

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

\_\_\_\_\_ Т. В. Коротка

\_\_\_\_\_ 2021 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**

зі спеціальності 151- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
на тему: "Моделювання процесу керування грануляцією азотних добрив"

Керівник роботи

к.т.н., доцент

В. А. Толбатов

Дипломник

студент гр. СУ.м-01

Д. О. Ярошенко

Суми – 2021

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

\_\_\_\_\_ Т. В. Коротка

\_\_\_\_\_ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Ярошенко Дмитру Олеговичу

1. Тема проекту: Моделювання процесу керування грануляцією азотних добрив
2. Затверджено наказом ректора університету № 0866-VI від « 19 » листопада 2021 р.
3. Термін здавання студентом закінченого проекту “13” грудня 2021р.
4. Вихідні дані до проекту: звіт з переддипломної практики, наукові публікації, статті, технічна документація та перелік літературних джерел з матеріалами опису і автоматизації технологічного процесу відповідної установки.
5. Зміст пояснювальної записки: огляд існуючих видів грануляції, формування критеріїв керування параметрами, огляд типових ланок керування та інформації щодо законів керування, дослідження системи керування хаосом у процесі гранулювання, підбір ПЛК, висновки до роботи.

6. Календарний план проектування

Номер етапу	Зміст етапу проектування	Термін виконання
1	Аналіз завдання кафедри. Огляд літератури за темою диплому.	01.11.2021 - 05.11.2021
2	Розгляд загальних технологічних питань що до процесів грануляції.	06.11.2021- 15.11.2021
3	Створення математичної моделі.	16.11.2021- 23.11.2021
5	Розроблення основних схем автоматизації блоку грануляції.	24.11.2021- 30.11.2021
6	Формування висновків	1.12.2021- 4.12.2021
7	Технічне оформлення проекту.	5.12.2021- 12.12.2021

Студент- дипломник

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник проекту

\_\_\_\_\_  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

**Записка:** 50 сторінок, 17 рис., 2 таблиці, 22 джерела.

**Об'єкт дослідження** — обертовий вібраційний гранулятор.

**Мета роботи** — моделювання процесу грануляції азотних добрив.

**Методи дослідження** базуються на програмних засобах обробки даних, математичному імітаційному моделюванні, експериментальному моделюванні та інших методах, що дають змогу побудувати апаратно програмний комплекс для грануляційної установки .

**Результати** — визначено контури керування. Створено математичні моделі контурів керування температурою та вологою для дослідження на такі параметри як: час перехідного процесу та точність регулювання. Розроблено систему керування хаосом у процесі гранулювання. Проведено розрахунок оптимального програмного керування для системи рівнянь у програмному пакеті Matlab.

**Ключові слова:** вібраційний обертовий гранулятор, теорія хаосу, процес гранулювання, гранулятор, система керування, система керування хаосом, об'єкт керування, математична модель, канал збурення, канал керування, динамічна характеристика,.

## Зміст

ВСТУП.....	7
1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ В ОБЕРТОВОМУ ВІБРАЦІЙНОМУ ГРАНУЛЯТОРІ.....	9
1.1. Використання процесів грануляції.....	9
1.2. Протікання процесу в обертовому вібраційному грануляторі.....	10
1.3. Апаратурне оформлення процесу диспергування в грануляційних баштах10	
1.4. Математичні моделі процесу гранулювання в апараті.....	16
2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ В ОБЕРТОВОМУ ВІБРАЦІЙНОМУ ГРАНУЛЯТОРІ.....	20
2.1. Аналіз вібраційного гранулятора, як об'єкта керування.....	20
2.2. Математичне моделювання гідродинаміки стаціонарного струменя, що розпадається, без накладання вимушених коливань.....	23
2.3. Моделювання процесу поширення вимушених коливань тиску у зоні формування крапель вібраційного гранулятора.....	33
3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ХАОСОМ У ПРОЦЕСІ ГРАНУЛЮВАННЯ.....	36
3.1. Постановка задачі керування хаосом у процесі гранулювання.....	36
3.2. Розрахунок керування за зворотнім зв'язком (метод Пірагаса) процесом гранулювання в обертовому вібраційному грануляторі.....	39
3.3. Стійкість системи керування процесом гранулювання в обертовому вібраційному грануляторі.....	43
4. ОПТИМАЛЬНЕ ПРОГРАМНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАНУЛЮВАННЯ У ОБЕРТОВОМУ ВІБРАЦІЙНОМУ ГРАНУЛЯТОРІ.....	45
4.1. Вибір критерію оптимальності.....	45
4.2. Виведення необхідних умов оптимальності.....	45
4.3. Розрахунок оптимального програмного керування.....	46
4.4. Програмно-логічний контролер.....	47
ВИСНОВОК.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	51

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСР – автоматизована система регулювання.

ТУ – теорія управління.

ОВГ - обертовий вібраційний гранулятор.

АСУ – автоматизована система управління.

МК – мікроконтролер.

АК – автоматичне керування.

ОР - об'єкт керування.

АР - автоматичні регулятори.

## ВСТУП

Останніми роками все більш інтенсивними стають дослідження та практичні розробки, пов'язані з виробництвом і використанням речовин, що мають переважно монодисперсний склад (краплі та гранули). Продукти подібного складу використовуються в різних галузях: ядерній техніці, медицині, харчовій, хімічній та машинобудівній промисловості та ін. Широкий діапазон використання монодисперсних частинок передбачає різноманітність параметрів, що призводить до великої різноманітності способів отримання їх.

Ці методи мають забезпечити мінімізацію втрат вихідного продукту та зменшення браку вихідного продукту, автоматизацію не лише окремих етапів технології, а повноцінний розвиток технологічного процесу, включаючи облік і контроль на всіх етапах. Крім того, певними критеріями є ефективність використання ресурсів (включаючи енерго- та матеріаломісткість); екологічна безпека; оптимізація складових людської праці; модернізація технологій, їх швидка інтеграція з існуючими або можливість повної заміни вже освоєних.

Аналіз попередніх праць показує, що переважна кількість працюючих на виробництві мінеральних добрив АСР розроблено за допомогою прийнятих підходів теорії управління і досить просто виконуються за допомогою вже відомих загальних регуляторів. Також дані системи не можуть надати необхідну якість управління при умовах, запізнювання, інерційності, випадкових збурень, наявності неякісної і неповної інформації.

З зростанням попиту на мінеральні азотні добрива для створення конкуренції на ринку збуту актуальною є потреба покращенні якості отриманого продукту. Існуючі підприємства прагнуть підвищити виробництво добрив без будівництва нових башт гранулювання, це можливо досягти тільки шляхом модернізації вузла грануляції. У зв'язку з цим на шляху у науковців та інженерів постає актуальна проблема модернізації існуючого обладнання для диспергування.

Найближчими роками очікуються досить активне інвестування та зростання світових потужностей. На стадії будівництва на цей час перебувають 250

проектів. Виходячи з вартості будівництва нових установок і закладання шахт, експерти IFA оцінюють загальні витрати на будівництво нових установок у 88 млрд доларів. Їх реалізація приведе до зростання виробничих потужностей у 2022 році на 183 млн.

Саме тому задачею першої важливості є потреба проаналізувати доцільність визначення хаотичних процесів і управління ними. Хаотична поведінка притаманна більшості динамічних систем, як з консервативним збереженням енергії так і дисипативним. Хаотичні коливання в хімічних реакціях почали досліджуватись в 1970-х рр. спочатку за допомогою моделювання, а пізніше експериментально. Метою управління є або досягнення заданого режиму реакції, тобто нівелювання хаотичних коливань, або збудження коливного чи навіть хаотичного режиму [1].

Згідно з дослідженими існуючими класичними способами управління, було здійснено дослідження хаотичних процесів в обертовому вібраційному грануляторі та створена система керування з можливістю використання хаотичних коливань для покращення якості кінцевого продукту та оптимізації витрат вихідних речовин.



# 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ В ОБЕРТОВОМУ ВІБРАЦІЙНОМУ ГРАНУЛЯТОРІ

## 1.1. Використання процесів грануляції

Основи процесу грануляції групи, що розглядається, полягають в наступному. Гранульована речовина шляхом нагрівання приводиться в рідкий стан (плав) і подається на розподільний пристрій, що забезпечує дроблення плаву на краплі, або за рахунок розпаду струменя плав, що витікають з отворів. Рідкі краплі плаваючи в холодному середовищі газу тверднуть у вигляді частинок сферичної форми (гранул), охолоджуються і надходять на склад готової продукції. Якість одержуваного продукту залежить від перегріву плав, інтенсивності тепловідведення, розміру гранул, теплоємності, теплопровідності та кінетики кристалізації. Використання вібрацій забезпечує рівномірне дроблення струй, та запобігає забиванню отворів.

Широке поширення гранулювання азотних добрив отримали обертові гранулятори. Він може бути виконаний у вигляді перфорованого циліндра чи конуса. Струмені плав витікають з отворів циліндричної оболонки, що обертається на вертикальному валу. Ці гранулятори дають рівномірний розподіл падаючих крапель роздробленого плав в зустрічному потоці повітря по перерізу вежі.

Для підвищення рівномірності гранулометричного складу найбільш вдалою конструкцією є обертовий вібраційний гранулятор. За рахунок лопатей плав у вібраційному грануляторі обертається з тією ж кутовою швидкістю, що і перфорований циліндр, що зменшує турбулентність, дозволяє отримати рівні струмені плав і підвищити рівномірність гранул.

Слід зазначити, що обертові гранулятори конструктивно прості, надійні у роботі і не випадково вони тривалий час були предметом досліджень, вкладених у визначення оптимальних параметрів роботи.

## 1.2. Протікання процесу в обертовому вібраційному грануляторі

Принцип роботи ОВГ для отримання гранульованих мінеральних добрив з їхнього плаву заснований на властивості струменів рідини дробитися на краплі однакового розміру, якщо на її поверхні створені регулярні збурення (хвилі) на однаковій відстані один від одного. У масі плаву, що заповнює ОВГ, поширюються пружні хвилі. Досягаючи отворів витікання, вони періодично змінюють швидкість витікання плаву, створюючи обурення лежить на поверхні струменів як перетяжок. У місцях перетяжок силами поверхневого натягу струмені плавають на краплі строго однакового розміру, які, падаючи в порожнини грануляційної вежі назустріч потоку холодного повітря, тверднуть у сферичні гранули. Обертання ОВГ сприяє розподілу гранул по різних траєкторіях, завдяки чому покращуються умови теплообміну в грануляційній вежі, а також підвищується монодисперсність одержуваного продукту. Залежно від необхідного діаметра смолоскипа, форма перфорованого днища кошика може бути сферичного або тороїдального. ОВГ простий по конструкції та в обслуговуванні, надійний у роботі, довговічний, має тривалий пробіг між профілактичними оглядами. За дотримання умов експлуатації ОВГ забезпечує отримання необхідного гранулометричного складу.

## 1.3. Апаратне оформлення процесу диспергування в грануляційних баштах

Вибір і розрахунок диспергуючого пристрою[2] є першим і основним етапом розрахунку процесу гранулювання плавів і суспензій у баштах. Для диспергування плавів використовують кілька видів пристроїв (грануляторів): обертові, статичні, вібраційні [3]. Використовують також обертові механічні форсункові гранулятори (в тому числі з накладанням вібрації на потік рідини) [4].

У статичних грануляторах витікання плаву відбувається під дією гідростатичного напору: всі струмені витікають практично з однією швидкістю,

що забезпечує однакові умови подрібнення їх на краплі [3]. Непорушність самих грануляторів також сприяє рівномірному подрібненню струменів. Витікання струменів вертикально вниз або під невеликим кутом до вертикалі дає можливість значно збільшити щільність зрошення поперечного перерізу башт, зробити його більш рівномірним, крім того, це дозволяє працювати в баштах будь-якої форми перерізу [3]. Також його перевагами можна вважати герметичність конструкції та можливість накладання на диспергувальний плав вібрацій із розрахунковими параметрами. Статичні гранулятори найбільш прості у виготовленні, експлуатації і широко використовуються для диспергування чистих плавів. До недоліків статичного гранулятора можна віднести порівняно невеликий розмір отворів витікання, що супроводжується швидким забиванням отворів витікання плавом, а отже, необхідністю встановлювати фільтри для плавів [5].

Першим із зазначених недоліків є перешкода використання статичних грануляторів у разі диспергування суспензії – плавом мінеральних добрив з твердими порошковими наповнювачами (крейда, доломіт, вапняк та ін.) При цьому відбуваються засмічення отворів, випадання в осад частинок усередині гранулятора під дією сили тяжіння.

Статичні диспергувальні пристрої можуть мати конструкцію без накладання вібрацій і з накладанням вібрацій на плав, що витікає з пристрою. Статичний гранулятор лійкоподібного типу без накладання вібрацій зображений на рис. 1.1 а. Плав надходить у гранулятор по патрубку 1, де проходить через фільтрувальний елемент – сітчастий фільтр 4. Розбрикування плавом відбувається за допомогою перфорованого днища 5. Усередині корпусу гранулятора 3 встановлений напрямний конус 2, що сприяє кращому розподілу плавом в об'ємі гранулятора. При розпаді струменів плавом, що витікає з отворів статичного гранулятора, забезпечуються стабільні умови витікання (практична постійність швидкості витікання струменів).

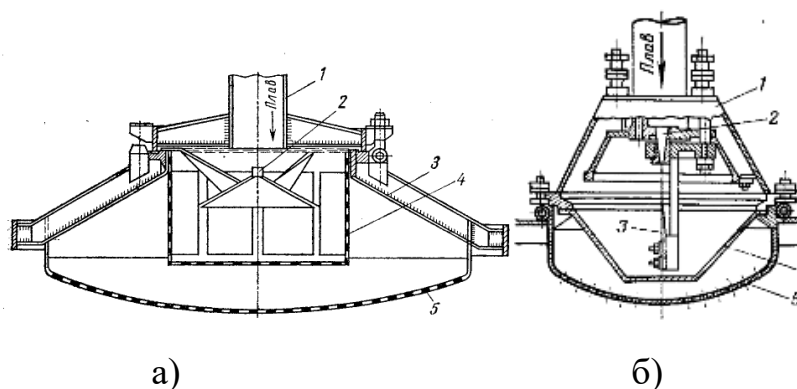


Рисунок 1.1. Типи статичних грануляторів: а) лійкоподібний: 1 – патрубкок; 2 – напрямний конус; 3 – корпус гранулятора; 4 – сітчастий фільтр; б) акустичний: 1 – конус; 2 – сопло; 3 – пластина; 4 – сітчастий фільтр; перфороване днище

У статичних вібраційних грануляторах вібрація створюється різними способами: з накладанням вібрації за рахунок впливу гідроакустичного генератора (рис. 1.1 а), в інших – пневмомеханічним вібратором або електромагнітним.

У корпусі 1 акустичного гранулятора знаходиться пластина 3, яка при взаємодії із плавом, що проходить через сопло 2, створює акустичні коливання. Джерелом енергії акустичних коливань є сам гранульований плав, тому гранулятор не потребує жодних джерел живлення чи інших пристроїв для генерації чи контролю коливань. Далі плав проходить через фільтруючий елемент 4 і стікає через отвір перфорованого днища 5. Витікаючи з отворів, плав під дією резонансних коливань пластини 3 розпадається на краплі рівномірного розміру, ніж при вільному поширенні. Робочий тиск становить 0,5–0,8 м стовпа плаву. Акустичні гранулятори дозволяють отримати підвищений однорідний гранулометричний склад продукту (70-80% фракції 2-3 мм, дрібні частини <1 мм - 1-2%). Крива розподілу гранул за розмірами для цього гранулятора показана на рис. 1.2 [5].

Обертові гранулятори забезпечують витікання плаву під дією обертової сили, що створюється за рахунок обертання перфорованого корпусу гранулятора [5].

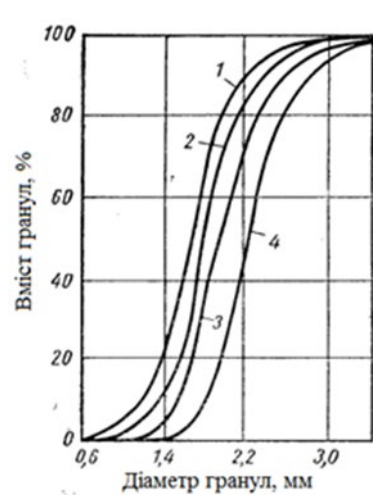


Рисунок. 1.2. Графіки розподілу гранул аміачної селітри по діаметру, отримані під час роботи грануляторів (диспергаторів): 1 – звичайний обертовий,  $d_{gr} = 1,65$  мм; 2 – секційний обертовий,  $d_{gr} = 1,82$  мм; 3 – статичний лійкоподібний типу,  $d_{gr} = 2,0$  мм; 4 – акустичний лійкоподібного типу  $d_{gr} = 2,3$  мм.

На рисунку 1.3 показано кілька конструкцій обертових грануляторів, що використовуються при виробництві мінеральних добрив. Даний тип гранулятора має отвори певного розміру - у цих конічних обертових грануляторах діаметр зливних отворів змінюється залежно від висоти корпусу. Можливість засмічення отворів у цього типу грануляторів менше, ніж у статичних або вібраційних грануляторів. Перевагами обертових грануляторів є також широкий діапазон експлуатаційних витрат плаву при збереженні прийнятнього гранулометричного складу.

Недоліками є важкодоступні конструкції, використання додаткових енергетичних витрат і досить дисперсний гранулометричний склад. Цей тип грануляторів характеризується великим радіусом розсіювання гранул, низькою і нерівномірною міцністю зрошувальних веж. Через відсутність потреби в диспергуванні розплаву робить цей тип грануляторів необхідним у виробничих умовах. Але для агрегатів прямокутного перерізу обертовий гранулятор не забезпечує рівномірного розплавлення і факел його розплавлення важко вписується в поперечний переріз грануляційної вежі.

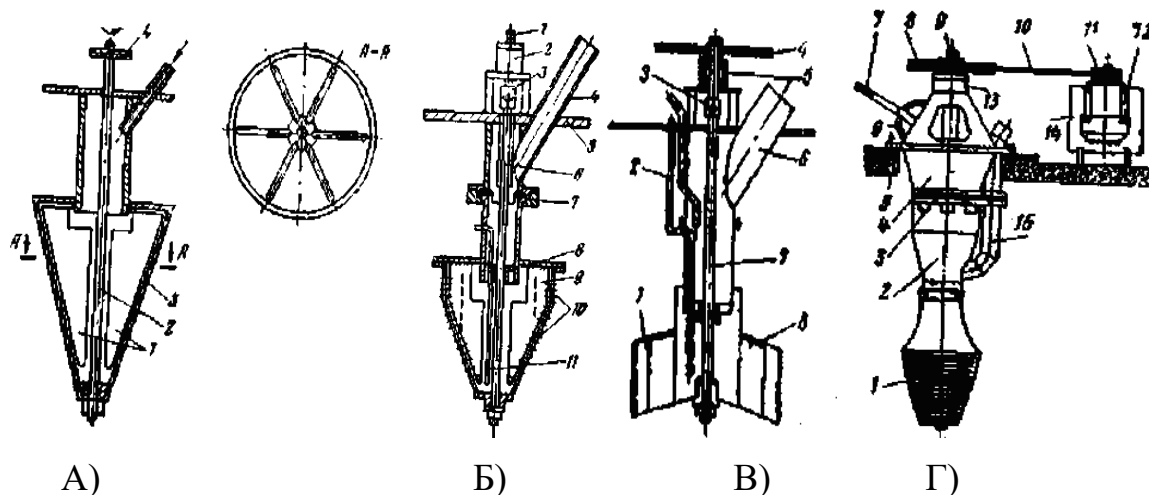


Рисунок 1.3. Обертові гранулятори:

а) секційний конічний з радіальними перегородками: 1 – секційні перегородки; 2 – вал; 3 – перфорована оболонка; 4 – привідний шків;

б) лопатевий з циліндрично-конічною оболонкою: 1 – вал приводу; 2 – підшипники; 3 – шарнірна муфта; 4 – патрубок для підведення плаву; 5 – фланець; 6 – нижній вал; 7 – кульове з'єднання; 8 – втулка; 9 – радіальні лопаті; 10 – перфорована оболонка; 11 – п'єзометрична труба для контролю навантаження;

в) лопатевий із циліндричною оболонкою: 1 – перфорована оболонка; 2 – п'єзометричний датчик рівня плаву; 3 – муфта; 4 – шків; 5 – вузол підшипників; 6 – введення плаву; 7 – вал; 8 – лопаті;

г) марки ГрЦСа-40 із двох- і чотирисекційними перфорованими конічними оболонками та пристроєм для розподілу плаву: 1 – перфорована оболонка; 2 – живляча камера; 3, 13 – підшипникові вузли; 4 – корпус; 5 – опорна плита; 6 – шкала; 7 – важіль для керування пристроєм розподілу плаву; 8, 11 – шківи; 9 – вал; 10 – клинопасова передача; 12 – електродвигун; 14 – плита для установки двигуна; 15 – патрубок для введення плаву.

У цьому випадку можна використовувати механічні форсунокові гранулятори. Щодо вище перерахованих грануляторів, то вони мають найбільший полідисперсний гранулометричний склад, але за рахунок більшого діаметра отвору диспергування вирішується проблема його засмічення твердими частинами, які містяться в плавах мінеральних добрив. У грануляційній башті прямокутного перерізу є можливість встановити ряд форсунок, що забезпечують

рівномірне зрошення апарату. Щільність зрошення та його рівномірність у факелі для правильно спроектованої форсунки відповідно до розміщених рядів форсунок по грануляційному майданчику великої.

Для збільшення рівномірного гранулометричного складу гранульованого продукту використовуються вібраційні гранулятори. Це викликано накладанням вібрацій на струмені рідини, які резонують з частотою спаду струму. Вібраційні гранулятори можуть бути як статичними, так і обертовими [6].

Коли вміст великої кількості гранул, що зіштовхуються, є неприпустимим, застосовують обертові гранулятори. Це забезпечує переміщення гранул за різними траєкторіями, що зменшує кількість зіткнень у 5-8 разів, ніж при роботі статичних грануляторів. Це особливо важливо при грануляції плаву карбаміду, оскільки краплі подвійної маси не встигають кристалізуватися у вежах висотою 30 м.

В якості генератора коливань використовувалися сирени або кульковий вібратор. У сучасних конструкціях для генерації коливань використовують електромагнітні вібратори. У таблиці 1.1 узагальнено найбільш типові дані різних конструкцій грануляторів у виробництві аміачної селітри [2, 5].

Таблиця 1.1

Дані експлуатації промислових грануляторів різних типів

Характеристика диспергатора	Діаметр отвору витікання, мм	Частота Обертання об/хв	Навантаження, т/год	Гранулометричний склад, %			
				1-4мм	2-4мм	2-3мм	<1мм
Статичний акустичний	0,85	-	7-18	98-99	85-95	80-90	0,8-1,5
Обертвий конічний	-	-	25-70	97-99	83-92	75-90	0,8-2,5
Обертвий вібраційний	1,1	35-55	20-100	>99	90-97	>90	0,5-1,0
Механічний форсунчатий	-	-	12	80-96	59-63	40-49	2,2-6,1

#### 1.4. Математичні моделі процесу гранулювання в апараті

Проаналізуємо математичні моделі існуючих процесів гранулювання.

Основною метою керування в гранулювання було обрано підвищення швидкості та інтенсивності, тобто покращення дроблення за рахунок збільшення ступеня хаотичності процесу. Тобто, приведення системи в стан так званих пульсацій (коливань), що є обмеженими таким чином, щоб система не втратила стійкості та не стала повністю хаотичною. Такий підхід обумовлено тим, що результатом інтенсивного дроблення частинок є певне вирівнювання концентрацій (градієнт концентрацій майже зникає) та температурного поля по об'єму шару, покращення «текучості», збільшення однорідності шару і, як наслідок, покращення процесів між фазного тепло- та масо- переносу (про що говорять збільшення коефіцієнтів тепло- та масо- передачі), урівноваження взаємовпливу всіх компонентів один на другий, зменшення сили зчеплення частинок між собою і, як наслідок, попередження утворення агломератів. Також це зниження ризику залипання розподільної решітки, а отже й виникнення аварійної ситуації в апараті. Тобто, якість перемішування безпосередньо впливає на якість (гранулометричний склад) готового продукту, відсоток браку та вірогідність виникнення аварійних ситуацій в апараті.

Важливо враховувати особливості гідродинаміки. Використовуючи моделі Девідсона і Харрісона для гетерогенних реакцій з різними характеристиками між однофазним перетворенням для еталонного апарату і двофазною моделлю, можна отримати умовно повністю змішану суцільну фазу. З огляду на проходження процесів в дифузійній області, коли швидкість протікання процесу визначається за коефіцієнтом масо передачі, різниця між цими двома моделями залишається невизначена. Однак переваги двофазних моделей істотні. Адже саме відсутність урахування бульбашок газу в однофазних підходах спровокували появу двофазних моделей. Ці моделі мали всі елементи, які були в останніх моделях існування різних фаз, розділення газових потоків, масо перенос між фазами [4].

Розглянемо основні підходи до розрахунків таких моделей.



Модель Мая. Основні припущення ранньої моделі Мая: розподіл газового потоку базується на двофазній теорії; необхідно, щоб потік бульбашок газу був у загальному потоці; бульбашки газу не містять твердих тіл; потік газу в емульсійній фазі прискорюється з загальним потоком; пористість у фазі емульсії відповідає мінімальним умовам псевдозрідження. Коефіцієнти дисперсії та коефіцієнти масо передачі були встановлені експериментально [4].

Модель Оркутта та Девідсона-Харрісона, запропонована Дж. Оркуттом [11] і відтворена Дж. Девідсоном і Д. Харрісоном [12], була однією з перших, де параметри зв'язані з динамікою газових бульбашок. Вона базується на таких припущеннях: розподілення газового потоку проходить за двофазною теорією; потік газових бульбашок перебуває в спільному потоку; газові бульбашки не включають твердих тіл; структура потоку газу в щільній фазі – або суцільно змішана, або витісняється; пористість у фазі емульсії співпадає з мінімальними умовам псевдозрідження; між фазний масообмін складається з проникнення й дифузії. Коефіцієнт масо переносу  $k_{be} = 0.75U_{mf} + 0.975g^{0.25}D_m^{0.5}d_{eq}^{-0.25}$ , де  $U_{mf}$  мінімальна швидкість псевдозрідження, м/с;  $D_m$  – коефіцієнт молекулярної дифузії, м<sup>2</sup>/с;  $d_{eq}$  – еквівалентний діаметр бульбашки, м. Пізніше цю модель було модифіковано Р. Дартоном з урахуванням збільшення бульбашок у шарі [7].

Модель Грейса базується на наступних припущеннях: у щільній фазі відсутній чистий вертикальний потік газу; потік бульбашок газу, швидше за все, буде зміщений; в застійних ділянках щільної фази не відбувається перемішування; пористість у твердій фазі відповідає мінімальним умовам псевдозрідження; для розрахунку масообміну використовуються напівемпіричні рівняння Грейса. Ця модель може бути використана як спрощення моделі висхідного трифазного шару та моделі протитечійного зворотного потоку. Вважається, що фазою хмари в цій моделі знехтували. Прийнято припущення про відсутність вертикального потоку газу в щільній фазі. Модель Грейса також передбачає наявність твердих речовин у фазі бульбашки [13].

Модель Вертера. Вертер запропонував такий ряд припущень: чистий потік газу в щільну фазу не присутній; потік бульбашок газу, швидше за все,

витісняється; в застійних ділянках щільної фази не відбувається перемішування; пористість у щільній фазі відповідає мінімальним умовам псевдозрідження. Ця модель заснована на ранній, яка враховує зростання бульбашки. Відношення масообміну є незалежним від осьового та радіального положень [4].

Висновки до розділу 1:

Незаперечними перевагами отримання гранульованого продукту, шляхом використання обертового вібраційного гранулятора для диспергування розплаву, є надійність в роботі, висока монодисперсність за розміром, рівномірний розподіл гранул в горизонтальному перерізі вежі, що забезпечує високу продуктивність і низьку енергомісткість. При зростанні попиту на мінеральні добрива для створення конкуренції на ринку, виникає потреба в підвищенні рівню їх монодисперсності, відповідно підвищують продуктивність діючих установ, що підвищують урожайність сільськогосподарських культур, вільну сипучість та зменшують їх втрати при транспортуванні, зайнятість при зберіганні.

Але існуючі на сьогодні гранулятори мають ряд недоліків [23]:

1. неможливість працювати в широкому діапазоні навантажень за плавом;
2. забивання отворів витікання при грануляції розчинів із домішками, для їх проходження крізь отвори витікання необхідний додатковий тиск (підвищення швидкості) перед ними;
3. привід обертання перфорованого днища не може забезпечити однакового напору плаву на верхніх і нижніх рядах отворів витікання при малих витратах;
4. зменшення ступеня монодисперсності готового продукту в результаті стабільності частоти сигналу при зміні рівня плаву в кошику.

Використання наукових розрахунків для прогнозування поведінки витікаючого струменю з вільним і вимушеним розпадом на краплі дозволить створити більш досконалі математичні моделі для аналізу роботи диспергуючих

пристроїв (вібраційних грануляторів).

Завданням кваліфікаційної роботи є створення системи управління хаосом у обертовому віброгрануляторі. Система контролю повинна забезпечувати необхідний коефіцієнт дроблення, який дозволить підтримувати необхідну якість продукції та стабільний процес. Необхідно проаналізувати об'єкт управління, розробити його математичні моделі, перевірити стійкість системи та оптимальне програмне керування

## 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ В ОБЕРТОВОМУ ВІБРАЦІЙНОМУ ГРАНУЛЯТОРІ

### 2.1. Аналіз вібраційного гранулятора, як об'єкта керування

Основний апарат, що розглядається в роботі – це обертовий вібраційний гранулятор. Призначення пристрою – гранулювання мінеральних добрив.

Основною проблемою виробництва азотних добрив це дотримання однорідності гранулометричного складу гранул.

На процес гранулювання у грануляторі впливають такі параметри як: витрата та рівень плаву, швидкість обертання корзини.

Конструкцію вібраційного диспергатора яку було модернізовано подано на рис.2.1.

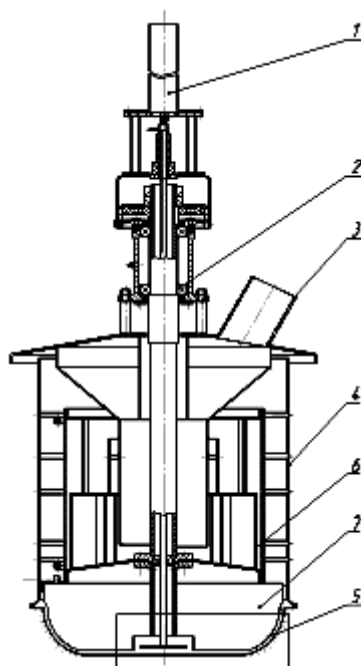


Рисунок. 2.1. - Обертовий вібраційний гранулятор

1 – вібраційний пристрій (актуатор); 2 – підшипниковий вузол; 3 – патрубок надходження плаву; 4 – циліндричний корпус; 5 – перфороване днище (кошик); 6 - розподільник; 7 - напірні лопаті

Електродвигун (не показаний) з розрахованою частотою передає обертання до порожнистого валу через редуктор, при цьому обертаються розподільник з

лопатями, циліндрична камера з перфорованим дном і лопаті, розміщені в перфорованому дні. Плав через насадку для введення надходить в кільцевий колектор. При взаємодії з лопатями розплав рівномірно стікає через отвір перфорованого циліндра і через сітку. Потім плав надходить на перфороване дно. Напірні лопаті вирівнюють швидкість обертання плаву в перфорованому дні. Під впливом цього тиску з усіх отворів перфорованого днища у вигляді окремих струменів виходить плав. Одночасно з подачею плаву вмикається вібраційний пристрій. Через стрижень вібрація з розрахованою частотою надходить на диск випромінювач, розташований над центральним сектором внутрішньої поверхні перфорованого днища із зазором відносно до неї. Зазор надає можливість надійного гідродинамічного з'єднання емітерного диска і центральним сектором перфорованого днища, завдяки чому хвилі розходяться у вигляді пружних деформацій в плаві і на перфороване днище. При застосуванні вібраційного диска-випромінювача відбувається зворотно-поступальний рух, за одну одиницю, якого рухається  $G_h$  кількості рідини:

$$G_h = \rho_p V_h = \frac{\pi D_h^2}{4} h_d \rho_p \quad (2.1)$$

де  $\rho_p$  – густина плаву;  $D_h$  – діаметр диска-випромінювача;  $h_d$  – відстань, яку проходить диск за один хід.

В результаті на потік розплаву, що витікає з отворів, накладаються закономірні збурення у вигляді звуження і розширення, а струмені плаву в місцях звуження розпадаються на рівномірні краплі.

Значення  $G_h$  являється критерієм ефективності передачі збурень на перфороване дно. Величина пульсації тиску, що утворилась, залежить від швидкості переміщення та амплітуди диска:

$$P = \frac{\rho_p v_h^2}{2} = \frac{\rho_p (h \cdot f)^2}{2} \quad (2.2)$$

де  $v_h$  – швидкість руху диска;  $f$  – частота коливання диску.

З вищесказаного бачимо, що одним з основних параметрів вібраційної дисперсії є частота коливань  $f$ , що впливає на закон зміни  $P = f(\tau)$  та дозволяє регулювати середній діаметр і монодисперсність одержуваних крапель плаву при вимушеному розпаді струму.

Для створення математичної моделі процесу розсіювання рідини з використанням вимушених коливань на ній, необхідно розглянути особливості витікання рідини з тонкостінного отвору та її розпаду на краплі без вібрації, щоб зрозуміти загальні особливості розпаду струменю рідини, так як, при вимушеному капілярному розпаді струменю взагалі неможливо отримати монодисперсні краплі при будь-яких зовнішніх впливах. Інша причина цього питання полягає в тому, під час роботи вібраційного гранулятора на виробництві бувають випадки, коли система вимушених коливань, виходять з ладу, і диспергатор працює в статичному режимі. Без накладення вібрації однорідність отриманого продукту зменшиться. Оскільки відповідно до вимог сучасних виробництв необхідно отримати продукт з високою монодисперсністю, важливо спрогнозувати поведінку розпаду струменю в краплі з розрахунком діаметра краплі, що утворюється [24].

При розгляді математичної моделі процесу прийняті наступні допущення:

1. поставити вісесиметричне завдання (припустимо, що в усіх секторах руху рідини - гідродинаміка однакова) - досліджується рух рідини в одному секторі;
2. у верхній частині гранулятора є елементи, які рівномірно розподіляють плав, який потім направляється в перфороване днище. При побудові елементів моделі гідродинаміки в нижній частині кошика, оскільки обладнання у верхній частині, не впливає на витрату плаву;
3. при вісесиметричному завданні розглядається обтікання однієї лопаті, яка знаходиться в центрі сектора з кутом  $360^\circ/n$ , де  $n$  – кількість лопатей.

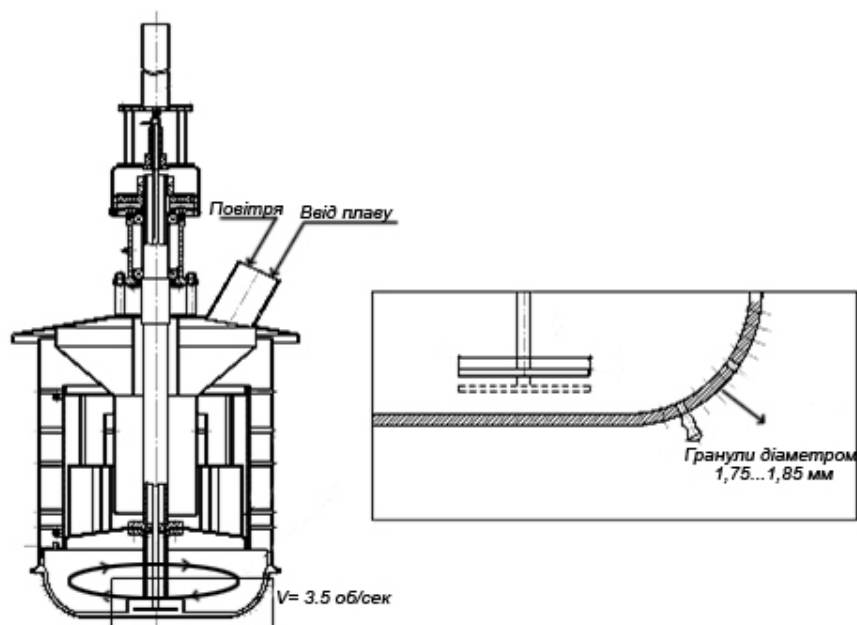


Рисунок 2.2 – загальний вигляд вібраційного гранулятора

## 2.2. Математичне моделювання гідродинаміки стаціонарного струменя, що розпадається, без накладання вимушених коливань

У загальному випадку для розрахунку гідродинамічних характеристик струменю, що виходить з отвору з вільною поверхнею, використовуються методики, що ґрунтуються на рівняннях руху в'язкої рідини. Саме цей шлях є найбільш доцільним для розв'язання конкретної задачі руху струменю рідини, що витікає з отворів днища (кошика) вібраційного гранулятора [14-19].

Для спрощення і зручності розв'язання рівняння Нав'є – Стокса, якими описуємо рух рідини (витікання струменя з отвору), раціонально буде використовувати рівняння в циліндричній системі координат. Основні спрощення отримані на основі теоретичних і експериментальних наукових праць та прийняті для вирішення поставленого завдання. Припускаємо, що збурення на поверхні струменя виникають в умовах, за яких можна вважати, що течія є вісесиметричною, і тангенціальна складова швидкості  $v_{\theta} = 0$ . Такі хвилі називаються симетричними. При симетричних хвилях переріз струменя залишається коловим, відбуваються лише звуження і розширення [**Ошибка!**

**Источник ссылки не найден.]**

Для чисельного дослідження та визначення механізму зміни швидкості і поширення коливань рідини та зміни значення тиску в струмені, який витікає з отвору перфорованого днища, було використано рівняння для опису нестационарного руху рідини [19]:

$$\frac{\partial v_r}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r)}{r} \right) \right], \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right], \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) = 0 \quad (2.5)$$

де  $v_r$ ,  $v_z$  - радіальна та осьова складові швидкості струменя відповідно.

Для спрощення кількості змінних, які входять до рівняння, доповнюємо рівняння (2.3) – (2.5), кінематичними виразами визначення швидкості

$$\frac{\partial r}{\partial \tau} = v_r \quad \text{та} \quad \frac{\partial z}{\partial \tau} = v_z. \quad (2.6)$$

Підставимо рівняння (2.6) у систему рівнянь (2.3) – (2.5), можна їх спростити, при цьому зміниться кількість змінних. Виключивши похідну за часом, отримаємо дану систему рівнянь:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) = 0, \quad (2.7)$$



$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) \right) \right], \quad (2.8)$$

$$v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right]. \quad (2.9)$$

Розглянемо два можливих напрямки розв'язання системи рівнянь (2.7)–(2.9).

Перший напрямок. Зробимо математичне перетворення рівнянь (2.7) – (2.9).

Тоді отримуємо

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0, \quad (2.10)$$

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right] \quad (2.11)$$

$$v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} \right] \quad (2.12)$$

Для розв'язання рівнянь (2.10 - 2.12) використовуємо сучасні методики розв'язання диференціальних рівнянь у частинних похідних і системах таких рівнянь. Використовуємо метод поділення змінних сумою, у результаті чого, отримуємо наступну систему рівнянь (2.13) [20]

Система рівнянь (2.13) неперіоритетна для застосування з точки зору невизначеності впливу зміни тиску в часі на радіальну та осьову швидкість компонентних швидкостей, яка не передбачає ефекту зміни тиску через численні рухи рідини в перфорованій оболонці на зміну радіальної та осьової швидкостей

та її вплив на формування гідродинамічних умов у струмені, що призводить до його розпаду на краплину

$$\begin{cases} p = -\frac{1}{2}\rho C_3^2 r^2 - \frac{1}{2}\frac{\rho C_2^2}{r^2} + C_9 - 2\rho C_3(C_3 z^2 - C_4 z - C_5 z) + C_8, \\ v_r = \frac{C_2}{r} + C_3 r, \\ v_z = C_5 + C_6 K + C_7 Y - 2C_3 z + C_4, \end{cases} \quad (2.13)$$

де  $C_2, C_3 \dots C_9$  – константи рівнянь;  $K, Y$  – функції Бесселя першого і другого порядку відповідно.

Наявність у рівнях функцій Бесселя для визначення осьової складової швидкості, ускладнює одержання розрахункових залежностей, які можуть бути використані для попереднього спрощеного аналізу гідродинаміки потоку рідини з доступом до конкретних інженерних рішень. З іншого боку, при створенні відповідних граничних умов знайдене рішення забезпечить постійний рівень та аналіз гідродинаміки течії з погляду його стаціонарного витікання. Цей аналіз також дуже важливий, тому що якість гранул, що зберігаються в грануляційній вежі, багато в чому залежить від якості перфорованої оболонки за відсутності вимушеної вібрації. [21].

Другий напрямок. Якщо припустити, що осьова складова швидкості  $v_z$  у момент витікання змінюється згідно з параболічним законом, що має вигляд

$$v_z = A_1 r^2 z^2 + A_2 r + A_3 \quad (2.14)$$

то рівняння (2.7) перетвориться на

$$2A_1r^2z + \frac{v_r + r \frac{\partial v_r}{\partial r}}{r} = 0 \quad (2.15)$$

З виразу (2.15) можна визначити значення радіальної складової швидкості витікання струменя:

$$v_r = \frac{-\frac{1}{2}A_1r^4z + F_1(z)}{r} \quad (2.16)$$

Припускаємо, що зміна тиску у струмені в радіальному напрямку незначна порівняно з осовою складовою. Підставивши отриманий вираз (2.14) у (2.9) рівняння набудатиме нового вигляду:

$$2(A_1r^2z^2 + A_2r + A_3)A_1r^2z = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + v \left( 2A_1r^2 + \frac{4A_1rz^2 + A_2}{r} \right) \quad (2.17)$$

Розв'язуючи диференціальне рівняння (2.17), отримуємо закон зміни  $p(z)$  уздовж осі струменя:

$$p(z) = -\frac{1}{r} \left( \rho \left( \frac{1}{2}A_1^2r^5z^4 + A_1r^4z^2A_2 + A_1r^3z^2A_3 - 2vA_1r^3z - \frac{4}{3}vA_1rz^3 - vA_2z \right) \right) + C_1 \quad (2.18)$$

Однією із задач визначення зміни  $p$  уздовж осі струменя є визначення сталих, зокрема  $C_1$ . Припускаємо, що при  $z = 0$  початок системи координат збігається з початком витікання струменя. Витікання відбувається під сталим тиском  $p = const$ , тоді згідно з рівнянням (2.18) отримуємо, що  $C_1 = p_1$ . Звідси рівняння, що описує закон зміни тиску вздовж струменя (осі  $z$ ), набуде вигляду

$$p(z) = -\frac{1}{r} \left( \rho \left( \frac{1}{2}A_1^2r^5z^4 + A_1r^4z^2A_2 + A_1r^3z^2A_3 - 2vA_1r^3z - \frac{4}{3}vA_1rz^3 - vA_2z \right) \right) + p_1 \quad (2.19)$$

Проаналізувавши отримані результати і підставивши знайдену залежність зміни тиску вздовж струменя (2.19) у рівняння (2.8), воно зміниться до вигляду

$$\frac{\left(-\frac{1}{2}A_1r^4z + F_1(z)\right)\left(-2A_1r^2z - \frac{-\frac{1}{2}A_1r^4z + F_1(z)}{r^2}\right)}{r} = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{1}{r^2}\left(\rho\left(\frac{1}{2}A_1^2r^5z^4 + A_1r^4z^2A_2 + A_1r^3z^2A_3 - 2vA_1r^3z - \frac{4}{3}vA_1rz^3 - vA_2z\right)\right) - \frac{1}{r}\left(\rho\left(\frac{5}{2}r^4A_1^2z^4 + 4A_1r^3z^2A_2 + 3A_1r^2z^2A_3 - 6vA_1r^2z - \frac{4}{3}vA_1z^3\right)\right)\right) + v\left(\frac{1}{r}\frac{d^2F_1(z)}{dz^2} - 4A_1rz\right) \quad (2.20)$$

У результаті отримуємо диференціальне рівняння повних похідних відносно функції  $F_1(z)$ , отриманої нами при розв'язанні рівняння нерозривності. Для розв'язання рівняння (2.20) необхідно задати значення першої похідної і самої функції  $F_1(z)$  в якійсь граничній точці. Виходячи з того, що похідна  $\frac{dv_r}{dz}$  дорівнює:

$$\frac{dv_r}{dz} = \frac{-\frac{1}{2}A_1r^4z + \frac{dF_1(z)}{dz}}{r} \quad (2.21)$$

а радіальна складова швидкості струменя, за умови, що  $z = 0$ , стає такою, що дорівнює нулю –  $v_r = 0$ , як наслідок, отримуємо:

$$0 = \frac{-\frac{1}{2}A_1r^4z + \frac{dF_1(z)}{dz}}{r} \longrightarrow \frac{1}{2}A_1r^4z = \frac{dF_1(z)}{dz} \quad (2.22)$$

Використовуючи граничні умови  $F_1(z=0) = 0$  і  $dz(F_1(z=0)) = 0$  й підставивши їх у рівняння (2.12), можна отримати значення функції  $F_1(z)$  у

вигляді полінома:

$$F_1(z) = \frac{1}{6} \frac{(-A_2 + 8A_1 r^3)z^3}{r} + \frac{1}{48} \frac{A_1 r^2 (3A_1 r^4 - 12A_2 r - 8A_3)z^4}{v} \quad (2.23)$$

Проаналізувавши отримані результати і підставивши знайдену залежність зміни функції  $F_1(z)$  уздовж струменя (2.23) у рівняння (2.16), воно зміниться до вигляду

$$\nu_r = \frac{1}{48} \frac{z(-24A_1 r^5 v - 8vz^2 A_2 + 64vz^2 A_1 r^3 + 3A_1^2 r^7 z^3 - 12A_1 r^4 z^3 A_2 - 8A_1 r^3 z^3 A_3)}{vr^2} \quad (2.24)$$

Для чисельного аналізу отриманого розв'язку  $\nu_r$ , нам необхідно визначити коефіцієнти  $A_1$ ,  $A_2$  і  $A_3$ , значення яких знаходимо так. Припустимо, що на поверхні струменя  $r = r_s$  тиск  $p$  дорівнює тиску навколишнього середовища  $p_0$ . Цю граничну умову можна записати у вигляді

$$p_0 = -\frac{1}{r_s} \left( \rho \left( \frac{1}{2} A_1^2 r_s^5 z^4 + A_1 r_s^4 z^2 A_2 + A_1 r_s^3 z^2 A_3 - 2v A_1 r_s^3 - \frac{4}{3} v A_1 r_s z^3 - v A_2 z \right) \right) + p_1 \quad (2.25)$$

Це рівняння дає можливість визначити один із шуканих коефіцієнтів  $A_2$ , що буде мати вигляд

$$A_2 = -\frac{1}{6} \frac{(r_s (3z^4 A_1^2 \rho \cdot r_s^4 + 6z^2 A_1 \rho \cdot r_s^2 A_3 - 12z A_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_1 + 6p_0))}{\rho z (A_1 r_s^4 z - v)} \quad (2.26)$$

Для визначення наступного коефіцієнта  $A_3$  припускаємо, що на осі струменя, тобто при  $r = 0$ , радіальна складова швидкості також дорівнює нулю:  $\nu_r = 0$ . Це можливо за умови, якщо чисельник рівняння (2.24) буде дорівнювати нулю. Підставляючи перелічені вище умови в отримане рівняння (2.26)

визначаємо значення коефіцієнта  $A_3$ , яке має наступний запис:

$$A_3 = -\frac{1}{6} \frac{3z^4 A_1^2 \rho r_s^4 + 6p_0 - 12zA_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_1}{z^2 r_s^2 \rho A_1} \quad (2.27)$$

Підставивши виведене значення коефіцієнтів  $A_2$  і  $A_3$  у рівняння (2.14), вираз для осової складової швидкості матиме такий вигляд:

$$v_z = A_1 r^2 z^2 - \frac{1}{6} \frac{3z^4 A_1^2 \rho r_s^4 + 6p_0 - 12zA_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_1}{z^2 r_s^2 \rho A_1} \quad (2.28)$$

Для визначення значення  $A_1$  будемо використовувати наступне припущення. У точці, близькій до початку системи координат  $z = z_0$ , швидкість витікання ще не змінює свого значення і дорівнює швидкості течії струменя в отворі  $v_z = v_{z_0}$ . Ця умова записується у такому вигляді:

$$v_{z_0} = \frac{1}{6} \frac{6A_1^2 r^2 z_0^4 r_s^2 - 3z_0^4 A_1^2 \rho r_s^4 - 6p_0 - 12z_0 A_1 \rho v r_s^2 + 8\rho v A_1 z_0^3 + 6p_1}{z_0^2 r_s^2 \rho A_1} \quad (2.29)$$

Розв'язуючи отримане рівняння (2.28) стосовно коефіцієнта  $A_1$ , отримаємо два розв'язки:

$$A_1 = \frac{1}{3} \frac{1}{z_0^3 r_s^2 \rho (2r^2 - r_s^2)} (-4v \rho z_0^2 + 3v_{z_0} r_s^2 \rho z_0 - 6\rho v r_s^2 + (16v^2 \rho^2 z_0^4 - 24v \rho^2 z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho^2 z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho^2 z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho^2 z_0 v + 36\rho^2 v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho p_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho p_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho p_1 - 18z_0^2 r_s^4 \rho p_0 + 18z_0^2 r_s^4 \rho p_1)^{1/2}) \quad (2.30)$$

Друге

$$A_1 = -\frac{1}{3} \frac{1}{z_0^3 r_s^2 \rho (2r^2 - r_s^2)} (4v\rho z_0^2 - 3v_{z_0} r_s^2 \rho z_0 + 6\rho v r_s^2 + (16v^2 \rho^2 z_0^4 - 24v\rho^2 z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho^2 z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho^2 z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho^2 z_0 v + 36\rho^2 v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r_s^2 \rho p_0 - 36z_0^2 r_s^2 \rho p_0 - 36z_0^2 r_s^2 \rho p_1 - 18z_0^2 r_s^4 \rho p_0 + 18z_0^2 r_s^4 \rho p_1)^{1/2}) \quad (2.31)$$

Значення коефіцієнта  $A_1$  отримане рівнянням (2.31) не задовольняє фізичну модель.

За допомогою отриманих рівнянь можна вивчити вплив фізичних властивостей рідини, діаметра отвору на зміну довжини і швидкості течії струменя вздовж осі до його розпаду на краплі [22].

Отримані математичні області проілюстровано у вигляді графіків. Для цього на прикладі розглянемо потік води із отвору діаметром 1,1 мм. На графіку (рис. 2.3) показано залежність радіальної складової швидкості від відстані від отвору. На малих відстанях радіальна складова швидкості майже не присутня. При збільшенні струменю виникають і розвиваються радіальні течії, які викликають розпад струменів на краплі. На це вказує збільшення радіальної складової  $v_r$ , що може призвести до дроблення струменю в краплі. Це збігається з теорією інших авторів [18].

Отриманий графік (рис. 2.3) у ході розв'язання характеризує кількісну зміну радіальної складової швидкості  $v_r$  уздовж осі  $z$  від моменту витікання струменя до його розпаду на краплі.

На рис. 2.4 зображена залежність радіальної складової швидкості  $v_r$ , розрахована для різних початкових швидкостей витікання струменя з отвору.

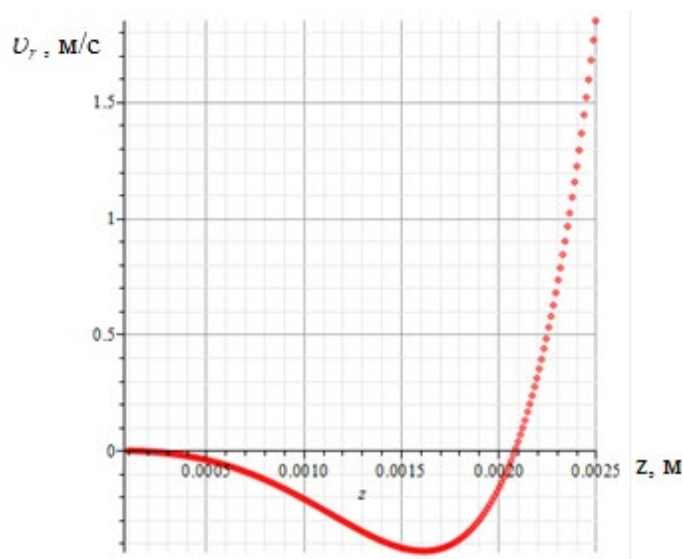


Рисунок. 2.3. Залежність зміни радіальної складової швидкості  $v_r$  від відстані вздовж осі  $z$

З рис. 2.3 видно, що збільшення початкової швидкості рідини з отвору в процесі розсіювання призводить до зменшення відстані від отвору, при якому радіальна складова стає критичною, при якій струмінь проходить дроблення. Чим менша відстань від отвору під час розпаду струменя, тим менша довжина частини струменя, що утворює об'єм краплі, що утворюється при розпаді струменя. Ця гіпотеза підтверджується експериментальними дослідженнями і навіть збігається з результатами досліджень інших вчених. [10, 22].

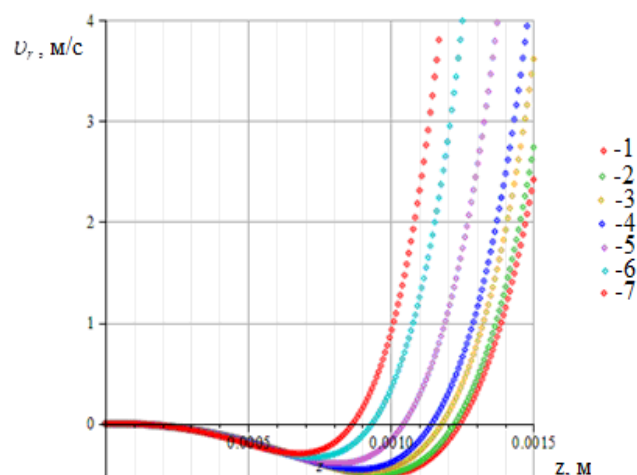


Рисунок. 2.4.

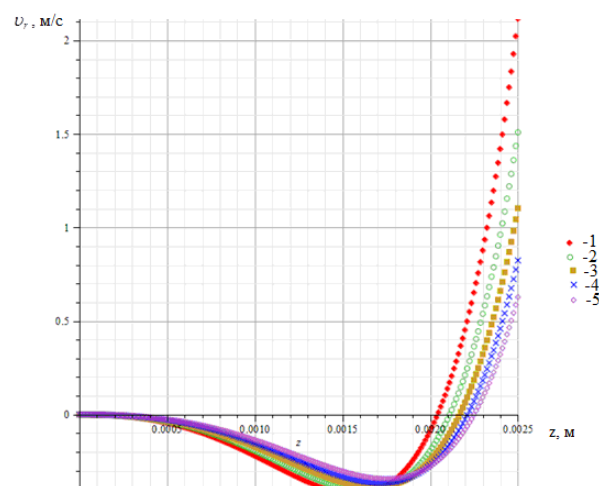


Рисунок. 2.5.

Рис. 2.4 Залежність зміни радіальної складової швидкості  $v_r$  від відстані вздовж осі  $z$  при  $V_{z0}$ : 1) 0,3 м/с; 2) 0,8 м/с; 3) 2 м/с; 4) 3 м/с; 5) 6 м/с; 6) 10 м/с; 7)



13 м/с

Рис. 2.5 Залежність зміни радіальної складової швидкості  $v_r$  від діаметра отвору  $d_{отв}$ : 1) 1 мм; 2) 1,1 мм; 3) 1,2 мм; 4) 1,3 мм; 5) 1,4 мм.

На рис. 2.5 зображення залежності радіальної складової швидкості, розрахованої для різних діаметрів отворів витоку рідини. З рис. 2.5 бачимо, що зі збільшенням діаметра отвору маємо діаметр утвореної краплі

### 2.3. Моделювання процесу поширення вимушених коливань тиску у зоні формування крапель вібраційного гранулятора

Інша картина дроблення струменю рідини на краплі, в разі, коли коливання на її поверхні зумовлені зовнішнім джерелом коливань постійної частоти. При накладанні регулярних коливань струмів рідини дробиться на краплі однакового розміру без утворення супутникових крапель, якщо довжина  $\lambda$  утворених хвиль буде більшою від  $\pi D_j$ . За таких умов відбувається зростання в часі амплітуди поверхневих хвиль, які виникають на поверхні струменя рідини [9].

З вищесказаного бачимо, що частота коливань  $f$  може впливати на зміни закону  $P = f(\tau)$  та регулювати середній діаметр і діапазон монодисперсності одержаних крапель плаву при вимушеному розпаді струменя.

Щоб вирішити задачу, мета якої з'ясувати, як проходить поширення збурень та змінюється значення тиску вздовж потоку плаву, що витікає з отвору перфорованого днища - можна викоистати рівняння (2.3) – (2.5).

Зробимо математичне перетворення рівнянь (2.3) – (2.5).

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0, \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right] \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} \right] \quad (2.34)$$

Використовуючи для розв'язання системи рівнянь (2.32) – (2.34) метод розділення змінних сумою [20], отримаємо наступне рішення:

$$\begin{cases} P = C_{12} + \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + C_{11} + F(\tau); \\ v_r = \frac{C_2}{r} + C_3 r; \\ v_z = C_6 + C_7 \ln(r) + C_8 r^2 - 2C_3 z + C_5 + C_9 \tau + C_{10}, \end{cases} \quad (2.35)$$

де  $C_i$  – константи рівнянь.

Перший рівень для визначення закону зміни тиску вздовж струменю включає функцію,  $F(\tau)$ , яка залежить від часу. Використовуючи цю функцію, можна визначити граничні умови, припускаючи, що початок координат поєднується з центром отвору, з якого витікає плав. Тоді при  $z=0$

$$P = \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + P_1(\tau) \quad (2.36)$$

Припускаємо, що в отворі, з якого витікає рідина, тиск змінюється відповідно до залежності

$$P_1 = a \sin(\omega \tau + c) + d \quad (2.37)$$

де,  $a$  – амплітуда коливань;  $\omega$  – колова частота коливань,  $\tau$  – час;  $c$  – початкова фаза.

Таким чином, у загальному вигляді величина зміни тиску вздовж осі струменя "z" залежить від початкових та граничних умов витікання струменя з отвору та фізичних властивостей рідини:

$$P = \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + a \sin(\omega\tau + c) + d \quad (2.43)$$

Наприклад, на рис. 2.6 зображення того, як змінюється значення тиску на потік струму до його розпаду на краплі у разі витоку рідини (нітрату амонію) з діаметром отвору 1,1 мм при досягненні початкової амплітуди коливань з значення  $\alpha=100$  мкм біля перерізу отвору. Аналіз отриманих результатів (рис. 2.6) показує, що по досягненні довжини струменя  $l_c = 0,00145$  м (до розпаду на краплі) абсолютна величина коливань зменшується на 0,012 %. Це дає змогу передбачити вплив коливань на струмінь та формування крапель рідини (плаву).

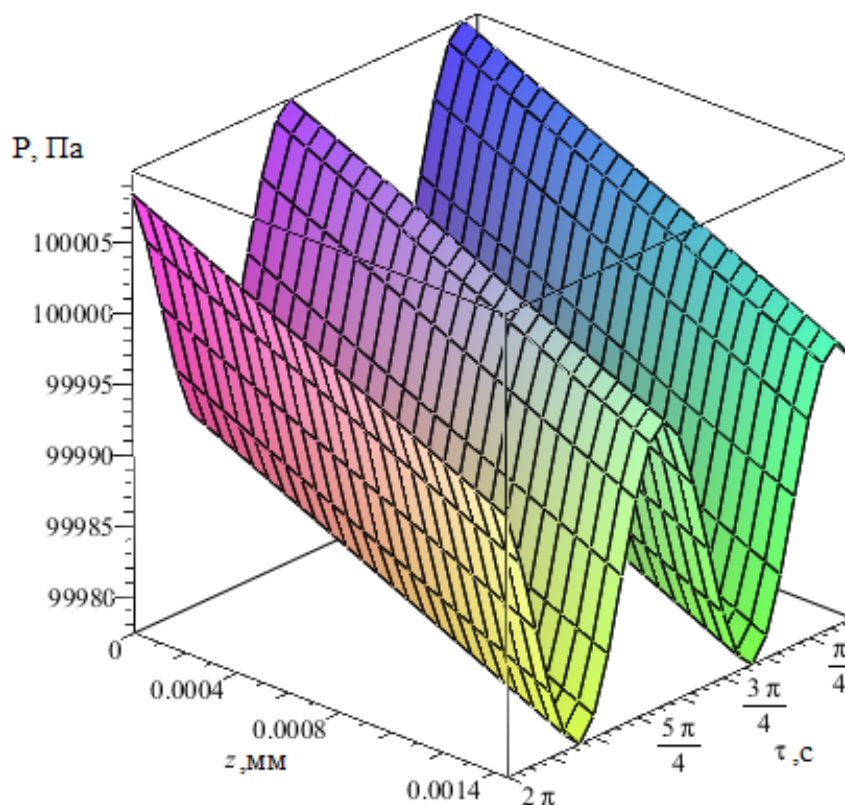


Рисунок. 2.6. Зміна тиску вздовж струменя з часом

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ХАОСОМ У ПРОЦЕСІ ГРАНУЛЮВАННЯ

#### 3.1. Постановка задачі керування хаосом у процесі гранулювання

Термін управління хаосом (управління хаосом) зазвичай використовується для визначення області зіткнення теорії управління та теорії динамічних систем, котра вивчає, як керувати детермінованими системами з нерегулярною, хаотичною поведінкою. Термін хаос походить від грецького « $\chi\alpha\omicron\sigma$ », що в давньогрецькій міфології та філософії означало хаотичну суміш матеріальних елементів світу, з якими все існувало. [25].

Відомо кілька математичних визначень, але всі вони припускають, що тип властивостей притаманний динамічним системам, пов'язаним з «підвищеною чутливістю» до початкових умов: навіть доволно близькі траєкторії, з часом відстань починають розходитись на кінцеву відстань, отже передбачити траєкторію на дуже тривалій час неможливо. Однак кожна траєкторія залишається обмеженою, що суперечить інтуїтивному розумінню нестійкості на основі досвіду роботи з лінійними системами.

Однак виявилось, що нелінійні динамічні детерміновані системи з подібними властивостями не є винятком, «патологічними» випадками. Також було виявлено, що моделі, що описують хаотичну поведінку, присутні в переважній кількості областей науки та техніки, і в деяких випадках більше підходять для опису нерегулярних коливань і невизначеності, ніж ймовірнісні та стохастичні моделі. Досить сказати, що до широкого класу хаотичних систем належать відомі генератори псевдовипадкових чисел, кожен з яких з'явився задовго до введення терміну «хаос» у науковий обіг.

Хаотичні системи — це клас моделей невизначеності, котрі відрізняються від стохастичних моделей своїми властивостями. Якщо в детермінованій моделі майбутню траєкторію можна передбачити на максимальний час вперед, враховуючи поточний стан системи, а в стохастичній моделі точний прогноз

неможливий навіть за найкоротший час, тобто в хаотичній моделі ймовірність помилки прогнозу зростає, експоненціально, з чого витікає висновок про те, що можливий прогноз на обмежений час вперед, який обмежений допустимою похибкою прогнозу. Процеси в хаотичних моделях виглядають як нерегулярні коливання, в яких змінюється, «плаває», як частота, так і амплітуда.

Існує два класи постановки задач управління хаотичними процесами:

1. задача стабілізації;
2. задача збурення або генерації хаотичних коливань.

Завдання стабілізації нестабільного періодичного рішення (орбіти) виникає при пригніченні шуму, вібрації різних конструкцій, усуненні несподіваних гармонік в системах зв'язку, електроніці, тощо. Особливістю цих завдань є те, що об'єкт керування є сильно коливальним, тобто власні значення матриці лінеаризованої системи близькі до уявної осі. Небажані вібрації мають змогу мати, як регулярний, так і хаотичний характер. Завдання придушення хаотичних коливань шляхом перетворення їх у регулярні коливання або повного їх придушення можна формалізувати так:

Розглянемо вільне (некероване,  $u(t) \equiv 0$ ) рух  $x_*(t)$  системи  $\dot{x} = F(x, u, t)$  з початковою умовою  $x_*(0) = x_{*0}$ . Нехай цей рух є  $T$ -періодичним, тобто таким, що для всіх  $t \geq 0$  виконано  $x_*(t+T) = x_*(t)$ . Поставимо задачу його стабілізації, тобто приведення рішень  $x(t)$  системи  $\dot{x} = F(x, u, t)$  до  $x_*(t)$  (3.1):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_*(t)) = 0 \quad (3.1)$$

або зведення виходу системи  $y(t)$  до заданої функції  $y_*(t)$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - y_*(t)) = 0 \quad (3.2)$$

для будь-якого рішення  $x(t)$  системи (2.34) при початковому стані  $x(0) = x_0$ , де  $\Omega$  – задана множина початкових умов.

Задача лежить у розрахунку функції управління в розімкненій формі («програмно керуючий вплив») (3.3):

$$u(t) = U(t, x_0) \quad (3.3)$$

або у вигляді зворотного зв'язку по стану (3.5)

$$u(t) = U(x(t)) \quad (3.4)$$

або зворотній зв'язок по виходу (3.6)

$$u(t) = U(y(t)) \quad (3.5)$$

У даній постановці, завдання стабілізації такого руху нічим не відрізняється від звичної да ТУ завдання стеження. Окрім, принципові особливості: при управлінні хаотичними процесами необхідно досягати мети на досить низькому (в ідеалі невеликому) рівні контролю, вирішення цієї проблеми не є очевидним через нестабільність траєкторій  $x^*(t)$ .

Другий клас задач керування відповідає завданню збурення, або генерації хаотичних вібрацій (називають також завданнями хаотизації, або антикеруванням). Такі завдання з'являються, коли хаотичний рух є бажаним видом поведінки системи. Класичними прикладами є генератори псевдовипадкових чисел, джерела хаотичних сигналів в системах зв'язку і радіолокаційних системах, В останні роки з'явилися також дані про те, що хаотизація процесів може дати досить відчутний ефект в хімічних і біотехнологіях, при обробці сипучих матеріалів, Для подібних завдань притаманно, що траєкторія, по якій повинен переміщуватись фазовий вектор системи, попередньо не задана, не відома або не має впливу на подальше досягнення мети [5].

Формально мета управління може бути представлена у вигляді (3.1), але тут траєкторія  $x^*(t)$  більше не періодична. Більше того, замість того, щоб рухатися по цій траєкторії, є вимоги встановити, що керований процес задовольняє певному заданому критерію хаосу. Наприклад, можна вказати скалярну цільову функцію і встановлена ціль управління на основі досягнення граничної рівності

Формально мету управління можна було б зобразити у вигляді (3.1), але тут траєкторія вже не є періодичною. Більш того, замість переміщення по даній

траєкторії є можливість встановити вимогу, щоб керований процес задовольняв певний заданий критерій хаотичності. Наприклад, можливе задання скалярної цільової функції  $G(x)$  і встановлення мети керування, що основана на досягненні граничної рівності (3.6):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} G(x(t)) = G_* \quad (3.6)$$

або нерівності для нижньої границі  $G(x(t))$  (3.7)^

$$\lim_{t \rightarrow \infty} G(x(t)) \geq G_* \quad (3.7)$$

Частіше за все цільовою функцією для вирішення задач хаотизації використовується старший показник Ляпунова  $G = \alpha$  і вказується  $G_* > 0$ . У певних ситуаціях в якості  $G(x)$  обирається повна енергія механічних або електричних коливань.

Важливим видом задач управління хаотичними процесами є покращення атракторів, як приклад, перетворення хаотичних збурень в періодичні і назад. Розробку шляхів вирішення таких проблем стимулювали нові застосування в лазерних і хімічних технологіях, в технічних телекомунікаціях, в медицині та біології. В результаті, можна збільшити потужність випромінювання при збереженні його когерентності. У хімічному виробництві властивість хаотичного руху в хімічному реакторі, є корисною, оскільки покращує реакцію та підвищує якість продукту. Отже, розумною метою управління, в цьому випадку, є підвищення ступеня хаотичності.

### 3.2. Розрахунок керування за зворотнім зв'язком (метод Пірагаса) процесом гранулювання в обертовому вібраційному грануляторі

Важливим напрямом досліджень використання керованого хаосу є хаотичне

перемішування, особливо - змішування рідин і сипучих речовин. Якісне змішування потоків має велике значення для хімічного виробництва в реакторах безперервної дії, виготовленні мінеральних добрив, порошоків і полімерів. Це слід враховувати при розробці камер згоряння, теплообмінників, грануляторів та інших галузей промисловості.

Підвищення швидкості та якості змішування в хімічних виробництвах зменшує масу реагентів, не задіяних в реакції, тобто підвищує якість вихідного продукту. Відомо, що вартість очищення становить близько 80% вартості готової продукції, тому ретельне змішування має першорядне значення. Для управління вібраційним впливом використовується розширена версія алгоритму Пірагаса. Таке управління сприяє підвищенню коефіцієнта змішування, що, в свою чергу, покращує процес масообміну [25].

У роботі запропоновано спосіб збільшення швидкості перемішування хаотичних потоків рідини на основі збільшення ступеня хаосу. Для його визначення визначають локальні значення показників Ляпунова (експонент Ляпунова), які описують середнє збільшення фазового об'єму.

На основі опису Лагранжа, динаміки двомірних потоків, вони описують рух частин рідини через рівняння Гамільтона, після чого розглядаються загальні рівняння нелінійної динамічної системи у вигляді (3.8) [25]

$$\dot{x} = F(x(t), u(t)) \quad (3.8)$$

де  $x(t)$  належить множині  $R^n$  вектор стану,  $u(t)$  – керуючий параметр потоку. Рівняння (3.8) розглядається разом з варіаційною системою (3.9)

$$\dot{\omega} = M(x, u)\omega \quad (3.9)$$

де  $M = \partial F / \partial x(x, u)$  – Матриця Якобі [25]. Пропонується виміряти локальну швидкість розширення потоку через квадратичну норму  $\omega$ , а саме, як  $\frac{\partial M}{\partial u} |\omega|^2 =$



$2\omega^T M(x, u)\omega$  і змінювати керуючий параметр по закону (3.10)

$$\Delta u = \gamma \text{sign}\left(\omega^T \frac{\partial M}{\partial u} \omega\right) \quad (3.10)$$

де  $\gamma > 0$ , Керуючий вплив активується в тих областях, в яких значення локального найбільшого показника Ляпунова менше, ніж його середнє значення.

На основі рівнянь динаміки, була розрахована система у варіаціях (2.33), після чого розглядаються загальні рівняння нелінійної динамічної системи у вигляді системи. (3.11.)

$$\begin{cases} \frac{d\zeta}{dt} = -(b_1 G_p + a_{11})\zeta - a_{12}\eta \\ \frac{d\eta}{dt} = \left[ a_{21} - \frac{(b_1 G_p + a_{11})(-b_2 G_r + a_{22})}{a_{12}} \right] \zeta + (b_2 G_r + a_{22})\eta \end{cases} \quad (3.11)$$

де  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{22}$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , – коефіцієнти розраховані з рівнянь динаміки системи процесу гранулювання;  $G_p$ ,  $G_r$  – керуючі параметри потоків;  $\zeta$ ,  $\eta$  – відхилення від стаціонарного стану системи (варіації).

Для керування процесом потрібно вимірювати локальні зміни потоку повітря (3.13), для цього необхідно розрахувати частинні похідні моделі у варіаціях (3.12).

$$\begin{cases} \frac{df}{dG_p} = -b_1 \\ \frac{dg}{dG_p} = \frac{-b_2 G_r + a_{22}}{a_{12}} \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\Delta G_p = -\gamma \text{sign}\left(\xi \frac{\partial f}{\partial G_p} + \xi \frac{\partial g}{\partial G_p} \eta\right) \quad (3.13)$$

І змінювати управляючий параметр по закону (3.15)

$$G_p^{n+1}(t) = G_p^n(t) + \Delta G_p \quad (3.14)$$

Недоліком алгоритму є припущення про можливість вимірювання всього вектору стану, а також визначення параметрів керованого процесу.

При використанні програмних пакетів Matlab було розраховано систему диференціальних рівнянь у варіаціях (рис. 3.1).

```
function DifVar
Y0=[365; 385];
[T, Y]=ode45(@fun, [0 100], Y0);
plot(T, Y(:, 1));
grid off;
pause;
plot(Y(:, 1), Y(:, 2));
function F=fun(x, y)
F=[56*10^-4*x+5.6*10^-5 *y(2); 66.31*x-0.22*y(2)];
```

Рисунок. 3.1. – Програма для розрахунку системи диференціальних рівнянь у варіаціях

Отримано графіки відхилень для температури повітря і температури шару (рис. 3.2, 3.3)

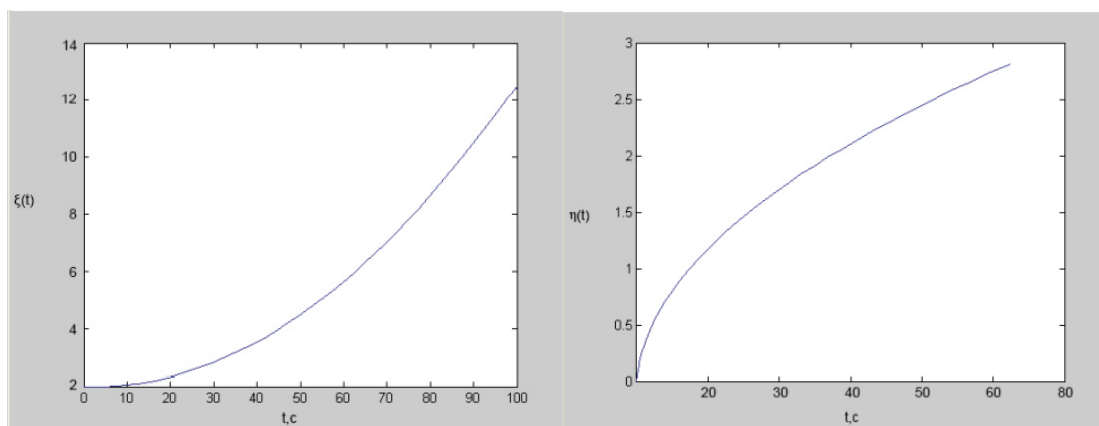


Рисунок. 3.2. та 3.3. - Графік відхилення температури повітря та графік відхилення температури шару, відповідно.

Отримані значення функцій підставляємо в рівняння (3.10) і (3.11). В результаті розрахунків побудовано графік контролю температури шару за допомогою повітряного потоку (рис. 3.4).

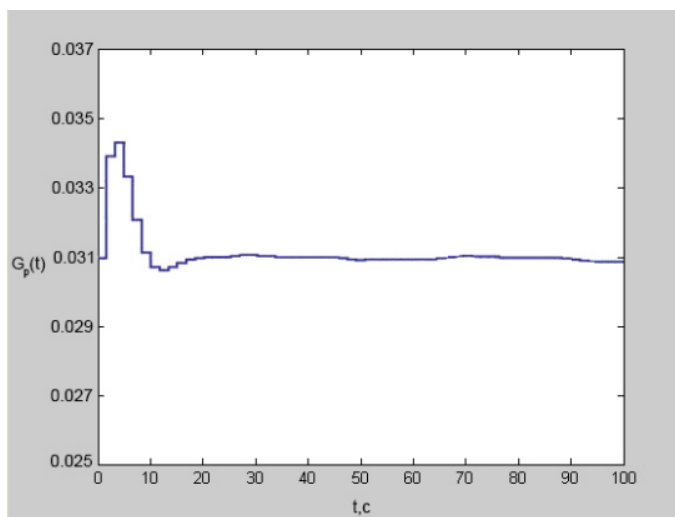


Рисунок. 3.4. Керування витратою повітря

Висновок: такий спосіб управління надає можливість збільшення відхилень, поступово змінюючи потік повітря, посилює хаос процесу, що в свою чергу підвищує ступінь перемішування сировини, що дуже важливо для забезпечення високої якості цільового продукту.

### 3.3. Стійкість системи керування процесом гранулювання в обертовому вібраційному грануляторі

Одним з основних питань, що з'являються при дослідженні та проектуванні лінійних систем управління, є питання їх стійкості. Лінійна система називається стійкою, коли при виведенні її із стану рівноваги (спокою) зовнішніми збуреннями вона повертається до неї після припинення зовнішніх впливів. Якщо після припинення зовнішнього збурення система не повертається до рівноваги, вона нестійка. Для нормального функціонування системи управління необхідно, щоб вона була стабільною, тому що в іншому випадку вона має небажані похибки. Визначення стійкості в більшості випадків здійснюється на початковому етапі створення системи управління. Це пояснюється наступними причинами. По-перше, аналіз стабільності системи досить простий. По-друге, нестабільні системи можна відрегулювати, тобто перетворити в стабільні, додавши спеціальні ланки регулювання.

Для визначення стабільності системи керування процесом гранулювання у

вібраційному грануляторі використовували алгебраїчний критерій стабільності..

Характеристичне рівняння системи було отримано з системи диференціальних рівнянь. Система є стійкою, коли дійсні частини всіх коренів характеристичного рівня від'ємні. Якщо хоча б один корінь рівня має дійсну частину 0, то ця система нестабільна. Якщо хоча б один корінь характеристичного рівня має нульову дійсну частину, то дійсні частини всіх інших коренів від'ємні, це означає, що система знаходиться на межі стійкості. На рисунку 3.5 наведено фрагмент програми для розрахунку характеристичного рівняння, а на рисунку 3.6 показано графічне зображення коренів системи рівнянь.

```
>> sys=tf(num,den)

sys =

          1|
-----
2.2e-05 s^2 + 12.32 s + 0.0037

Continuous-time transfer function.

>> pole(sys)

ans =

    1.0e+05 *
    -5.6000
    -0.0000

>> pzmap(sys)
```

Рисунок 3.5. Фрагмент програмного коду Matlab для розрахунку коренів характеристичного рівняння системи

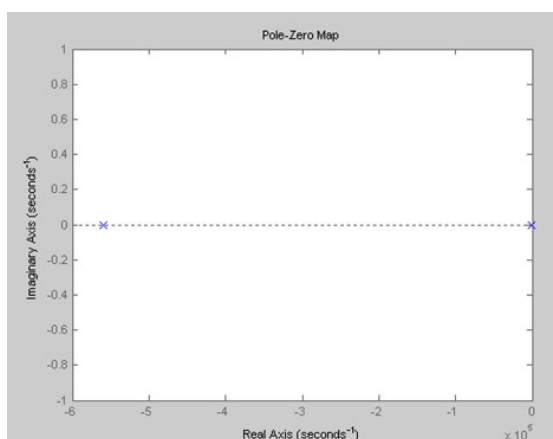


Рисунок 3.6. Розміщення коренів характеристичного полінома на комплексній площині

**Висновок:** Корені характеристичного полінома системи 2.31 знаходяться лівіше від уявної осі, це свідчить про те що дана система стійка.

#### 4. ОПТИМАЛЬНЕ ПРОГРАМНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАНУЛЮВАННЯ У ОБЕРТОВОМУ ВІБРАЦІЙНОМУ ГРАНУЛЯТОРІ

##### 4.1. Вибір критерію оптимальності

Мета: мінімізувати потік повітря, який виявляється на обігрівачах і досягає кінцевої температури шару на заданому рівні.

Для вирішення цієї проблеми вибираємо інтегральний критерій якості.

Критерій оптимальності буде виглядати так (4.1):  $G_p - \Delta t_{sh}$

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} [q(t_{sh} - t_{sh}^{zd}) + rG_p^2] dt \rightarrow \min \quad (4.1)$$

##### 4.2. Виведення необхідних умов оптимальності

Функція Гамільтона матиме вигляд (4.2):

$$H = \frac{1}{2} \left[ q(t_{sh} - t_{sh}^{zd})^2 + rG_p^2 \right] + \lambda_1 \left( \frac{G_p C_p t_p}{V_p \rho_p} - \frac{\alpha F}{V_p \rho_p C_p} - \frac{k F_r}{V_p \rho_p C_p} \right) + \lambda_2 \left( \frac{\alpha F}{m_r C_r} - \frac{\frac{\beta M_{h_2O} F m_r \Delta p}{R(273+t_{sh})}}{m_r C_r} + \frac{C_r(1-U_r)(r + c_p t_{sh})}{m_r C_r} + \frac{G_r U_r q}{m_r C_r} \right) \quad (4.2)$$

Канонічні рівняння Гамільтона (4.3 – 4.5) мають вигляд:

$$\lambda_1' = -\frac{\partial H}{\partial t_p} = -\lambda_1 G_p C_p = 0 \quad (4.3)$$

$$\lambda_2' = -\frac{\partial H}{\partial t_{sh}} = -q t_{sh}^{zd} - R + C_r c_p = 0 \quad (4.4)$$

$$-\frac{\partial H}{\partial G_p} = r G_p = 0 \quad (4.5)$$

### 4.3. Розрахунок оптимального програмного керування

Розрахунок оптимального програмного керування для системи рівнянь виконано за допомогою програмних пакетів Matlab. Графіки математичної моделі в реальному часі з постійним векторним керуванням, графік векторного керування та моделі в реальному часі з оптимальним векторним керуванням, представлені на наступних малюнках.

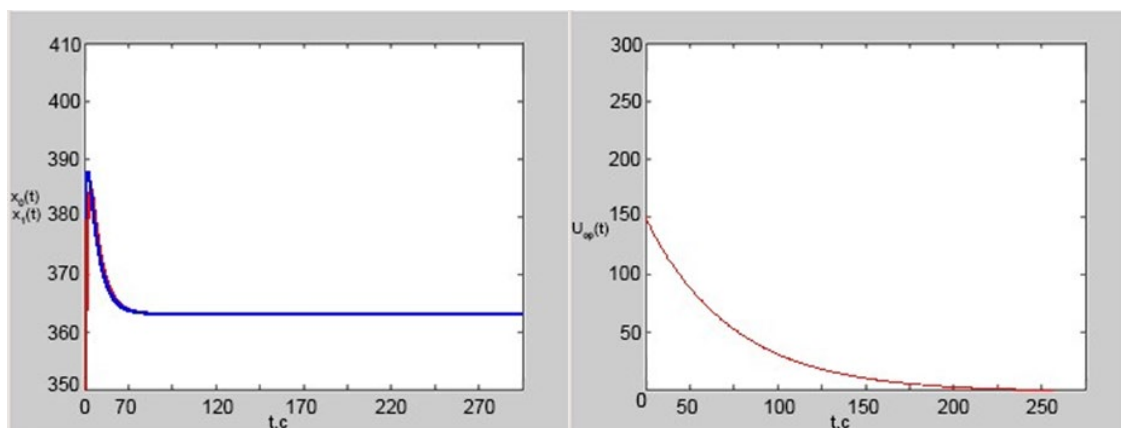


Рисунок. 4.1. та 4.2. – Оптимальна траєкторія переходу при постійному векторі керування та графік оптимального керування відповідно

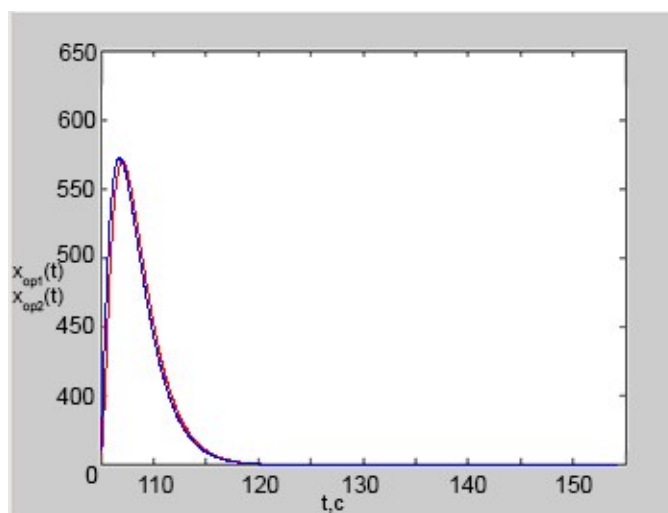


Рисунок. 4.3. – Оптимальна траєкторія переходу при оптимальному векторі керування

#### 4.4. Програмно-логічний контролер

Для впровадження системи нам необхідно провести вибір контролера. Сам вібраційний гранулятор вже оснащений контролером МІК-51. Оскільки використання цього контролера підходить для роботи нашої системи, він є одним з найбільш економічних у своїй категорії.

Архітектура контролера МІК-51 описує інформаційну організацію контролера та характеризує його як частину системи керування.

Частина архітектурних елементів конструкції реалізована апаратно, частина – програмно. Все програмне забезпечення, яке формує архітектуру, зберігається в постійному пристрої, яке запам'ятовує і недоступне для користувача. Незалежно від того, як реалізовані елементи архітектури — апаратні чи програмні — користувач може представляти контролер як продукт, в якому всі елементи фактично існують у вигляді окремих вузлів.

До складу архітектури контролера входить (див. рис. 5.1):

1. апаратура вводу-виводу інформації (базової моделі і модулів розширення);
2. апаратура оперативного керування і налаштування;
3. апаратура інтерфейсного каналу;
4. функціональні блоки;
5. бібліотека функціональних блоків

Спираючись на розрахунки наведені вище, були визначені критерії, за якими був здійснений підбор ряду контролерів, що задовольняють умови, а також проведено порівняння серед них, в ході чого було визначено, що МІК-51 є фаворитом серед обраних варіантів, як з економічної точки зору, так і з технічної.

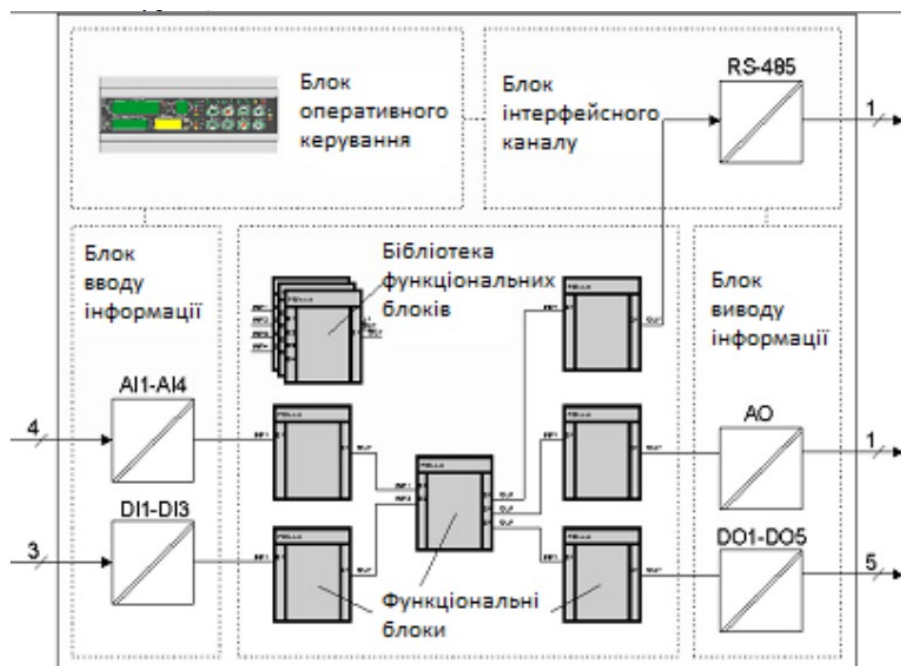


Рисунок 5.1- архітектура контролера МІК-51

Таблиця 5.1- Порівняння ПЛК по характеристикам

ПЛК	МІК-51	ОВЕН 160	ОВЕН 150
Інтерфейс	RS-485	RS-485,232	RS-485,232
К-сть входів дискретних	До 35	16	6
К-сть входів аналогових	4	8	4
К-сть виходів дискретних	До 37	12	4
К-сть виходів аналогових	До 4	4	2

Контролер програмується через програмний пакет редактора FBD-програм АЛЬФА, та містить велику бібліотеку функціональних блоків, достатню для вирішення складних налаштувань автоматичного керування та логіко-програмного керування. Окрім функціональних блоків автоматичного керування та логіко-програмного керування в бібліотеці присутній великий набір функціональних блоків, які окрім динамічного перетворення, здатні виконувати, ,



математичні, статичні, логічні та аналого-дискретні перетворення сигналів.

Частина функціональних блоків бібліотеки має особливе завдання: вона з'єднує апаратне забезпечення контролера з основною масою функціональних блоків. Ці «пов'язані» функціональні блоки скасовуються:

1. функціональні блоки вводу і виводу аналогових і дискретних сигналів,
2. функціональні блоки обслуговування лицьовій панелі,
3. функціональні блоки прийому і передачі сигналів через інтерфейсний канал.

Апаратні елементи структури контролера (вхідні та вихідні УСО, лицьова панель, інтерфейсний канал) починають виконувати свої функції лише після того, як будуть використані будь-які відповідні функціональні блоки.

## ВИСНОВОК

В проекті описана система гранулювання в обертовому вібраційному грануляторі.

Для цього були виконані наступні пункти:

1. Проаналізовано технологічний процес ;
2. Розроблено математичну модель управління;
3. Досліджена система керування хаосом у процесі гранулювання;
4. Вперше визначено критерій оптимальності;
5. Розраховано систему керування грануляційним комплексом

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. 90980 Україна, МПК В01 J2/02. Обертовий вібраційний гранулятор плавів / О. І. Краєвський, А. В. Васильєв, В. М. Покотило, О. О Краєвський; заявник і власник Сумський державний університет. – заявл. 06.07.2009, опубл. 10.06.2010, Бюл. № 11.
2. Кудинова О. Потенциал мирового рынка минеральных удобрений / О. Кудинова // The Chemical Journal Химический журнал. – 2017. – № 1–2. – С. 36–39
3. Склабинский В. И. Технический аудит узлов грануляции расплава в производстве минеральных удобрений башенным способом / В. И. Склабинский, М.С. Скиданенко, Н. П. Кононенко // Технологический аудит и резервы производства. – 2018. - № 3/2 (17). – С. 15–22.
4. Математичне моделювання динаміки процесів переносу при зневодненні та гранулюванні у псевдозрідженому шарі / Б. Я. Корнієнко // Вісник Національного авіаційного університету. - 2017.
5. Верисокин А.Ю. Определение показателей Ляпунова на примере модели Селькова в присутствии внешней периодической силы. Спектральный анализ и его приложения. Пер. с англ. -- Москва, Мир, 2017. – 584 стр.
6. Артюхов А. Е. Анализ результатов промышленного внедрения вращающихся вибрационных грануляторов плава в агрегатах получения аммиачной селитры / А. Е. Артюхов, Н. П. Кононенко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. –2017. – №1. – С. 35–41.
7. Дэвидсон Дж. Псевдооживление / Дж. Дэвидсон, Д. Харрисон. – М. : Химия, 1973. – 725 с.
8. Верисокин А.Ю. Определение показателей Ляпунова на примере модели Селькова в присутствии внешней периодической силы. Спектральный анализ и его приложения. Пер. с англ. -- Москва, Мир, 1990. – 584 стр.
9. Холин Б. Г. О гидродинамическом парадоксе центрифуги / Б. Г. Холин // Интенсификация технических процессов в химической и машиностроительной

промышленности. – 1970. – № 3. – С. 7–13.

10. Афанасьев В. Н. О некоторых особенностях капельных потоков / В. Н. Афанасьев // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 36, № 1. – С. 94–101

11. Моделювання і оптимальне керування процесами зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі : Автореф. дис... канд. техн. наук : 05.13.07 / Б. Я. Корнієнко; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - К., 2000. - 18 .

12. A Numerical Model of Gas-Fluidized Beds / J. A. M. Kuipers, K. J. van Duin, F. P. H. van Beckum, W. P. M. van Swaaij // Chem. Eng. Sei. – 2017

13. May W. G. Fluidized-Bed Reactor Studies / W. G. May // Chem. eng. progress. – 1959. – 55, No. 12. – P. 49-56.

14. Kobayashi H. Fluidization models / H. Kobayashi, F. Arai, T. Sunawaga // Chem. Eng. Tokyo. – 2017. – Vol. 31. – P. 239.

15. Sirignano W. A. Review of theory of distortion and disintegration of liquid streams / W. A. Sirignano, C. Mehring // Progress in energy and combustion science. – 2017. – Vol. 26. – P. 609–655.

16. Crowe C. T. Multiphase flow handbook / New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2017. – P. 1128.

17. Вулис Л. А. Теория струй вязкой жидкости / Л. А. Вулис, В. П. Кашкаро. –М.: Наука, 1965. – С.432.

18. Шкадов В. Я. Течение вязкой жидкости./ В. Я. Шкадов, З. Д. Запрянов –М.: Моск. ун–т, 1984. – 200 с.

19. Кочин Н. Е. Теоретическая гидромеханика / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. – изд. 4-е. – Ч 2. – Физматгиз, 1963. –728 с.

20. Shingareva, I. Solving nonlinear partial differential equations with Maple and Mathematica / I. Shingareva, C. Lizarraga-Celaya. – Springer Wien New York, 2018. – 359 p

21. Козлов В. В. Круглая струя в поперечном сдвиговом потоке / В. В. Козлов, Г. Р. Грек, М. А. Литвиненко, Ю. А. Литвиненко, Г. В. Козлов. //Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2017. – Т. 5, № 1. – С. 9–28.

22. Скиданенко М. С. Аналіз гідродинаміки стаціонарного витікання струменя / М. С. Скиданенко, В. І. Склабінський // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – 2017. – № 1. – С. 79–85.

23. Irshad U. Granulation of urea in a pan granulator / U. Irshad, M. N. Sharif, R. U. Khan, Z. H. Rizvi // Journal of quality and technology management. – 2018. – Vol. 5 (1). P. 56–66.

24. Скиданенко М. С. Оцінка можливості застосування вібраційних грануляторів для одержання мікрогранул / М. С. Скиданенко, А. В. Іванія, А. Є. Артюхов, В. І. Склабінський // Инженерные средства и методы оптимизации химических производств: материалы Всеукраинской конференции с международным участием (17 – 19 мая 2017 г.): тези доповідей. – Дніпропетровськ: Державний вищий навчальний заклад "Український державний хіміко-технологічний університет", 2017. – С. 72–73.

25. Андриевский Б. Р. Управление хаосом: методы и приложения [Текст]: учеб. пособ. // Б. Р. Андрієвський, А. Л. Фрадков; Институт проблем машиноведения РАН. – К., 2017. – 37 с. : ил. – Библиогр.: с. 24–25. – 150 экз. – ISBN: 0-08-043560-2.

26. Ярошенко Д.О. – «Система вібраційного гранулятора добрива» – Науково - технічна конференція «ІМА-2021». - Суми -2021.- 169-170с