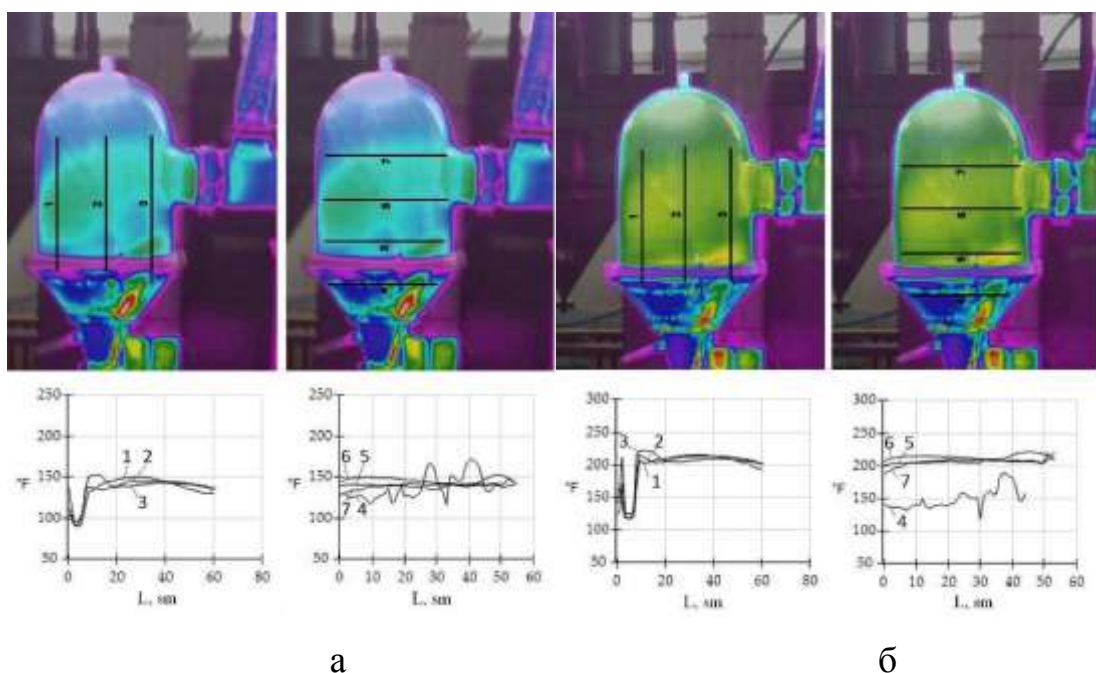


Рисунок 2.1 – Температурний режим роботи вихрового гранулятора (вихід на робочий режим, порожній апарат, однофазна система):

а - 4 хвилини з; б - 10 хвилин

Залежно від ступеню закрутки теплоносія прогрівання окремих зон робочого простору вихрового гранулятора відбувається з різною інтенсивністю. Оцінити розподіл температури теплоносія у вертикальних та горизонтальних перерізах вихрового гранулятора стає можливим за допомогою тепловізійних досліджень. Результати цих досліджень дозволяють визначити мінімальну, максимальну і середню температуру зріджуючого агента, а також температуру теплоносія в центрі гранулятора у визначений дослідженнями проміжок часу в умовах

присутності або відсутності гранул. Такий підхід дозволяє відпрацювати алгоритм керування та з достатнім ступенем точності одержати вихідні дані до кінетичного розрахунку прогріву та зневоднення гранули.

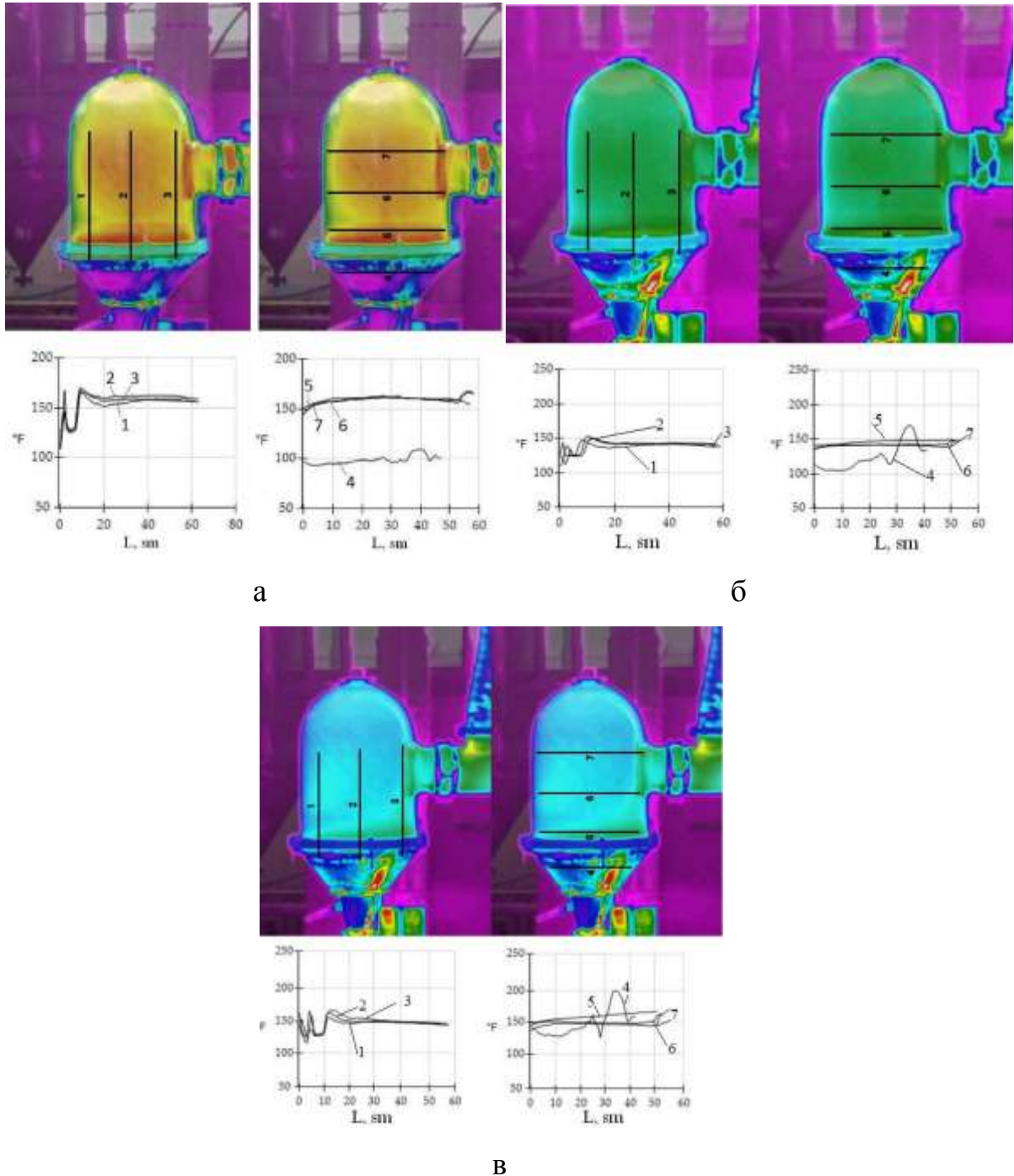


Рисунок 2.2 – Температурний режим роботи вихрового гранулятора (двофазна система «гранули - теплоносій»): а - 6 хвилин; б - 11 хвилин; в - 15 хвилин

Узагальнена картина зміни середньої температури теплоносія подана на рисунку 2.3. За результатами загального аналізу картини розподілу поля температур теплоносія запропоновано два способи сушіння гранул:

- одночасно з нагріванням гарячого теплоносія;
- періодичним введенням для сушіння після повного нагріву гарячого теплоносія і подальшим нагріванням.

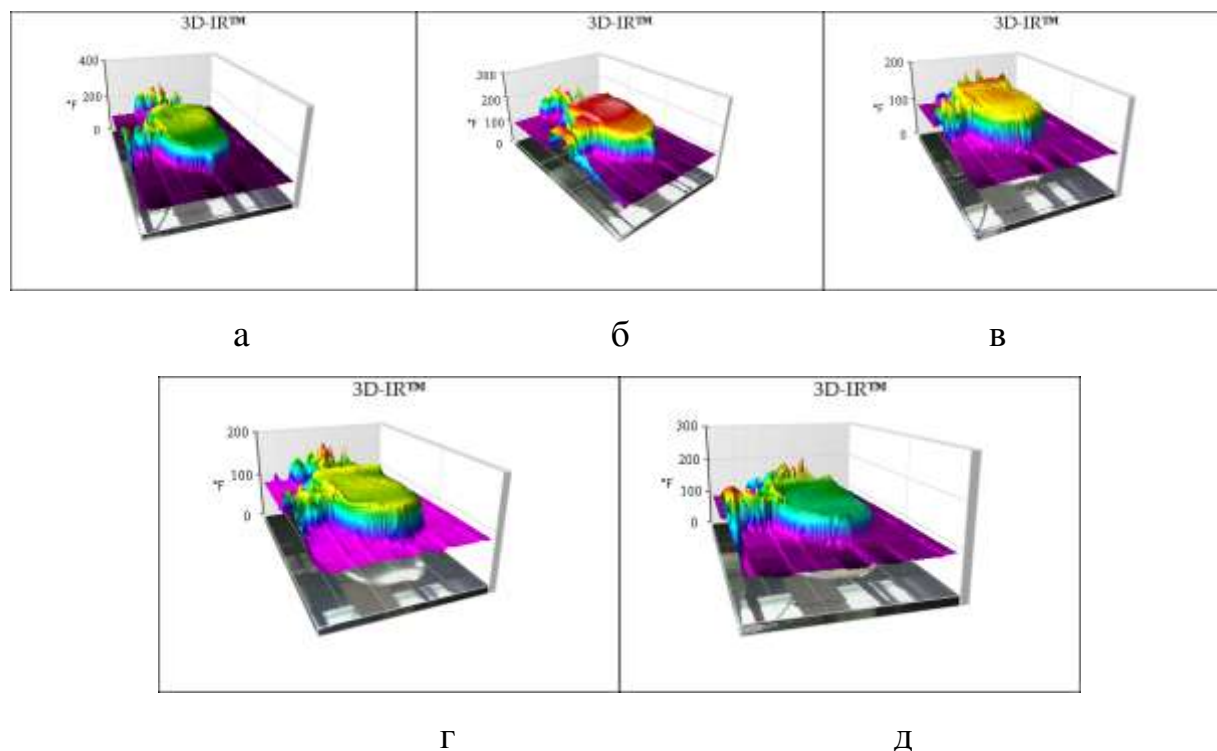


Рисунок 2.3 – Кінетика прогріву робочого простору вихрового гранулятора (двофазна система гранули-газовий потік, відлік часу - з моменту завантаження гранул в вихровий гранулятор) після 1 хвилини (а); 2,5 хвилин (б); 8 хвилин (в); 10, 5 хвилин (г); 18,5 хвилин (д)

У першому випадку прогрівання буде «м'яким» (поступовий прогрів гранули збільшує час її сушіння, але запобігає від руйнуванню ядра). У другому випадку інтенсивність видалення вологи збільшується (різкий нагрів дозволяє зменшити час прогріву гранули, збільшити інтенсивність видалення вологи), але при цьому можливе руйнування ядра. Підбір оптимального термодинамічної режиму роботи гранулятора дозволить провести повне видалення вологи з гранули із збереженням її міцності і утворенням пористого поверхневого шару [28]. При проведенні досліджень використовувався другий метод сушіння.

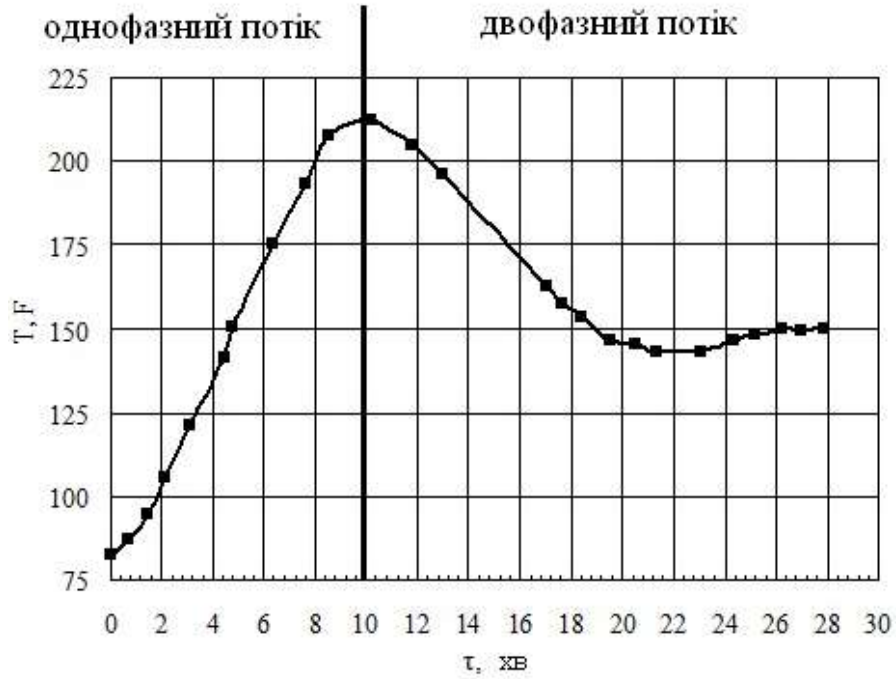


Рисунок 2.4 – Узагальнена картина зміни середньої температури теплоносія за часом

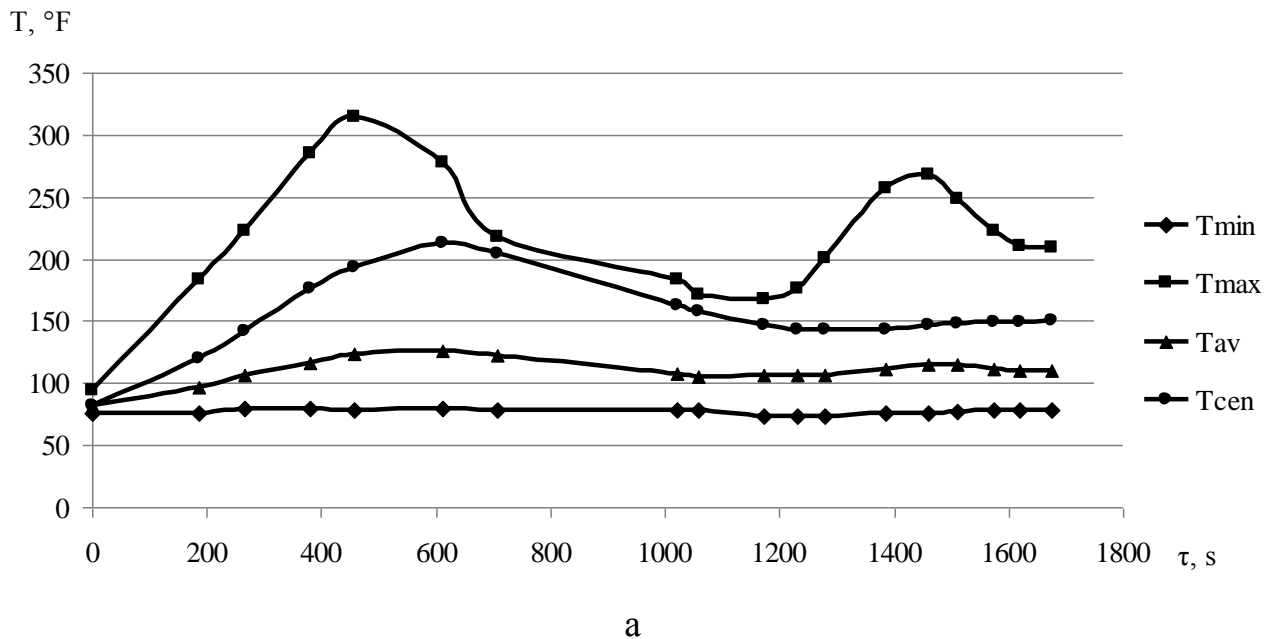


Рисунок 2.5 – Динаміка зміни температури робочого простору вихрового гранулятора залежно від інтенсивності закрутки зріджуючого агента V_φ : а – $V_\varphi = 5,2$ м/с; б – $V_\varphi = 6,8$ м/с; в – $V_\varphi = 8,1$ м/с. Температура зріджуючого агента: T_{min} – мінімальна температура; T_{max} – максимальна температура; T_{av} – середня температура; T_{cen} – температура в центрі. Час введення гранул – 650 с.

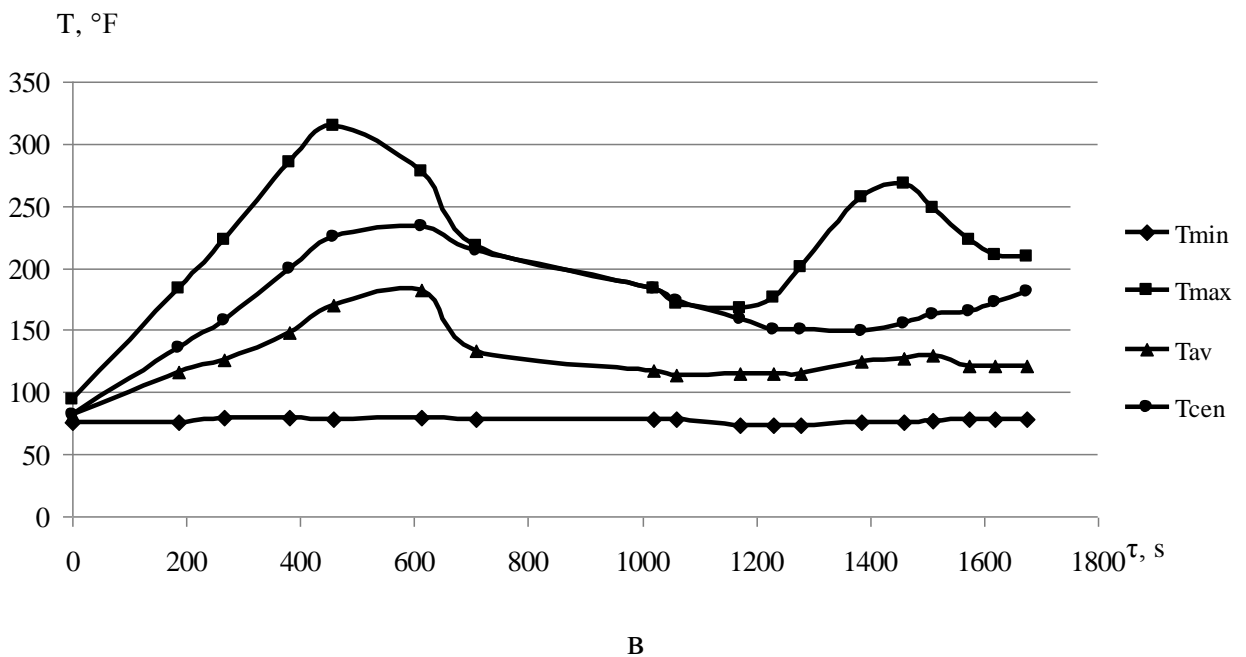
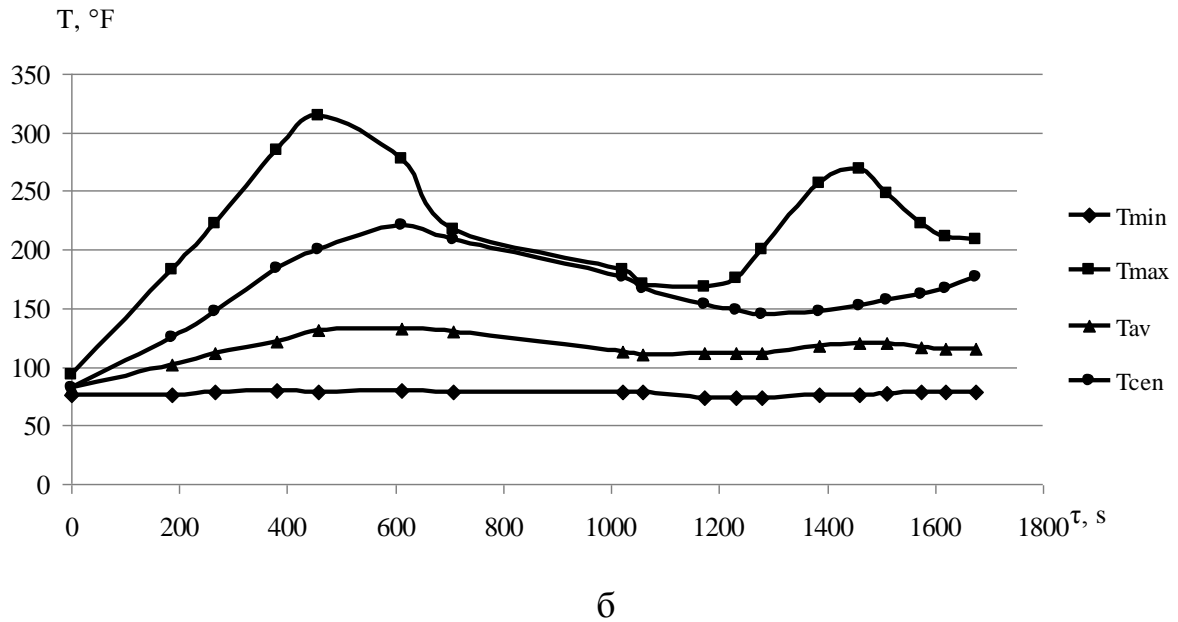


Рисунок 2.5 – Динаміка зміни температури робочого простору вихрового гранулятора залежно від інтенсивності закрутки зріджуючого агента (продовження)

Результати експериментальних досліджень показали наступне:

- зміна температурного поля в робочому просторі вихрового гранулятора в часі характеризується двома екстремумами (момент введення гранул в потік

гарячого теплоносія і момент початку одночасного нагрівання гранул і гарячого теплоносія);

- прогрів робочого простору вихрового гранулятора при виході на робочий режим здійснюється нерівномірно з характерними зонами зниженої тем-ператури (з плином часу прогрівання стає більш рівномірним);

- при збільшенні ступеня закрутки підвищується середня температура зріджуючого агента і його температура в центрі апарату;

- у вертикальних перерізах апарату в нижніх шарах зріджуючого агента (після введення гранул - двофазної системи) дещо зменшується температура в центральній області. Це можна пояснити наявністю інтенсивного вихрового руху зріджуючого агента (двофазної системи) в цій зоні.

- в горизонтальних перерізах апарату спостерігається деяке збільшення температури зріджуючого агента (після введення гранул - двофазної системи) внаслідок інтенсивної закрутки потоків;

- після завантаження гранул температура в зоні руху гранул різко падає, інтенсивність подальшого прогріву гранулятора також знижується.

Результати експериментальних досліджень дозволяють визначити температуру теплоносія в робочому просторі вихрового гранулятора в певний проміжок часу і застосувати цей показник для розрахунку кінетики прогріву та зневоднення гранули. Уточнення показника температури теплоносія в грануляторі дозволяє провести розрахунки з визначенням мінімального часу сушіння гранули, щоб уникнути небажаного її перегріву та руйнування ядра. В подальшому за результатами гідродинамічного розрахунку та оцінки умов стисненого руху гранул необхідно визначити оптимальну конструкцію робочого простору гранулятора.

2.2 Визначення часу перебування гранули у вихровому грануляторі в умовах стисненого руху і зміни маси

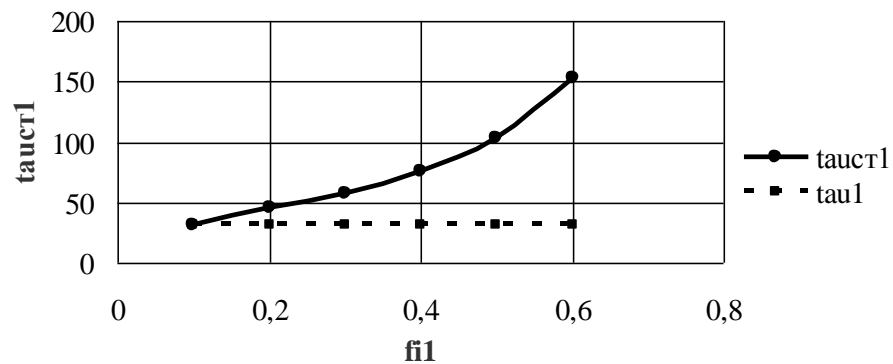
Зважаючи на те, що попередніми дослідженнями показано факт зміни порізності вихрового зваженого шару за висотою, а також наявність трьох характерних зон руху гранул, застосування при розрахунках часу перебування гранул у робочому просторі вихрового гранулятора середнього значення вмісту дисперсної фази в двофазній системі ψ призводить до значної похибки розрахунків часу перебування гранули за формулою (1.13).

Враховуючи те, що на процес зневоднення гранульованого матеріалу повинен відводитись визначений час, введення коефіцієнту стисненості в розрахунки для кожної зони гранулятора та визначення часу перебування гранули для кожної зони гранулятора окремо дозволить досягти оптимальних умов термообробки гранул без їх перегрівання або наявності залишкової, більшої за мінімально необхідну, кількості вологи.

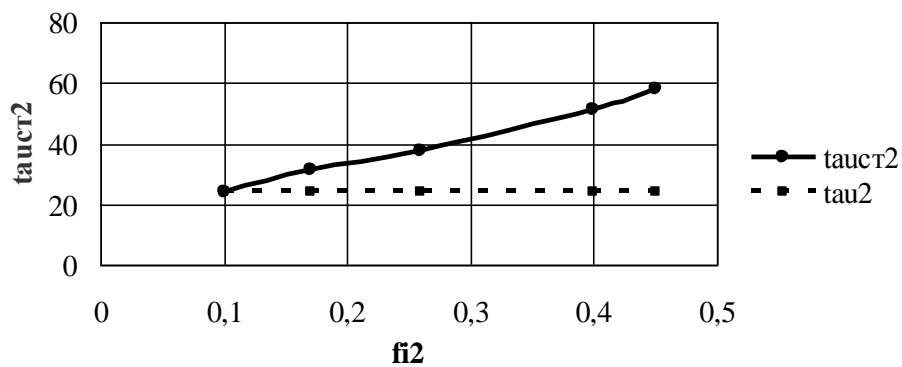
На рисунку 2.6 представлені результати експериментальних досліджень часу перебування гранули з визначеними вологісними параметрами в робочому просторі вихрового гранулятора в режимі вільного ($\psi \leq 0,1$) та стисненого руху. Експериментальні дослідження проводились при застосування газорозподільних пристроїв лопатевого типу.

Збільшення часу перебування гранули у кожній зоні відбувається з різною інтенсивністю, зважаючи на зміну порізності зваженого шару і різний напрям вектору сумарної швидкості руху газового потоку за висотою пристрою. При цьому переважно гранула знаходиться в зоні вихрового руху гранул, яка співпадає з «активною» зоною, де видалається більша частина вологи в режимі постійної швидкості сушіння. У другій та третій зонах гранулятора, де час перебування гранули менший за першу зону 3-5 разів (рисунок 2.7), видалення вологи відбувається в режимі спадаючої швидкості сушіння. Припущення про співпадіння зон руху гранул у вихровому грануляторі з періодами сушіння

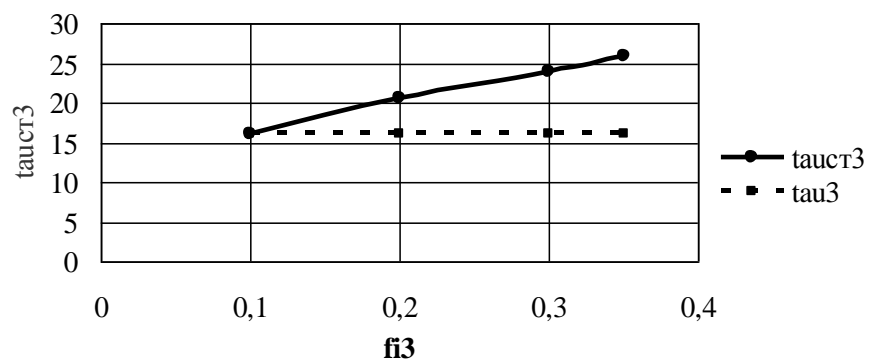
підтверджується результатами визначення швидкості сушіння по висоті пристрою (крива сушіння аміачної селітри представлена на рисунку 2.8).



а



б



в

Рисунок 2.6 – Час перебування гранули аміачної селітри (полідисперсна система, що складається з 75-80% гранул діаметром $d=2-3$ мм) з $U_{ноч}=0,02$ кг вологи/кг матеріалу і $U_{кин}=0,001$ кг вологи/кг матеріалу при $T_c=100^\circ\text{C}$ в окремих зонах гранулятора: а – зона I; б – зона II; в – зона III

У першій зоні видаляється до 60% необхідної вологи, у другій зоні – до 30%, третя зона характеризується повільним видаленням вологи і несе більше гідродинамічну функцію – функцію сепараційної зони і зони відведенні дрібних або легких гранул для здійснення внутрішньої циркуляції ретура.

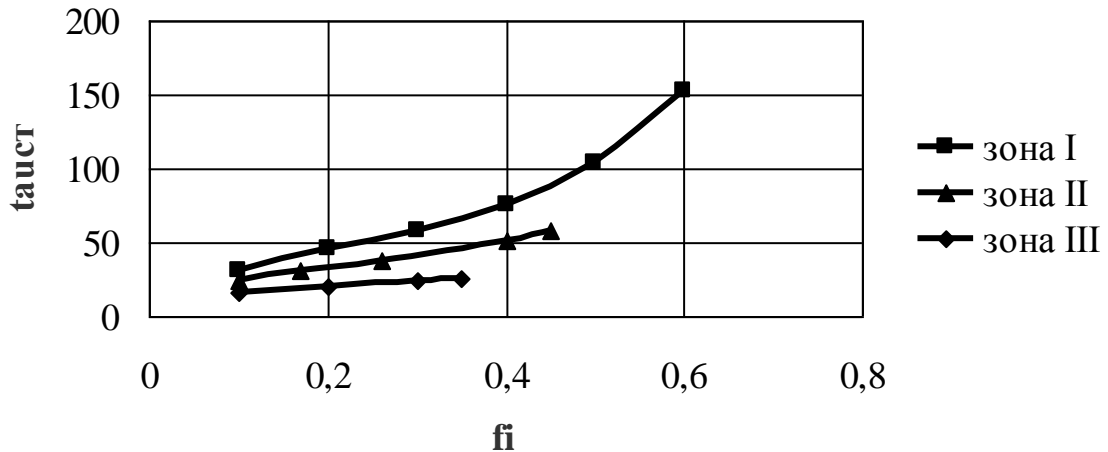


Рисунок 2.7 – Визначення часу перебування гранули в окремих зонах робочого простору вихрового гранулятора

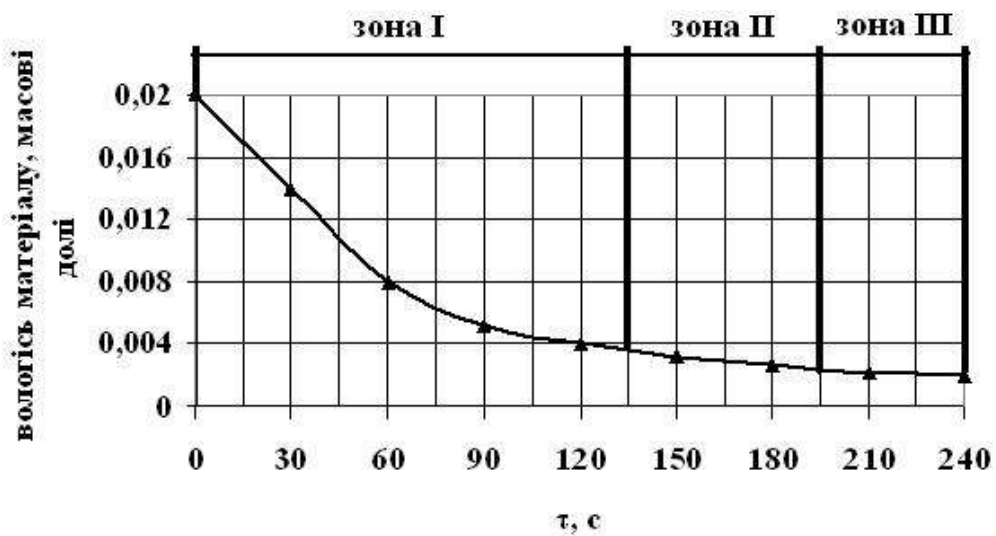


Рисунок 2.8 – Крива сушіння аміачної селітри: $T_c=100^\circ C$, $U_{поч}=0,02$ кг вологи/кг матеріалу, $U_{кін}=0,001$ вологи/кг матеріалу, $d=2$ мм

Аналогічні експериментальні дослідження були проведені для гранул аміачної селітри з різним ступенем полідисперсності (з вмістом від 75 до 95 % гранул діаметром $d=2-3$ мм), $U_{поч}=0,01-0,02$ кг вологи/кг матеріалу і $U_{кін}=0,001-$

0,003 кг вологи/кг матеріалу при $T_c = 100-120^\circ\text{C}$ в діапазоні кутів розкриття конуса робочого простору гранулятора в межах $\varphi = 10-15^\circ$.

За результатами визначення експериментального часу перебування ретура в режимі вільного і стисненого руху при наявному значенні ψ з урахуванням, що

відповідно до формули (1.13) $f_{er} = \tau_{cm} / \tau$ коефіцієнт m визначається за формулою

$$m = -\frac{\ln(\tau_{cm} / \tau)}{\ln(1 - \psi)}. \quad (2.1)$$

Результати досліджень дали змогу визначити діапазон значень показника m в кожній зоні гранулятора по формулі (2.1):

- зона I – $m = 1,7-1,74$;
- зона II – $m = 1,46-1,49$;
- зона III – $m = 1,1-1,13$.

Таким чином, загальний час перебування гранул в режимі стисненого руху визначиться за формулою

$$\sum \tau_{cm} = \tau_{cm}^I + \tau_{cm}^{II} + \tau_{cm}^{III} = \tau^I (1 - \psi^I)^{-m^I} + \tau^{II} (1 - \psi^{II})^{-m^{II}} + \tau^{III} (1 - \psi^{III})^{-m^{III}}, \quad (2.2)$$

де середнє значення ψ в кожній зоні залежить від середньої порізності зваженого шару та визначається за формулою

$$\psi_i = 1 - \varepsilon_i. \quad (2.3)$$

За даними експериментальних досліджень з визначення оптимальної конструкції газорозподільного пристрою та її впливу на стабільність вихрового зваженого шару запропоновано наступні діапазони середніх значень ψ в кожній зоні вихрового гранулятора, які будуть застосовані в інженерному розрахунку апарата середньої потужності [26-28]:

- зона I – $\psi = 0,48-0,53$;
- зона II – $\psi = 0,35-0,4$;
- зона III – $\psi = 0,2-0,24$.

2.3 Масообмін в системі «газ-гранула» у вихровому грануляторі

Обчислення коефіцієнту масовіддачі (коефіцієнту вологовіддачі) β проведено за рівнянням [29]

$$\frac{\Delta U}{\tau} = \beta \cdot F \cdot \left(b_k - \frac{b_k + b_0}{2} \right) \cdot \rho_v, \quad (2.4)$$

де b_0 , b_k , ΔU – початкова та кінцева вологість теплоносія, кількість видаленої води з гранул відповідно; F – поверхня масопередачі, яка залежить від продуктивності гранулятора за дисперсним матеріалом, у т.ч. коефіцієнту стисненості і часу перебування гранул в апараті.

Значення b_0 , b_k , ΔU визначаються за результатами експериментальних досліджень, час τ - залежно від визначеного часу перебування в апараті гранули у режимі вільного руху, показника m , визначеного для кожної з зон гранулятора за формулою (2.1) коефіцієнту стисненості, обчисленого за формулою (1.14) та часу руху гранули в умовах стисненого руху, визначеного за формулою (1.13).

Площа поверхні масопередачі F визначається залежно від потужності гранулятора за дисперсною фазою та часу перебування гранули в умовах стисненого руху.

Розраховані значення коефіцієнта масовіддачі β з рівняння (2.4) залежно від швидкості руху теплоносія показано на рисунку 2.9.

У загальному вигляді критеріальне рівняння процесу сушіння можна записати наступним чином:

$$Sh = A_1 \cdot Sc^n \cdot Re^m, \quad (2.5)$$

де A_1 – коефіцієнт рівняння; d_v^e – еквівалентний діаметр частинки; m , n – показники ступенів рівняння, які визначаються з графічної залежності $Sh / Sc^{0.33} = f(Re)$, отриманої на основі експериментальних даних (рисунок 2.10).

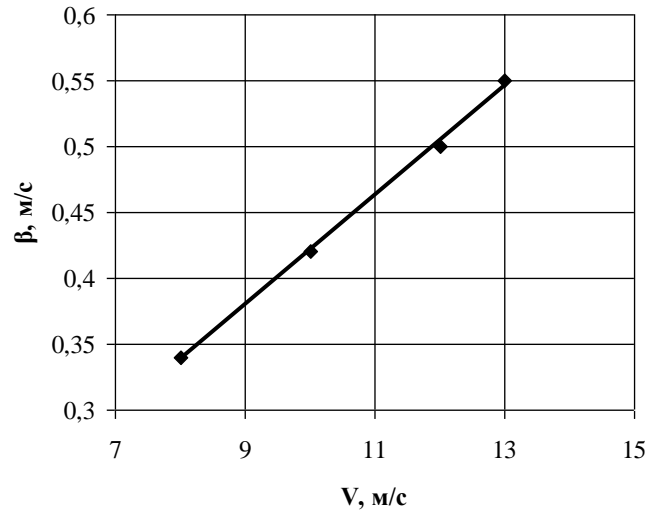


Рисунок 2.9 – Залежність коефіцієнта масовіддачі від швидкості руху сушильного агента

З графічної залежності (рисунок 2.10) коефіцієнт $A_1 = 0,018$, $m = 0,58$. Значення коефіцієнта n дорівнює 0,33 для випадку, коли параметри сушильного агента змінюються упродовж експерименту незначно.

З урахуванням отриманих значень коефіцієнта A_1 та ступеня m критеріальне рівняння (2.5) буде мати вигляд:

$$Sh = 0,018 \cdot Sc^{0,33} \cdot Re^{0,58} \quad (2.6)$$

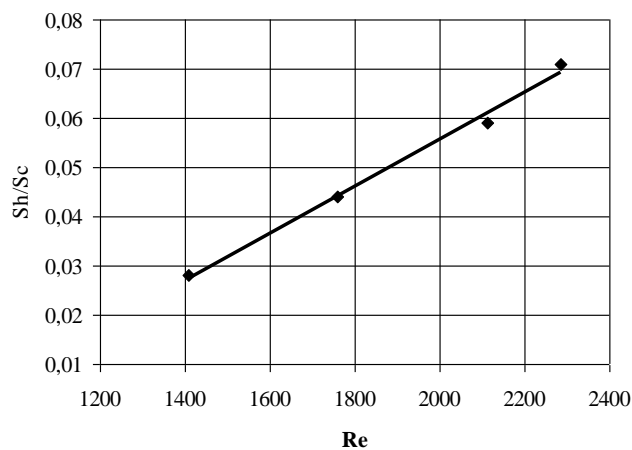


Рисунок 2.10 – Графічна залежність $Sh / Sc^{0,33} = f(Re)$ для визначення коефіцієнта A_1 та ступеня m

При розрахунку коефіцієнту масовіддачі враховано сумарну швидкість руху газового потоку.

3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ

В основу програмного продукту Vortex Granulator[©] покладена система рівнянь Нав'є-Стокса і рівняння нерозривності потоку (однофазний потік) і система диференціальних рівнянь руху гранули в циліндричній системі координат.

В основу програмного продукту Classification in vortex flow [©] покладено математичну модель класифікації та сепарації гранул в вихровому грануляторі, а також система диференціальних рівнянь кінетики прогріву гранули та кінетики видалення вологи з гранули.

У програмі Vortex Granulator[©] використано 9 класів і один файл стилів.

Модель програми представлена у вигляді UML діаграми (рисунок 3.1)

Клас Main.java відповідає за відображення головного меню і підключення до нього інших файлів програми.

Клас ControllerInput.java забезпечує введення даних для розрахунку складових швидкості газового потоку і гранул і сумарних швидкостей цих фаз.

Клас Theory.java надає теоретичні відомості про вихровий гранулятор, його переваги та недоліки.

Класи SpeedGas.java і Granuly.java відображають графічні залежності складових швидкостей (вертикальної, радіальної та колової) газового потоку і гранул.

Клас Trajectory.java відображає сумарні швидкості.

Клас Functional.java зберігає вхідні значення програми і містить методи вирішення і формування масивів даних для відображення графічних залежностей.

Класи Error.java і AlertBox.java призначені для перевірки коректності введених даних і обробки можливих помилок при роботі з програмою.

Програма Classification in vortex flow[©] має 7 класів і один файл стилів.

Модель програми представлена у вигляді UML діаграми (рисунок 3.2).

Клас Main.java відповідає за відображення головного меню і підключення до нього інших файлів програми.

Клас DataInput.java зберігає вхідні значення програми і містить методи вирішення і формування масивів даних для відображення графічних залежностей.

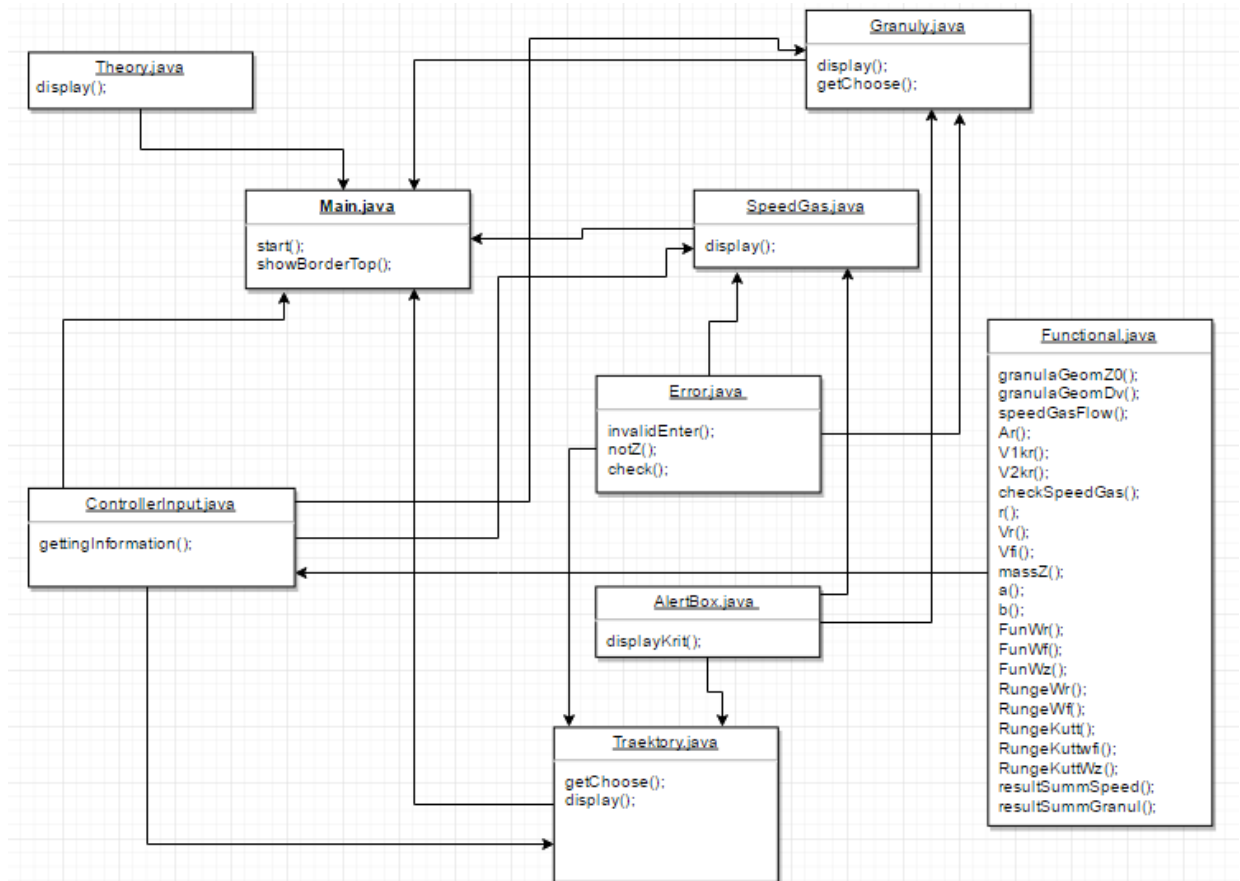


Рисунок 3.1 – Модель програми Vortex Granulator[©]

Клас ControllerInputSpeedGas.java містить в собі клас по відображенню графічного інтерфейсу програми.

Клас Graph.java відповідає за виведення отриманих значень у вигляді графічних залежностей.

Клас Excelgenerator.java формує документ у форматі електронної таблиці за отриманими значеннями.

Класи Error.java і AlertBox.java призначені для перевірки коректності введених даних і обробки можливих помилок при роботі з програмою.

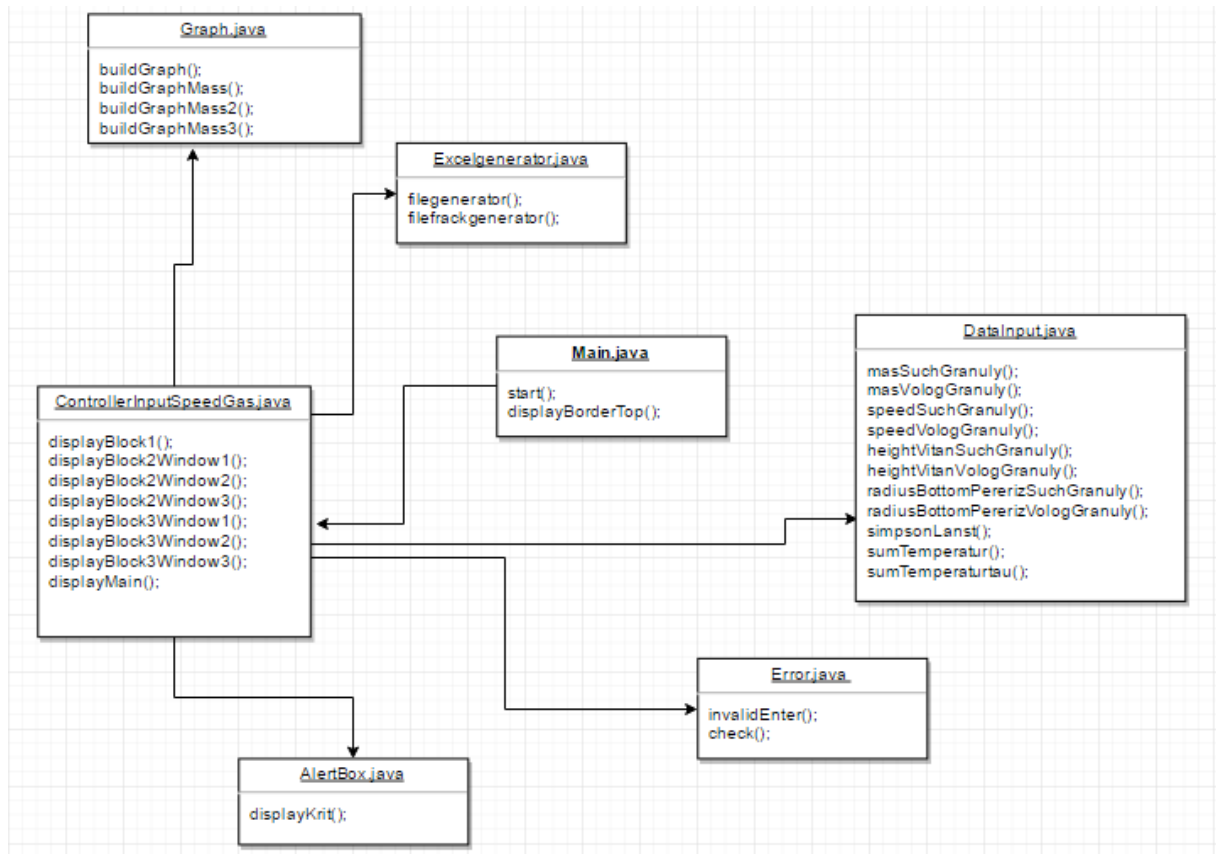


Рисунок 3.2 – Модель програми Classification in vortex flow[©]

Основним класом в програмі Vortex Granulator[©] є клас Main.java який, відповідає за відображення головного меню і підключення до нього інших класів. За замовчуванням після запуску програми в першу чергу підключається клас, який відповідає за введення даних. Після введення вхідних параметрів (рисунок 3.3), програма перевіряє їх на коректність за допомогою класу Error.java. Якщо виникають помилки введення, програма викликає клас AlertBox.java, що відповідає за виведення інформації про помилку. Перевірені дані потрапляють в клас Functional.java, який відповідає за їх зберігання і розрахунок.

Програма має 3 області розрахунку: складові швидкості газового потоку, складові швидкості гранул, сумарні швидкості газового потоку і гранул. При активації пунктів меню програма розраховує відповідно радіальну, вертикальну, колову складові швидкостей газового потоку (рисунок 3.4) і гранул (рисунок 3.5).

Результати розрахунків можуть бути виведені у вигляді графічних залежностей.

Incoming data

Air-flow rate Q (m³/s)

Diameter of the granules d (m)

Density of air (kg/m³)

Density of granule material (kg/m³)

Coefficient of dynamic viscosity of air (Pa*s)

Initial circular velocity of the gas stream (m/s)

Coefficient of turbulent viscosity E

Coefficient of aerodynamic resistance ψ

Geometrical characteristics of working space of the vortex granulator

Angle of disclosure of a diffuser

Diameter of the lower section of the diffuser D m

Height of the diffuser Z m

Рисунок 3.3 – Блок введення вхідних даних

Graphic dependences

Parameter Z

Vertical component of velocity of the gas stream movement

Radial component of velocity of the gas stream movement

Circular component of velocity of the gas stream movement

Critical values

Рисунок 3.4 – Вікно побудови графічних залежностей складових швидкості газового потоку

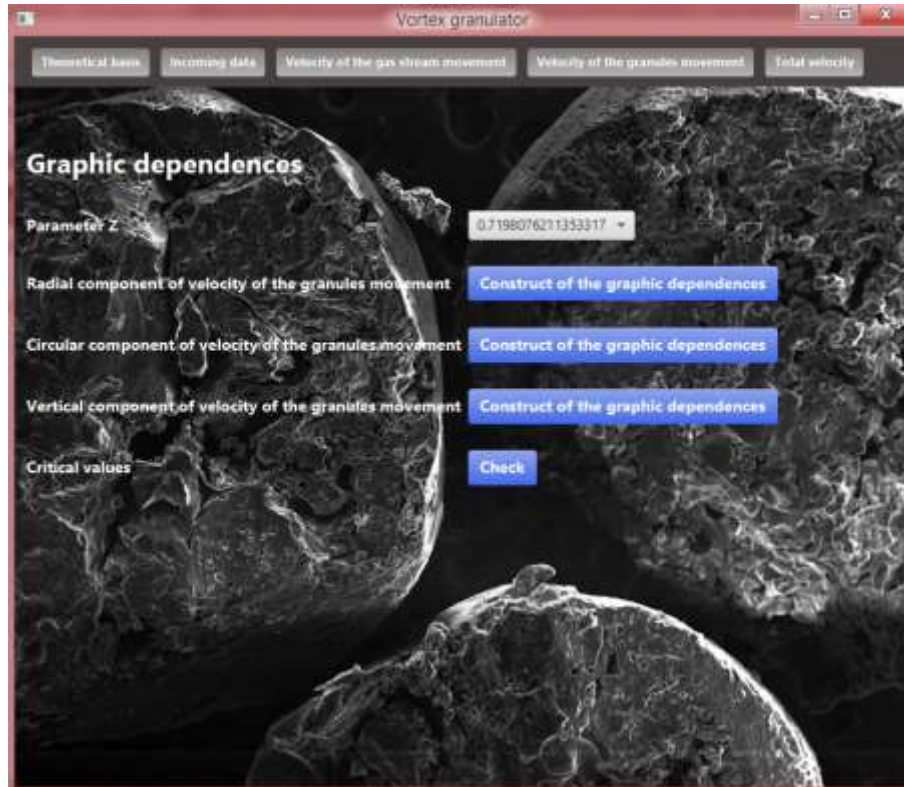


Рисунок 3.5 – Вікно побудови графічних залежностей складових швидкостей гранули.

Основними методами знаходження складових і сумарних швидкостей газового потоку і гранул є такі методи:

а) public speedGas - розраховує вертикальну складову швидкості газового потоку по висоті робочого простору вихрового гранулятора (рисунок 3.6);

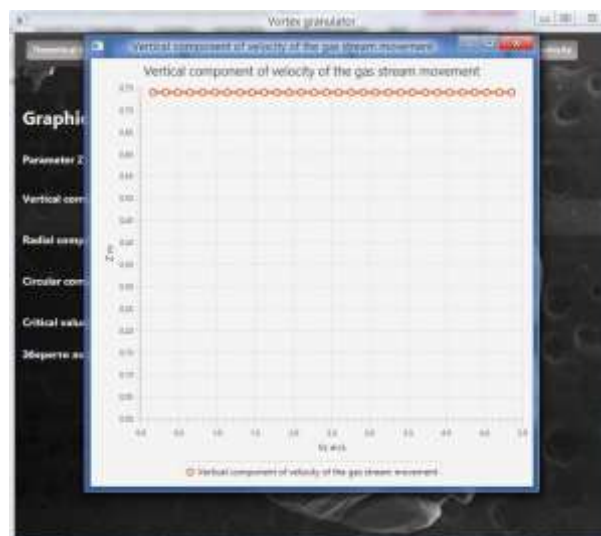


Рисунок 3.6 – Вертикальна складова швидкості руху газового потоку

б) public Vr - розраховує радіальну складову швидкості газового потоку по радіусу вихрового гранулятора (рисунок 3.7);

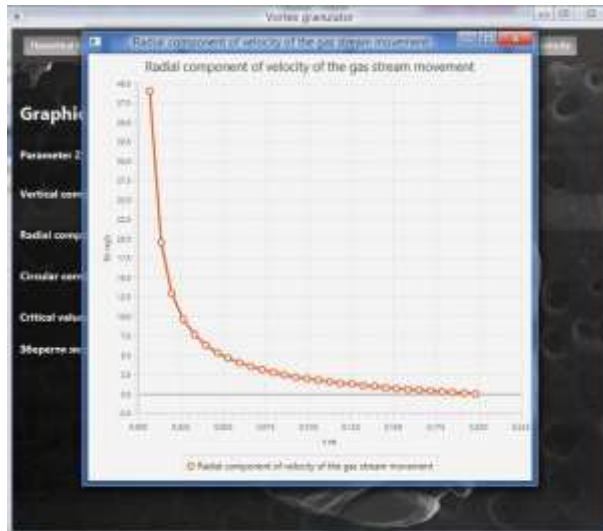


Рисунок 3.7 – Радіальна складова швидкості руху газового потоку

в) public Vfi - розраховує колову складову швидкості газового потоку по радіусу вихрового гранулятора (рисунок 3.8);

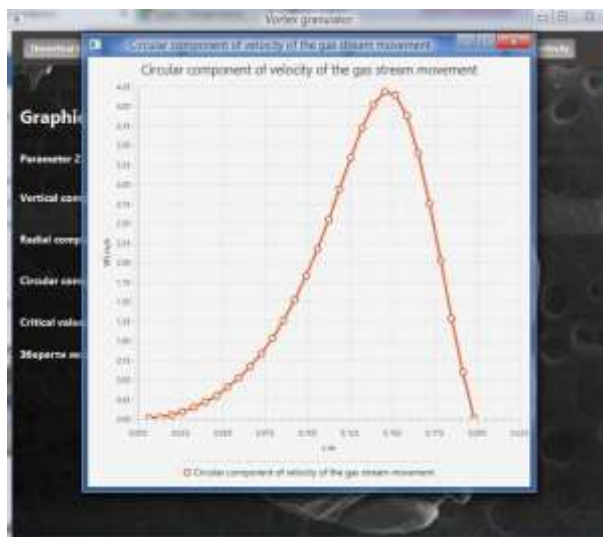


Рисунок 3.8 – Колова складова швидкості руху газового потоку

г) public RungeKutt - реалізує алгоритм Рунге-Кутта для знаходження значення радіальної складової швидкості гранул;

г) public Wr - розраховує радіальну складову швидкості гранул по радіусу вихрового гранулятора (рисунок 3.9);

д) public RungeKuttWfi - реалізує алгоритм Рунге-Кутта для знаходження значення колової складової швидкості гранул;

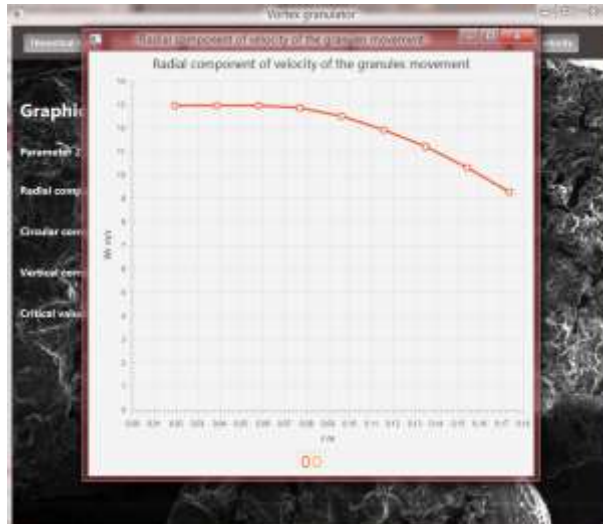


Рисунок 3.9 – Радіальна складова швидкості руху гранули

е) public Wfi - розраховує колову складову швидкості гранул по радіусу вихрового гранулятора (рисунок 3.10);

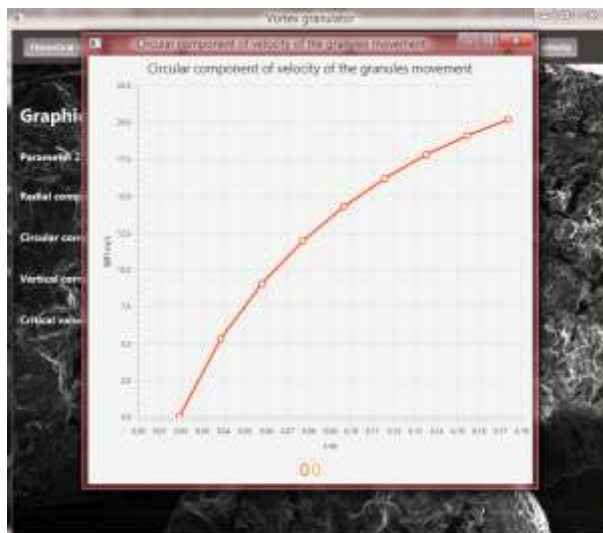


Рисунок 3.10 – Колова складова швидкості руху гранули

є) public RungeKuttWz - реалізує алгоритм Рунге-Кутта для знаходження значення вертикальної складової швидкості гранул;

ж) public Wz - розраховує вертикальну складову швидкості гранул по висоті робочого простору вихрового гранулятора (рисунок 3.11);

з) public resultSummSpeed - розраховує сумарну швидкість газового потоку по радіусу вихрового гранулятора (рисунок 3.12);

и) public resultSummGranul - розраховує сумарну швидкість гранул по радіусу вихрового гранулятора (рисунок 3.13).

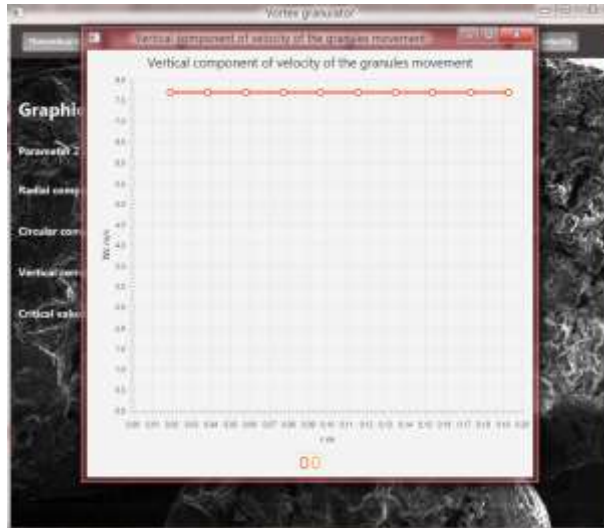


Рисунок 3.11 – Вертикальна складова швидкості руху гранули

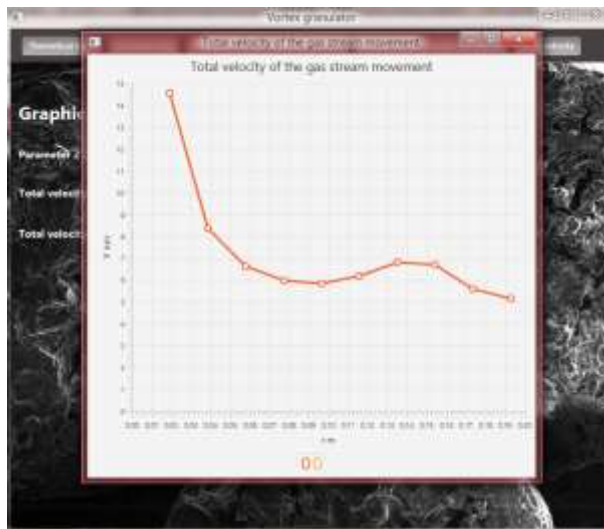


Рисунок 3.12 – Сумарна швидкість руху газового потоку

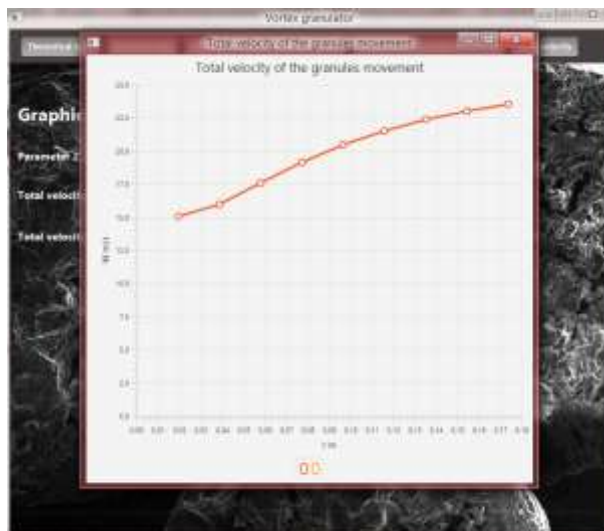


Рисунок 3.13 – Сумарна швидкість руху гранули

Основним класом в програмі Classification in vortex flow © є клас Main.java, який відповідає за відображення головного меню і підключення до нього інших класів. Після запуску, програма відображає модель (рисунок 3.14) і загальні параметри гранулятора (рисунок 3.15).

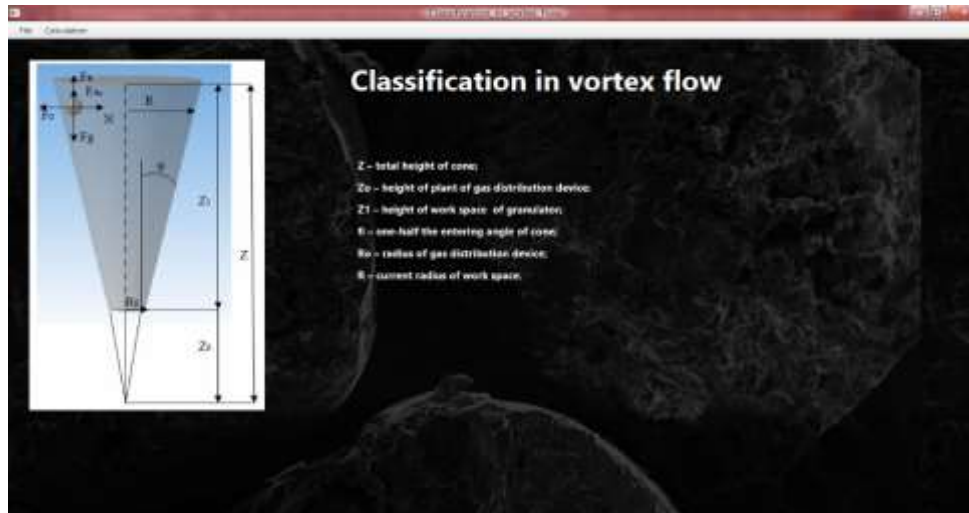


Рисунок 3.14 – Розрахункова область гранулятора

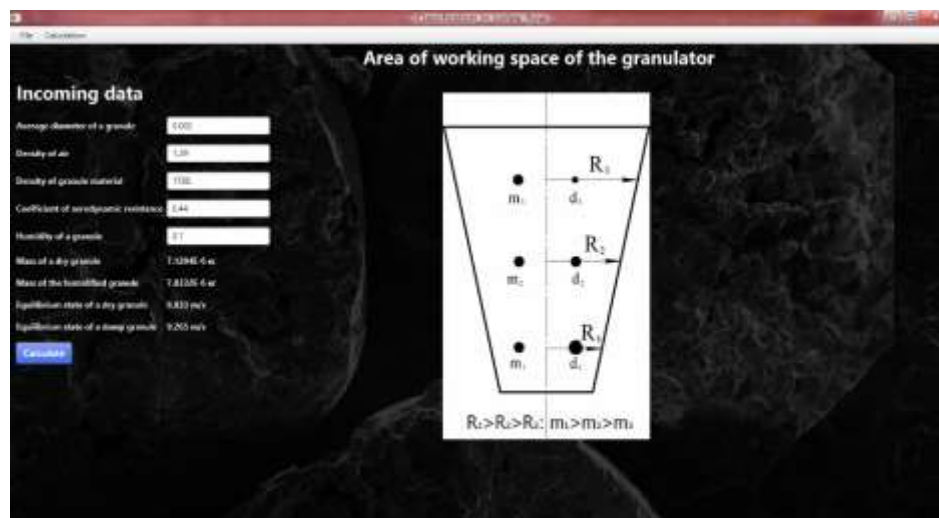


Рисунок 3.15 – Вікно введення початкових даних. Швидкість газового потоку

Програма має 3 області розрахунку:

а) Швидкість газового потоку (рисунок 3.15).

б) Геометрія робочого простору:

1) розрахунок при змінній витраті повітря - виводяться залежності висоти робочого простору і радіуса поперечного перерізу від витрати повітря для сухих і вологих гранул (рисунок 3.16);

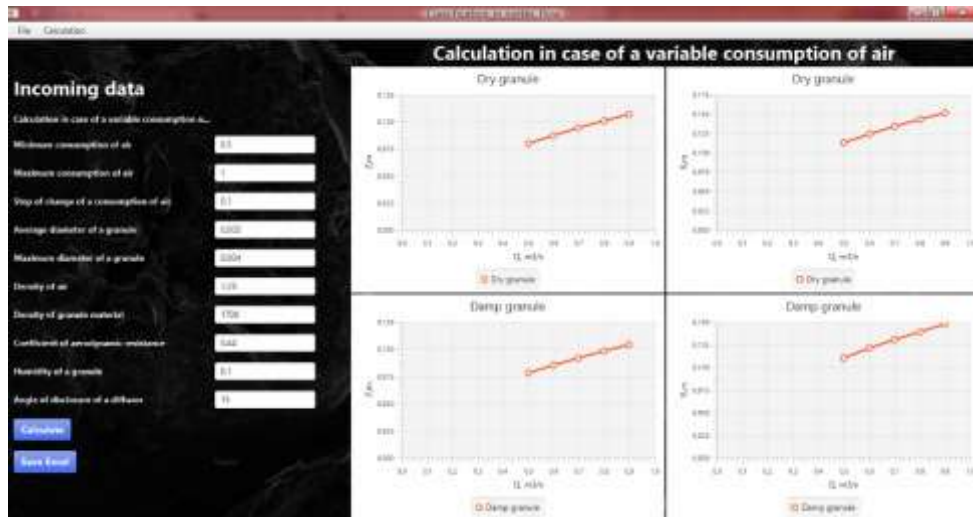


Рисунок 3.16 – Розрахунок геометрії робочого простору вихрового гранулятора при змінній витраті повітря

2) розрахунок при змінному куті розкриття дифузора - виводяться залежності висоти робочого простору від кута розкриття дифузора для сухих і вологих гранул (рисунок 3.17);

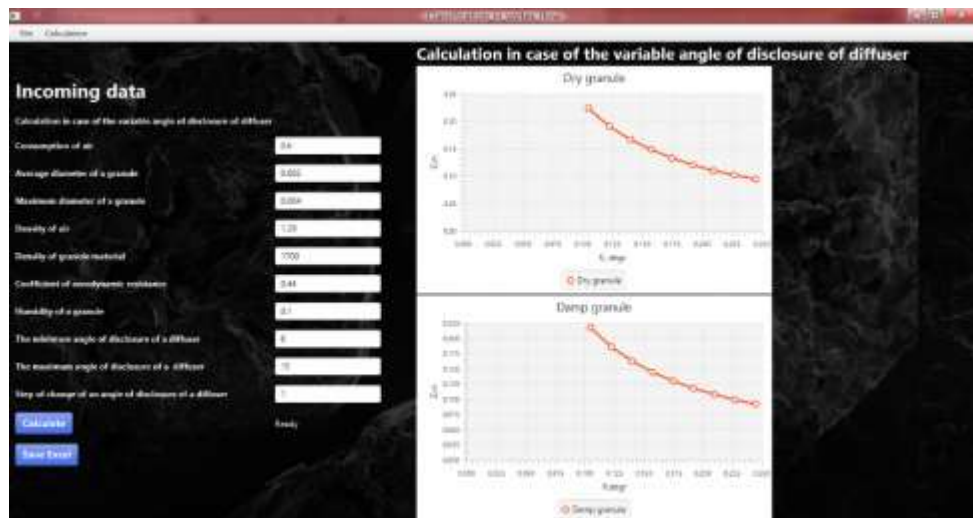


Рисунок 3.17 – Розрахунок геометрії робочого простору вихрового гранулятора при змінному куті розкриття дифузора

3) розрахунок розподілу гранул по фракціям в робочому просторі гранулятора - виводиться розподіл гранул різного діаметру по висоті робочого простору вихрового гранулятора (рисунок 3.18).

в) Розрахунок маси і кінетики прогріву гранули:

1) розрахунок маси гранули (рисунок 3.19);

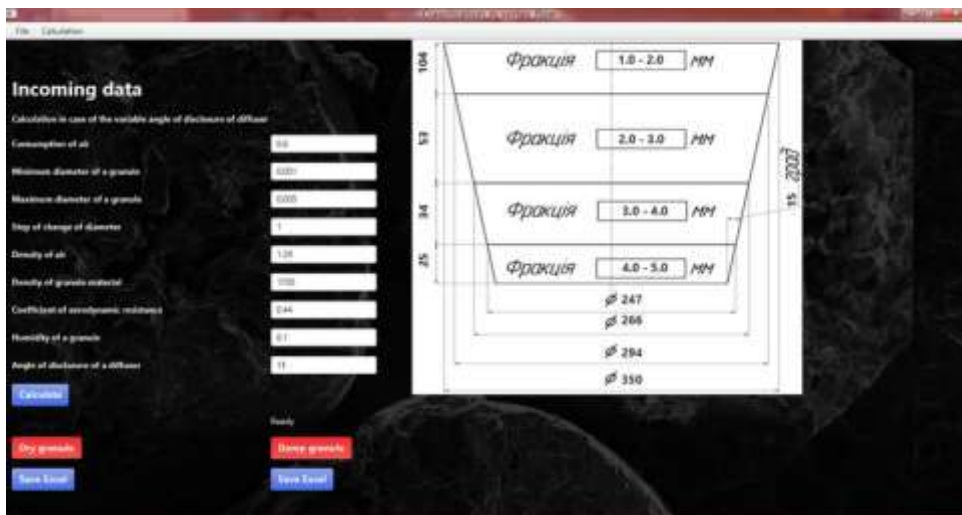


Рисунок 3.18 – Розрахунок розподілу гранул по фракціям в робочому просторі гранулятора

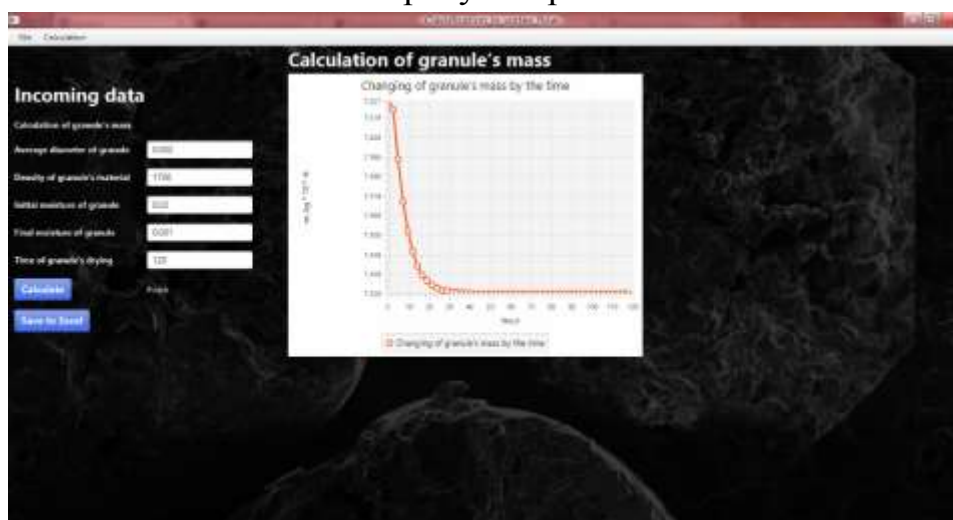


Рисунок 3.19 – Розрахунок маси гранули

2) розрахунок кінетики прогріву гранули (розподіл температури по радіусу гранули) (рисунок 3.20);

3) розрахунок кінетики прогріву гранули (зміна температури гранули в часі) (рисунок 3.21).

Для розрахунку відповідних величин, необхідно вибрати конкретний пункт, ввести дані і натиснути на кнопку «Розрахувати». Програма перевірить коректність даних, потім розрахує відповідні величини і візуалізує отримані значення у вигляді графічних залежностей. У програмі Classification in vortex flow[©] є можливість зберегти отримані результати в форматі електронної таблиці.

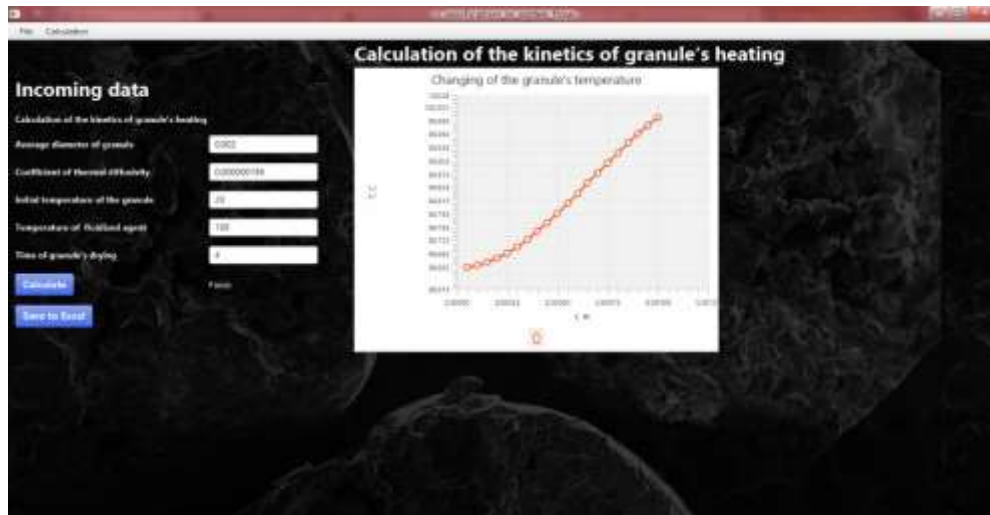


Рисунок 3.20 – Розрахунок кінетики прогріву гранули (розподіл температури по радіусу гранули)

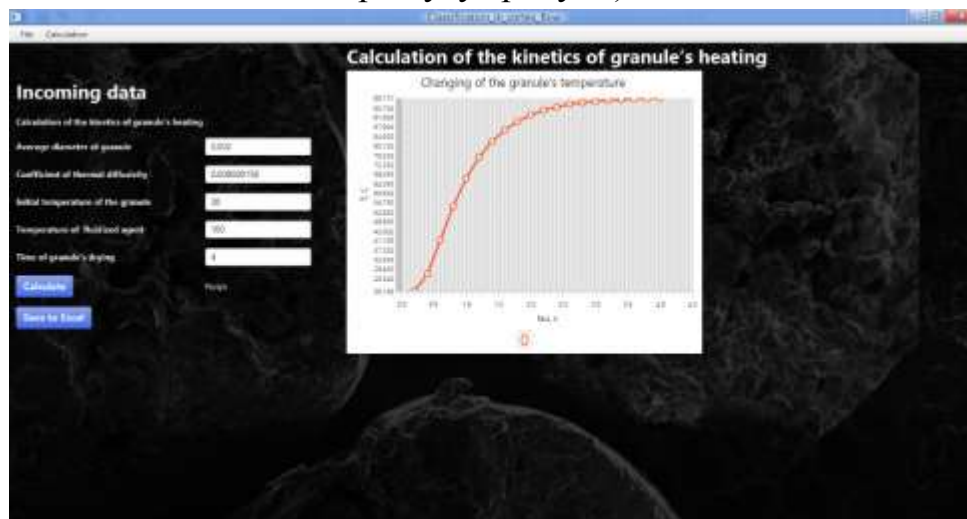


Рисунок 3.21 – Розрахунок кінетики прогріву гранули (зміна температури гранули в часі)

Основними методами розрахунку є:

- а) public double masSuchGranuly - розраховує масу сухої гранули;
- б) public double masVologGranuly - розраховує масу вологої гранули;
- в) public double speedSuchGranuly - розраховує швидкість сухої гранули;
- г) public double speedVologGranuly - розраховує швидкість вологої гранули;
- г) public double heightVitanSuchGranuly - розраховує висоту польоту сухої гранули;
- д) public double heightVitanVologGranuly - розраховує висоту польоту вологої гранули;

е) `public double radiusBottomPererizSuchGranuly` - розраховує радіус нижнього перерізу гранулятора для сухої гранули;

є) `public double radiusBottomPererizVologGranuly` - розраховує радіус нижнього перерізу гранулятора для вологої гранули;

ж) `public double simpsonLanst` - реалізує алгоритм Сімпсона і призначений для розрахунку інтегралів;

з) `public double sumTemperatur` - розраховує кінетику прогріву гранули (розподіл температури гранули по радіусу)

и) `public double sumTemperaturtau` - розраховує кінетику прогріву гранули (зміна температури гранули в часі).

ВИСНОВКИ

1. Вперше проведено теоретичний опис кінетики прогріву гранули та видалення з неї вологи, експериментально визначено вплив гідродинамічних показників руху газового потоку на термодинамічні показники робочого простору вихрового гранулятора.

2. На базі теоретичного опису та експериментальних досліджень запропоновано модель визначення часу перебування гранул у робочому просторі вихрового гранулятора в умовах зміни її маси та стисненого руху.

3. Одержано критеріальне рівняння, яке дозволяє визначити масообмінні характеристики процесу видалення вологи з гранули під час гранулювання у вихровому газовому потоці.

4. Впроваджено сучасні методи визначення термодинамічних характеристик робочого простору вихрового гранулятора з використанням тепловізійного обладнання.

6. Представлено теоретичні основи програмну реалізацію оптимізаційного розрахунку гідродинамічних умов руху потоків та змодельовано прогрів та зміну маси гранули під час гранулювання у вихровому газовому потоці.

7. Представлені результати комп'ютерного моделювання спільно з проведеними раніше теоретичними дослідженнями в області гідродинаміки руху потоків та кінетики гранулювання можуть бути покладені в основу розробки методики інженерного розрахунку вихрового гранулятора.

8. Запропоновано авторські програмні продукти для розрахунку гідродинамічних та кінетичних закономірностей процесу гранулювання у вихровому зваженому шарі, нові способи отримання гранул пористої структури, конструкції вихрових грануляторів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Urea Casale S.A. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.casale.ch/>.
2. Прандтль Л. Гидроаэромеханика / Прандтль Л.; пер. с нем. Г.А. Вольперта. – Ижевск: НИЦ РХН, 2000. – 576 с.
3. Гольдштик М.А. Вихревые потоки / Гольдштик М.А. – Новосибирск: Наука, 1981. – 366 с.
4. Жеба, К.В. Гідродинаміка двофазних вихрових потоків. Вплив на габарити грануляційного обладнання / К.В. Жеба, В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов // Хімічна промисловість України. – Київ, 2009. – №4. – С. 47-52.
5. Artyukhov A.E., Obodiak V.K., Boiko P.G., Rossi P.C. Computer modeling of hydrodynamic and heat-mass transfer processes in the vortex type granulation devices // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – 1844. – P. 33-47.
6. Artyukhov A.E., Sklabinskiy V.I. Investigation of the temperature field of coolant in the installations for obtaining 3d nanostructured porous surface layer on the granules of ammonium nitrate // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2017. – 9, No. 1. – P. 01015-1 - 01015-4.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
8. Lipsanen T. Process analytical technology approach on fluid bed granulation and drying: identifying critical relationships and constructing the design space. – Helsinki: University Printing House, 2008. – 51 p.
9. Artyukhov A.E., Sklabinskiy V.I. Application of vortex three-phase separators for improving the reliability of pump and compressor stations of hydrocarbon processing plants / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 233, Is. 1, 2017, Article number 012014.
10. Kudra T. Advanced Drying Technologies / T. Kudra, A. S. Mujumdar – New York: Marcel Dekker, 2002. – 459 p.

11. Erode G. M. Ammonium Nitrate Explosives for Civil Applications: Slurries, Emulsions and Ammonium Nitrate Fuel Oils / G. M. Erode. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co, 2013. – 230 p.
12. Levchenko D.O., Artyukhov A.E., Yurko I.V. Maisotsenko cycle applications in multi-stage ejector recycling module for chemical production / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 233, Is. 1, 2017, Article number 012024.
13. Artyukhov A., Artyukhova N., Ivaniia A., Galenin R. Progressive equipment for generation of the porous ammonium nitrate with 3D nanostructure / Proc. Int. Conf. NAP-2017, Vol. 6 No 3, 03NE06.
14. Buczkowski D. Detonation Properties of Mixtures of Ammonium Nitrate Based Fertilizers and Fuels / D. Buczkowski, B. Zygmunt // Central European Journal of Energetic Materials. – 2011. – Vol.8. – No. 2. – pp. 99-106.
15. Artyukhov A., Voznyi A. The meso- and macropores generating process via modification of NH_4NO_3 granules: thermodynamic regime impact on the granule structure / Proc. Int. Conf. NAP-2017, Vol. 6 No 3, 03NEA09.
16. Artyukhov A., Ivaniia A. Experimental and industrial introduction of the improved devices to generate NH_4NO_3 granules with nanoporous structure / Proc. Int. Conf. NAP-2017, Vol. 6 No 3, 03NE10.
17. Zygmunt B. Influence of Ammonium Nitrate Prills' Properties on Detonation Velocity of ANFO / B. Zygmunt, D. Buczkowski // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2007. – Vol.32. – Is. 5. – pp. 411-414.
18. Short M. Simulation of Detonation of Ammonium Nitrate Fuel Oil Mixture Confined by Aluminum: Edge Angles for DSD / M. Short, J. J. Quirk, C. B. Kiyanda, S. I. Jackson, M. E. Briggs, M.A. Shinas // Proceedings of the 14th International Detonation Symposium.
19. Crowe C.T. Multiphase flow handbook / New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 1128 p.

20. Ostroha R., Yukhymenko M., Yakushko S., Artyukhov A. Investigation of the kinetic laws affecting the organic suspension granulation in the fluidized bed / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol 4, No 1 (88), pp. 4-10.
21. Artyukhov A.E., Vorobiov S.I. Phase Composition and Crystal Structure of N_4HNO_3 Granules with Nanostructured Surface Porous Layer Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2017. – 9, No. 6. –P. 06018-1 - 06018-4.
22. K. Hiltunen, A. Jasberg, S. Kallio, H. Karema, M. Kataja, A. Koponen, M. Manninen, V. Taivassalo. Multiphase Flow Dynamics: Theory and Numerics. – VTT Technical Research Centre of Finland, Edita Prima Oy. – 124 p.
23. L. Marrone, A. Scotto. New Technology for Urea Solidification: Vortex Granulator & Vibrating Skin Bucket / The Casale 3rd Customer Symposium, 2011, paper No. 4.3, 11 p.
24. Lipsanen T. Process analytical technology approach on fluid bed granulation and drying: identifying critical relationships and constructing the design space. – Helsinki: University Printing House, 2008. – 51 p.
25. Artyukhov A., Artyukhova N., Ivaniia A., Gabrusenoks J. Multilayer modified NH_4NO_3 granules with 3D nanoporous structure: effect of the heat treatment regime on the structure of macro- and mezopores / Proc IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017). – pp. 315-318.
26. Artyukhov A., Sklabinskiy V., Ivaniia A. Electrical intelligent system for controlling the formation of monodisperse droplets in granulation devices based on magnetostrictive actuator / Proc. IEEE International Conference “Modern Electrical and Energy Systems” (MEES 2017). – pp. 280-283.
27. Kudra T. Advanced Drying Technologies / T. Kudra, A. S. Mujumdar – New York: Marcel Dekker, 2002. – 459 p.
28. Artyukhov A.E. Internal Recycled Particles Circulation in Vortex Granulator / Chemical and Petroleum Engineering. – Vol 53, Is 7–8. – pp. 423-429.
29. Атаманюк В. М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів / В. М. Атаманюк, Я. М. Гумницький. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 276 с.