

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

На правах рукопису

СКИДАНЕНКО МАКСИМ СЕРГІЙОВИЧ

УДК [66.099.2+66.063.62].02:66.021.1 (043.5)

ГІДРОМЕХАНІЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ
МОНОДИСПЕРСНИХ КРАПЕЛЬ ТА ГРАНУЛ

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
доктор технічних наук, професор
Склабінський Всеволод Іванович

Суми – 2014

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ....	12
1.1 Тенденції зростання виробництва азотних добрив.....	12
1.2 Апаратурне оформлення процесу диспергування в грануляційних баштах	20
1.3 Вплив гідродинамічних та механічних чинників на формування крапель...	28
1.3.1 Режимми швидкості витікання рідини з отвору.....	30
1.3.2 Вплив геометрії отвору на характер витікання рідини.....	33
1.4 Вплив параметрів сигналу на розпад струменя.....	36
1.5 Математичні методи опису процесу розпаду струменя на краплі.....	44
1.5.1 Лінійна теорія капілярної нестійкості струменів для в'язкої рідини	44
1.5.2 Нелінійна теорія капілярного розпаду струменя.....	46
1.6 Висновки до першого розділу, вибір напрямку досліджень.....	49
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ СТВОРЕННЯ КРАПЕЛЬ МОНОДИСПЕРСНОГО СКЛАДУ.....	52
2.1 Фізична модель розпаду струменя та утворення крапель.....	52
2.2 Визначення характеру розподілу швидкості руху розплаву в об'ємі оболонки та перед отворами витікання.....	56
2.3 Математичне модеулювання гідродинаміки стаціонарного струменя, що розпродається.....	66
2.4 Розповсюдження вимушених коливань тиску у зоні формування крапель віброгранулятора.....	78
2.5 Висновки до другого розділу.....	81
РОЗДІЛ 3 ОПИС СТЕНДІВ ТА МЕТОДІВ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.....	83
3.1 Будова експериментальної установки.....	83

3.2 Контроль та вимірювання технологічних параметрів процесу.....	87
3.3 Методика обробки результатів експериментальних досліджень.....	89
3.4 Результати експериментальних досліджень.....	90
3.5 Висновки до третього розділу.....	96
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	98
4.1 Зіставлення результатів експерименту та моделювання процесу диспергування плаву.....	98
4.2 Інженерна методика розрахунку гідро- та механічних умов створення крапель монодисперсного складу	104
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	106
РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ПРОМИСЛОВИХ ВИПРОБУВАНЬ ВИРОБНИЦТВА АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ В ГРАНУЛЯЦІЙНИХ БАШТАХ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....	107
5.1. Опис технології виробництва аміачної селітри в грануляційних баштах АС-60.....	107
5.2 Опис методики проведення промислових досліджень.....	110
5.3 Результати дослідно-промислових випробувань.....	111
5.4 Одержані техніко-економічні показники.....	116
5.5 Висновки до п'ятого розділу.....	121
ВИСНОВКИ.....	122
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	124
ДОДАТКИ	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

d_{gp} – діаметр гранули, м;

d_{kp} – діаметр краплі, м;

$d_{отв.}$ – діаметр отвору, м;

D_j – діаметр струменя, м;

f – частота коливань, Гц;

φ – коефіцієнт швидкості;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

h – висота розплаву в грануляторі, м;

v – швидкість витікання розплаву з отвору, м/с;

ε – коефіцієнт стиснення струменя;

m – масова витрата рідини, віднесена до одиниці площі внутрішньої поверхні перфорованої оболонки, кг/м²;

R_l – радіус оболонки гранулятора, м;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;

Re – критерій Рейнольдса;

We – критерій Вебера;

Oh – критерій Онезорга;

L_j – частини струменя, що не розпалася, м;

U_j – швидкості витікання струменя з отвору, м/с;

R_N – радіус отвору, м;

R_j – радіус струменя, м;

r_k – радіус основної краплі, м;

r_c – радіус сателіта, м;

R_{min} – кінцевий радіус струменя, м;

α – кут входу в отвір, град;
 β – кут виходу з отвору, град;
 z – відстань вздовж струменя, м;
 χ – безрозмірне хвильове число;
 a – амплітуда сигналу, м;
 γ – безрозмірний інкремент нестійкості;
 λ – довжина хвилі, м;
 ρ – густина, кг/м³;
 σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;
 v_r – радіальна компонента швидкості струменя, м/с;
 v_z – осьова компонента швидкості струменя, м/с;
 v_θ – тангенціальна складова швидкості струменя, м/с;
 φ – потенціал швидкості;
 h_d – відстань, яку проходить диск за один хід, м;
 D_h – діаметр диска-випромінювача, м;
 P – тиск на поверхні струменя вздовж вісі, Па;
 v_h – швидкість руху диску, м/с;
 β_2 – вихідний кут лопатей, град.;
SD – середньоквадратичне відхилення виміру, мм;
ОВГ – обертовий вібраційний гранулятор;
ВКРС – вимушеного капілярного розпаду струменя;
КС – киплячий шар.

ВСТУП

Актуальність теми. Останніми роками все більш інтенсивного розвитку набувають наукові дослідження і практичні розробки, пов'язані зі здобуттям і використанням речовин, що мають переважно монодисперсний склад (краплі та гранули). Продукцію однакового складу використовують у різних сферах: ядерній технології, медицині, харчовій промисловості, хімічній, машинобудівній промисловості та ін. Широкий діапазон застосування монодисперсних частинок передбачає розбіжність параметрів, що у свою чергу обумовлює велику різноманітність методів їх отримання.

Ці методи повинні забезпечити найменші втрати вихідного продукту і звести до мінімуму утворення браку кінцевого продукту, автоматизацію не лише окремих етапів технологій, але і комплексну роботизацію технологічного процесу, включаючи процеси обліку та контролю на всіх його стадіях. Крім того найважливішими критеріями є ресурсозбереження (включаючи енерго- і матеріалоємність); екологічна безпека; оптимізація складових людської праці; наступність технологій, їх швидке суміщення з уже існуючими або можливість заміни ними вже освоєних.

У сучасному хімічному виробництві застосування монодисперсних частинок реалізовано, зокрема, у великотонажних виробництвах азотних і комплексних мінеральних добрив, що одержуються баштовим способом (прилювання). Для формування краплинних структур застосовують різні типи технічних пристроїв. На сьогодні найбільш перспективним є метод вимушеного розпаду струменів рідини, що відповідає переліченим вимогам, із використанням обертових або статичних вібраційних грануляторів (ОВГ) у баштах прилювання.

У сучасному сільському господарстві у всьому світі динамічно зростає попит на азотні добрива. Найближчими роками очікуються активне інвестування та зростання світових потужностей виробництва мінеральних добрив. На стадії будівництва на цей час знаходяться 250 проектів. Експерти

ІФА оцінюють, що у 2015–2020 роках споживання азотних добрив в середньому зросте на 2,5–3 % на рік і досягне 215 млн т поживних речовин.

Зі зростанням попиту на мінеральні азотні добрива, для створення конкуренції на ринку збуту актуальною є необхідність підвищення якості отриманого продукту. Існуючі підприємства прагнуть збільшити виробництво азотних добрив без будівництва нових башт прилювання, це можливо досягти лише шляхом модернізації вузла грануляції. У зв'язку з цим перед науковцями та інженерами постає актуальна проблема модернізації існуючого обладнання для диспергування.

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

Дисертаційна робота відповідає тематичному плану науково-дослідних робіт кафедри процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв (ПОХНВ) Сумського державного університету в рамках держбюджетної тематики «Дослідження гідродинамічних та масотеплообмінних характеристик пристроїв із вихровими та високотурбулізованими одно- та двофазними потоками» (номер державної реєстрації 0110U002632). Термін виконання – 2010–2014 р. Замовник – Міністерство освіти і науки України.

Результати дисертаційної роботи також були впроваджені при виконанні господарських розрахункових договорів:

1) № 51.18-03.12 СП «Виготовлення науково-технічної продукції за завданням замовника – кошика до гранулятора ОВГ 500/585». Замовник ПАТ «Концерн Стирол» Ostchem;

2) № 51.18-02.12 СП «Розробка, виготовлення, поставка та проведення пусконаладжувальних робіт грануляційного устаткування». Замовник ПрАТ «Северодонецьке об'єднання азот».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження основних закономірностей гідродинаміки витікання струменя рідини з тонкостінного отвору та динаміки розвитку збурень на поверхні струменя рідини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити гідродинаміку руху рідини в порожнистій перфорованій оболонці з малим значенням Re , що дасть можливість характеризувати розподіл швидкості руху розплаву в порожнині оболонки (в кошику обертового вібраційного гранулятора) і перед отворами витікання, та узагальнити отримані результати у вигляді рекомендацій з модернізації конструкції гранулятора залежно від робочих параметрів.

2. Дослідити гідродинаміку струменя, що витікає з тонкостінної перфорованої оболонки, при мимовільному розпаді. Подати узагальнення отриманих результатів у вигляді аналітичних рівнянь.

3. Установити гідродинамічні закономірності струменя, що витікає з отвору, при накладанні на нього вимушених коливань. Подати узагальнення отриманих результатів у вигляді аналітичних рівнянь.

4. Провести експериментальні дослідження для вивчення режимів розпаду струменя.

5. На основі експериментальних і теоретичних досліджень модернізувати існуючий обертовий вібраційний гранулятор.

6. Запропонувати оптимальний режим роботи генератора низьких частот для забезпечення монодисперсного складу продукту та зниження кількості пилу.

7. Підтвердити запропоновані рекомендації на промислових випробуваннях.

Об'єкт дослідження – процес диспергування рідини методом вимушеного розпаду струменя.

Предмет дослідження – вплив гідромеханічних показників пристроїв на процес диспергування рідини за допомогою вібраційного гранулятора для отримання монодисперсних крапель та гранул.

Методи дослідження. У роботі були використані методи фізичного та математичного моделювання процесу диспергування струменів за різних умов. Гідродинаміку порожнистої перфорованої оболонки обертового

вібраційного гранулятора досліджувалась чисельним способом за допомогою програмного забезпечення ANSYS CFX. Для розв'язання диференціальних рівнянь використовували аналітичні методи. Проведено експериментальне дослідження режимних параметрів роботи обертового вібраційного гранулятора. Опрацювання експериментальних даних виконували за допомогою комп'ютерної техніки та пакета прикладних програм, а саме: MS Office Excel, MATLAB (Matrix Laboratory), MathCAD.

Наукова новизна одержаних результатів. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень процесу диспергування струменів у обертовому вібраційному грануляторі в дисертаційній роботі вперше отримано:

– аналітичний розв'язок рівнянь, які описують витікання струменя з оболонки обертового вібраційного гранулятора у стаціонарному режимі з подальшою зміною радіальної складової швидкості рідини струменя, що впливає на формування величини крапель;

– аналітичні рівняння, які описують витікання струменя з оболонки обертового вібраційного гранулятора під дією коливань тиску, що дозволяє проводити теоретичний аналіз впливу початкових і граничних умов із використанням вібраційних впливів на параметри струменя та утворювальних крапель;

– експериментально досліджено вплив параметрів сигналу генератора низьких частот на режими розпаду струменя з урахуванням рівня рідини у кошику вібраційного гранулятора та швидкості його обертання.

Набув подальшого розвитку опис гідродинаміки:

– руху рідини в порожнистій перфорованій оболонці обертового віброгранулятора;

– витікання струменя з отворів обертового вібраційного гранулятора за умов вільного витікання і при накладанні вимушених коливань.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані аналітичні рівняння опису гідродинаміки витікання струменя дають можливість

аналізувати процес диспергування струменя, що дає змогу встановлювати оптимальні технологічні параметри процесу диспергування розплаву азотних добрив для отримання якісного продукту. Встановлені математичні закономірності дозволяють уточнити методику розрахунку грануляторів розплаву азотних добрив, що дає можливість отримувати гранули у вузькому фракційному діапазоні при максимальному розмірі гранул, які можуть охолотитися у башті приливання. На підставі рівнянь гідродинаміки запропоновано математичну модель, яка враховує поширення коливань тиску вздовж струменя, що дозволяє проаналізувати режим вимушеного розпаду струменя. Розроблено методику розрахунку диспергатора – обертового вібраційного гранулятора, що дозволяє проводити теоретичний аналіз пристрою за різних умов експлуатації гранулятора, в тому числі й для розплаву азотних мінеральних добрив. Науково-технічні результати дисертаційної роботи були впроваджені при розрахунку диспергатора обертового вібраційного гранулятора для гранулювання аміачної селітри.

Особистий внесок здобувача. **Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи, що складають її сутність, отримані особисто здобувачем. Серед них: статистичний збір матеріалу, його обробка, аналіз роботи конструкцій приладів для диспергування рідин; створення лабораторної установки та проведення експериментальних досліджень; розроблення фізичної та математичної моделей досліджуваного процесу. Вибір теми дисертаційної роботи, постановка завдання дослідження, обговорення отриманих результатів відбувалися разом із науковим керівником – проф. Склабінським Всеволодом Івановичем.

Апробація результатів дисертації. **Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій: «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2011, 2013 рр.); II та III Всеукраїнських міжвузівських науково-технічних конференціях

«Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2012, 2014 рр.); Всеукраїнській науковій конференції з міжнародною участю «Інженерні засоби і методи оптимізації хімічних виробництв» (м. Дніпропетровськ, 2011 р.); II Міжнародній конференції молодих вчених «ССТ-2011» (м. Львів, 2011 р.); на II Міжнародній Казахстансько-Російській конференції з хімії та хімічної технології (м. Караганда, Казахстан, 2012 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «КМХТ – 2012» (Київ–Рубіжне, 2012 р.); I Міжнародній науково-технічній конференції «Хімічна технологія: наука та виробництво» (м. Шостка, 2012 р.); Міжнародній українсько-японській конференції з питань науково-промислового співробітництва (м. Одеса, 2013 р.); Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте» (м. Одеса, 2013 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 17 наукових працях, серед них 4 статті у наукових фахових виданнях та 2 статті в журналах, що входять до наукометричних баз даних, 11 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (який містить 100 найменувань на 10 сторінках) і додатків. Робота викладена на 110 сторінках основного тексту, містить 40 рисунків, 12 таблиць та додатків на 7 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Тенденції зростання виробництва азотних добрив

В сучасному сільському господарстві по всьому світу динамічно зростає попит на азотні добрива.

На розвиток ринку мінеральних азотних добрив мають вплив економічні і соціальні тренди. Зростанню попиту на азотні добрива сприяють:

- проблема продовольчого забезпечення слаборозвинених країн;
- необхідність підтримувати і підвищувати врожайність сільськогосподарських земель, можливості розширення яких вельми обмежені;
- активний пошук поновлюваних джерел енергії та плани розвитку біоенергетики.

У найближчі роки очікується досить активне інвестування і зростання світових потужностей. На стадії будівництва в даний час знаходяться 250 проектів. Виходячи з вартості будівництва нових установок і закладання шахт, Експерти IFA оцінюють загальні витрати на будівництво нових установок в 88 млрд доларів. Їх реалізація призведе до зростання виробничих потужностей в 2015 році на 183 млн т (рис. 1.1) [2].

На регіональному рівні основний приріст споживання добрив припадатиме на країни Азії та Американського континенту – 59 і 23 % світового приросту споживання відповідно. З азіатських країн основна частина приросту споживання припаде на країни Південної Азії (Малайзія, Індонезія, Індія), де все більша увага приділяється продовольчій безпеці. У 2015–2020 роках споживання в середньому зросте на 2,5–3 % на рік і досягне 215 млн т поживних речовин (рис. 1.2) [2].

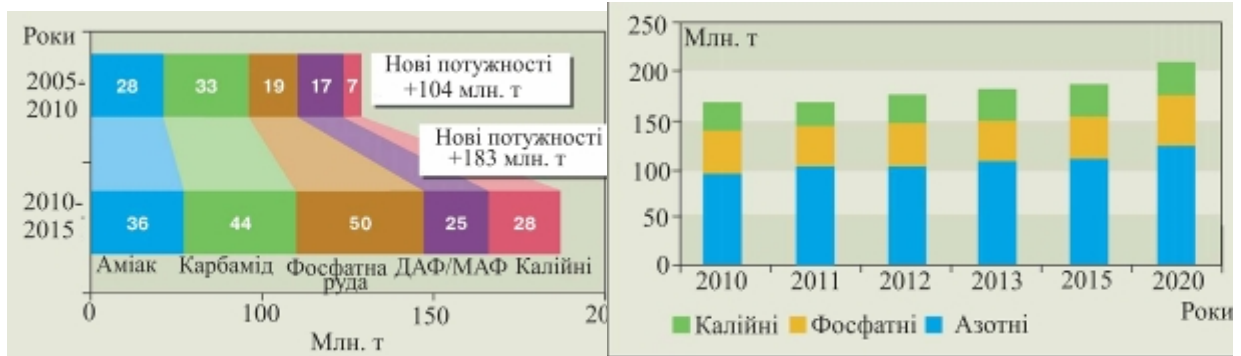


Рисунок 1.1 – Збільшення потужності виробництва мінеральних добрив і розмір інвестицій у його розвиток

Рисунок 1.2 – Прогноз споживання мінеральних добрив у світі, млн т харч. речовин

Зі зростанням попиту на мінеральні добрива, для конкурентної спроможності на ринку, з'являється необхідність підвищення їх монодисперсного складу, що забезпечує підвищення врожайності сільськогосподарських культур, вільну сипучість при використанні, зменшення втрат при їх транспортуванні та відсутність злежування при зберіганні. У світовій практиці хімічної промисловості найбільше розповсюджені способи виробництва азотних мінеральних добрив методом прилювання в баштах і гранулювання (шляхом пошарового нанесення розплаву на частинки ретурна в киплячому шарі в барабанних або тарілчастих грануляторах) [3]. Спосіб прилювання полягає в розбризкуванні (розпаді струменів на краплі, що витікають з диспергуючого пристрою) в повітряному середовищі розплаву мінеральних добрив, та охолодження сферичних крапель розплаву, що знаходяться у вільному падінні і їх кристалізації в зустрічному потоці охолоджуючого повітря.

Башта прилювання (рис. 1.3) представляє собою інженерно-технічну споруду висотою 30–114 м і діаметром 8–22 м, в залежності від продуктивності. У нижній частині башти, практично по всьому поперечному перерізу, встановлюється вбудований апарат охолодження прил в киплячому

шарі з підведеними повітроводами і дуттьовими вентиляторами для подачі повітря в апарат охолодження. Над ним передбачаються вікна для подачі додаткової кількості атмосферного повітря, а також, у разі необхідності, монтується направляючий конус. У верхній частині башти є перекриття, в центрі якого розташований пристрій для диспергування розплаву.

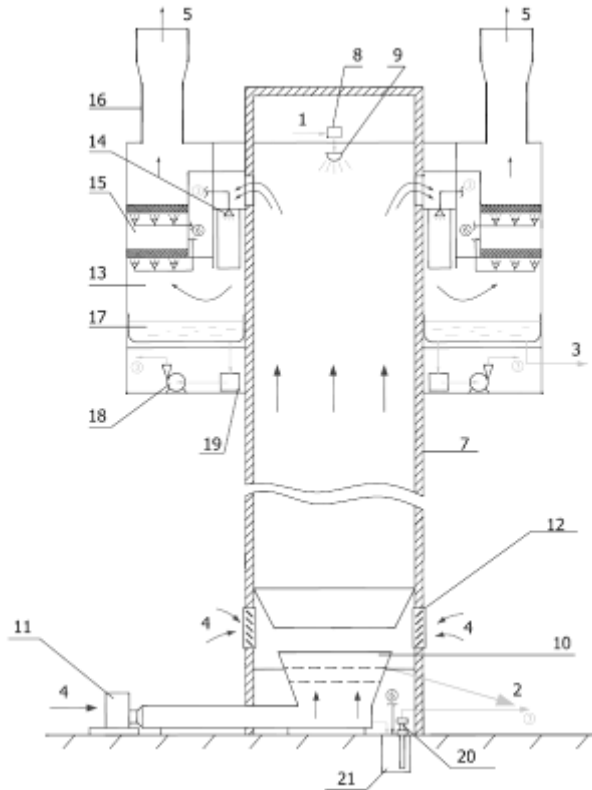


Рисунок 1.3 – Сучасна схема башти прильовання:

1 – розплав мінеральних добрив;
 2 – прильовані гранули добрив;
 3 – розчин мінеральних добрив;
 4 – атмосферне повітря;
 5 – очищене відпрацьоване повітря;
 6 – десорбована стічна вода після вузла очистки стічних вод або паровий конденсат;
 7 – стовбур башти прильовання;
 8 – фільтр розплаву мінеральних добрив;

9 – пристрій для диспергування; 10 – апарат охолодження прил в киплячому шарі; 11 – вентилятор дуттьовий; 12 – вікна для підсосу атмосферного повітря; 13 – очисний пристрій; 14 – перша зона очисного пристрою; 15 – друга зона очисного пристрою; 16 - труби витяжні; 17 – ванна очисного пристрою; 18 – насоси розчину мінеральних добрив; 19 – фільтри розчину мінеральних добрив; 20 – насос занурюваний; 21 – збірник

Нижче перекриття розташовуються вікна для входу відпрацьованого повітря в очисний пристрій. В якості очисного пристрою використовується система очищення інжекційного типу. Очищення повітря здійснюється у двох послідовно розташованих зонах. У першій зоні відпрацьоване повітря промивається розчином мінеральних добрив, що розпилюється форсунками,

кожна з яких поміщена в циліндричну обичайку для більш ефективного контакту фаз. Після першої зони очистки повітря проходить через два розташованих по ходу його руху шару сіткових бризкоуловлювачів - друга зона очищення, і за рахунок тяги викидається в атмосферу через витяжні труби. Стовбур башти приливання може бути виконаний із залізобетону або металокаркасній.

Робота установки гранулювання мінеральних добрив в киплячому шарі здійснюється за одною схемою та відрізняється одна від одної в основному тільки конструкцією гранулятора (рис. 1.4).

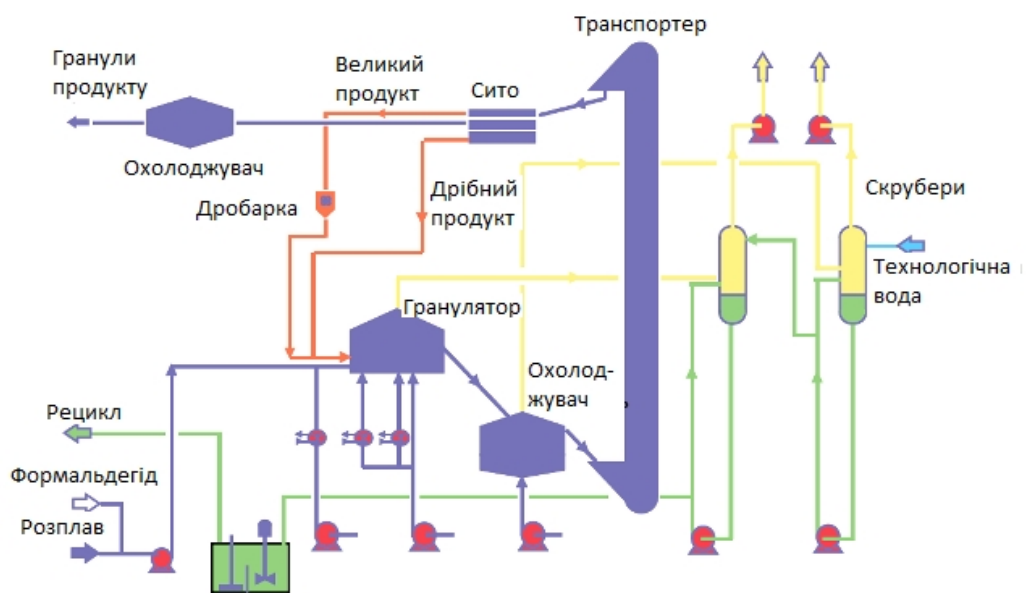


Рисунок 1.4 – Схема установки гранулювання мінеральних добрив в киплячому шарі

Розплав мінеральних добрив після вузла випарювання за допомогою насосів подається у вузол гранулювання в киплячому шарі. Даний вузол складається з одного апарату - гранулятора, що має дві зони: зону гранулювання і зону охолодження. У зону гранулювання подається ретур, що представляє собою некондиційний продукт після стадії класифікації. У даній зоні гранулятора відбувається наплення крапель розплаву мінеральних добрив на ретур через розбризкування останнього за допомогою форсунок. При русі гранул по зоні гранулювання відбувається поступове збільшення їх

розміру за рахунок багаторазового нашарування плівок до досягнення бажаного діаметра гранул. Потім гранульований продукт надходить із зони гранулювання в зону охолодження. У цій зоні відбувається охолодження гранул до проміжної температури за рахунок подачі вентиляторами охолоджуючого атмосферного повітря. Після охолоджувача гранули мінеральних добрив за допомогою ковшового елеватора направляються на стадію класифікації. На цій стадії відбувається розсівання частково охолодженого продукту по фракціях. Фракції діляться на дрібну, велику і з заданим розміром гранул. Гранули дрібної фракції після стадії класифікації направляються в якості ретуру в гранулятор, а гранули великої - попередньо розмелюють на валках і тільки потім направляють в гранулятор. Кінцевий продукт - гранули з заданим розміром транспортують на стадію остаточного охолодження. На даній стадії відбувається охолодження гранул холодоагентом з температурою 7–10 °С. Після охолодження продукту до температури 40–50 °С товарну фракцію відправляють на склад або відвантажують. Для очищення відпрацьованого повітря передбачені два скрубери. У першому відбувається очищення повітря після гранулятора, у другому - після попереднього і «хвостового» охолоджувача. Очищення повітря в скруберах здійснюється за рахунок промивки циркулюючим розчином мінеральних добрив. Спосіб прилювання і спосіб гранулювання, як і кожен з продуктів, отриманих даними способами, мають свої переваги і недоліки. Головний недолік грануляції – багатостадійність процесу отримання готового продукту (табл. 1.1) пояснюється утворенням великої кількості агломерованих частинок і гранул широкого спектра розмірів у грануляторі киплячого шару.

Для отримання монодисперсного складу товарного гранульованого мінерального добрива необхідно проводити його класифікацію з відсівом некондиційної фракції. Наслідком даної обставини є наявність в грануляційних установках великої кількості динамічного обладнання,

відсутнього в баштах прилювання, необхідного для класифікації гранул з подальшим помелом і поверненням ретуру в гранулятор (рис. 1.5) [3].

Таблиця 1.1

Основні стадії процесу грануляції [3]

Найменування стадій	Прилювання	Грануляція
Секція випарки	+	+
Розпилювання плаву	+	+
Охолодження	+	+
Очищення	+	+
Класифікація	-	+
Дробарки	-	+
Повернення ретуру	-	
Остаточне охолодження	-	

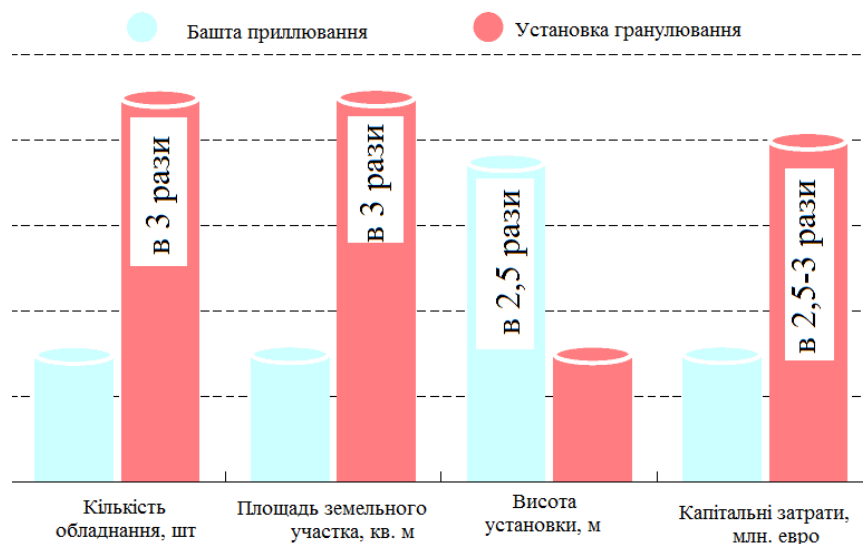


Рисунок 1.5 – Порівняльні характеристики установок

Наявність на стадії грануляції втричі більшої кількості обладнання, порівняно з баштою, і його габарити, визначає капітальні витрати на її будівництво, які в 2,53 рази більше, ніж капітальні витрати на будівництво однієї башти прилювання. Однією з переваг способу прилювання є можливість отримання товарної фракції добрив без використання подачі в установку пара, хладагента для охолодження продукту і формальдегідовмісної речовини (табл. 1.2).

Таблиця 1.2.

Техніко-економічні показники [3]

Подача ресурсів в установку	Башта прилювання	Установка грануляції
Пара на технологію, т/т	0	0,05–0,12
Пара на упарювання розчину з очисного облаштування установки, т/т	0,01–0,02	0,035–0,045
Формальдегід добавка, що міститься в розплаві, кг/т	0	5,0–8,0
Кількість ретура, % від продуктивності	0	Не менше 50
Електроенергія, кВт/т	15–18	30–60
Собівартість продукту	Більш низька	Більш висока

Під час гранулювання мінеральних добрив в киплячому шарі утворюється велика кількість пилу, а разом з летючими пари формальдегіду зумовлюють засмічення газоходів обладнання. В результаті з'являється необхідність частих зупинок на промивання грануляції, в середньому один раз на два місяці, що є істотним недоліком, тоді як у баштах прилювання налипання продукту практично відсутнє. Її промивка здійснюється один раз на рік під час зупинок на проведення планового капітального ремонту цеху.

Порівняння нормованих показників якості готового продукту (табл. 1.3) показує, що прильований продукт поступається гранульованому тільки по міцності гранул.

Сферичність форми гранул хоч і не є нормованим показником, але являється істотним чинником при «сухому» тукозмішуванні і рівномірності внесення добрива в ґрунт. Гранули не є сферами, в той час як прили мають гладку сферичну поверхню (рис. 1.6).

Процес здобуття товарного продукту протікає без утворення некондиції, а також твердих і рідких відходів. Внаслідок чого башта оснащується невеликою кількістю устаткування, простим і надійним в експлуатації і обслуговуванні, з тривалим експлуатуванням між промиваннями, що зумовлює низькі експлуатаційні витрати. Для виробництва прил не вимагається постійна паронеобхідність, хладагент і формальдегід, що

обумовлює меншу собівартість продукту. До переваг грануляції можна віднести можливість здобуття продукту із збільшеною міцністю.

Таблиця 1.3

Показники якості товарного продукту

Показник	Прилювання	Грануляція
Готовий продукт: вміст азоту, %;	46,2–46,4	не більше 46,2
вміст біурета, %;	0,8–1,0	0,8–1,0
вміст води, %;	0,35–0,5	0,35–0,5
основна фракція, %;	2,5–3,0	2,0–4,5
вміст основної фракції, % ваг.;	не менше 95	не менше 95
статична міцність прил (гранул), кгс/гранула;	1,0-1,3	3,0-3,5
температура продукту, °С;	для $d_{гр}=3,0$ мм, 40–50	для $d_{гр}=3,0$ мм, 40–50
Форма продукту	сферична	не сферична



Рисунок 1.6 – Форма гранул (ліворуч) і прил (праворуч)

1.2 Апаратурне оформлення процесу диспергування в грануляційних баштах

Вибір і розрахунок диспергуючого пристрою [4] є першим і основним етапом розрахунку процесу гранулювання розплавів і суспензій у баштах. Для диспергування розплавів використовують кілька видів пристроїв (грануляторів): обертові, статичні, вібраційні [5]. Використовуються також відцентрові механічні форсункові гранулятори (в тому числі і з накладенням вібрації на потік рідини) [6].

У статичних грануляторах витікання розплаву відбувається під дією гідростатичного напору: всі струмені витікають практично при одній швидкості, що забезпечує однакові умови дроблення їх на краплі [5]. Непорушність самих грануляторів також сприяє рівномірному дробленню 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 перетину [5]. Також його перевагами можна вважати – герметичність конструкції і можливість накладення на диспергуючий розплав вібрацій з розрахунковими параметрами. Статичні гранулятори найбільш прості у виготовленні, експлуатації і широко використовуються для диспергування чистих розплавів. До недоліків статичного гранулятора можна віднести порівняно невеликий розмір отворів витікання, що супроводжується швидким забиванням отворів витікання розплаву, а отже необхідністю встановлювати фільтри для розплаву [7].

Перший із зазначених недоліків є перешкода використання статичних грануляторів у разі диспергування суспензії - розплаву мінеральних добрив з твердим порошковим наповнювачами (крейда, доломіт, вапняк та ін.) При цьому відбувається засмічення отворів, випадання в осад частинок усередині гранулятора під дією сили тяжіння.

Статичні диспергуючі пристрої можуть мати конструкцію без накладення вібрацій і з накладенням вібрації на розплав, що витікає з пристрою. Статичний гранулятор лійчного типу без накладення вібрацій зображений на рис. 1.7 а. Розплав надходить в гранулятор по патрубку 1, де проходить через фільтруючий елемент - сітчастий фільтр 4. Розбризування розплаву відбувається за допомогою перфорованого днища 5. Усередині корпусу гранулятора 3 встановлений направляючий корпус 2, що сприяє кращому розподілу розплаву в об'ємі гранулятора. При розпаді струменів розплаву, що витікає з отворів статичного гранулятора, забезпечуються стабільні умови витікання (практичне постійність швидкості витікання струменів).

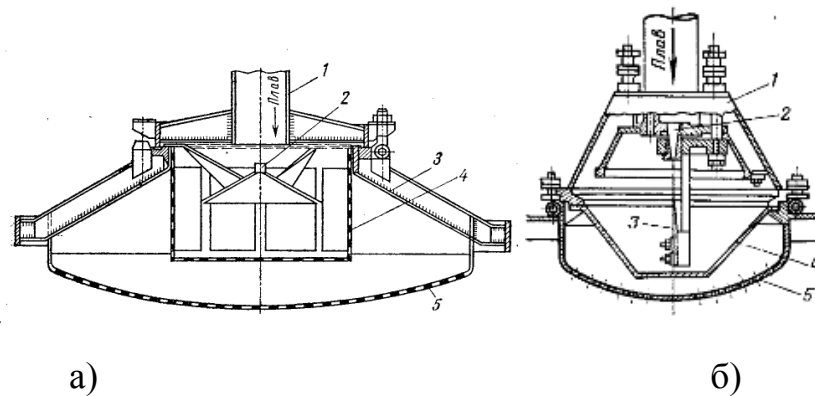


Рисунок 1.7 – Типи статичних грануляторів: а) лійчний: 1 – патрубок; 2 – направляючий конус; 3 – корпус гранулятора; 4 – сітчастий фільтр; б) акустичний: 1 – конус; 2 – сопло; 3 – пластина; 4 – сітчастий фільтр; перфороване днище.

У статичних віброгрануляторах вібрація створюється різними способами: з накладенням вібрації за рахунок впливу гідроакустичного генератора (рис. 7 а), в інших - пневмомеханічним вібратором або електромагнітним.

В корпусі 1 акустичного гранулятора встановлена пластина 3, яка при взаємодії зі сплавом, що проходить через сопло 2, генерує акустичні коливання. Джерелом енергії акустичних коливань служить сам розплав, що

гранулюється, тому для гранулятора не потрібно ніяких додаткових джерел живлення або інших пристроїв для створення коливань або управління ними. Далі розплав проходить через фільтруючий елемент 4 і витікає через отвори перфорованого днища 5. При витіканні з отворів розплав під дією резонансних коливань пластини 3 розпадається на краплі більш однорідного розміру, ніж при вільному його розповсюдженні. Робочий напір розплаву становить 0,5-0,8 м стовпа розплаву. Акустичні гранулятори дозволяють отримати збільшений однорідний гранулометричний склад продукту (70–80 % фракції 2–3 мм, дрібниці <1 мм – 1–2 %). Крива розподілення гранул за розмірами для цього гранулятора наведена на рис. 1.8 [7].

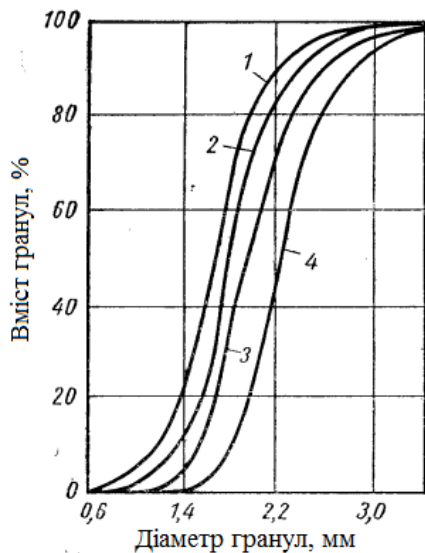


Рисунок 1.8 – Графіки розподілу гранул аміачної селітри по діаметру, отримані при роботі грануляторів (диспергаторів): 1 – звичайний обертовий, $d_{гр} = 1,65$ мм; 2 – секційний обертовий, $d_{гр} = 1,82$ мм; 3 – статичний лійочного типу $d_{гр} = 2,0$ мм; 4 – акустичний лійочного типу $d_{гр} = 2,3$ мм.

Обертові гранулятори забезпечують витікання розплаву під дією відцентрової сили, що створюється за рахунок обертання перфорованого корпусу гранулятора [7].

На рис. 1.9 показано декілька конструкцій обертових грануляторів, які використовуються у виробництві мінеральних добрив. Цей тип гранулятора має відносно великі отвори - у конічних обертових грануляторів діаметр отворів витікання змінюється по висоті корпусу. Можливість засмічення отворів цього типу грануляторів менша, ніж у статичних або віброгрануляторів. Перевагами обертових грануляторів також є широкий діапазон робочих витрат по розплаву при збереженні прийнятної гранулометричного складу.

Недоліками є - відносні складності в конструкції, експлуатації, додаткові витрати енергії і досить полідисперсний гранулометричний склад. Для цього типу грануляторів характерний великий радіус розльоту гранул, низька і нерівномірна щільність зрошення розплавом башт. Тому тільки необхідність диспергування розплаву робить цей тип грануляторів необхідним у виробничих умовах.

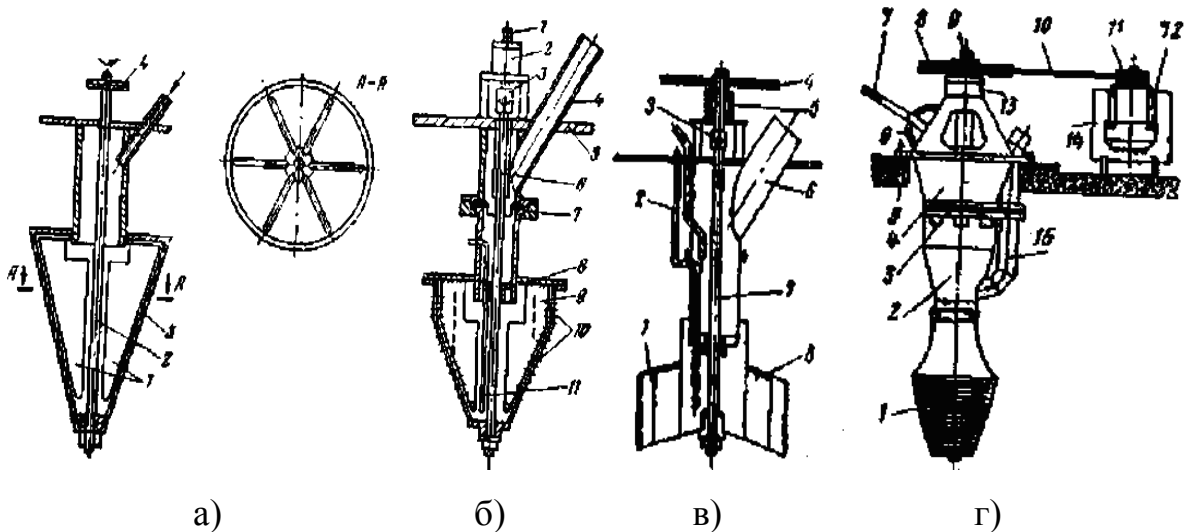


Рисунок 1.9 – Обертові гранулятори: а) секційний конічний з радіальними перегородками: 1 – секціонуючі перегородки; 2 – вал; 3 – перфорована оболонка; 4 – приводний шків; б) лопатевої з циліндрично-конічною оболонкою: 1 – вал приводу; 2 – підшипники; 3 – шарнірна муфта; 4 – патрубок для підведення розплаву; 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) лопастний з циліндричною оболонкою: 1 – перфорована оболонка; 2 – п'єзометричний датчик рівня розплаву; 3 – муфта; 4 – шків; 5 – вузол підшипників; 6 – введення розплаву; 7 – вал; 8 – лопаті; г) марки ГрЦСа – 40 з дво- і чотирьохсекційними перфорованими конічними оболонками і пристроєм для розподілу розплаву: 1 – перфорована оболонка; 2 – живляча камера; 3, 13 – підшипникові вузли; 4 – корпус; 5 – опорна плита; 6 - шкала; 7 – важіль для управління пристроєм розподілу розплаву; 8, 11 – шків; 9 - вал; 10 - клинопаскова передача; 12 - електродвигун; 14 – плита для установки двигуна; 15 – патрубок для введення розплаву.

Але для агрегатів прямокутного перерізу обертовий гранулятор не забезпечує рівномірного зрошення і факел його зрошення важко вписати в перетин грануляційної башти. У цьому випадку можуть використовуватися механічні форсунчасті гранулятори. По відношенню до всіх перерахованих грануляторів вони мають найбільш полідисперсний гранулометричний склад, але за рахунок більшого діаметра отвору диспергування вирішується проблема його засмічення твердими частинками, що містяться в розплавах мінеральних добрив. У грануляційній башти прямокутного перетину можна встановити ряд форсунок, які забезпечують відносно рівномірне зрошення апарату. Щільність зрошення і його рівномірність у факелі для правильно спроектованої форсунки при відповідному розміщенні ряду форсунок по грануляційному майданчику – великі.

Для поліпшення рівномірного гранулометричного складу гранульованого продукту застосовують вібраційні гранулятори [8]. Це викликано накладенням на струмень рідини коливань, які резонують з частотою розпаду струменя. Вібраційні гранулятори можуть бути як статичні так і обертові.

Коли неприпустимою є наявність в гранулозмісті значної кількості гранул, що зіткнулися, застосовують обертові гранулятори. Це забезпечує рух гранул по різних траєкторіях, що дозволяє знизити число зіткнень в 5-8 разів у порівнянні з роботою нерухомих грануляторів (статичних). Це особливо важливо при грануляції плаву карбаміду, так як краплі подвоєної маси не встигають кристалізуватися в баштах заввишки 30 м.

В якості збудника коливань застосовувалися серени або кульковий вібратор. У сучасних конструкціях в якості збудника коливань застосовують електромагнітні вібратори. У таблиці 1.4 зведені найбільш характерні дані різних конструкцій грануляторів у виробництвах аміачної селітри [4,5].

Основним показником якості роботи гранулятора є гранулометричний склад продукту. Згідно ГОСТ 2-85, зміст гранул фракції 1–3 мм не повинен бути менше 92 %, а зміст фракції <1 мм не більше 5 %. Для зниження

злежування добрив бажано збільшувати вміст гранул 3–2 мм. З таблиці 1.4 видно, що істотно кращий гранулометричний склад при використанні віброгранулятора. Застосування віброгрануляторів - найбільш раціональний шлях для отримання монодисперсних гранул у великих промислових масштабах.

Таблиця 1.4

Дані експлуатації промислових грануляторів різних типів (виробництво аміачної селітри)

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 форсунчастий гранулятор	-	-	12	80-96	59-63	40-49	2,2-6,1

Перфоровані обертові оболонки для диспергування розплавів в промисловості

Перфоровані оболонки є основними елементами конструкцій обертових вібраційних грануляторів розплаву. Перфоровані оболонки, що застосовуються для диспергування розплавів, мають різну форму рис. 1.10. Зазвичай вони мають осьову симетрію [9,10].

При конструюванні грануляторів для прилювання розплавів в баштах, виникає проблема формування тонких струменів рідини з заданими параметрами витікання.

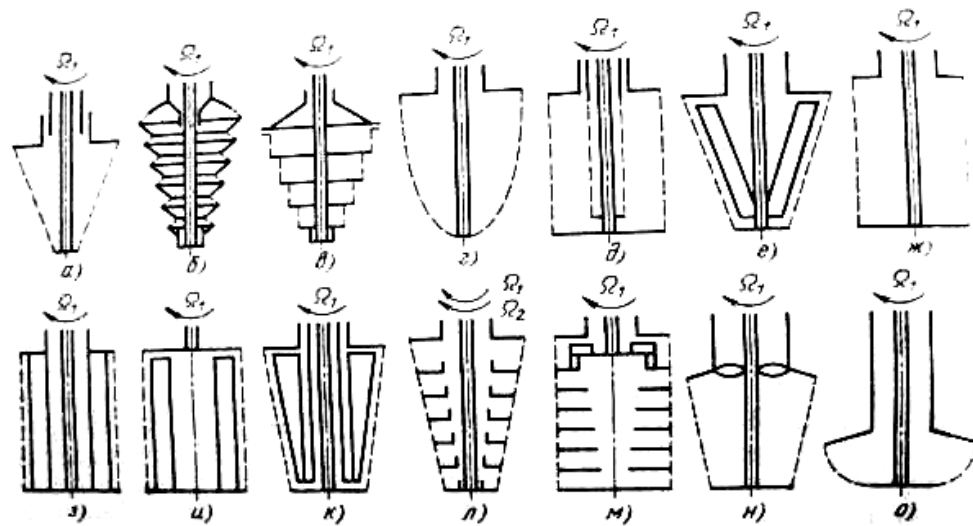


Рисунок 1.10 – Форма перфорованих обертових оболонок: а) порожниста конічна; б) порожниста із зворотними конусами; в) ступінчаста порожниста; г) порожниста параболоїдної форми; д) циліндрична з внутрішнім перфорованим циліндричним розподілом; е) конічна з радіальними лопатями; ж) порожниста циліндрична; з), и) циліндричні з радіальними лопатями; к) конічна незалежно з обертовими лопатями; л) конічна з горизонтальними перегородками; м) циліндрична з горизонтальними перегородками; н) конічна з лопатями гвинтового профілю; о) чашовидна

Витікання розплаву з оболонки в основному відбувається під дією гідрастичного напору рідини, а це означає що для різних рядів отворів оболонки швидкість витікання плаву буде мати різні значення, а отже, різними будуть і розміри утворюваних крапель [11],

$$d_k = \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot d_{\text{отв}} \cdot \varepsilon \cdot v}{f}}, \quad (1.1)$$

де v - швидкість витікання розплаву з отвору.

$$v = \varphi \sqrt{2g \cdot h}, \quad (1.1 \text{ а})$$

де φ - коефіцієнт швидкості; h - висота розплаву від поверхні заповнення гранулятора до отвору.

Тому переважно застосовують на виробництві чашоподібні оболонки, так як дана геометрія днища дає можливість вирівняти швидкість витікання струменя і як наслідок отримувати більшу кількість монодисперсного продукту порівняно з іншими видами оболонок.

Для отримання більш рівномірних гранул, підвищення продуктивності і поліпшення розподілу навантаження було запропоновано в нижню частину гранулятора (в перфороване чашоподібне днище), перед отворами з яких витікає розплав, поставити лопатевий пристрій [10, 11]. Лопаті приводять розплав в обертання, завдяки чому відцентровий напір зростає і швидкість витікання струменя, особливо у верхній частині гранулятора, збільшується.

Основним призначенням оболонки є диспергування розплаву на краплі.

Для того щоб керувати процесом диспергування розплаву за допомогою оболонок і приймати правильні конструктивні та технологічні рішення, необхідно мати чітке уявлення про фізичну картину руху рідини в оболонці.

В розробці теоретичних основ роботи порожнистих перфорованих обертових оболонок присвячено чимало праць вчених і дослідників [10, 12–14].

Однак до останнього часу, дана теорія недопрацьована. Так, при розрахунку пропускної здатності (продуктивності) таких оболонок пропонувалося використовувати емпіричні залежності, отримані для умов відносного спокою рідини в оболонці [12]. На практиці в багатьох випадках використовуються порожнисті перфоровані обертові оболонки, в яких рідина рухається зі швидкістю, меншою швидкості обертання оболонки [13]. Тому вищезазначені залежності не відображають в цілому фізичну сутність внутрішньої гідродинаміки даних оболонок і можуть застосовуватися лише у випадках, обмежених рамками експериментів. Значний внесок у розвиток теорії порожнистих перфорованих обертових оболонок зробив своїми працями Б.Г.Холін [10]. Ним досліджені закономірності внутрішньої гідродинаміки цих оболонок. Автори [14] доповнили теорію опису

внутрішньої гідродинаміки порожнистої перфорованої обертової оболонки, підтвердивши свої пропозиції теоретичними та експериментальними дослідженнями. Однак, викладені гіпотези авторів [10, 14] можуть застосовуватися тільки при великих значеннях Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{m \cdot R_1}{\mu}, \quad (1.3)$$

де m – масова витрата рідини, віднесена до одиниці площі внутрішньої поверхні перфорованої оболонки радіусом R_1 ; μ - динамічний коефіцієнт в'язкості.

Необхідно знати характер вісесиметричного обертового руху та розподіл тисків у розплаві, що заповнює об'єм перфорованої оболонки, що обертається, це дасть можливість визначати характер розподілу швидкості руху розплаву в порожнини оболонки і перед отворами витікання.

1.3 Вплив гідродинамічних та механічних чинників на формування крапель

З точки зору сучасної гідродинаміки, єдиного механізму розпаду струменів рідини не існує і в залежності від цілого ряду параметрів, можуть існувати різні механізми розпаду рідинного об'єму на окремі частки. Як приклади на рис. 1.11 [15–18] представлені варіанти розпаду рідких струменів за рахунок капілярної нестійкості при різних режимах: вимушений капілярний розпад струменя (рис. 1.11 а); нестійкість Кельвіна Гельмгольца - нестійкості поверхні рідкого об'єму за рахунок розриву профілю швидкості течії рідини і навколишнього середовища (рис. 1.11 б).

Бачемо, що характер розпаду рідких струменів і утворення в цих типах нестійкості носить абсолютно різний характер: в першому випадку переважаючим механізмом є вплив капілярних сил, у другому - градієнт швидкості течії рідини струменя. Останній механізм зустрічається при

високих швидкостях течії струменів, якщо є розрив швидкості струменя і навколишнього середовища.

Розпад рідких струменів під дією капілярних сил відбувається наступним чином. Стійкість системи залежить від того, зростає або зменшується потенційна енергія системи. Так для циліндричних рідинних мас (струміль) потенційна енергія не є мінімальною, така геометрична конфігурація повинна розпадатися на сферичні об'єми, які мають меншу потенційну енергію, для їх розпаду непотрібно вельми сильного зовнішнього впливу.

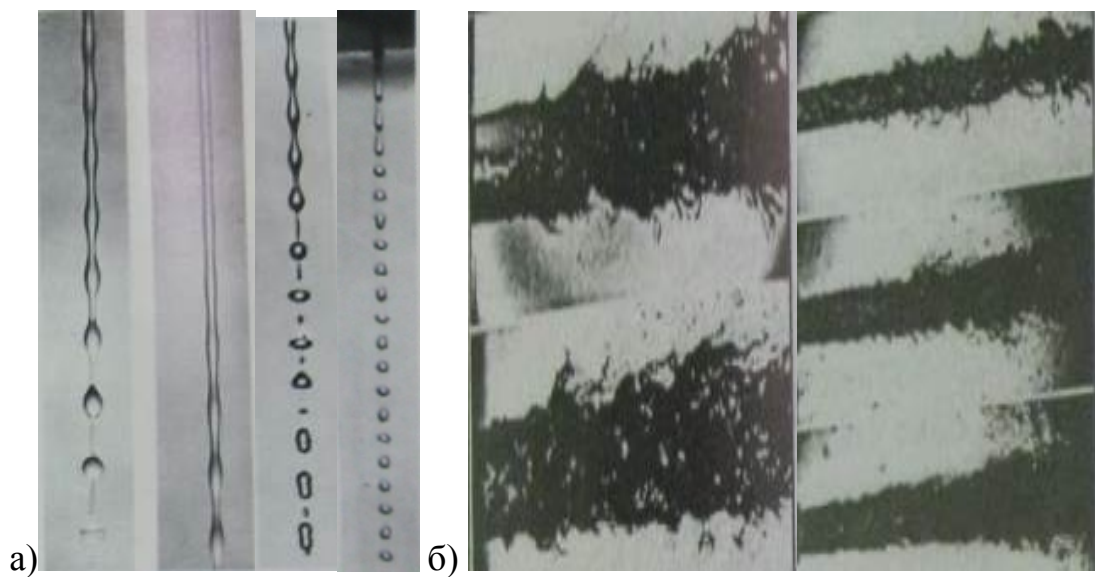


Рисунок 1.11 – Розпад рідких струменів: а) капілярний розпад струменів; б) розпад струменів за рахунок нестійкості Кельвіна Гельмгольца

Релей [19] пояснив це явище нестійкістю рідкого циліндричного тіла, головним джерелом розвитку якої служать сили поверхневого натягу (потенційна енергія рідинного циліндра і крапель визначається поверхневою енергією (капілярними силами), яка утворюється при наявності межі розділу фаз. Їх дія призводить до прогресивного наростання капілярних хвиль, внаслідок чого відбувається локальне зменшення діаметра струменя щодо свого первісного діаметра, що супроводжується відповідним витісненням рідини і утворенням сусідніх розширень струменя. В результаті формується регулярне чергування стискання і розширення. Ділянки що зменшують свій

діаметр, поступово витягаючи в довжину, розриваються з утворенням крапель.

Існує інша теорія нестійкості струменя. На думку авторів [20], пружні коливання поверхні струменів можуть мати місце, але вони будуть завжди мати затухаючий характер вздовж струменя. Тому розпад струменя може відбутися тільки в місці виникнення такого коливання. Послідовність же чергування звужень і розширень по довжині струменя обумовлюється не пружними коливаннями, а силами Лапласа, що мають постійний напрямок. Рідина з місця звуження може і обов'язково буде перетікати в місця розширення, і цей процес незворотній, оскільки сили Лапласа діють в цьому ж напрямку. Таким чином, звуження, що почалося в даному перетині, буде тільки звужуватися, а розширення буде тільки розширюватися. Кожне звуження обов'язково викличе поруч з собою утворення розширення видавлюванням туди рідини, а кожне розширення викличе поруч із собою звуження за рахунок симетричного розподілу сил по поверхні кулі. Так утворюється послідовний ланцюг звужень і розширень по довжині струменя.

1.3.1 Режими швидкості витікання рідини з отвору

При витіканні струменів з круглих отворів розрізняють три характерних режими розпаду: вісесиметричний розпад, згинальний розпад і розпил рис. 1.12 [21–23]. Режими розпаду визначаються критеріями Рейнольдса і Онезорга [24]. Критерієм режиму розпаду може також служити критерій Вебера. В залежності від значення критерія Вебера може спостерігатися вісесиметричний розпад (рис. 1.13 а), або згинальний розпад (рис. 1.13 б).

Струмінь на виході з отвору може бути ламінарним або турбулентним - залежно від режиму течії в диспергаторі до моменту її утворення. Режим течії струменя також залежить від аеродинамічного впливу на нього навколишнього середовища. У разі, коли аеродинамічним опором можна

знехтувати, згідно теореми Гельмгольца [24] в струмені не виникають і не зникають вихори і при вісесиметричному розпаді режим течії струменя залишається незмінним.

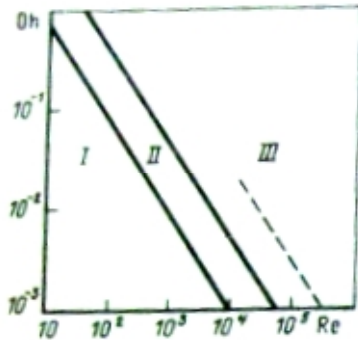


Рисунок 1.12 – Режимы капілярного розпаду рідких струменів що витікають з круглих отворів: I-область вісесиметричного розпаду; II-область згинального розпаду; III-область розпилу; Oh - критерій Онезорг; Re -критерій Рейнольдса

Якщо аеродинамічний опір середовища великий, може виникати згинальний розпад. Вплив середньої швидкості витікання на режим течії струменя носить складний характер.

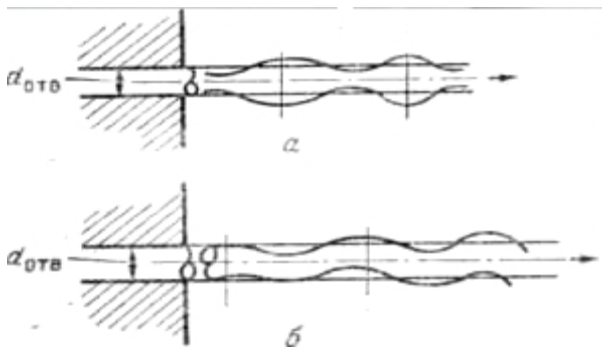


Рисунок 1.13. – Види профілів струменів перед їх розпадом: частини струменя що нерозпалась від а) вісесиметричний профіль струменя; б) згинальний профіль струменя

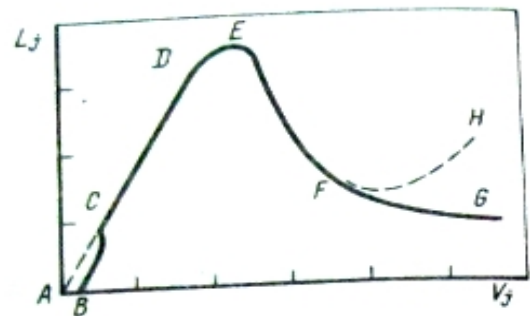


Рисунок 1.14. – Залежність довжини частини струменя, що не розпалась L_j від середньої швидкості витікання струменя з отвору U_j . Лінійна ділянка CD відповідає вісесиметричному розпаду ламінарного струменя. На цій ділянці $L_j \approx U_j$. У більшості практичних випадків використовують швидкість витікання струменя U_j відповідний ділянці CD. На ділянці ABC

На рис. 1.14 показана залежність довжини частини струменя, що не розпалась L_j від середньої швидкості витікання струменя з отвору U_j . Лінійна ділянка CD відповідає вісесиметричному розпаду ламінарного струменя. На цій ділянці $L_j \approx U_j$. У більшості практичних випадків використовують швидкість витікання струменя U_j відповідний ділянці CD. На ділянці ABC

режим витікання є перехідним від витікання струменя до крапельного, швидкісний напір можна порівняти з капілярним тиском.

Крім того, при малих швидкостях витікання, відповідних цій ділянці, не існує стаціонарного рішення задачі про струмені. При підвищенні швидкості витікання характер поведінки залежності $L_j(U_j)$ різко змінюється (ділянка DEF), як і на ділянці ABC, стає нелінійним. Пояснення зменшення довжини частини струменя що не розпалася L_j із зростанням U_j запропоновано декілька гіпотез [23, 25, 26]. Проте всі підходи призводять лише до якісної оцінки, і до теперішнього часу не існує теорії, яка дає кількісне проорокування поведінки L_j залежно від U_j , особливо в областях ABC і DEF.

Перехід до турбулентного режиму ділянки FG (H) відповідає $Re=2000$, однак у залежності від конструкції отвору (насадка) може змінюватись в широких межах від 240 до 10000 [21]. Турбулентність істотно впливає на довжину частини струменю що не розпався, причому різною мірою при різних режимах розпаду. Для турбулентних струменів спостерігається явище гістерезису [27] пов'язане з відривом рідини від стінок насадки і проявляється в зміні характеру залежності $L_j(U_j)$. При подальшому зростанні швидкості U_j відбувається розпилення струменя, викликане зростанням короткохвильових збурень, підсилюються тиском навколишнього газового середовища, що призводить до розбиття поверхні струменя на безліч полідисперсних дрібних крапель. Швидкість витікання рідини з отвору також впливає і на діаметр струменя. Це підтверджено численними теоретичними та експериментальними дослідженнями. Так при $Re < 15$ відбувається перебудова профілю швидкості від пуазейлівського до практично однорідного, а діаметр струменю збільшується з віддаленням від насадка аж до насичення; подібна поведінка профілю швидкості і діаметру струменя в принципі узгоджується з наявними експериментальними даними [21].

При $Re \approx 15$ кінцевий діаметр струменя дорівнює діаметру отвору насадки; разом з тим при цих значеннях чисел Re все ж і в розрахунку, і в

експерименті спостерігається спочатку зменшення діаметра струменя. При $Re > 15$ струмінь зменшує діаметр відразу після витікання з насадки; згідно [15]: R_{min} (кінцевий радіус струменя)/ R_N (радіус отвору) $\approx 0,91$ при $Re \approx 50$, починаючи з $z/R_N > 3$. Експерименти [21] підтверджують таку залежність для радіуса струменя при великих Re . З ростом $Re \gg 1$ (але в режимі ламінарного витікання) стиснення струменя R_{min}/R_N , згідно з результатами чисельного рахунку, прагне до $R_{min}/R_N \approx 0,86$. Дослідні дані для $Re \approx 10^3$ дають $R_{min}/R_N \approx 0,83$, а для $Re \approx 10^4$ $R_{min}/R_N \approx 0,7$.

1.3.2 Вплив геометрії отвору на характер витікання рідини

Характер витікання рідини з отвору та формування початкового розподілу швидкості залежать від параметрів отвору (рис. 1.15): відношення довжини отвору витікання до діаметру $L_N/d_{отв.}$, кута входу в отвір α , кута виходу з отвору β , згладженості внутрішньої поверхні, форма отвору, матеріал насадки (впливає на змочуваність).

Кут входу в отвір може змінюватися від 0 до 180° . Однак при $\alpha \approx 0$ і $\alpha \approx 180^\circ$ полегшено виникнення турбулентності, тому в практичних конструкціях отвори зазвичай $\alpha < 180^\circ$. В [29] було показано, що для струменів $D_j = 1-10$ мм в інтервалі $15^\circ < \alpha < 90^\circ$ значення α не сильно впливає на умови витікання. При цьому важливим є досягнення балансу між малим α , яке призводить до зростання поверхневого опору потоку та освіти дрібномасштабної турбулентності, і великим α , яке сприяє утворенню зони турбулентних вихорів. З урахуванням цього рекомендується оптимальне значення $\alpha = 100^\circ$ для низькошвидкісних і $\alpha = 30^\circ$ для високошвидкісних потоків рідини.

На рис. 1.16 зображено вплив форми вхідного перетину отвору і відносини $L_N/d_{отв.}$ на характер витікання струменя. Видно, що в першу чергу перехід до турбулентної течії відбувається при прямокутній вхідній

кромці ($\alpha=180^\circ$), потім при конічному входному перерізі і в останню чергу - для отворів в з закругленими кромками (кромки вважаються закругленими, якщо $2r/d_{отв.} > 0,3$).

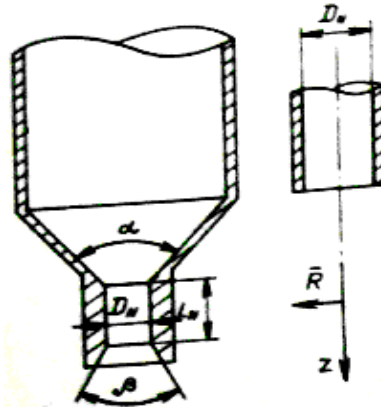


Рисунок 1.15 – Геометричні параметри отвору: $L_N/d_{отв.}$ відношення довжини отвору витікання L_N до діаметру $d_{отв.}$; α - кут входу в отвір витікання; β - кут входу з отвору витікання

Експерименти, виконані в [23], показали також, що для конічного входного перерізу перехід до турбулентної течії настає тим раніше, чим більше відношення $L_N/d_{отв.}$ (див. рис. 1.16 б). Ці висновки збігаються з експериментальними та спостереженнями інших авторів [29], при $L_N/d_{отв.} > 50$ вплив довжини отвору витікання на зміну режиму можна знехтувати.

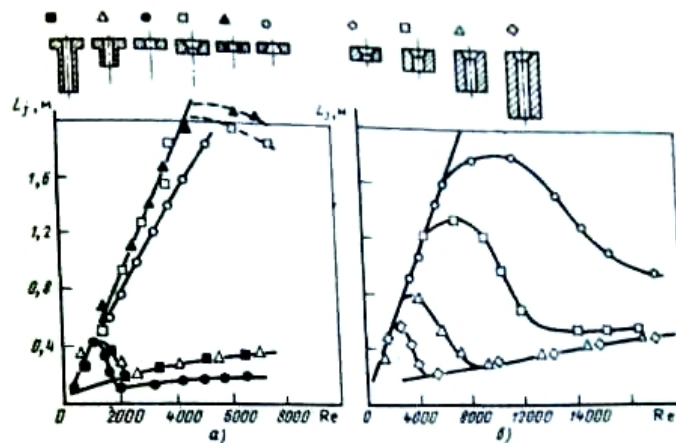


Рисунок 1.16 – Вплив форми звуження входного отвору і $L_N/d_{отв.}$ на довжину не розпалася частини струменя

Для прямокутної вхідної кромки перехід від ламінарної до турбулентної течії відбувається при відносно малих Re . Як видно з рис. 1.16 а, величина цього переходу практично не залежить від довжини отвору. За умови, коли інерційні сили перевершують в'язкі, вплив довжини отвору стає більш помітним. При витіканні з отворів з гострими краями ($L_N/d_{отв.} \approx 0$) відсутність стінок і незначні аеродинамічні навантаження на струмись, перешкоджають розвитку турбулентності.

У [27, 28] вказано, що в цьому випадку досягається найбільша довжина не збуреної частини струменя що не розпалася і, отже, отвори з малим $L_N / d_{отв.}$ найбільш перспективні для генераторів ВРС, в яких потрібно отримати потік частинок з великою початковою швидкістю.

Як зазначено в [30], геометрія вихідній частини насадка набагато менше впливає на режим витікання рідини. Відомо, що повний переріз потоку зберігається тільки при відносно малих кутах розкриття кута ($\beta < 30^\circ$). В експериментах [23] для ламінарних потоків вплив вихідної частини насадка нехтують, коли відсутнє змочування внутрішніх стінок вихідного ділянки отвору витікання. Для турбулентних умов витікання вплив геометрії вихідної частини залежить від величини і від ступеня турбулентності.

Вплив обробки отворів витікання

Обробка отворів витікання істотно впливає на рівномірність одержуваних крапель [23]. Процес дроблення на краплі струменів рідини ефективно протікає тільки в тому випадку, якщо вдається при витіканні без вібрацій отримати ламінарний струмись. Гарним критерієм ламінарності служить довжина гладкої ділянки струменя до прояву інтенсивних збурень її поверхні. Ця довжина близька до довжини суцільної частини струменя. Режим струменя що витікає з отвору вважається ламінарним, якщо довжина суцільної частини струменя більше 40-50 діаметрів отвору витікання. Якщо

на такий струмінь накласти регулярні збурення, частота яких лежить в межах, безсателітного режиму розпаду, струмінь розпадається на строго рівномірні краплі. При цьому довжина суцільної частини струменя може скоротитися до 3–10 діаметрів струменя. При витіканні струменів рідини з отворів що не зенкують, хоча і добре оброблених, на поверхню струменя накладаються збурення. При накладенні додаткових регулярних збурень від зовнішнього джерела важко отримати такі ж рівномірні краплі, як у випадку впливу збурень на ламінарні струменя.

При витіканні рідини з погано оброблених отворів з задирками і при турбулізації рідини перед отвором витікання в тонкостінній оболонці на поверхні струменя утворюються нерегулярні збурення з різною довжиною хвилі. У цьому випадку накладення регулярних додаткових збурень від зовнішнього джерела буває малоефективним.

Вплив чистоти обробки поверхні на розподіл швидкості на виході з насадка оцінюється за коефіцієнтом $tg\eta' = dr/dz$ (де r – середній радіус струменя, z -координата вздовж струменя). Цей вплив суттєвий, полірування внутрішніх поверхонь отвору призводить до поліпшення розподілу швидкості на виході з насадки і зниження $tg\eta$ на 25%.

Питання про вплив чистоти обробки внутрішніх поверхонь насадка на розподіл швидкості рідини на його виході до теперішнього часу вивчений мало.

1.4 Вплив параметрів сигналу на розпад струменя

Теорія ВРС, побудована на лінійних рівняннях, які не описують повною мірою явище вимушеного капілярного розпаду, в тому числі такі важливі для практичного застосування ефекти, як утворення сателітів, дисперсію розмірів і швидкостей утворених крапель. Експерименти

показують, що до моменту розпаду в струмені вже містяться гармонійні складові основної частоти, які суттєво впливають на розпад.

Експерименти [31] показали, що внесок в капілярні поверхневі хвилі вищих гармонік, викликаних нелінійними ефектами розпаду струменя, істотно менше амплітуди основної частоти, за винятком області розпаду. Цим пояснюється непогана відповідність з теорією Релея довжини струменя що не розпався при ВКРС. Однак в області розпаду амплітуда гармонік значно зростає і стає порівнянної з амплітудою основної частоти збудження.

Систематичне дослідження динаміки зміни амплітуди гармонік збуреного сигналу при ВКРС проведено в [32]. Результати, отримані при ВКРС води для наростання гармонік вздовж струменя, показують, що при малих амплітудах збурення інкременти наростання сигналів основної частоти і першої гармоніки мають експонентний характер аж до місця розпаду струменя на краплі. При великих амплітудах збурення поведінка струменя істотно нелінійна, що проявляється в розширенні спектру збурень і порушенні експоненціального зростання сигналів, причому при зростанні амплітуди точка перегину наближається до місця витікання струменя ($z = 0$).

На рис. 1.18 а [29] в напівлогарифмічному масштабі дана залежність відношення a/R_j від z для слабкого початкового обурення струменя води a_0 при гармонійному збуренні і оптимальному значенні безрозмірного хвильового числа $\chi = 0,69$. При цьому утворення сателітів не спостерігалось. Характерною особливістю є швидке (з інкрементом в 3–5 разів більше, ніж для частоти збурення) наростання амплітуд вищих гармонік, яке проявляється поблизу області розпаду струменя на краплі.

При збуренні струменю в аналогічних умовах ($\chi = 0,69$, збурення одномодове, відсутність сателітів) сигналом великої амплітуди (рис. 1.17 б) характер еволюції спектру коливань істотно змінюється.

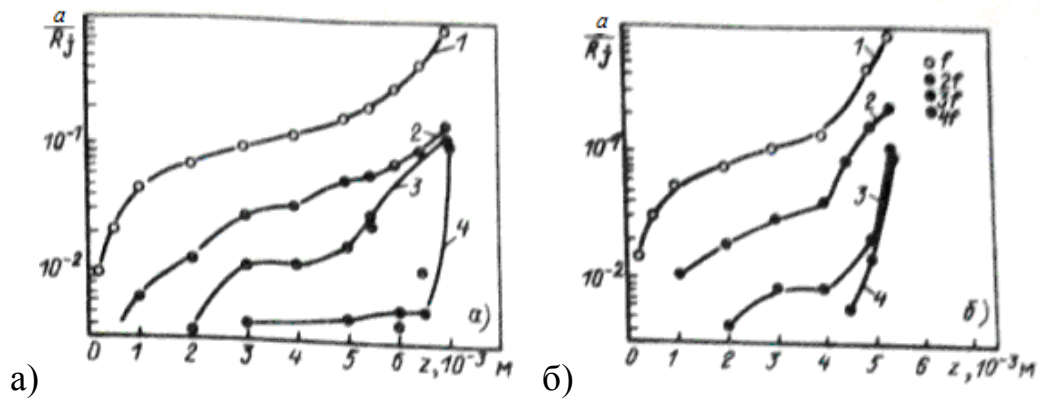


Рисунок 1.17 – Залежність відносної амплітуди збурень поверхні струменя a/R_j від координати вздовж струменя z при $\chi=0,69$ для перших чотирьох гармонік (1-4); а) слабкий збурений сигнал; б) сильне збурення

На отриманих кривих чітко видно три характерні області: перша - від виходу з насадки до $z_1=(3\div 5) d_{отв.}$ - пов'язана з перетворенням коливань тиску і швидкості рідини в генераторі в коливання поверхні струменя; другий: $z_1 < z < z_2$ - з лінійною стадією розпаду ($\gamma^* = \text{const}$), третья: $z > z_3$ - з нелінійної стадією розпаду, що характеризується різким зростанням інкременту γ^* . Важливою особливістю отриманих результатів є відмінне значення інкремента в лінійній області від значення, передбаченого теорією Релея, що, втім, узгоджується з експериментальними результатами [31].

Це означає, що при великій амплітуді початкового порушення ВРС ні на якій із стадій не може бути описаний теорією Релея. При ВРС, відповідним χ лежачим далеко від оптимальних значень в спектрі коливань струменя спостерігалася значна домішка гармонійних складових, амплітуда яких поблизу області розпаду найчастіше перевершувала амплітуду сигналу на частоті збудження. Так, на рис. 1.18 зображені залежності a/R_j від z при одномодовому збуренні $\chi=0,35$. При цьому спостерігалася утворення сателітів.

Інший експериментальний підхід до вивчення нелінійних ефектів ВРС полягає в знаходженні умов утворення і характеристик крапель - сателітів,

супроводжуючих генерацію основних крапель [32, 33]. Область утворення сателітів $\chi^* < \chi < 1$. Значення χ^* , за результатами різних експериментів коливаються в межах 0,48–0,6. Поява сателітів може бути наслідком шуму в системі, або бути результатом взаємодії гармонійних складових сигналу збудження. До проявів інших нелінійних явищ ВКРС відносяться чутливість області утворення сателітів до амплітуди початкових збурень, зсув мінімуму залежності $L_j(\chi)$ в область більших значень при збільшенні χ амплітуди збурення, а також зміна характеру росту амплітуди початкових збурень від експоненціального до лінійного. Нелінійна еволюція гармонік описана в теоретичних [34–36] та експериментальних [37–40] дослідженнях. Вважається, що основну роль відіграють перші три гармоніки (основна і дві кратні їй). Решта не встигають помітно зрости до точки розпаду струменя, хоча впливають на фазовий зсув і точку відриву крапель від струменя (отже, на довжину частини струменя, що не розпалася). Одним із найважливіших явищ при капілярному розпаді струменів є процес утворення, поряд з основними краплями, сателітів (супутників). Процес формування сателітів пов'язаний з нелінійною поведінкою гармонік на струмені та особливостями в точці розпаду струменя.

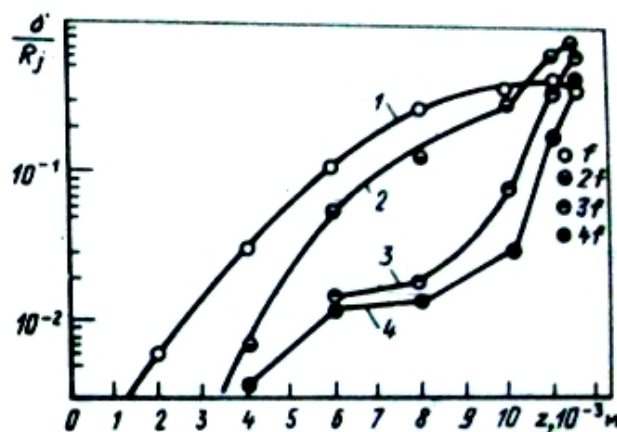


Рисунок 1.18 – Залежність відносної амплітуди збурень поверхні струменя a/R_j від координати вздовж струменя при $\chi=0,35$ для перших чотирьох гармонік (1-4) при сильному збуренні; слабкий розчин гліцерину у воді,

$$d_{омв} = 200 \text{ мкм}, \quad L_N / d_{омв} = 1.$$

Загальний обсяг основної краплі і сателіта дорівнює їх сумарному обсягу і дорівнює обсягу рідини, що протікає за період через отвір. Із закону збереження маси випливає просте співвідношення для відношення радіусів основної краплі і сателітів:

$$\left(\frac{r_k}{R_j}\right)^3 + \left(\frac{r_c}{R_j}\right)^3 = \frac{3\pi}{2\chi}. \quad (1.3)$$

Флуктуація розмірів основних крапель також може бути пов'язана з сателітами, які або здоганяють краплі (наздоганяльні сателіти), чи основні краплі наздоганяють сателіти (відстаючі сателіти). У зв'язку з цим, немає ясності утворення сателітів з точки зору розподілу їх розмірів залежно від широкого набору параметрів, керуючих капілярним розпадом струменів. Приймалися численні спроби розрахунку параметрів сателітів як на основі нелінійної теорії капілярного розпаду [39–45] так і на підставі законів збереження.

Найбільш вдалий підхід, розвинений Ашгрізом та Машайеком [46] на основі рівнянь Нав'є-Стокса для в'язкої рідини, які дають гарне узгодження з дослідними даними. При $\chi \leq 0.2$ основні краплі і сателіти мають приблизно однакові розміри. Пояснення цієї обставини полягає в тому, що при малих хвильових числах найбільше зростання все одно має основна гармоніка з $\chi = 0.7$, яка спонтанно виростає з шуму і швидко випереджає за швидкістю зростання всі інші гармоніки, тому спостерігається режим квазімонодисперсного розпаду (де краплі і сателіти вже невиразні), хоча область збурення струменя знаходиться далеко від області стабільної монодисперсності.

На рис. 1.19 [47-51] представлені різні типи сателітів залежно від безрозмірної довжини хвилі збурення струменів і амплітуди збурення.

У таблиці 1.5, взятої з [52] наведені основні області з якісними відмінностями формування крапельних структур.

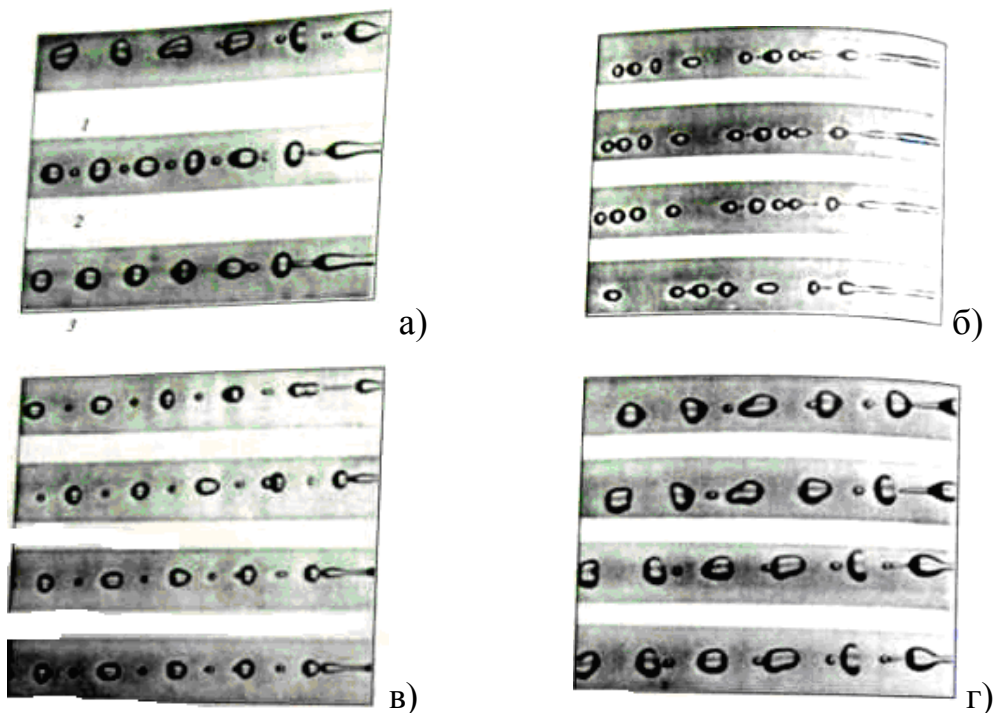


Рисунок 1.19. – Ефекти генерації сателітів при різних режимах капілярного розпаду: а) капілярний розпад струменів при середніх хвильових числах: 1 – злиття назад; 2 – стійкі сателіти; 3 – злиття вперед; б) капілярний розпад струменів зі злиттям чотирьох крапель при великих хвильових числах; в) капілярний розпад струменів з регулярним утворенням основної краплі і сателіта при великих хвильових числах; г) капілярний розпад струменів з відбиттям сателіта від основної краплі

Таблиця 1.5

Характеристика режимів розпаду струменя

Режим	Характер розпаду	λ / D_j	χ
I	Стохастичний (самовільний)	$3,0 <$	$> 1,0$
II	Короткохвильовий	$3,0 - 5,5$	$0,57 - 1,0$
III	Середньохвильовий	$5,5 - 11,0$	$0,285 - 0,5$
IV	Довгохвильовий	> 11	$< 0,285$

Режим I відповідає одномодовому збуренню при $\chi > 1$ що згідно релеевської теорії відповідає стійкому стану моди. У режимі I спостерігатися

спонтанний (стохастичний) розпад, при якому довжина струменя що не розпалася, час розпаду і розміри крапель випадкові і пов'язані з внутрішнім шумом генератора крапель або зовнішнім шумом (наприклад, у навколишньому середовищі). Система в режимі I діє як підсилювач випадкових збурень, а отже, спектр формування крапель повинен корелюватися зі спектром шуму. Режим (спонтанного розпаду) в даний час вивчений недостатньо, оскільки відсутні, наприклад, результати з імовірнісного аналізу зв'язку спектра шуму і розміру крапель.

Режим II відповідає короткохвильовим збуренням з $0,57 < \chi < 1,0$. У цій сфері існує три підрежими в поведінці крапельної структури. У першому під режимі (IIa) формується когерентний крапельний ланцюжок без сателітів (монодисперсний розпад), причому сателіти не утворюються починаючи з першої краплі (це зауваження необхідно, тому що існують режими, в яких сателіти утворюються в початковій стадії, а потім зникають). У другому під режимі (IIb) поряд з основними краплями з'являються сателіти, які рухаються повільніше основних крапель, наздоганяючи їх приблизно на відстані двох довжин хвиль. Подібний під режим частіше спостерігається у струменів великого діаметру. Третій підрежим (IIc), в роботі описаний вперше. Він відповідає такій взаємодії основних крапель і сателітів, яке можна назвати відражаючим (пружним): основна крапля наздоганяє сателіт, але не поглинає його, а пружно відбиває, і останній, отримуючи додаткову швидкість, наздоганяє попереду краплю. Всі три описаних підрежими II можуть спостерігатися при зміні χ ($0,57 < \chi < 1,0$), але при близьких амплітудах збурення. Це призводить до дуже складної мапи режимів. Виявляється, що мапа дуже помітно змінюється при зміні числа Онезорге $Oh = \nu(\rho/(R\sigma))^{1/2}$, що характеризує вплив в'язкості. У зв'язку з цим відзначимо, що повна мапа режимів в області $0,57 < \chi < 1,0$ досі не побудована, хоча необхідність такого побудування очевидна, через певні

труднощі проведення експериментів в широких діапазонах зміни багатьох параметрів.

Режим III відповідає середнім хвильовим числам $0,285 < \chi < 0,5$. Цей режим також характеризується багатою картою різних типів поведінки крапельних потоків. Тут переходи між різними підрежимами в основному пов'язані з варіаціями амплітуди збурень. Наприклад, для малих амплітуд спостерігається підрежим злиття назад для сателітних крапель. Із зростанням амплітуди настає підрежим злиття вперед. Нарешті, якщо амплітуда збурень (для кожного хвильового числа в діапазоні $0,285 < \chi < 0,5$) перевищує певне (порогове) значення настає монодисперсний розпад (без сателітів з високим ступенем однорідності розмірів і швидкостей крапель). Останній підрежим неодноразово фіксувався багатьма авторами, оскільки має важливе значення в додатках.

Режим IV (довгохвильовий розпад, $\chi < 0,3$). В цьому режимі спостерігаються ефекти, які можна назвати модуляційними. При $\chi < 0,3$ довгохвильові збурення на поверхні струменя ростуть помітно повільніше, ніж збурення з коротшою довжиною хвилі при $\chi^* < 0,7$. Таким чином, на фоні регулярних довгохвильових збурень поверхні струменя одночасно зростають і гармоніки (причому швидкість їхнього зростання вище) при хвильових числах $\chi^* = 0,7$, причому останні модульовані довгохвильовим регулярним сигналом. На довжині хвилі регулярного сигналу можуть спостерігатися як основні краплі, так і сателіти, причому динаміка їх після розпаду така, що «зберігається пам'ять» про довгохвильовий сигнал. Важливою особливістю капілярного розпаду і генерації крапель при $\chi < 0,3$ є той факт, що утворені краплі мають значний розкид за розмірами (цей розкид, кількісно сьогодні практично не досліджений). Разом з тим характер розпаду є квазіперіодичним, причому квазіперіод залежить від довжини хвилі регулярного сигналу збурення. Зокрема, із зростанням відношення λ / D (зменшенням χ) число крапель усередині одного квазіперіоду зростає.

У багатьох експериментах, проведених раніше в неконтрольованих умовах, можливо існували низькочастотні коливання в експериментальній установці, що призводили до низького ступеня монодисперсності крапель. Крім того, можливо, що сам спонтанний розпад струменів в основному має довгохвильову природу: він модульований низькочастотним шумом.

1.5 Математичні методи опису процесу розпаду струменя на краплі

1.5.1 Лінійна теорія капілярної не стійкості струменів для в'язкої рідини

Для в'язкої рідини лінійна теорія капілярної нестійкості була розвинена Вебером [53] на основі використання рівнянь Нав'є-Стокса.

Для симетричних хвиль рівняння руху рідини в струмені має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_r}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) \right) \right]; \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right], \end{cases} \quad (1.4)$$

де v_r , v_z - відповідно радіальна і осьова компоненти збурення швидкості струменя. В силу малості деформації квадратичні члени в рівняннях руху опущені.

Рівняння безперервності

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) = 0. \quad (1.5)$$

Зробивши всі підстановки, дозволяє отримати дисперсійне рівняння в довгохвильовому наближенні

$$\gamma^2 + \frac{3\mu}{\rho r_0^2} \chi^2 \gamma + \frac{\sigma}{2\rho r_0^2} \chi^2 (\chi^2 - 1) = 0. \quad (1.6)$$

З останнього співвідношення (1.6) видно стабілізуюча роль в'язкості. На рис. 1.20 зображені криві Релея-Вебера для різних чисел Онезорга [49]. Добре видно, що зі збільшенням в'язкості рідини максимум інкремента зменшується і він зміщується в область менших безрозмірних хвильових чисел (великих довжин хвиль).

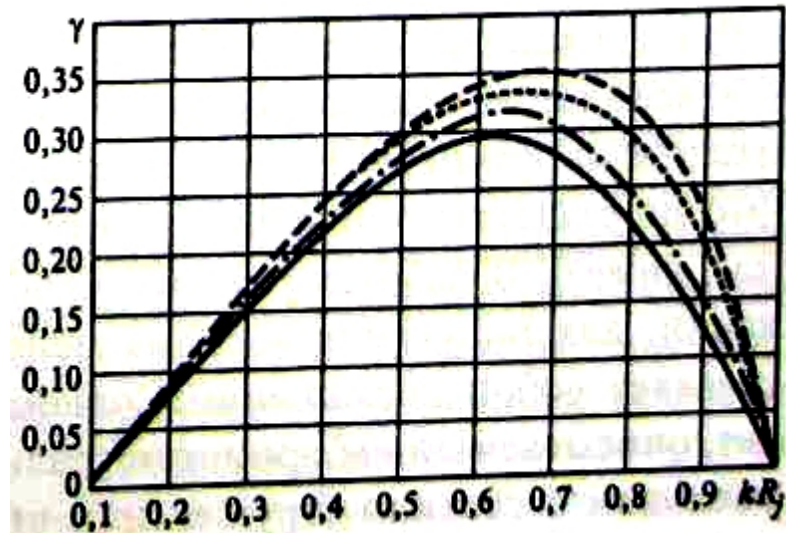


Рисунок 1.20 – Залежність інкремента капілярної нестійкості струменя від безрозмірного хвильового числа при різних числах Онезорга:
 — — — - $Oh=0$; - - - - $Oh=1$; — · — · - $Oh=5$; — — — - $Oh=10$.

З рівняння (1.6) можна визначити швидкість росту максимально зростаючих збурень:

$$\frac{\gamma_{\max} \mu r_0}{\sigma} = -\frac{3}{2} Oh \chi^2 + \left[\frac{9}{4} Oh^2 \chi^4 + \frac{Oh \chi^2}{2} (1 - \chi^2) \right]^{1/2}, \quad (1.7)$$

$$\chi_{\max} = \{2[1 + 3Oh/2]\}^{-1/2}. \quad (1.8)$$

Труднощі теорії Релея Вебера з точки зору експериментальних даних і загальнотеоретичних міркувань полягає в наступному: теорія Релея-Вебера, в силу своєї лінійності, не може пояснити такі важливі ефекти капілярного

розпаду, як утворення крапель сателітів (супутників), швидкість зростання окремих гармонік на поверхні струменя.

1.5.2 Нелінійна теорія капілярного розпаду струменя

Багато питань, пов'язаних з монодисперсним розпадом струменів, не можуть бути теоретично досліджені в рамках лінійної теорії. Це, в першу чергу, обумовлено тим, що на кінцевій стадії розвитку збурень поверхні струменя основну роль грають нелінійні ефекти. Крім цього, складність початкового сигналу при розвитку капілярної нестійкості веде до різноманіття режимів розпаду, що можна описати також лише в рамках нелінійної теорії. Головними питаннями в проблемі монодиспергування слід вважати дослідження безсателітного розпаду струменя і визначення областей утворення сателітів, визначення ступеня монодисперсності утворених крапель і керування режимами розпаду за допомогою зміни виду початкового сигналу в генераторі .

Для опису нелінійних ефектів струменя, що розпадається існує кілька підходів, так як у повній постановці завдання про еволюцію струменя під дією капілярних сил аж до утворення крапель надзвичайно складна: це нелінійна двовимірною задачею гідродинаміки в'язкої ньютонівської (а в інших випадках, більш складної) реології рідин з невідомим кордоном. Вирішити подібне завдання поки що важко. У зв'язку з цим використовується ряд спрощуючих припущень. Зокрема, завдання розглядається в нев'язкій постановці, в цьому випадку вона зводиться до двовимірного рівняння Лапласа для потенціалу швидкості і нелінійних граничних умов на поверхні струменя. Рішення такого завдання може бути отримано чисельними методами (або звичайно-різницевиими, або методом кінцевих елементів). Інший широко використовуваний при аналізі нелінійних ефектів підхід полягає в застосуванні квазіоодномірного наближення (залежністю від

радіальної координати в струмені нехтують). Докладний аналіз нелінійних теорій капілярної нестійкості струменів міститься в огляді [44].

У перших теоретичних роботах по нелінійному капілярному розпаду [54-56] розглядалася потенційна течія ідеального рідкого струменя кругового перетину. Нелінійний аналіз проводили методами теорії збурень розкладанням по малому параметру (як правило, за амплітудою). В основі цієї теорії лежать рівняння для потенціалу швидкості φ і деформації поверхні струменя $\eta(z, t)$:

$$\Delta\varphi = 0; \quad 0 \leq r \leq \eta; \quad -\infty < z < \infty. \quad (1.9)$$

і граничні кінематичні та динамічні умови:

$$\frac{\partial\eta}{\partial t} + \frac{\partial\varphi}{\partial z} \frac{\partial\eta}{\partial z} = \frac{\partial\varphi}{\partial r}, \quad \eta = \eta(z, t), \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z} \right)^2 \right] = \frac{\partial^2\eta}{\partial z^2} \left[1 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial z} \right)^2 \right]^{-3/2} - \eta^{-1} \left[1 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial z} \right)^2 \right]. \quad (1.11)$$

При цьому початкові умови задаються у вигляді:

$$\eta(z, 0) = \varepsilon \cos kz + \left(1 - \frac{1}{2} \varepsilon^{1/2} \right) - 1, \quad (1.12)$$

$$\partial\eta(z, 0) / \partial t = 0.$$

Введення малого параметру ε ($|\varepsilon| \ll 1$) дозволяє записати рішення для φ та η у вигляді розкладів

$$\varphi = \varphi_0 + \sum_{m=1}^N \varepsilon^m \varphi_m, \quad \eta = \sum_{m=1}^N \varepsilon^m \eta_m. \quad (1.13)$$

Підставляючи (1.13) у вихідну систему рівнянь (1.9)–(1.11) і прирівнюючи члени при однакових ступенях ε , знаходять явний вигляд функцій φ_m і η_m . В [57] число членів розкладання (1.13) вибирали невеликим ($N=3$). Однак навіть аналіз третього наближення пов'язаний з певними труднощами, зумовленими появою секулярних членів. Згодом була

здійснена більш складна процедура багатомасштабного розкладання [58], в якій не тільки шукані функції φ і η розкладаються в ряди по малому параметру, а й незалежні змінні (час і поздовжня довжина) представляються у вигляді рядів:

$$\tau = t \left[1 + \sum_{m=1}^N \epsilon^m v_m(\epsilon, k_0, \delta) \right], \quad (1.14)$$

$$\xi = z \left[1 + \sum_{m=1}^N \epsilon^m v_m(\epsilon, k_0, \delta) \right], \quad (1.15)$$

де k_0 – хвильове число основної гармоніки; $\delta = \delta_n / \epsilon$ (δ_n – амплітуда n -ї гармоніки). При цьому початкові умови мали вигляд:

$$\begin{aligned} \eta(z, 0) &= 0, \\ \left. \frac{\partial \eta}{\partial z} \right|_{t=0} &= \delta_0 \cos(k_0 z) + \delta_n \cos(nk_0 z + \theta); \quad \delta_0 = \omega_0 \epsilon. \end{aligned} \quad (1.16)$$

Побудовані розкладання дозволили уточнити результати [54–58] і вказати в них ряд неточностей. Розвитком роботи [58] є [59], де методом багатьох масштабів побудовано нелінійне рішення задачі про конвективні нестійкості напівобмеженого струменя.

Інший підхід до дослідження нелінійної стадії капілярної нестійкості був спочатку розвинений в [60]. Тут замість розкладань в ряд по малому параметру виду (1.13) використовували процедуру розкладання по базисній системі тригонометричних функцій (розкладання Фур'є):

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_0 + \sum_k [\phi_k \exp(ik\xi) + \phi_k^* \exp(-ik\xi)], \\ \eta &= \eta_0 + \sum_k [\eta_k \exp(ik\xi) + \eta_k^* \exp(-ik\xi)], \end{aligned} \quad (1.17)$$

де $\xi = kz - \omega t$.

Підставляючи (1.17) у вихідну систему рівнянь, отримуємо нелінійну систему рівнянь для коефіцієнтів розкладу ϕ_k і η_k , яка може бути розв'язана

прямим чисельним інтегруванням. Зазначена процедура розв'язання дозволяє розглядати не тільки абсолютну, а й конвективну нестійкість струменя.

Одним з найважливіших результатів нелінійної теорії є знаходження залежності безрозмірного хвильового числа від амплітуди початкового сигналу збурення $\chi(\delta_0)$ в точках максимуму кривої Релея (точка максимального інкремента) і в точці граничного хвильового числа χ^* (в лінійній теорії їй відповідає точка $\chi = 1$). Ця залежність зазвичай, виходячи з нелінійної теорії виходить квадратичною: $\chi^* = 1 + b\delta_0^2$, де b - деяка константа (вона виходить різною в різних теоріях) [61].

До теперішнього часу розроблені різні варіанти нелінійних теорій капілярної нестійкості струменів і на їх основі отримано багато результатів [62].

1.6 Висновки до першого розділу, вибір напрямку досліджень

Незаперечними перевагами отримання гранульованого продукту способом прилювання з використанням, для диспергування розплаву, обертового вібраційного гранулятора є надійність в роботі, забезпечення високого ступеня монодисперсності за розмірами, рівномірний розподіл гранул по горизонтальному перетину башти, забезпечує високу продуктивність і малу енерго- та матеріалоемність. З ростом попиту на мінеральні добрива, для створення конкуренції на ринку збуту, з'являється необхідність підвищення їх монодисперсного складу, підвищення продуктивності вже існуючих установок, забезпечує підвищення врожайності сільськогосподарських культур, вільну сипкість при використанні і зменшення їх втрат при транспортуванні, відсутність злежання при зберіганні.

Але існуючі на сьогодні гранулятори мають ряд недоліків [63, 64]:

- неможливість працювати в широкому діапазоні навантажень по розплаву;
- забивання отворів витікання при грануляції розчинів з домішками, для їх проходження крізь отвори витікання необхідний додатковий тиск (підвищити швидкість) перед ними;
- привод обертання перфорованого днища не може забезпечити однаковий напір розплаву на верхніх і нижніх рядах отворів витікання при малих витратах;
- зменшення ступеня монодисперсності готового продукту в результаті стабільності частоти сигналу при зміні рівня розплаву в кошику.

З огляду на все вище наведене, впливає доцільність дослідження гідромеханічних показників вібраційних грануляторів для усунення перерахованих недоліків і покращення умов роботи.

Використання наукових викладок для прогнозування поведінки струменя, що витікає, з довільним та вимушеним розпадом на краплі дозволить створити більш досконалі математичні моделі для аналізу роботи диспергуючих пристроїв (вібраційних грануляторів).

Метою дисертаційної роботи є дослідження процесу диспергування рідини методом вимушеного розпаду струменя і на основі отриманих результатів модернізувати відому конструкцію обертового вібраційного гранулятора.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1) Дослідити гідродинаміку руху рідини в порожнистій перфорованій оболонці з малим значенням Re , що дасть можливість характеризувати розподіл швидкості руху розплаву в порожнині оболонки (в кошику обертового вібраційного гранулятора) і перед отворами витікання, та узагальнити отримані результати у вигляді рекомендацій з модернізації конструкції гранулятора залежно від робочих параметрів.
- 2) Дослідити гідродинаміку струменя, що витікає з тонкостінної перфорованої оболонки, при мимовільному розпаді. Подати узагальнення отриманих результатів у вигляді аналітичних рівнянь.

- 3) Установити гідродинамічні закономірності струменя, що витікає з отвору, при накладанні на нього вимушених коливань. Подати узагальнення отриманих результатів у вигляді аналітичних рівнянь.
- 4) Провести експериментальні дослідження для вивчення режимів розпаду струменя.
- 5) На основі експериментальних і теоретичних досліджень модернізувати існуючий обертовий вібраційний гранулятор.
- 6) Запропонувати оптимальний режим роботи генератора низьких частот для забезпечення монодисперсного складу продукту та зниження кількості пилу.
- 7) Підтвердити запропоновані рекомендації на промислових випробуваннях.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ СТВОРЕННЯ КРАПЕЛЬ МОНОДИСПЕРСНОГО СКЛАДУ

2.1 Фізична модель розпаду струменя та утворення крапель

Згідно першого розділу оптимальний спосіб диспергування розчину на краплі монодисперсного складу є накладання на струмінь вимушених коливань. Цей метод впроваджений у вібраційних обертових розпилювачах. Одним із способів отримання вимушених збурень струменя рідини є поширення в ньому регулярних змінних імпульсів тиску. Як один із варіантів, джерелом таких імпульсів у вібродиспергаторі може бути диск-випромінювач (мембрани що коливається), на який подається вібрація [65].

У більшості випадків вібраційний диспергатор працює наступним чином (рис. 2.1) [65].

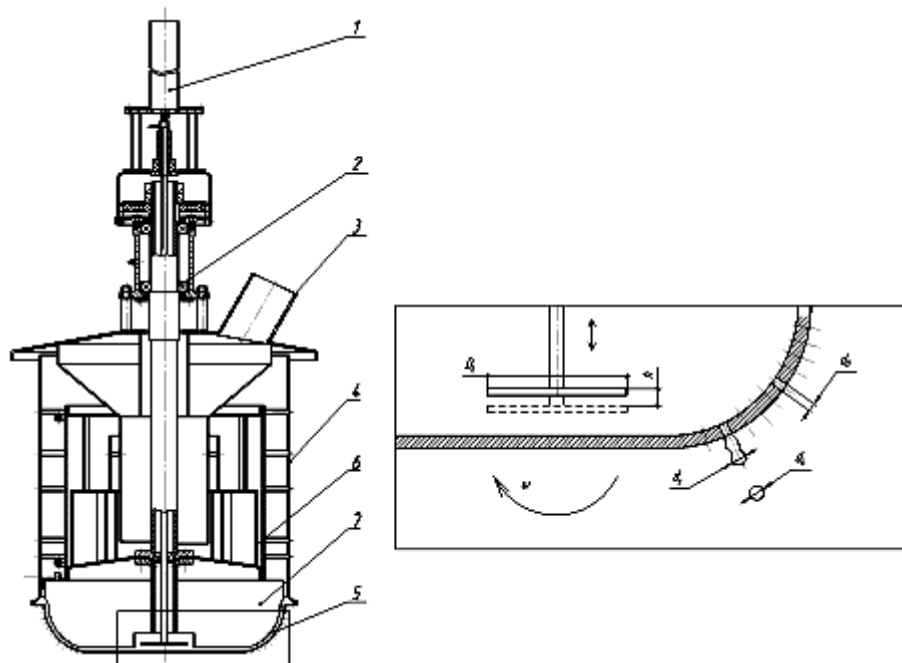


Рисунок 2.1 – Обертовий віброгранулятор: 1 – вібропристрій; 2 – підшипниковий вузол; 3 – патрубок входу плаву; 4 – циліндричний корпус; 5 – перфороване днище (кошик); 6 – розподільник; 7 – напірні лопаті

Електродвигун (не зображено) з розрахунковою частотою надає обертання порожнистому валу, водночас обертається розподільник із напірними лопатями, циліндрична камера з перфорованим днищем та напірними лопатями, які розташовані в перфорованому днищі. Розплав по патрубку для введення подається в кільцевий колектор. При взаємодії з напірними лопатями розплав рівномірно проходить через отвори перфорованого циліндра і через сітку. Далі розплав надходить у перфороване днище. Напірні лопаті вирівнюють швидкість обертання розплаву у перфорованому днищі. Під дією цього напору розплав витікає з усіх отворів витікання перфорованого днища у вигляді струменів. Водночас із подачею розплаву вмикається вібропристрій. Через шток вібрація з певною частотою подається на диск-випромінювач, який розташований над центральною частиною внутрішньої поверхні перфорованого днища з зазором відносно неї. Зазор забезпечує надійний гідродинамічний зв'язок диска-випромінювача і центральної частини перфорованого днища, завдяки якому хвилі поширюються у вигляді пружних деформацій у розплаві та передаються на перфороване днище. При накладенні вібрації диск-випромінювач здійснює зворотно-поступальний рух, за один хід якого переміщується G_h кількості рідини:

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

де ρ_p - густина розплаву; D_h - діаметр диска-випромінювача; h_d - відстань, яку проходить диск за один хід.

В результаті на струменях розплаву, які витікають з отворів, накладаються регулярні збурення у вигляді звуження та розширення, і струмені розплаву розпадаються в місцях звужень на монодисперсні краплі.

Значення G_h є важливим критерієм ефективності передачі коливань на перфороване днище. Величина пульсації тиску, що виникла при цьому, залежить від швидкості переміщення та амплітуди диску:

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

де v_h - швидкість руху диску; f - частота коливання диску.

Зі сказаного вище бачимо, що один із головних параметрів вібраційного диспергування є частотою коливань f , яка впливає на закон зміни $P = f(\tau)$, та дозволяє регулювати середній діаметр і діапазон монодисперсності одержуваних крапель розплаву при вимушеному розпаді струменя.

Для створення математичної моделі опису процесу диспергування рідини з накладанням вимушених коливань на неї, необхідно розглянути особливості витікання струменя рідини з отвору з тонкою стінкою і розпад її на краплі без накладання вібрації для розуміння загальних особливостей розпаду рідких струменів. Так як, бувають деякі режими витікання рідини з отвору при яких при вимушеному капілярному розпаді струменя взагалі не можливо отримати монодисперсні краплі ні за яких зовнішніх впливах. Ще однією причиною розгляду даного питання є те що, при роботі вібраційного диспергатора на виробництві бувають випадки коли система вимушених коливань виходить з ладу і розпилювач працює в статичному режимі [63]. Без накладення вібрації монодисперсність отриманого продукту знизиться. Оскільки за вимогами сучасних галузей є отримання продукту з високим вмістом однорідності, то актуальним є вміння аналізувати поведінку розпаду струменя на краплі з визначенням діаметра отриманої краплі.

З точки зору сучасної гідродинаміки єдиного механізму розпаду рідких струменів не існує, і в залежності від цілого ряду параметрів можуть існувати різні механізми розпаду рідкого об'єму на краплі. Вважаємо, що

циліндричний струмінь рідини розпадається під дією капілярних сил (швидкість витікання рідини менша по відношенню до газу).

Об'єм рідини циліндричного струменя, обмежений вільною поверхнею з формою, відмінною від сферичної і підданого дії сил поверхневого натягу, за відсутності зовнішніх силових полів буде прагнути прийняти сферичну форму, що володіє мінімальною площею вільної поверхні, яка забезпечує мінімальність потенційної енергії капілярних сил.

Кожна порція рідини струменя, витікає безперервно з отвору. Поверхня струменя при проходженні через отвір піддається однаковому впливу малих збурень. Ці збурення виникають внаслідок вихрового руху рідини, створюваного тертям, коливаннями самого отвору і відхиленнями його від правильної круглої форми, наявності в струмені пилинок і бульбашок повітря, шорсткості стінок та ін.

Під впливом зазначених причин частки рідини, що знаходяться на поверхні струменя, відчувають малі зміщення, поверхня струменя деформується і відхиляється від рівноважної форми (рис. 2.2).

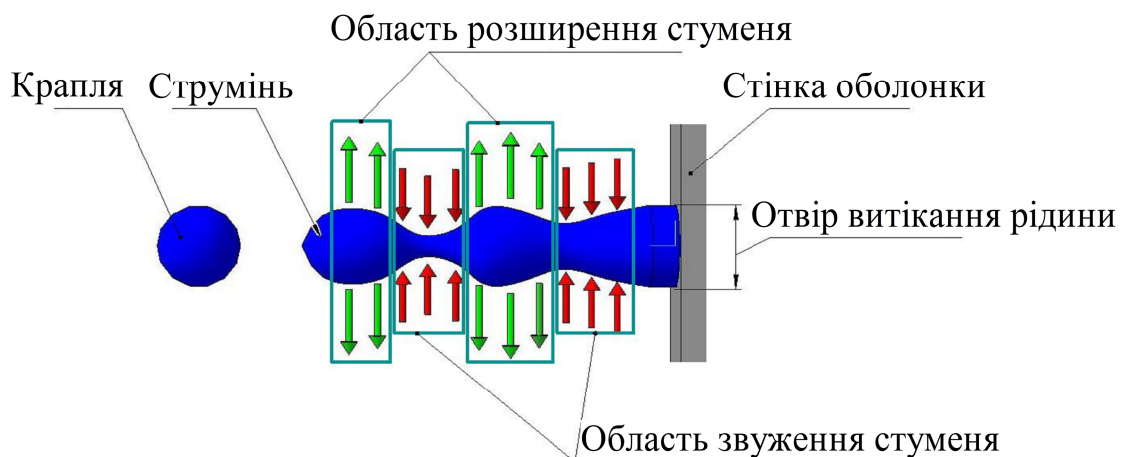


Рисунок 2.2 – Вісесиметрична форма розпаду струменя

Збільшення вільної енергії поверхні, викликане подібною деформацією, призводить до появи капілярних сил, які прагнуть скоротити загальну поверхню струменя і надати їй рівноважну форму. Під дією цих сил частки

рідини, виведені з рівноважного положення, прагнуть повернутися до нього. Однак, за інерцією вони проходять положення рівноваги і тому знову відчують дію відновлювальних сил і т.д.

У результаті таких переміщень на поверхні струменя виникають хвильові коливання - області звуження і розширення струменя. Ці хвилі можуть поширюватися з різними швидкостями вздовж струменя у напрямку її руху. Амплітуда коливань у процесі руху хвилі може зменшуватися, або збільшуватися.

Багатьма авторами було відмічено [7, 13, 36], що довжина і амплітуда хвилі коливання збільшуються прямо пропорційно швидкості струменя. Якщо при збільшенні швидкості довжина хвилі коливання λ перевищить довжину кола πD_j незбуреного струменя, то подальше зростання амплітуди коливання відбувається експоненціально. У результаті стійкість руху струменя порушується, і струмінь розпадається на окремі частини (краплі).

2.2 Визначення характеру розподілу швидкості руху розплаву в об'ємі оболонки та перед отворами витікання

Для вказаного дослідження і визначення характерних зон руху рідини, було створено твердотілу модель перфорованої оболонки програмним продуктом “КОМПАС-3D (<http://ascon.ru/>), та проведено чисельне моделювання течії з використанням програмної системи ANSYS CFX (<http://www.ansys.ru/>) методом кінцево-елементного аналізу (МСЕ). Для розрахункової області була створена структурована розрахункова сітка в програмі ICEM CFD. Для коректного моделювання умов роботи пристрою використовувалася двозв'язна розрахункова область, що складається з корпусу і кошика (рис. 2.3).

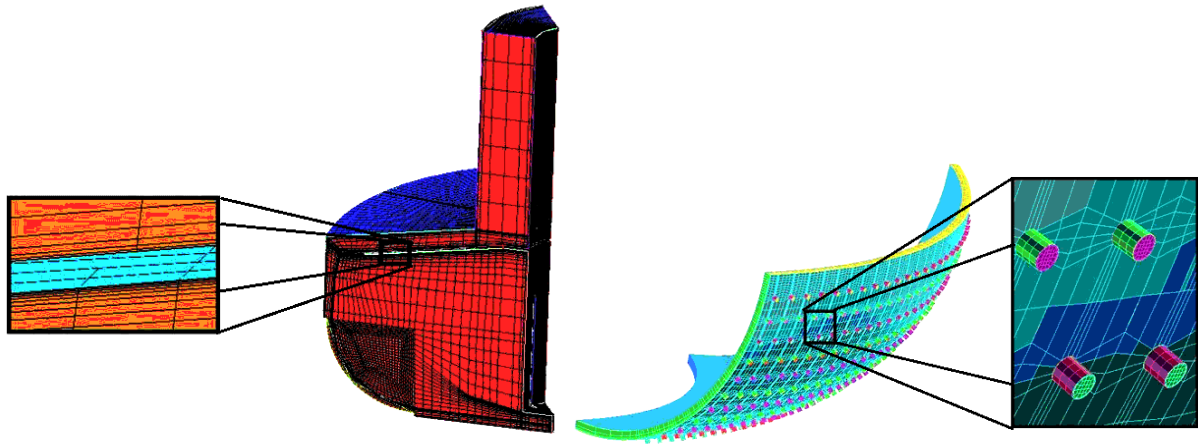


Рисунок 2.3 – Розрахункова сітка для комп'ютерного моделювання

Розрахунок параметрів руху рідини виконаний шляхом чисельного рішення системи рівнянь, що описують загальний випадок руху рідкого середовища – усереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є–Стокса і нерозривності [53].

При моделюванні було зроблено ряд припущень:

1) ставиться вісесиметричне завдання (припускаємо, що в усіх секторах рух рідини – гідродинаміка однакова) – розглядається рух рідини в одному секторі;

2) в верхній частині гранулятора знаходяться елементи які рівномірно розподіляють розплав, який потім потрапляє в перфороване днище. При побудові моделі розглядалася гідродинаміка в нижній частині оболонки (кошику), так як елементи гранулятора в верхній частині не впливають на швидкість витікання розплаву;

3) при вісесиметричному завданні розглядається обтікання однієї лопаті, яка знаходиться в центрі сектора з кутом $360^\circ/n$, де n - кількість лопатей.

Необхідно зазначити, що побудова розрахункових структурованих сіток ручним шляхом в програмі Meshing програми ANSYS трудомістка робота, вимагає навичок і часу, проте дозволяє отримати якісну детальну сітку з необхідним числом елементів.

Завдання граничних умов

Чисельний експеримент проводився при стаціонарній постановці завдання (Steady State). Постановка граничних умов для розрахункових областей були реалізовані за наступною схемою рис. 2.4.

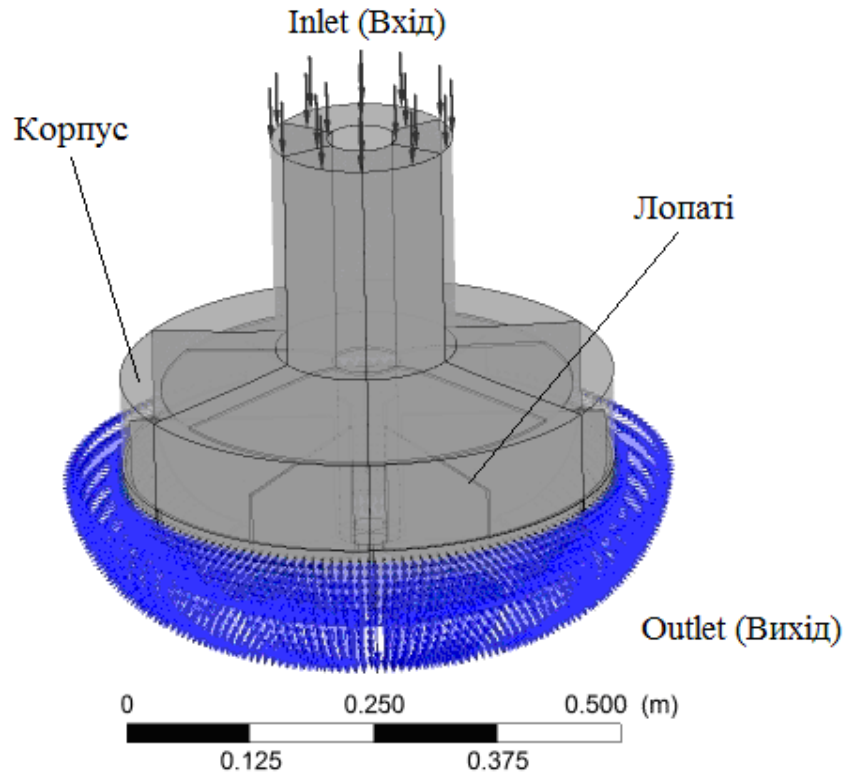


Рисунок 2.4 – Схема завдання граничних умов для задачі

На поверхні Inlet, через яку потік потрапляє в розрахункову область, задавалося значення витрати, яке відповідає виробничому режиму роботи гранулятора [66]. Оболонка гранулятора обертається навколо своєї осі (z). Під дією статичного тиску, з отворів (Outlet), відбувається витікання рідини в повітряне середовище, в якій задавалося значення тиску, що відповідає умовам модельованого експерименту. На поверхні Wall задавалося умова твердої стінки, властивостями якої є непроникність і прилипання до неї молекул води. На поверхні Interface для передачі параметрів потоку без зміни між розрахунковими областями задавалася опція Frozen Roter. При цьому умови контакту сітки є фіксованими один щодо одного; потік в незмінному вигляді переходить з однієї області в іншу [67].

Під час моделювання процесу змінювалася частота обертання гранулятора, кількість лопатей і їх форма. Вихідні дані для завдання граничних умов при різних режимах роботи наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Вихідні дані для завдання граничних умов при різних режимах роботи

Режим	Кількість лопатей, шт	Частота обертання оболонки, об/хв	Витрата рідини, кг/год	Тиск навколишнього середовища, МПа
Без лопатей				
1	0	30	27000	0,1
2	0	40		
3	0	50		
Радіальні лопаті				
4	4	50	27000	0,1
5	4	60		
6	4	80		
7	5	50	27000	0,1
8	5	60		
9	5	80		
10	6	50	27000	0,1
11	6	60		
12	6	80		
13	7	50	27000	0,1
14	7	60		
15	7	80		
Загнуті вперед лопаті ($\beta_2=135^\circ$)				
16	6	50	27000	0,1
17	6	60		
18	6	80		

Критерієм збіжності розрахунку було встановлення інтегральних характеристик потоку при досягненні значення величини середньоквадратичних нев'язок за основними параметрами (P-Mass - рівняння нерозривності, E-enerdgi – рівняння збереження енергії та рівняння збереження моменту кількості руху по осях U-Mom, W-Mom, V-Mom) на рівні $1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-6}$ [68].

Методики обробки та аналізу результатів розрахунку

При розрахунку гідродинамічних характеристик на кожному з режимів роботи обертового диспергатора параметри потоку усереднюються в контрольних перерізах (перед витіканням рідини з отворів і на відстані 100 мм від нижньої точки днища). У кожному з перерізів знімаються усереднені значення наступних параметрів: тиску і швидкості. Всі параметри усереднювалися за допомогою функції MassFlow-Weighted Average (усереднення з урахуванням масової витрати), яка визначає значення деякої величини K за формулою:

$$K = \frac{\sum(m_i \cdot K_i)}{\sum m_i}, \quad (2.3)$$

де K – значення величини K в комірці розрахункової сітки, m_i - значення масової витрати в комірці розрахункової сітки [68].

Результати комп'ютерного моделювання

Отримані результати чисельного моделювання гідродинаміки потоку пристрою без лопатей показують, що основна маса рідини, за винятком дуже тонкого прикордонного шару, прилеглого до внутрішньої поверхні оболонки (рис. 2.5), рухається з великим відставанням від оболонки. В області отвору витікання у кожен окремий проміжок часу буде знаходитися нова кількість

рідини. За цей час за рахунок надлишкового тиску передається імпульс у напрямку отвору. У цей момент відбувається витікання рідини з отвору. Радіальна складова швидкості рідини, яка не встигла увійти в отвір, в наступний момент часу знову стає рівною нулю, так як рідина потрапляє в зону неперфорованої частини стінки оболонки. Потім, при підході нового отвору до розглянутої області рідини, витікає наступна порція [13]. Оскільки маса рідини володіє інерцією, то радіальна складова швидкості буде збільшуватися в часі від нуля на передній по ходу руху вхідний кромці отвору до деякого максимуму на протилежному краю отвору витікання. Надмірний тиск в оболонці гранулятора малий, отже, мале і значення імпульсу сили в напрямку осі отвору. При збільшенні швидкості обертання оболонки час перебування рідини над отвором зменшується, при цьому тиск в ній зростає несуттєво. Рідина по інерції у відносному русі як би пролітає над отвором, не встигаючи заповнити його [69].

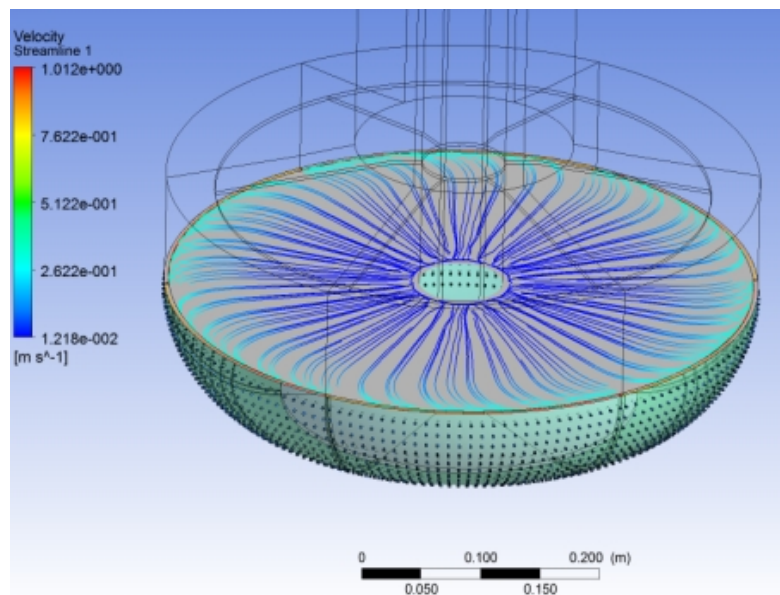


Рисунок 2.5 –Траєкторія руху рідини для обертового гранулятора зі швидкістю обертання 50 об/хв без лопатей

Для отримання монодисперсних гранул і можливості підвищення продуктивності і поліпшення розподілу навантаження було запропоновано

розташувати в днище гранулятора напірні лопаті з зазором, які повторюють форму перфорованого днища, і обертаються разом з корпусом гранулятора [69]. Було здійснено чисельне моделювання роботи гранулятора з радіальними, загнутими вперед і загнутими назад лопатями. Перегородки призводять розплав в обертання, завдяки чому зростає відцентровий натиск і збільшується швидкість витікання струменів з отворів чашоподібного днища.

На першому етапі досліджувався вплив кількості радіальних лопатей (від 4 до 7, в тому числі і без лопатей) на швидкість витікання при постійних початкових умовах. За результатами моделювання, як видно за графіком на рис. 2.6, при збільшенні кількості лопатей спостерігається збільшення абсолютної швидкості і тиску.

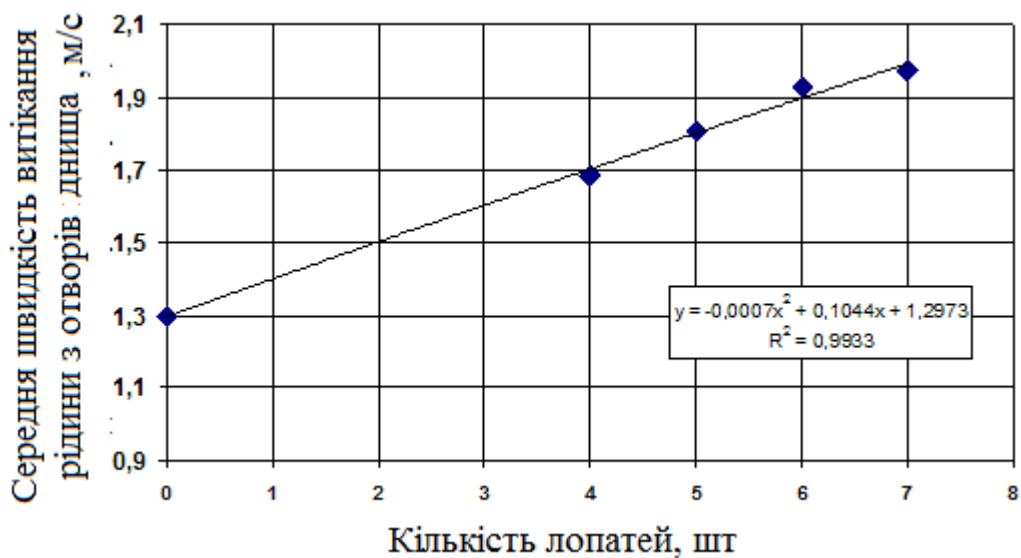


Рисунок 2.6 – Залежність середньої швидкості витікання рідини з отворів чашоподібного днища гранулятора від кількості радіальних лопатей при частоті обертання кошика 50 об/хв

Для пояснення отриманих залежностей розглянемо фізику процесу. Припустимо ідеальний випадок, коли гранулятор складається з нескінченного числа нескінченно тонких лопатей. У такому випадку, траєкторія потоку рідини повністю повторює траєкторію лопатей. У

реальності, при зменшенні кількості лопатей в каналі між лопатями отримуємо у відносному русі обертання рідини в бік, зворотний обертанню днища гранулятора. Вихровий відносний рух рідини в каналі між лопатями володіє швидкостями, що збігаються за напрямком з основним потоком з всмоктуючого боку лопаті і швидкостями зворотними по напрямку до основного потоку, з напірної сторони лопаті. Осьовий вихор переносного руху накладається на основний потік, призводить до підвищення відносних швидкостей на всмоктувальній стороні і до зниження їх на напірній (рис. 2.7).

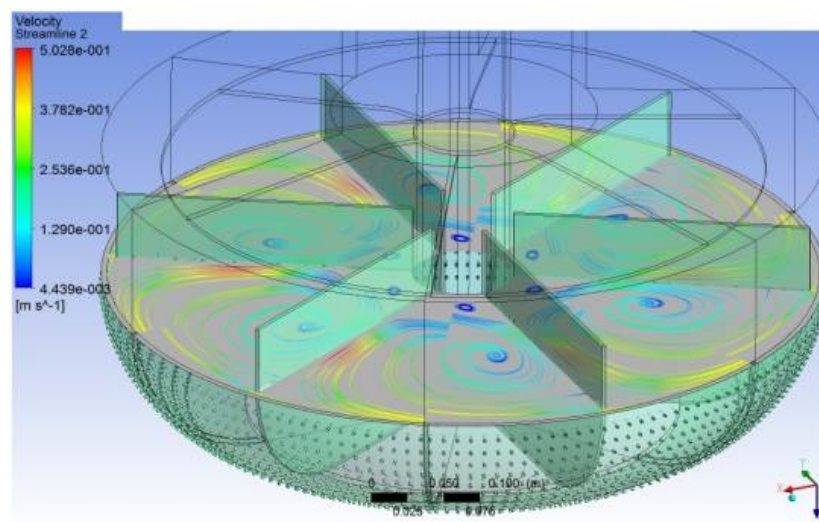


Рисунок 2.7 – Траєкторія руху рідини обертового гранулятора зі швидкістю обертання 50 об/хв із 6 радіальними лопатями

Отже, чим менша кількість лопатей буде знаходитися в днище гранулятора, тим більше буде швидкість на напірній стороні лопаті, а, отже, зменшиться швидкість витікання рідини з отворів. Дане припущення підтверджується рівнянням теоретичного напору з урахуванням кінцевого числа лопатей за схемою Стодоли-Майзеля [70]:

$$H_m = \frac{\omega}{g} \left[r_2^2 \left(1 - \frac{\pi \cdot \sin \beta_2}{z} \right) \omega - \frac{Q}{2\pi b_2 \psi \cdot \operatorname{tg} \beta_2} - (rc_u) \right], \quad (2.4)$$

де z – кількість лопатей; β_2 – кут виходу лопаті.

Зазначене рівняння не несе кількісного навантаження, воно тільки показує якісну характеристику впливу кількості лопатей на швидкість витікання рідини з отворів.

На другому етапі досліджувалася залежність середньої швидкості витікання рідини з отворів днища гранулятора. Як бачимо з графіка на рис. 2.8 при збільшенні частоти обертання гранулятора збільшується середня швидкість витікання рідини згідно лінійної залежності. При розвитку окружної швидкості збільшується і теоретичний напір (2.4) який, у свою чергу, збільшує значення швидкості витікання рідини з отвору перфорованої оболонки [71].

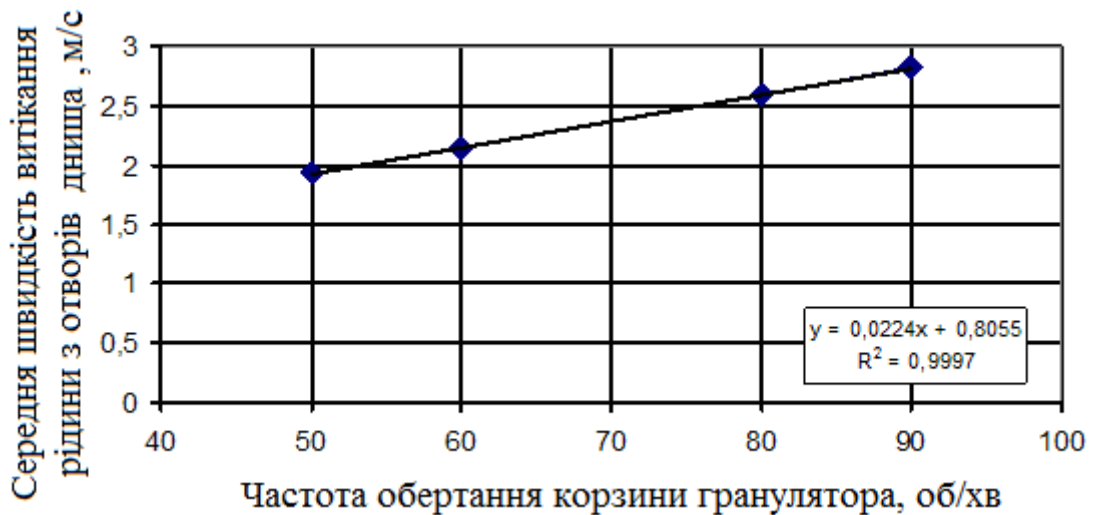
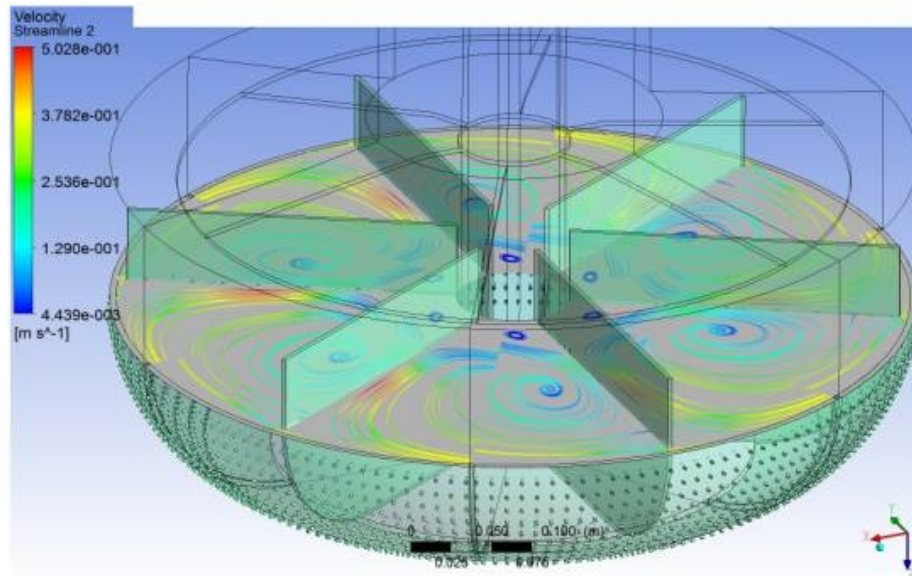
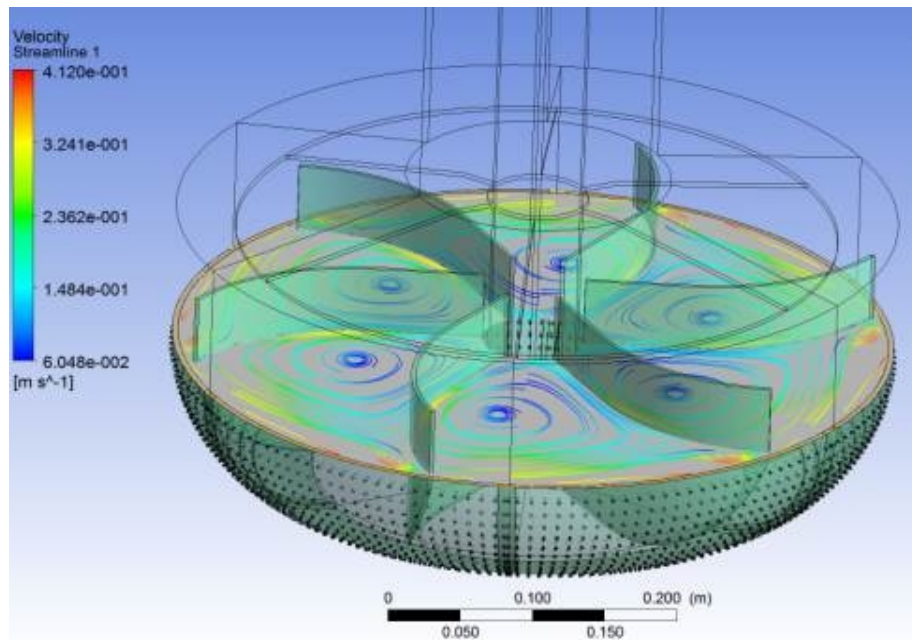


Рисунок 2.8 – Залежність середньої швидкості витікання рідини з отворів днища гранулятора з 6 радіальними лопатями від швидкості обертання днища

На третьому етапі досліджувалася швидкість витікання рідини з отворів залежно від геометричної форми лопатей. Випробування проводили на радіальних (вихідний кут лопатей 90°) (рис. 2.9 а) і загнутих вперед (вихідний кут лопатей 135°) лопатях (рис. 2.9 б) при цьому, вони повторюють форму перфорованого днища. Всі випробування проводилися в однакових умовах.



а)



б)

Рисунок 2.9 – Траєкторія руху рідини обертового гранулятора зі швидкістю обертання кошика 50 об/хв: а) із 6 радіальними лопатями; б) із 6 загнутими вперед ($\beta_2 = 135^\circ$) лопатями

Як видно з гістограми заміна радіальних лопатей на загнуті вперед на 37 % збільшує швидкість витікання рідини з отворів. Кінетику рідкого середовища в днищі гранулятора можна пояснити, розглянувши трикутник швидкостей рис. 2.10.

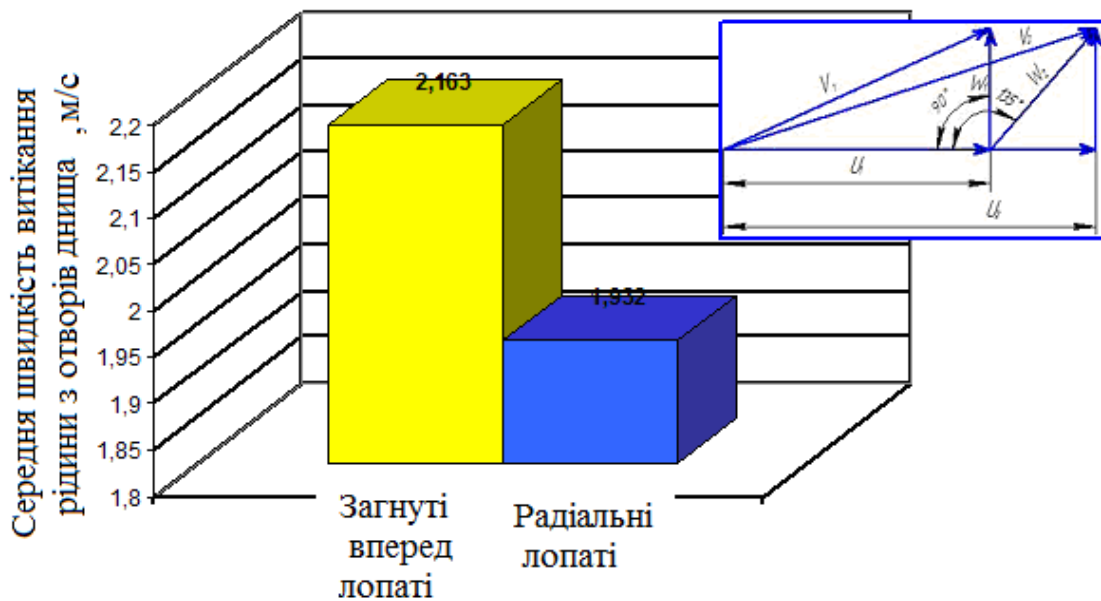


Рисунок 2.10 – Середня швидкість витікання рідини з отворів кошика гранулятора при різних формах лопаті і трикутник швидкостей на виході з лопаті

За правилами побудови плану швидкостей абсолютна швидкість V_1 в області лопатей є векторною сумою відносної W_1 й окружної U_1 швидкостей. З плану швидкостей видно, що при використанні радіальної лопаті абсолютна швидкість V_1 менше, ніж при загнутій вперед V_2 .

2.3 Математичне модулювання гідродинаміки струменя що розпростається без накладання вимушених коливань

У загальному випадку для розрахунку гідродинамічних характеристик струменя, що витікає з отвору з вільною поверхнею, використовуються методики, засновані на рівняннях руху в'язкої рідини [72–75]. Саме цей шлях є найбільш доцільним для розв'язання конкретного завдання руху струменя рідини, що витікає з днища (кошика) вібраційного гранулятора.

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 розв'язання поставленого завдання. Припускаємо, що збурення на поверхні струменя виникають в умовах, при яких можна вважати, що течія є вісесиметричною, і тангенціальна складова швидкості $v_\theta = 0$. Такі хвилі називаються симетричними [53]. При симетричних хвилях перетин струменя залишається круговим, відбувається тільки звуження і розширення (рис.2.2).

Для чисельного дослідження та визначення механізму зміни швидкості та поширення коливань рідини і зміни значення тиску в струмені, який витікає з отвору перфорованого днища, було використано рівняння, для опису нестационарного руху рідини [75]:

$$\frac{\partial v_r}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) \right) \right], \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right], \quad (2.6)$$

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

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

Для зменшення кількості змінних, які входять до рівняння, доповнюємо рівняння (2.5) - (2.7), кінематичними виразами визначення швидкості

$$\frac{\partial r}{\partial \tau} = v_r, \text{ та } \frac{\partial z}{\partial \tau} = v_z. \quad (2.8)$$

Підставивши рівняння (2.8) в систему рівнянь (2.5) - (2.7), дозволяє їх спростити, зменшивши при цьому кількість змінних. Виключивши похідну за часом, отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) = 0, \quad (2.9)$$

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r)}{r} \right) \right], \quad (2.10)$$

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

Розглянемо два можливих напрямки розв'язання системи рівнянь (2.9)–(2.11).

Перший напрямок. Зробимо математичне перетворення рівнянь (2.9)–(2.11). Тоді отримуємо

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0, \quad (2.12)$$

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right], \quad (2.13)$$

$$v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} \right]. \quad (2.14)$$

Для розв'язання рівнянь (2.12)–(2.14) застосовуємо сучасні методи розв'язання диференціальних рівнянь у частинних похідних і систем таких рівнянь. Використавши метод поділу змінних сумою [76], в результаті отримуємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} p = -\frac{1}{2} \rho C_3^2 r^2 - \frac{1}{2} \frac{\rho C_2^2}{r^2} + C_9 - 2\rho C_3 (C_3 z^2 - C_4 z - C_5 z) + C_8, \\ v_r = \frac{C_2}{r} + C_3 r, \\ v_z = C_5 + C_6 K + C_7 Y - 2C_3 z + C_4, \end{cases} \quad (2.15)$$

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

Система рівнянь (2.15) незручна для застосування з точки зору невизначеності впливу зміни тиску в часі на величини радіальної і осьової складових швидкості, що не дозволяє передбачати ступінь впливу зміни тиску в результаті коливальних рухів рідини в перфорованій оболонці на зміну радіальної і осьової складової швидкості та, відповідно, його впливу на формування гідродинамічних умов в струмені, які призводять до його розпаду на краплі.

Наявність у рівнянні для визначення осьової складової швидкості функцій Бесселя так само істотно ускладнює отримання розрахункових залежностей, які можна було б використовувати для попереднього спрощеного аналізу гідродинаміки струменя рідини з виходом на конкретні інженерні рішення. З іншого боку, при формуванні відповідних граничних умов знайдене рішення дозволяє визначити константи рівняння і провести аналіз гідродинаміки струменя в умовах стаціонарного її витікання. Такий аналіз також досить важливий, оскільки якість гранул, що одержують в грануляційній башти, багато в чому залежить від якості роботи перфорованої оболонки у разі відсутності вимушеної вібрації.

Другий напрямок. Якщо припустити, що осьова складова швидкості v_z у момент витікання змінюється згідно з параболічним законом [77], що має вигляд:

$$v_z = A_1 r^2 z^2 + A_2 r + A_3, \quad (2.16)$$

то рівняння (2.9) перетвориться на

$$2A_1r^2z + \frac{v_r + r \frac{\partial v_r}{\partial r}}{r} = 0. \quad (2.17)$$

З виразу (2.17) можна визначити значення радіальної складової швидкості витікання струменя:

$$v_r = \frac{-\frac{1}{2}A_1r^4z + F_1(z)}{r}. \quad (2.18)$$

Припускаємо, що зміна тиску у струмені у радіальному напрямку незначна порівняно з осьовою складовою. Підставивши отриманий вираз (2.16) в (2.11) рівняння набудатиме нового вигляду:

$$2(A_1r^2z^2 + A_2r + A_3)A_1r^2z = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + v \left(2A_1r^2 + \frac{4A_1rz^2 + A_2}{r} \right). \quad (2.19)$$

Вирішуючи диференціальне рівняння (2.19) отримуємо закон зміни $p(z)$ вздовж осі струменя:

$$p(z) = -\frac{1}{r} \left(\rho \left(\frac{1}{2}A_1^2r^5z^4 + A_1r^4z^2A_2 + A_1r^3z^2A_3 - 2vA_1r^3z - \frac{4}{3}vA_1rz^3 - vA_2z \right) \right) + C_1. \quad (2.20)$$

Однією із задач визначення зміни p вздовж осі струменя є визначення постійних, 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 (2.20), отримуємо, що $C_1 = p_1$. Звідси, рівняння, що описує закон зміни тиску вздовж струменя (осі z) набуде вигляду:

$$p(z) = -\frac{1}{r} \left(\rho \left(\frac{1}{2} A_1^2 r^5 z^4 + A_1 r^4 z^2 A_2 + A_1 r^3 z^2 A_3 - 2\nu A_1 r^3 z - \frac{4}{3} \nu A_1 r z^3 - \nu A_2 z \right) \right) + p_1. \quad (2.21)$$

Проаналізувавши отримані результати і підставивши знайдену залежність зміни тиску вздовж струменя (2.21) у рівняння (2.10) воно зміниться до вигляду:

$$\frac{\left(-\frac{1}{2} A_1 r^4 z + F_1(z) \right) \left(-2A_1 r^2 z - \frac{-\frac{1}{2} A_1 r^4 z + F_1(z)}{r^2} \right)}{r} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{1}{r^2} \left(\rho \left(\frac{1}{2} A_1^2 r^5 z^4 + A_1 r^4 z^2 A_2 + A_1 r^3 z^2 A_3 - 2\nu A_1 r^3 z - \frac{4}{3} \nu A_1 r z^3 - \nu A_2 z \right) \right) - \frac{1}{r} \left(\rho \left(\frac{5}{2} r^4 A_1^2 z^4 + 4A_1 r^3 z^2 A_2 + 3A_1 r^2 z^2 A_3 - 6\nu A_1 r^2 z - \frac{4}{3} \nu A_1 z^3 \right) \right) \right) + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{d^2 F_1(z)}{dz^2} - 4A_1 r z \right). \quad (2.22)$$

В результаті отримуємо диференціальне рівняння повних похідних відносно функції $F_1(z)$, яка отримана нами при розв'язанні рівняння нерозривності. Для розв'язання рівняння (2.22) необхідно задати значення першої похідної і самої функції $F_1(z)$ в якійсь граничній точці. Виходячи з того, що похідна $\frac{dv_r}{dz}$ рівна:

$$\frac{dv_r}{dz} = \frac{-\frac{1}{2} A_1 r^4 z + \frac{dF_1(z)}{dz}}{r}, \quad (2.23)$$

а радіальна складова швидкості струменя, при умові, що $z = 0$ стає рівною

нулю $v_r = 0$, як наслідок, отримуємо:

$$0 = \frac{-\frac{1}{2}A_1r^4z + \frac{dF_1(z)}{dz}}{r} \longrightarrow \frac{1}{2}A_1r^4z = \frac{dF_1(z)}{dz}. \quad (2.24)$$

Використовуючи граничні умови $F_1(z=0) = 0$ і $dz(F_1(z=0)) = 0$, й підставивши їх у рівняння (2.14) можна отримати значення функції $F_1(z)$ у вигляді полінома:

$$F_1(z) = \frac{1}{6} \frac{(-A_2 + 8A_1r^3)z^3}{r} + \frac{1}{48} \frac{A_1r^2(3A_1r^4 - 12A_2r - 8A_3)z^4}{v}. \quad (2.25)$$

Проаналізувавши отримані результати і підставивши знайдену залежність зміни функції $F_1(z)$ вздовж струменя (2.25) у рівняння (2.18) воно зміниться до вигляду

$$v_r = \frac{1}{48} \frac{z(-24A_1r^5v - 8vz^2A_2 + 64vz^2A_1r^3 + 3A_1^2r^7z^3 - 12A_1r^4z^3A_2 - 8A_1r^3z^3A_3)}{vr^2}. \quad (2.26)$$

Для чисельного аналізу отриманого рішення v_r , нам необхідно визначити коефіцієнти A_1 , A_2 і A_3 , значення яких знаходимо таким чином. Припустимо, що на поверхні струменя $r = r_s$ тиск p дорівнює тиску навколишнього середовища p_0 . Цю граничну умову можна записати у вигляді:

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

$$\left. - \frac{4}{3} v A_1 r_s z^3 - v A_2 z \right) + p_1. \quad (2.27)$$

Дане рівняння дає можливість визначити один із шуканих коефіцієнтів A_2 , що буде мати вигляд:

$$A_2 = -\frac{1}{6} \frac{(r_s(3z^4 A_1^2 \rho \cdot r_s^4 + 6z^2 A_1 \rho \cdot r_s^2 A_3 - 12z A_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_1 + 6p_0))}{\rho z (A_1 r_s^4 z - v)}. \quad (2.28)$$

Для визначення наступного коефіцієнта A_3 , припускаємо, що на осі струменя, тобто при $r = 0$, радіальна складова швидкості також дорівнює нулю: $v_r = 0$. Це можливо за умови, якщо чисельник рівняння (2.26) буде дорівнювати нулю. Підставляючи перераховані вище умови в отримане рівняння (2.28) визначаємо значення коефіцієнта A_3 , яке має наступний запис:

$$A_3 = -\frac{1}{6} \frac{3z^4 A_1^2 \rho r_s^4 + 6p_0 - 12z A_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_1}{z^2 r_s^2 \rho A_1}. \quad (2.29)$$

Підставивши виведене значення коефіцієнтів A_2 і A_3 у рівняння (2.16), вираз для осової складової швидкості матиме такий вигляд:

$$v_z = A_1 r^2 z^2 - \frac{1}{6} \frac{3z^4 A_1^2 \rho r_s^4 + 6p_0 - 12z A_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_1}{z^2 r_s^2 \rho A_1}. \quad (2.30)$$

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 наступному вигляді:

$$v_{z_0} = \frac{1}{6} \frac{6A_1^2 r^2 z_0^4 r_s^2 - 3z_0^4 A_1^2 \rho r_s^4 - 6p_0 - 12z_0 A_1 \rho v r_s^2 + 8\rho v A_1 z_0^3 + 6p_1}{z_0^2 r_s^2 \rho A_1}. \quad (2.31)$$

Рішаючи отримане рівняння (2.30) відносно коефіцієнта A_1 отримаємо два рішення:

$$A_1 = \frac{1}{3} \frac{1}{z_0^3 r_s^2 \rho (2r^2 - r_s^2)} (-4v\rho z_0^2 + 3v_{z_0} r_s^2 \rho z_0 - 6\rho v r_s^2 + (16v^2 \rho^2 z_0^4 - 24v\rho^2 z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho^2 z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho^2 z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho^2 z_0 v + 36\rho^2 v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho p_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho p_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho p_1 - 18z_0^2 r_s^4 \rho p_0 + 18z_0^2 r_s^4 \rho p_1)^{1/2}), \quad (2.32)$$

і друге

$$A_1 = -\frac{1}{3} \frac{1}{z_0^3 r_s^2 \rho (2r^2 - r_s^2)} (4v\rho z_0^2 - 3v_{z_0} r_s^2 \rho z_0 + 6\rho v r_s^2 + (16v^2 \rho^2 z_0^4 - 24v\rho^2 z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho^2 z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho^2 z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho^2 z_0 v + 36\rho^2 v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho p_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho p_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho p_1 - 18z_0^2 r_s^4 \rho p_0 + 18z_0^2 r_s^4 \rho p_1)^{1/2}). \quad (2.33)$$

Значення коефіцієнта A_1 отримане рівнянням (2.33) не задовольняє фізичній моделі.

Знайшовши значення всіх коефіцієнтів можемо записати загальний вигляд залежностей радіальної та осьової складових швидкості витікання струменя.

$$\begin{aligned}
v_z = & \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{z_0^3 r_s^2 \cdot \rho (2r^2 - r_s^2)} \left[\left(-4v\rho \cdot z_0^2 + 3v_{z_0} \cdot r_s^2 \rho \cdot z_0 - 6\rho \cdot v \cdot r_s^2 + (16v^2 \rho^2 z_0^4 - \right. \right. \\
& -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 + \\
& \left. \left. + 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho \cdot P_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho \cdot P_1 - 18z_0^2 \rho \cdot r_s^4 P_0 + 18z_0^2 \rho r_s^4 P_1 \right)^{1/2} \right] r^2 z^2 \left] - \frac{1}{2} \times \right. \\
& \times \left(\left(\frac{1}{3} \frac{1}{z_0^6 \rho (2r^2 - r_s^2)^2} \left[\left(-4v\rho \cdot z_0^2 + 3v_{z_0} \cdot r_s^2 \rho \cdot z_0 - 6\rho \cdot v \cdot r_s^2 + (16v^2 \rho^2 z_0^4 - \right. \right. \right. \right. \\
& -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 + \\
& \left. \left. \left. + 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho \cdot P_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho \cdot P_1 - 18z_0^2 \rho \cdot r_s^4 P_0 + 18z_0^2 \rho r_s^4 P_1 \right)^{1/2} \right]^2 z^4 \right) + 6P_0 - \\
& - \frac{1}{z_0^3 (2r^2 - r_s^2)} \left(4 \cdot \left(-4v\rho \cdot z_0^2 + 3v_{z_0} \cdot r_s^2 \rho z_0 - 6\rho \cdot v \cdot r_s^2 + (16v^2 \rho^2 z_0^4 - \right. \right. \\
& -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 + \\
& \left. \left. + 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho \cdot P_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho \cdot P_1 - 18z_0^2 \rho \cdot r_s^4 P_0 + 18z_0^2 \rho r_s^4 P_1 \right)^{1/2} \right) \cdot z v \left. \right) - \\
& - \frac{8}{3} \frac{1}{z_0^3 r_s^2 (2r^2 - r_s^2)} \cdot \left(v \left(-4v\rho \cdot z_0^2 + 3v_{z_0} \cdot r_s^2 \rho z_0 - 6\rho \cdot v \cdot r_s^2 + (16v^2 \rho^2 z_0^4 - \right. \right. \\
& -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 + \\
& \left. \left. + 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho \cdot P_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho \cdot P_1 - 18z_0^2 \rho \cdot r_s^4 P_0 + 18z_0^2 \rho r_s^4 P_1 \right)^{1/2} \right) z^3 - 6P_1 \left. \right) z_0^3 \times \\
& \times (2r^2 - r_s^2) / \left(z^2 \left(-4v\rho \cdot z_0^2 + 3v_{z_0} \cdot r_s^2 \rho z_0 - 6\rho \cdot v \cdot r_s^2 + (16v^2 \rho^2 z_0^4 - 24v\rho^2 z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + \right. \right. \\
& \left. \left. + 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 \cdot P_0 - \right. \right. \\
& \left. \left. \left. - 36z_0^2 r^2 r_s^2 \rho \cdot P_1 - 18z_0^2 \rho \cdot r_s^4 P_0 + 18z_0^2 \rho r_s^4 P_1 \right)^{1/2} \right) \right) \left. \right) \quad (2.34)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_r = & \frac{1}{216} \frac{1}{\rho v z_0^6 r_s^4 (2r^2 - r_s^2)^2} \left(z r (288r^2 v^2 z_0^5 r_s^2 \rho - 144r^2 v^2 z_0^5 r_s^4 \rho + 432r^4 v^2 z_0^3 r_s^4 \rho - \right. \\
& -216r^2 v^2 z_0^3 r_s^6 \rho + 288z^2 v^2 z_0^5 r_s^4 \rho + 432z^2 v^2 z_0^3 r_s^6 \rho + 48z^3 r^4 v^2 \rho z_0^4 + 108z^3 r^4 \rho v^2 r_s^4 + \\
& + 64z^5 r_s^2 v^2 \rho z_0^4 + 192z^5 r_s^4 v^2 \rho z_0^2 + 36z^5 r_s^6 v_{z_0}^2 \rho z_0^2 + 128v^2 z^4 z_0^5 \rho r^2 - 64v^2 z^4 z_0^5 \rho r_s^2 - \\
& -96v^2 z^4 z_0^3 \rho r_s^4 + 36z P_0 z_0^6 r_s^6 - 36z P_1 z_0^6 r_s^6 + 72z^5 r_s^4 z_0^2 r^2 P_0 - 72z^5 r_s^4 z_0^2 r^2 P_1 + \\
& + 54z^3 r^6 z_0^2 r_s^2 P_0 - 54z^3 r^6 z_0^2 r_s^2 P_1 - 27z^3 r^4 z_0^2 r_s^4 P_0 + 27z^3 r^4 z_0^2 r_s^4 P_1 + 144z^5 r_s^6 \rho v^2 - \\
& -36z^5 r_s^6 z_0^2 P_0 + 36z^5 r_s^6 z_0^2 P_1 - 24z^5 r_s^4 v (\rho (16v^2 \rho z_0^4 - 24v\rho z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho z_0^2 r_s^2 + \\
& + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho z_0 v + 36\rho v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_1 - 18z_0^2 r_s^4 P_0 + \\
& + 18z_0^2 r_s^4 P_1))^{1/2} + 144z^2 v z_0^3 r_s^2 (\rho (16v^2 \rho z_0^4 - 24v\rho z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho z_0^2 - \\
& -36v_{z_0} r_s^4 \rho z_0 v + 36\rho v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_1 - 18z_0^2 r_s^4 P_0 + 18z_0^2 r_s^4 P_1))^{1/2} r^2 + \\
& + 9z^3 r^4 v_{z_0} r_s^2 z_0 (\rho (16v^2 \rho z_0^4 - 24v\rho z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho z_0 v + \\
& + 36\rho v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_1 - 18z_0^2 r_s^4 P_0 + 18z_0^2 r_s^4 P_1))^{1/2} - 72r^4 v z_0^3 r_s^2 (\rho \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times (16v^2 \rho z_0^4 - 24v\rho z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho z_0 v + 36\rho v^2 r_s^4 + \\
& + 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_1 - 18z_0^2 r_s^4 P_0 + 18z_0^2 r_s^4 P_1)^{1/2} + 36r^2 v z_0^3 r_s^4 (\rho(16v^2 \rho z_0^4 - \\
& - 24v\rho z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho z_0 v + 36\rho v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_0 - \\
& - 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_1 - 18z_0^2 r_s^4 P_0 + 18z_0^2 r_s^4 P_1))^{1/2} - 72z^2 v z_0^3 r_s^4 (\rho(16v^2 \rho z_0^4 - 24v\rho z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + \\
& + 48v^2 \rho z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho z_0 v + 36\rho v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_1 - \\
& - 18z_0^2 r_s^4 P_0 + 18z_0^2 r_s^4 P_1))^{1/2} - 12z^3 r^4 v z_0^2 (\rho(16v^2 \rho z_0^4 - 24v\rho z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho z_0^2 r_s^2 + \\
& + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho z_0 v + 36\rho v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_1 - 18z_0^2 r_s^4 P_0 + \\
& + 18z_0^2 r_s^4 P_1))^{1/2} - 18z^3 r^4 v r_s^2 (\rho(16v^2 \rho z_0^4 - 24v\rho z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho z_0^2 - \\
& - 36v_{z_0} r_s^4 \rho z_0 v + 36\rho v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_1 - 18z_0^2 r_s^4 P_0 + 18z_0^2 r_s^4 P_1))^{1/2} + \\
& + 12z^5 r_s^4 v_{z_0} z_0 (\rho(16v^2 \rho z_0^4 - 24v\rho z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho z_0 v + \\
& + 36\rho v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_1 - 18z_0^2 r_s^4 P_0 + 18z_0^2 r_s^4 P_1))^{1/2} - 32v z_0^3 z^4 \times \\
& \times (\rho(16v^2 \rho z_0^4 - 24v\rho z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho z_0 v + 36\rho v^2 r_s^4 + \\
& + 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_0 - 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_1 - 18z_0^2 r_s^4 P_0 + 18z_0^2 r_s^4 P_1))^{1/2} + 16v z_0^3 z^4 (\rho(16v^2 \rho z_0^4 - \\
& - 24v\rho z_0^3 v_{z_0} r_s^2 + 48v^2 \rho z_0^2 r_s^2 + 9v_{z_0}^2 r_s^4 \rho z_0^2 - 36v_{z_0} r_s^4 \rho z_0 v + 36\rho v^2 r_s^4 + 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_0 - \\
& - 36z_0^2 r^2 r_s^2 P_1 - 18z_0^2 r_s^4 P_0 + 18z_0^2 r_s^4 P_1))^{1/2} \cdot r_s^2 - 216r^4 v z_0^4 r_s^4 \rho v_{z_0} + 108r^2 v z_0^4 r_s^6 \rho v_{z_0} - \\
& - 576z^2 v^2 z_0^5 r_s^2 \rho r^2 - 216z^2 v z_0^4 r_s^6 \rho v_{z_0} - 864z^2 v^2 z_0^3 r_s^4 \rho r^2 + 144z^3 r^4 v^2 \rho z_0^2 r_s^2 + \\
& + 27z^3 r^4 v_{z_0}^2 r_s^4 \rho z_0^2 - 96z^5 r_s^4 v \rho z_0^3 v_{z_0} - 144z^5 r_s^6 v_{z_0} \rho z_0 v + 48v z^4 z_0^4 \rho v_{z_0} r_s^4 + \\
& + 192v^2 z^4 z_0^3 \rho r_s^2 r^2 + 144z P_0 z_0^6 r_s^2 r^4 - 144z P_0 z_0^6 r_s^4 r^2 - 144z P_1 z_0^6 r_s^2 r^4 + 144z P_1 z_0^6 r_s^4 r^2 + \\
& + 432z^2 v z_0^4 r_s^4 \rho v_{z_0} r^2 - 72z^3 r^4 v \rho z_0^3 v_{z_0} r_s^2 - 108z^3 r^4 v_{z_0} r_s^4 \rho z_0 v - 96v z^4 z_0^4 \rho v_{z_0} r_s^2 r^2). (2.35)
\end{aligned}$$

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 [78].

Проілюструємо отримані математичні залежності у вигляді графіків. Для цього, як приклад, розглянемо течію струменя води з отвору діаметром 1,1 мм. На графіку (рис. 2.11) зображено залежність радіальної складової швидкості від відстані від отвору. На малій відстані радіальна складова швидкості майже не виникає. Зі збільшенням відстані у струмені з'являються і розвиваються радіальні течії, які ведуть до розпаду струменів на краплі. На це вказує значне збільшення радіальної складової v_r , що може призвести до розпаду струменя на краплі. Це збігається з теорією інших авторів[74].

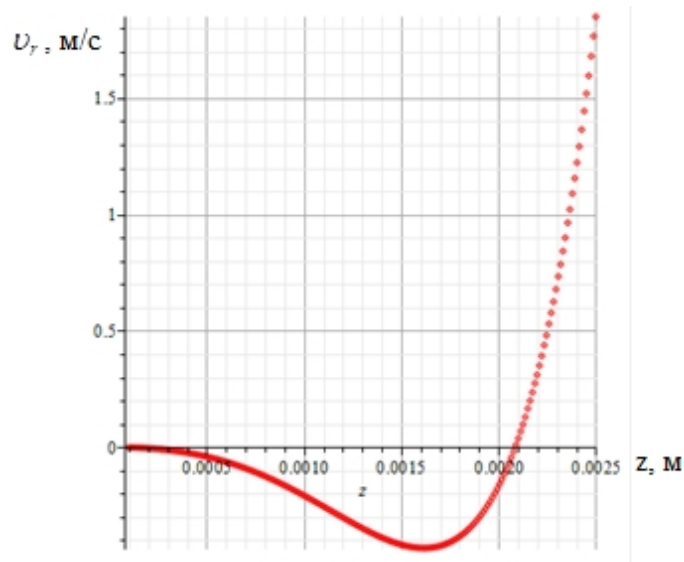


Рисунок 2.11 – Залежність зміни радіальної складової швидкості v_r від відстані вздовж осі z

Отриманий графік (рис. 2.11) в ході рішення характеризує кількісну зміну радіальної складової швидкості v_r вздовж осі z від моменту витікання струменя до його розпаду на краплі.

На рис. 2.12 зображена залежність радіальної складової швидкості v_r , розрахована для різних початкових швидкостей витікання струменя з отвору за залежністю (2.35). З рис. 2.12 бачимо, що зростання початкової швидкості витікання рідини з отвору в процесі диспергування призводить до зменшення відстані від отвору, на якій радіальна складова набуде критичного значення, при якому відбувається розпад струменя. Чим менша відстань від отвору витікання під час розпаду струменя, тим менша довжина частини струменя, що формує об'єм утвореної краплі під час розпаду струменя. Ця гіпотеза підтверджується експериментальними дослідженнями, а також збігається з результатами досліджень інших науковців [15, 22].

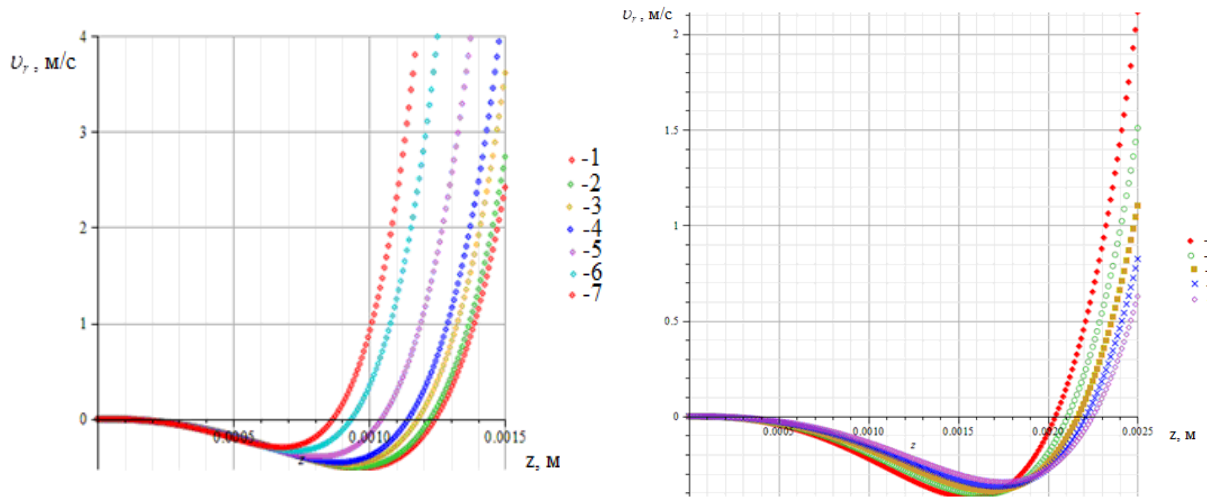


Рисунок 2.12 – Залежність зміни радіальної складової швидкості v_r від відстані вздовж осі z при V_{z0} : 1) 0,3 м/с; 2) 0,8 м/с; 3) 2 м/с; 4) 3 м/с; 5) 6 м/с; 6) 10 м/с; 7) 13 м/с

Рисунок 2.13 – Залежність зміни радіальної складової швидкості v_r від діаметру отвору d_{oms} : 1) 1 мм; 2) 1,1 мм; 3) 1,2 мм; 4) 1,3 мм; 5) 1,4мм

На рис. 2.13 зображена залежність радіальної складової швидкості v_r , розрахована для різних діаметрів отворів витікання рідин за залежністю (2.35). З рис. 2.13 видно, що зі зростанням діаметру отвору зростає діаметр утвореної краплі (методика розрахунку див. розділ 4).

2.4 Розповсюдження вимушених коливань тиску у зоні формування крапель віброгранулятора

Іншою представляється картина розпаду струменя рідини на краплі, якщо початкові збурення на її поверхні обумовлені стороннім джерелом коливань постійної частоти. При накладенні регулярних збурень струмінь рідини розпадається на краплі однакового розміру без утворення крапель супутників, якщо довжина λ утворених хвиль буде більше πD_j [13]. За таких умов відбувається зростання в часі амплітуди поверхневих хвиль, які виникають на поверхні струменя рідини.

Зі сказаного вище бачимо, що задаючись частотою коливань f , можемо впливати на закон зміни $P = f(\tau)$, та регулювати середній діаметр і діапазон монодисперсності одержаних крапель розплаву при вимушеному розпаді струменя.

Для розв'язання задачі, метою якої є з'ясування, як надалі відбувається розповсюдження коливань та змінюється значення тиску вздовж струменя розплаву, що витікає з отвору перфорованого днища, - можна скористатися рівняннями (2.5) – (2.7).

Зробимо математичне перетворення рівнянь (2.5)–(2.7).

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0, \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right], \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} \right]. \quad (2.38)$$

Використовуючи для розв'язання системи рівнянь (2.36) – (2.38) метод розділення змінних сумою [76], отримаємо наступне рішення:

$$\begin{cases} P = C_{12} + \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + C_{11} + F(\tau); \\ v_r = \frac{C_2}{r} + C_3 r; \\ v_z = C_6 + C_7 \ln(r) + C_8 r^2 - 2C_3 z + C_5 + C_9 \tau + C_{10}, \end{cases} \quad (2.40)$$

де C_i - константи рівнянь.

У першому рівнянні для визначення закону зміни тиску вздовж струменя входить функція $F(\tau)$, яка залежить від часу. Вид цієї функції

можна визначити з граничних умов, вважаючи, що початок координат поєднано з центром отвору, з якого відбувається витікання розплаву. Тоді при $z = 0$:

$$P = \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + P_1(\tau). \quad (2.41)$$

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

$$P_1 = a \sin(\omega\tau + c) + d, \quad (2.42)$$

де, a - амплітуда коливань; ω - кругова частота коливань, τ - 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. 2.15, зображено як змінюється величина тиску вздовж струменя до його розпаду на краплі у разі витікання рідини (аміачної селітри) з отвору діаметром 1,1 мм, при досягненні початкової амплітуди коливань зі значенням $a=100$ мкм у перетині отвору. Аналіз отриманих результатів (рис. 2.15) показує, що по досягненню 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 (розплаву).

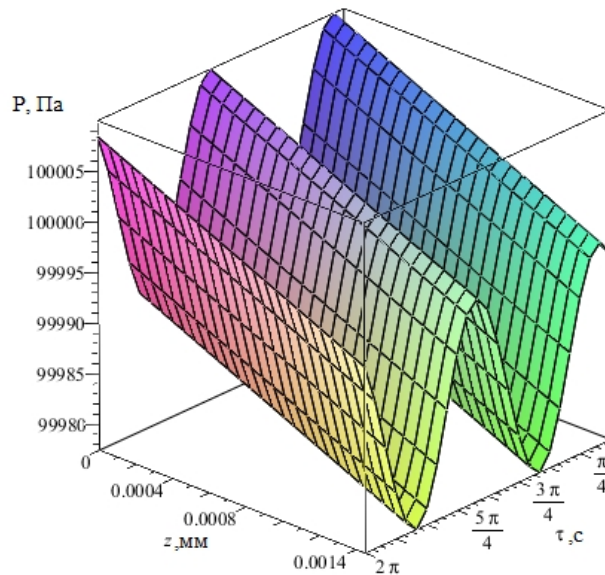


Рисунок 2.15 – Зміна тиску вздовж струменя з часом

2.5 Висновки до другого розділу

1. Розроблена фізична модель витікання струменя рідини з отвору з тонкою стінкою і розпад її на краплі дозволяє оцінити вплив гідромеханічних параметрів роботи апарату на характер розповсюдження збурень на поверхні струменю.

2. На підставі розв'язання класичних рівнянь гідродинаміки отримано залежності складових повної швидкості витікання рідини з отвору при умовах свавільного розпаду від розмірів отвору і фізико-хімічних властивостей розплаву.

3. На підставі розв'язання класичних рівнянь гідродинаміки отримано залежність зміни тиску вздовж струменю до його розпаду на краплі, у разі витікання розплаву з отвору з накладанням на нього вимушених коливань від гідромеханічних показників апарату.

4. Створено математичну модель процесу диспергування рідини методом вимушеного розпаду струменя, яка дозволяє оцінити та спрогнозувати вплив дії різних параметрів на режим монодисперсного розпаду струменя.

5. Чисельне дослідження дозволило уточнити (відкоригувати) розрахунок швидкості витікання струменя розплаву та знайти спосіб підвищення швидкості витікання (напору) розплаву з отворів кошика гранулятора за рахунок модернізації конструкції обертового вібраційного гранулятора: збільшення кількості лопатей або підібрати геометричну форму лопатей, в залежності від робочих параметрів роботи гранулятора. Зі збільшенням напору зменшується ймовірність забивання та зміни геометричних розмірів отворів витікання. Це дає можливість використовувати гранулятор для диспергування розплавів з твердими домішками (добавками).

Основні завдання досліджень та їх результати опубліковані в працях [69, 78, 79].

РОЗДІЛ 3

ОПИС СТЕНДІВ ТА МЕТОДІВ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Дослідження гідродинамічних характеристик процесу диспергування струменя і вплив на них гідромеханічних параметрів вібраційного обладнання проводилося на двох експериментальних установках. На першій установці проводилися дослідження та вивчення процесу диспергування монодисперсних гранул, виявлення впливу швидкості та фізико-хімічних властивостей рідини, діаметру отворів витікання рідини. На другій установці проводилися дослідження та вивчення впливу швидкості витікання рідини та параметрів вимушеного сигналу, який накладається на струмінь, на режими вимушеного розпаду струменя, що витікає з отвору.

3.1 Будова експериментальних установок

Для проведення першого етапу досліджень з вивчення диспергування рідини з отриманням монодисперсних крапель та гранул було спроектовано і виготовлено експериментальну установку, принципова схема якої представлена на рис. 3.1 [80].

Розплав агар-агару наливається (подається) в ємність 1, навколо якої обмотано тен 2, який підігріває ємність 1, та розплав, щоб не застиг. Система регулювання температури 10 контролює та змінює температуру нагріву розплаву агар-агару. Диспергуюча рідина витікає через змінну філь'єру 3 і розпадається на краплі в повітрі. Далі краплі потрапляють в ємність, в якій під дією гідростатичного тиску інертне середовище (масло) перетікає з однієї частини U-подібної ємності 4 в іншу, разом з цим переміщує з собою гранули агар-агару. За цей час відбувається кристалізація та охолодження гранул. U-подібної ємність 4 виготовлена зі скла, що дозволяє спостерігати за рухом гранули (краплі) в інертному середовищі. Самопливом інертне середовище

разом з гранулами, що сформувалися, переміщається до збірника гранул 5, який в верхній частині містить перфоровану перегородку. Потрапляючи на неї, гранули залишаються на поверхні, а інертне середовище через отвори потрапляє до нижньої частини, завдяки чому відбувається розділення гранул. Насосом 6 інертне середовище, яке збирається в збірнику гранул 5 перекачується до верхньої частини U- подібної ємності 4.

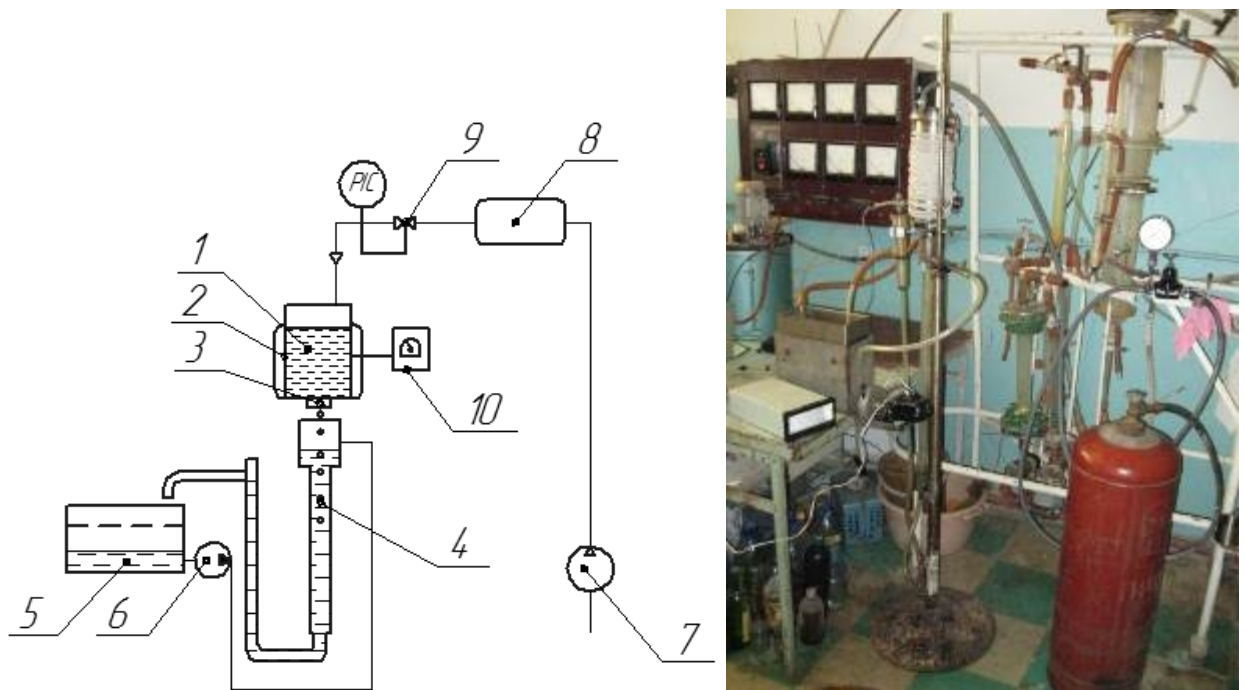


Рисунок 3.1 – Принципова схема лабораторної установки першого етапу досліджень: 1 – ємність; 2 – тен; 3- змінна фільтера; 4 – U-подібної ємність; 5 – збірник гранул; 6 – насос; 7 – компресор; 8 – система надлишкового тиску; 9 – стабілізатор тиску; 10 – система регулювання температури

Повітря з навколишнього середовища спрямовується до компресора 7 де відбувається його стиснення. Далі стиснуте повітря по гнучкому шлангу направляєтся до системи надлишкового тиску 8, де гасяться пульсації та вирівнюється тиск. Стиснутий потік повітря, що вирівняли в системі надлишкового тиску 8 по гнучкому шлангу транспортується до верхньої частини ємності 1, де на поверхні розплаву агар-агару створюється надлишковий тиск. За допомогою стабілізатору тиску 9 контролюємо та

регулюємо надлишковий тиск в ємності 1, що в свою чергу дає можливість змінювати швидкість витікання диспергуючої рідини.

На другому етапі досліджували гідродинамічні параметри процесу витікання рідини з накладанням вимушених коливань на струмінь з вертикально розташованого циліндричного резервуару, які проводилися на поодинокому отворі в тонкій стінці. Схема експериментальної установки наведена на рис. 3.2.

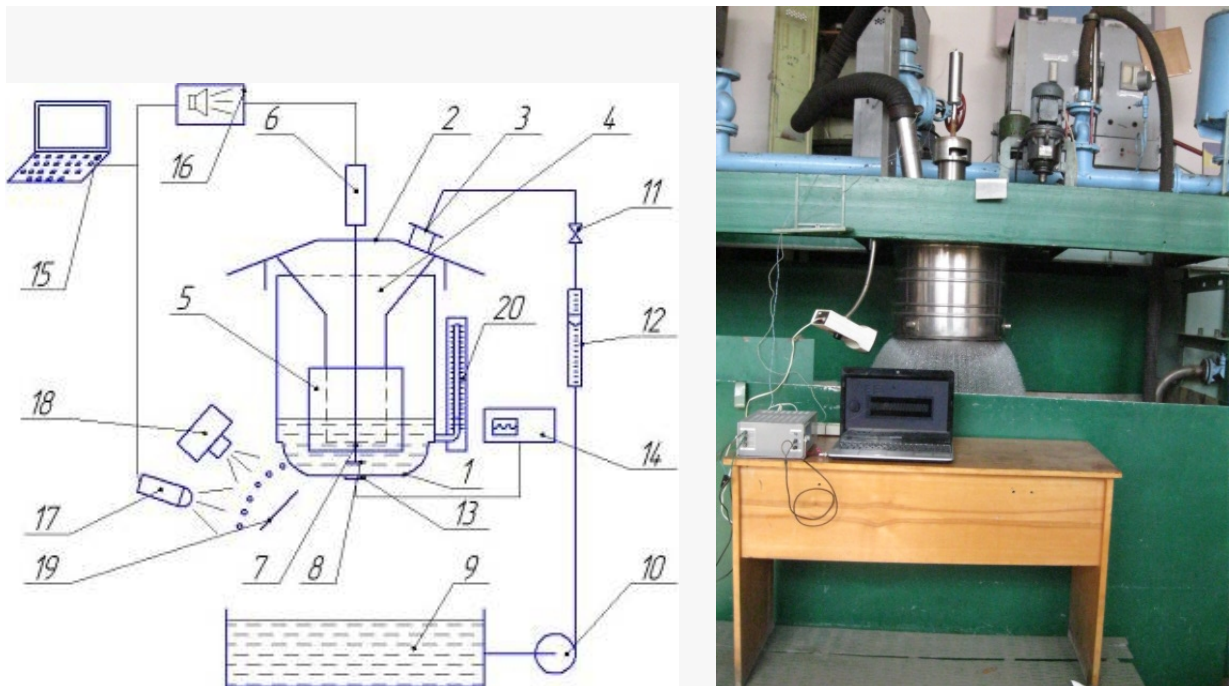


Рисунок 3.2 – Експериментальний стенд вібраційного гранулятора: 1 – змінне перфороване днище (кошик); 2 – корпус; 3 – патрубок; 4 – колектор; 5 – фільтрувальний елемент; 6 – електромагнітний вібратор; 7 – шток; 8 – резонатор (диск); 9 – буферна ємність; 10 – насос; 11 – вентиль; 12 – ротаметр; 13 – датчик коливань; 14 – осцилограф; 15 – комп'ютер; 16 – підсилювач низьких частот; 17 – стробоскоп; 18 – фотокамера; 19 – екран зі шкалою; 20 – вимірювач рівня

Рідина з нижньої частини буферної ємності 9 за рахунок створюваного розрідження насосом 10 всмоктується до гнучкого трубопроводу і подається до верхньої частини вібраційного гранулятора в патрубок 3. Витрати рідини

контролюються ротаметром 12, та регулюється вентилем 11. Рідина по патрубку 3 подається в кільцевий колектор 4. Після чого робоча рідина рівномірно проходить скрізь фільтруючий елемент 5, який складається з перфорованого циліндра. Проходячи крізь його, з об'єму рідини звільнюються бульбашки повітря. Фільтруюча сітка закріплена на перфорованому циліндрі для запобігання забивання отворів витікання в кошику 1. Далі рідина прямує до перфорованого днища 1 та поступово заповнює його об'єм, рівень заповнення контролюється вимірювачем рівня 20. Під дією напору, створеного рівнем рідини в кошику, вона витікає з усіх отворів перфорованого днища 1. Далі ввімкненням програми з комп'ютера 15, за допомогою якої генерується сигнал, після проходження підсилювача низької частоти 16 електромагнітний вібратор 6 через шток 7 приводить резонатор 8 у коливальний рух з певною частотою. Диск-випромінювач розташовують над центральною частиною внутрішньої поверхні перфорованого днища з зазором відносно неї. Зазор забезпечує надійний гідродинамічний зв'язок диска-випромінювача і центральної частини перфорованого днища. При накладенні вібрації диск-випромінювач здійснює зворотно-поступальний рух. Хвилі коливань, які виникли за рахунок вібрації диска-випромінювача, поширюються у вигляді пружних деформацій у розплаві та передаються на перфороване днище. В результаті на струмені розплаву, які витікають з отворів, накладаються регулярні збурення у вигляді звужень та стовщень, що приводить до їх розпаду в місцях звужень на краплі. Частота, з якою коливається перфороване днище – кошик, фіксується за допомогою осцилографа 14, що з'єднаний з датчиком коливань 13 кошика гранулятора.

Для спостереження за розпадом струменів на краплі та візуального визначення режиму розпаду струменя використовується стробоскоп 17, на який подається сигнал з комп'ютера, такий же, що направляється на електромагнітний вібратор гранулятора. Тобто обидва сигнали синхронізовані. Під струменем, що витікає з перфорованого днища

гранулятора розміщено екран 19 зі змінними шкалами (з різним градуванням), який дозволяє визначати довжину струменя, що не розпався та діаметр крапель, утворених після розпаду струменя, і відстань між ними. Фотокамера 18, яка розташована над струменем та екраном зі шкалою, дозволяє фіксувати режими розпаду струменя на краплі.

Контроль зміни технологічних характеристик процесу диспергування відбувається при використанні стандартних засобів контролю параметрів процесу (витрати, частота сигналу та ін.), візуальному спостереженні за перебігом різних режимів процесу диспергування, сучасними цифровими засобами, що дає можливість якісно та кількісно виявити вплив зміни технологічних характеристик у процесі експерименту.

3.2 Контроль та вимірювання технологічних параметрів процесу

Ряд досліджень гідромеханічних показників пристроїв для отримання монодисперсних крапель та гранул здійснено на модельній установці вібраційного гранулятора в складі експериментальної схеми (рис. 3.2).

Порядок проведення експерименту:

- дослідження гідродинамічних характеристик рідини, що витікає з отворів кошика ;
- дослідження механічних показників пристрою для отримання монодисперсних крапель

Схема контрольних параметрів подана на рис. 3.1–3.2

Витрата рідини, що потрапляла до вібраційного гранулятора з буферної ємності за допомогою насосу вимірювалася за допомогою ротаметра РМ-VI. Основна допустима похибка вимірювання становить $\pm 2,5\%$. Зміна витрати робочої рідини здійснюється за допомогою трубопровідної арматури у вигляді вентиля, що розміщений за насосом.

Рівень рідини в об'ємі вібраційного гранулятора визначається за допомогою показникового вимірювача рівня. Похибка вимірювання

становить 2 мм.

Характер зміни швидкості витікання рідини з одиночного отвору при різних рівнях рідини в об'ємі вібраційного гранулятора досліджувався за допомогою вимірювання мірним циліндром витрати рідини через одиночний отвір в кошику гранулятора за час t . Похибка вимірювання становить 2 %.

Швидкість витікання рідини з отвору кошика гранулятора:

$$v = \frac{Q_c}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2 t}, \quad (3.1)$$

де Q_c – об'ємна витрата рідини крізь отвір кошика гранулятора за секунду,

$Q_c = \frac{Q}{t} = \left[\frac{m^3}{c} \right]$; Q – об'ємні витрати рідини, заміряні мірним циліндром за

час t ; S - площа перетину отвору витікання, $S = \frac{\pi d^2}{4} = [m^2]$; d – діаметр

отвору витікання, мм.

Перед проведенням дослідницьких експериментів все обладнання, яким проводилися заміри, пройшло тарування.

Керувати видом сигналу (синус, пила, трикутник), задавати частоту та амплітуду ,а також регулювати потужність сигналу, що подається на актуатор (вібраційний пристрій) після підсилювачу низької частоти здійснюється за допомогою написаної програми для комп'ютера. Параметри задаються з клавіатури та відображаються на моніторі (рис. 3.3).

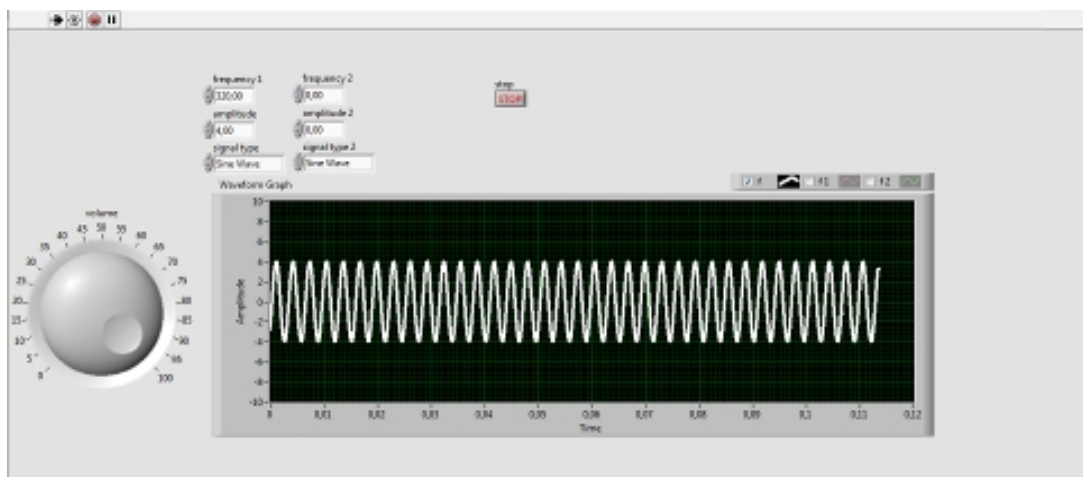


Рисунок 3.3 – Робоче вікно програми

Перед підключенням комп'ютера та актуатора (вібраційного пристрою) до експериментального стенду, було проведено перевірку дійсного значення вихідного сигналу на осцилографі. Похибка вимірювання становить 0,5–2 Гц.

Частота коливань, яку набуває перфороване днище гранулятора контролюється за допомогою набору приладів: датчика коливань та осцилографа GDS-820S.

Для аналізу експерименту з впливу гідромеханічних показників вібраційного гранулятора на формування монодисперсних крапель отримано високоякісні фотоматеріали, на яких зафіксовано зображення утворених крапель в залежності від режиму роботи гранулятора на фоні градаційної лінійки зі шкалою однієї поділки, що становить 250 мкм. Це дає можливість визначити діаметр крапель. Похибка вимірювання становить ± 62 мкм. Методика проведення замірів та їх опис виконано згідно з рекомендаціями [72].

3.3 Методика обробки результатів експериментальних досліджень

Для встановлення ступеню точності оцінки вимірювальних гідромеханічних показників вібраційного гранулятора під час експериментальних досліджень були враховані вимірювальні похибки [81].

Рекомендації для статичної обробки та узагальнення результатів [82–85] дозволили визначити оптимальну кількість дослідів та оброку отриманих результатів з високою точністю. Для виявлення близького до істинного значення параметрів, отриманих під час дослідів, використовувалось середнє арифметичне значення цих результатів [83]. Під час проведення досліджень виникають систематичні та випадкові похибки вимірювання, які спотворюють дійсні значення вимірів [84]. Для усунення випадкової помилки використовували середньоквадратичне відхилення (дисперсію) [85]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y_q - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (3.2)$$

де y_q - результат окремого досліджу, \bar{y} - середнє арифметичне значення; $n-1$ - число ступенів вільності.

Систематичні похибки компенсуються урахуванням похибок вимірювальних приладів та інструментів. Для визначення помилки такого типу всі прилади, що були використані в ході дослідження в умовах проходження експерименту, пройшли тарування за допомогою зразкових приладів.

3.4 Результати експериментальних досліджень

Під час досліджень змінними параметрами сигналу були: частота сигналу змінювалася в діапазоні 200–1500 Гц, амплітуда 4,4 і 10,4 В (що відповідає 43 та 100 мкм відповідно). Отримані фотографії під час досліджень були проаналізовані пакетом прикладних програм для розв'язання задач технічних обчислень MATLAB (Matrix Laboratory), що дало можливість визначити розміри крапель, відстань між ними й інші геометричні параметри [86, 87].

Умови проведення випробування: рівень рідини в корпусі гранулятору 280 мм, амплітуда 4,4 В (при середньоквадратичному відхиленні виміру $SD=0,031$ мм).

Починаючи з частоти вимушеного сигналу 240 Гц розпад струменя відбувається з утворенням основної краплі спільно з сателітом (рис. 3.4 а). Розмір краплі і супутника не сильно відрізняються один від одного ($r_k=1,038$ мм, $r_c=0,922$ мм). Причому, спочатку після розпаду струменя, краплі рухаються групами - основна крапля і сателіт, відстань між якими сумірна в одиницях мікрон. Така відстань між ними забезпечується поверхневими

силами які утворюються за рахунок перетяжки між ними. А відстань між групами крапель становить 3,803 мм. При подальшому русі крапель відстань між основною краплею і сателітом збільшується, відбувається розрив перетяжки і утворюється новий сателіт розмір якого становить $r_{с.м.}=0,188$ мм, при цьому змінюються розміри основної краплі ($r_k=0,936$ мм) і основного сателіта ($r_c=0,836$ мм). Відстань між основною краплею і основним сателітом становить в середньому близько 2,097 мм.

При досягненні значення частоти 500 Гц встановлюється монодисперсний режим розпаду струменя на краплі, які спочатку мають овальну форму. Радіус краплі $r_k=0,904$ мм. Режим монодисперсного розпаду триває до частоти 520 Гц (рис. 3.4 б).

При подальшому збільшенні частоти відбувається полідисперсний розпад струменя. Починаючи з частоти близько 800 Гц відбувається розпил струменя: утворення полідисперсних великих крапель і безлічі дрібних (рис. 3.4 в).

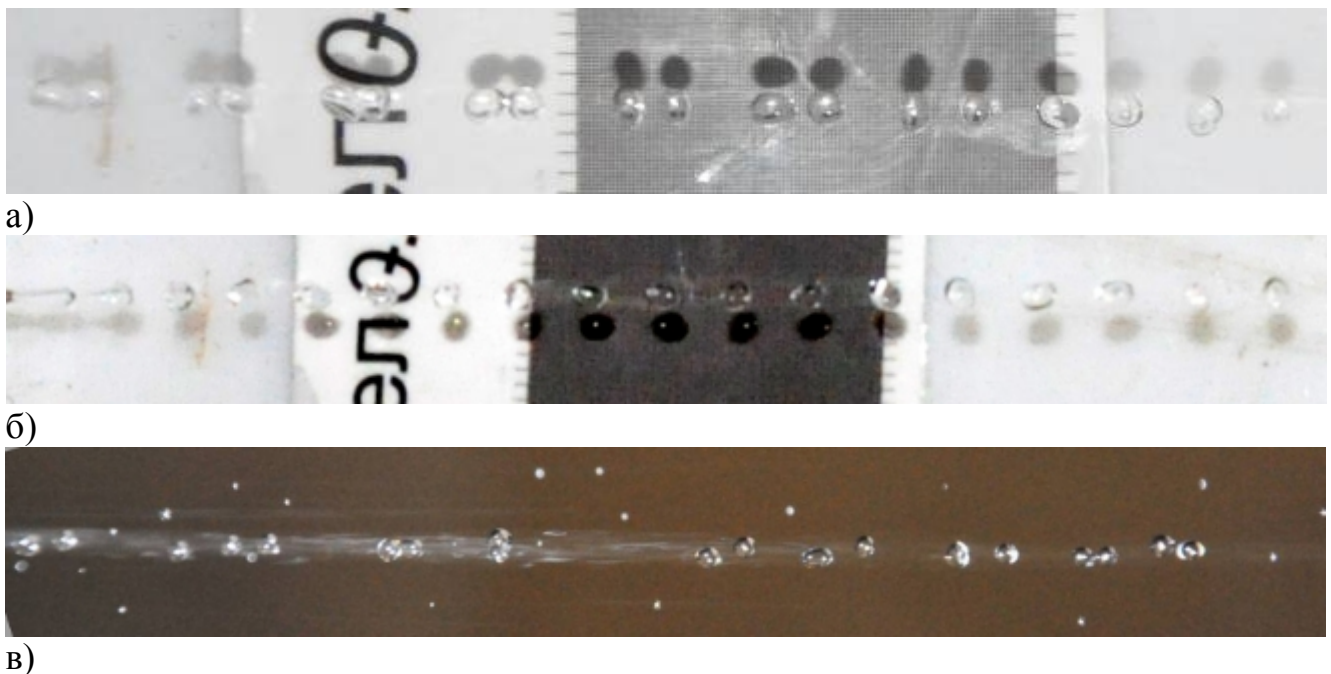
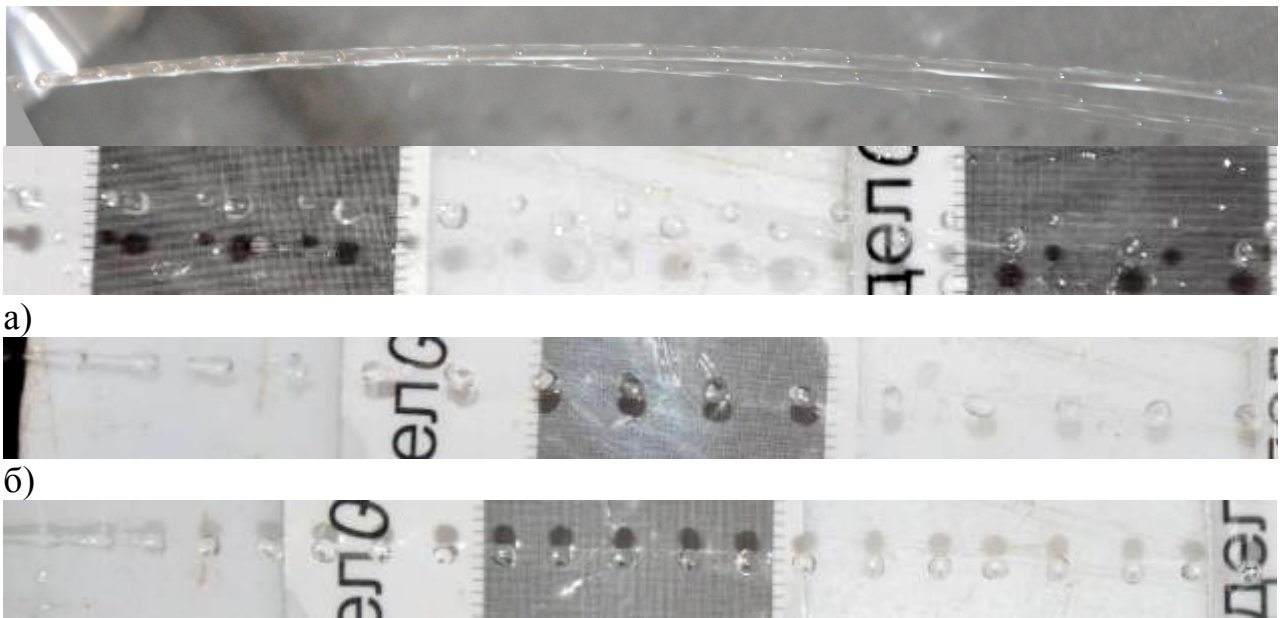


Рисунок 3.4 – Режими розпаду струменя при вимушених збуреннях з рівнем рідини в корпусі гранулятора 280 мм і амплітудою 4,4 В при частоті сигналу: а) 240 Гц; б) 500 Гц; в) 800 Гц

Умови проведення випробування: рівень 280 мм, амплітуда 10,6 В (при середньоквадратичному відхиленні виміру $SD = 0,027$ мм).

При частоті збурюючого сигналу 220 Гц струмінь після витікання з отвору розділяється на дві частини (рис. 3.5 а), з утворенням в одному струмені основних крапель розміром $r_k=1,044$ мм, а в іншому струмені утворюються сателіти розміром $r_c=0,703$ мм. Середня відстань між краплями сателітів становить 6,700 мм, а між основними краплями – 6,552 мм. При частоті в діапазоні 245-260 Гц відбувається розпад струменя з утворенням грушоподібної краплі довжиною 5,952 мм.



а)

Рисунок 3.5 – Режими розпаду струменя при вимушених збуреннях з рівнем рідини в корпусі гранулятора 280 мм і амплітудою 10,6 В при частоті сигналу: а) 220 Гц; б) 245 Гц; в) 370 Гц

На відстані 21,883 мм від отвору витікання хвіст краплі зменшується з утворенням сателіта. На відстані 44,73 мм основна крапля наздоганяє сателіт і вони об'єднуються в одну краплю. Утворюється монодисперсний потік крапель з постійними когерентними характеристиками. Радіус монодисперсних крапель $r_k=1,125$ мм (рис. 3.5 б) [88]. При частоті 370-380 Гц розпад струменя відбувається з утворенням основних крапель розміром

$r_k=0,981$ мм і сателітів радіусом $r_c=0,267$ мм. При подальшому русі основна крапля доганяє сателіт і відбувається об'єднання в одну краплю з радіусом $r_k=0,988$ мм. Відстань між об'єднаними краплями 3,332 мм (рис. 3.5 в). В діапазоні частот 440-460 Гц при розпаді струменя на краплі відбувається утворення сателітів без подальшого їх об'єднання.

При частотах 500-520 Гц спостерігається монодисперсний розпад струменя на краплі радіусом $r_k=0,903$ мм без утворення сателітів.

Умови проведення випробування: рівень 380 мм, амплітуда 4,4 В (при середньоквадратичному відхиленні виміру $SD = 0,031$ мм)

При параметрах сигналу починаючи з 380 Гц спостерігалися хвилеподібні збурення на поверхні струменя з чітко вираженими зонами розширення та звуження. Ділянка звуження має довгасту форму, що при подальшому розвитку на поверхні струменя збурень призводить до утворення супутників (рис. 3.6). Як видно з рис. 3.6, довгаста ділянка при розпаді струменя утворює перетяжку довжиною 3,361 мм. За рахунок поверхневих сил натягу "хвіст" краплі зменшується, при цьому утворюється перетяжка вже між основною краплею і сателітом що утворюється. В результаті утворюється крапля радіусом $r_k=0,977$ мм і сателіт радіусом $r_c=0,302$ мм.

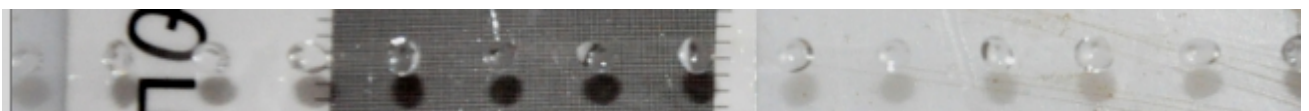


Рисунок 3.6 – Режим розпаду струменя при вимушених збуреннях з рівнем рідини в корпусі гранулятора 380 мм і амплітудою 4,4 В при частоті сигналу 380 Гц

В діапазоні частот 460–560 Гц ($SD=0,049$ мм) спостерігається монодисперсний розпад струменя з радіусом крапель $r_k=1,108$ мм. При подальшому збільшенні частоти настає полідисперсний розпад з утворенням сателітів

Умови проведення випробування: рівень 380 мм, амплітуда 10,6 В (при середньоквадратичному відхиленні виміру $SD=0,042$ мм).

В діапазоні частот 235-240 Гц відбувався нестабільний монодисперсний розпад струменя. Краплі утворюються овальні, періодично спостерігається утворення сателітів. Середній радіус краплі $r_k=1,297$ мм (рис. 3.7 а). При збільшенні частоти вимушеного сигналу вище 240 Гц вузька ділянку струменя стає довше широкої ділянки ($l_1/l_2=2,588$) і, після її розпаду крапля набуває «ложкоподібної» форми, в якій добре видно область основної краплі, звужену ділянку - "шийку", і довгасту ділянку. При подальшій еволюції краплі, що утворилася, відбувається розпад її на ділянці шийки і виникають нові дві краплі: основна $r_k=1,122$ мм і сателіт $r_c=0,750$ мм, які рухаються разом на відстані 1,203мм один від одної, утворюючи групу (пакет) крапель (рис. 3.7 б). При досягненні частоти 380 Гц спостерігається монодисперсний розпад (рис. 3.7 в) до частоти 390 Гц. Радіус крапель $r_k=1,181$ мм відстань між краплями 4,344 мм.



а)



б)



в)

Рисунок 3.7 – Режимы розпаду струменя при вимушених збуреннях з рівнем рідини в корпусі гранулятора 380 мм і амплітудою 4,4 В при частоті сигналу:

а) 235 Гц; б) 240 Гц; в) 380 Гц.

При частоті понад 390 Гц спостерігається нестабільний розпад струменя з утворенням сателітів. В діапазоні частот 440–480 Гц також був отриманий монодисперсний розпад струменя на краплі радіусом $r_k=1,163$ мм. Відстань між краплями 4,307 мм. При частоті 570–590 Гц монодисперсний розпад струменя відбувався з утворенням овальних крапель. Радіус утворюючих крапель $r_k=0,996$ мм відстань між краплями 2,277 мм.

Умови проведення випробування: рівень 490 амплітуда 4,4 В (при середньоквадратичному відхиленні виміру $SD = 0,038$ мм).

При частоті 250 Гц розпад струменя відбувається з утворенням краплі пестікоподібної форми, добре спостерігається основна частина, перешийок і стовпчик. Подальша еволюція даної краплі під дією сил поверхневого натягу призводить до розпаду її на 2 частини, які через деяку відстань коагулюють в одну (рис. 3.8 а).

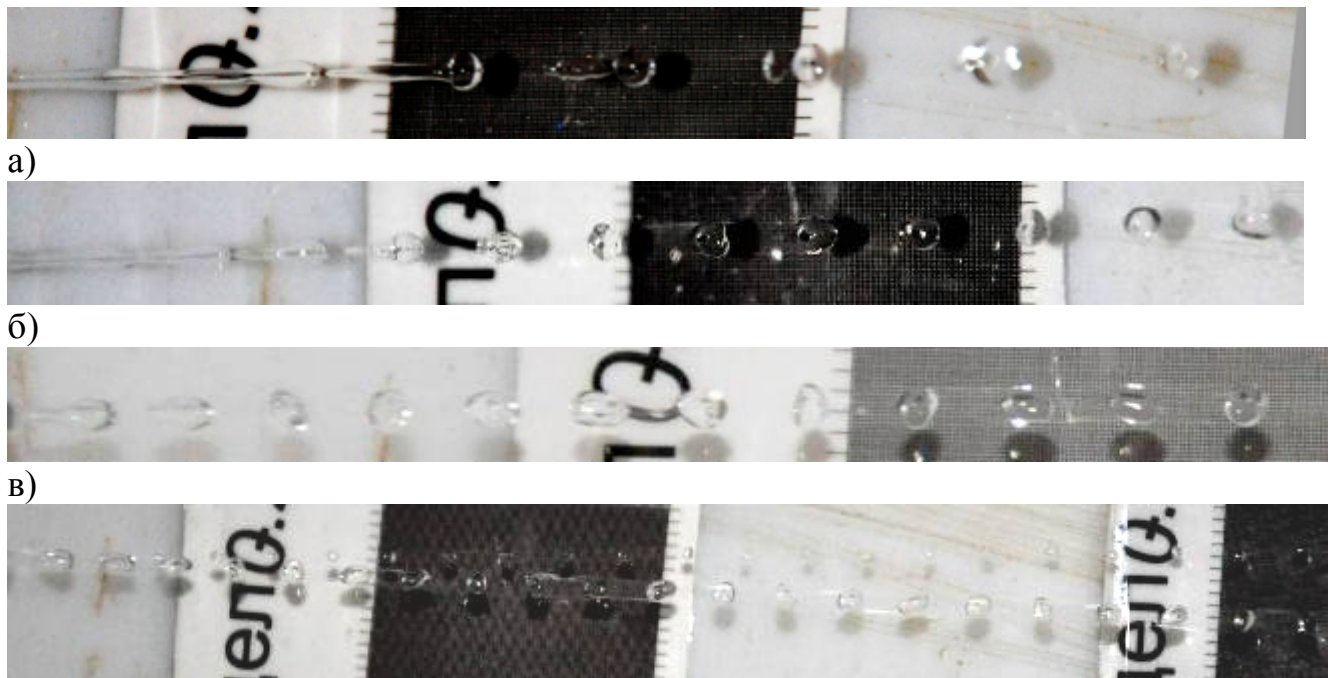


Рисунок 3.8 – Режими розпаду струменя при вимушених збуреннях з рівнем рідини в корпусі гранулятора 490 мм і амплітудою 4,4 В при частоті сигналу: а) 250 Гц; б) 400 Гц; в) 460 Гц; г) 500 Гц.

Розмір основного сателіта $r_c=0,809$ мм, розмір основної краплі $r_k=1,138$ мм. Після об'єднання крапля мала розмір $r_k=1,353$ мм. Відстань між

краплями 8,297 мм. При частоті 400–430 Гц відбувається монодисперсний розпад струменя. Під час розпаду струменя утворюється крапля несферичної форми (рис. 3.8 б), яка під дією капілярних сил втягується всередину краплі. Після формування крапля мала розмір $r_k = 1,155$ мм. Відстань між краплями 4,346 мм. В діапазоні 430–460 Гц спостерігається порушення монодисперсного розпаду струменя, з'являються сателіти.

Починаючи з 460 Гц і до 500 Гц спостерігається монодисперсний розпад струменя (рис. 3.8 в). Краплі спочатку мають овальну форму, яка під дією поверхневого натягу набуває сферичну форму з радіусом $r_k = 1,125$ мм. Відстань між краплями 3,028 мм. При частотах 500–505 Гц відбувається поділ струменя на два потоки під кутом $3^{\circ}08'$. Розмір сателітів $r_c = 0,490$ мм, відстань між ними 4,080 мм. Основна крапля овальна, радіус її складає $r_k = 1,074$ мм. Відстань між краплями 3,286 мм (рис. 3.8 г). Починаючи з частоти 750 Гц і до 1500 Гц відбувається полідисперсний розпил струменя.

3.5 Висновки до розділу

1. Результати експериментів показують, що вплив різної величини імпульсу на струмені рідини призводить до зміни режиму її розпаду і діаметра одержуваних крапель. Це вказує на необхідність врахування зазначеного частотного впливу при використанні в розрахунках.

2. Установлено константи системи рівнянь (2.43), що дає можливість проводити розрахунки параметрів вимушеного сигналу для отримання монодисперсного продукту з заданими розмірами.

3. Установлено характер розповсюдження збурень, які виникають на поверхні струменя при накладанні вимушених коливань залежно від параметрів сигналу що надходить з вібратора.

4. Досліджено та отримано максимально ефективне значення частоти та амплітуди сигналу в залежності від рівня розплаву в корпусі гранулятора для створення монодисперсного розпаду струменів на краплі.

5. Проведені дослідження підтверджують можливість створення грануляторів розплаву азотних добрив, які дозволять отримувати гранули в вузькому фракційному діапазоні, при максимальній кількості частинок, розмір яких може охолотитися в цій башті; забезпечити можливість регулювати розмір крапель в залежності від температури подаваного в башту хладоагента. В результаті цього, теплове навантаження на башту буде близькою до оптимальної, що дозволяє зменшити налипання частинок на робочих поверхнях башти, і, як результат, скоротити витрати енергоносіїв на переробку некондиційного продукту і знизити викиди пилу азотних добрив в атмосферу, а також поліпшити екологічну ситуацію в районі виробництва.

Основні завдання досліджень та їх результати опубліковані в працях [88-93].

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Зіставлення результатів експерименту та моделювання процесу диспергування розплаву.

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

Для аналізу отриманих результатів був обраний діапазон крапель 2–2,5 мм, відповідно до основних потреб розміру готового продукту (мінеральних добрив) підприємств та ГОСТ 2-85.

Проведено розрахунок діаметра краплі, що утворюється під час розпаду струменя, на прикладі розпаду струменя 1 % розчину агар-агару, властивості якого при температурі 95 °С близькі до властивостей аміачної селітри при виробничих умовах. Початкова швидкість витікання розчину становила 1 м/с з отвору діаметром 1,1 мм. Для дослідження процесу розпаду струменя був обраний 1 % розчин агар-агару, оскільки при охолодженні до температури 35–40 °С він стає твердим гелем, що зручно для аналізу отриманих результатів під час дослідження.

Було зроблене припущення, що наявність значної величини радіальної складової швидкості призводить до порушення цілісності струменя. За допомогою рівняння (2.35), задаючись величиною радіальної складової швидкості, можна визначити передбачуваний перетин розриву струменя. Осьову складову швидкості рідини струменя в цьому перетині можна визначити за рівнянням (2.34).

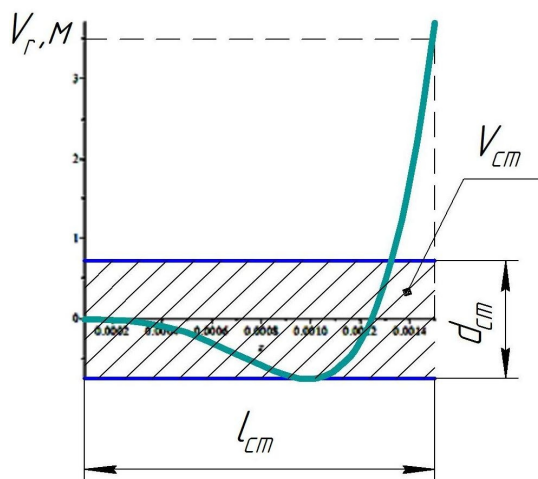
За початковими даними та за допомогою рівняння (2.35) побудовано графік зміни радіальної складової швидкості v_r відстані від отвору витікання

вздовж осі z до критичного перерізу (рис. 4.1 а). Припускали, що заштрихована область утворює об'єм циліндричної частини струменя (рис. 4.1 а), що формує об'єм краплі. Вважали, що процес розпаду струменя регулярний, тоді, застосувавши на цьому контрольному об'ємі рівняння балансу маси, тобто деякий об'єм циліндричної частини, струменя дорівнюватиме об'єму утвореної краплі:

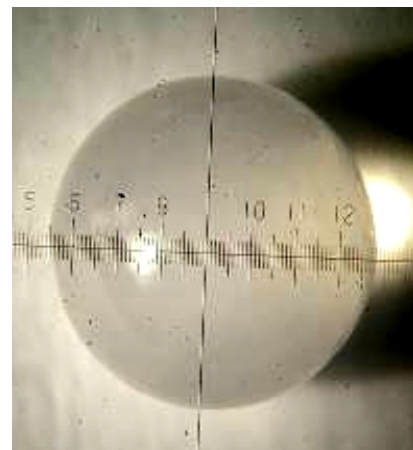
$$V_{cm} = \frac{\pi \cdot D_j^2}{4} \cdot l_{cm} = V_{кр} = \frac{\pi d_{кр}^3}{6}, \quad (4.1)$$

де D_j – діаметр струменя; $d_{кр}$ – діаметр утвореної краплі.

Для розрахунку об'єму циліндричної частини струменя $V_{ст}$ визначили довжину частини струменя l_{cm} , що формує об'єм краплі. Припускали, що при досягненні критичного значення швидкості $v_r^{кр} = 3,5$ м/с відбудеться розпад струменя з утворенням краплі. Скориставшись графіком (рис. 4.1 а), отримали, що розпад струменя відбувається при досягненні відстані від отвору витікання довжини $z = l_{cm} = 0,00145$ м (рис. 4.1 а).



а)



б)

Рисунок 4.1 – Зіставлення результатів експерименту та теоретичних припущень: а) залежність зміни радіальної складової швидкості v_r від відстані вздовж осі z ; б) гранула агар-агару, що була отримана під час експериментальних досліджень, діаметр гранули 2,58 мм (1 поділка=0,04 мм)

Отриманий графік (рис. 4.1, а) в ході рішення характеризує кількісну зміну радіальної складової швидкості v_r вздовж осі z від моменту витікання струменя до його розпаду на краплі.

Отримавши значення довжини струменя l_{cm} , розраховуємо об'єм циліндричної частини струменя за рівнянням (4.1), який дорівнює об'єму утвореної краплі $V_{cm} = V_{kp} = 7,232 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$. Використавши отримане значення об'єму краплі, визначили діаметр утвореної краплі $d_{kp}^m = 2,4 \text{ мм}$ і порівняли із результатами отриманих під час експерименту на лабораторному стенді $d_{kp}^{ек} = 2,58 \text{ мм}$ (рис. 8 б). Похибка розрахункової формули, отриманої нами у порівнянні з експериментальними результатами, становила 7 %.

Порівнявши діаметр утвореної краплі за вже широко апробованою формулою $d_{kp} = \frac{6 \cdot d_{омг}}{Re^{0.15}} = 2,49 \text{ мм}$, та отриманого з розрахунків за допомогою рівнянь (2.34) та (2.35) запропонованої методики, різниця в розрахунках становила приблизно 4,5 %.

Під час проведення експериментальних досліджень на другій установці (рис. 3.2) знімалися показники коливання днища гранулятора та виводилися на двоканальний осцилограф у вигляді графіка синусоподібної залежності, що змінювалася залежно від параметрів сигналу. Порівнявши отримані результати експерименту з теоретичними одержані за рівнянням (2.43), спостерігали розбіжність. Проаналізувавши одержані результати, дійшли висновку, що на струмінь діє ще сукупність збурень, джерелом яких є конструкція гранулятора, які повністю складно контролювати. Оскільки факторів, що впливають на характеристику залежності, безліч, їх складно врахувати в теоретичному розрахунку. Для отримання графічної залежності коливань, що генерує конструкція диспергатора, до отриманої синусоподібної залежності коливань усієї системи додали вимушені коливання, які утворює актуатор, скориставшись математичними

операціями осцилографа. Проаналізувавши результат, отримали синусоподібну залежність. Спростивши й усереднивши отримані результати та додавши додаткову функцію в рівняння (2.43), отримали

$$P = \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + a \sin(\omega\tau + c) + d + a_1 \sin(\omega_1\tau + c_1). \quad (4.2)$$

Це рівняння можна застосувати лише для аналізу роботи вібраційної системи даної конструкції гранулятора.

Проведимо порівняння результатів експериментальних досліджень, з уточненими теоретичними викладками, згідно з рівнянням (4.2).

При заповненні кошика гранулятора рідиною до рівня 380 мм при параметрах сигналу 380 Гц та амплітуді 4,4 В, спостерігається хвильове збурення на поверхні струменя з зонами розширення та звуження. Відбувається монодисперсний розпад струменя з утворенням крапель радіусом 1,092мм. Але через кожні 8–10 крапель між ними утворюється ледь помітна перетяжка, яка потім звужувалася майже при повному збереженні симетрії. При цьому в місцях перетяжок утворюються супутники (сателіти) рис. 4.2 а. Такий же феномен спостерігається і на отриманому графіку (рис. 4.2 в) побудованому за результатами розрахунку, отриманого нами рівняння (4.2).

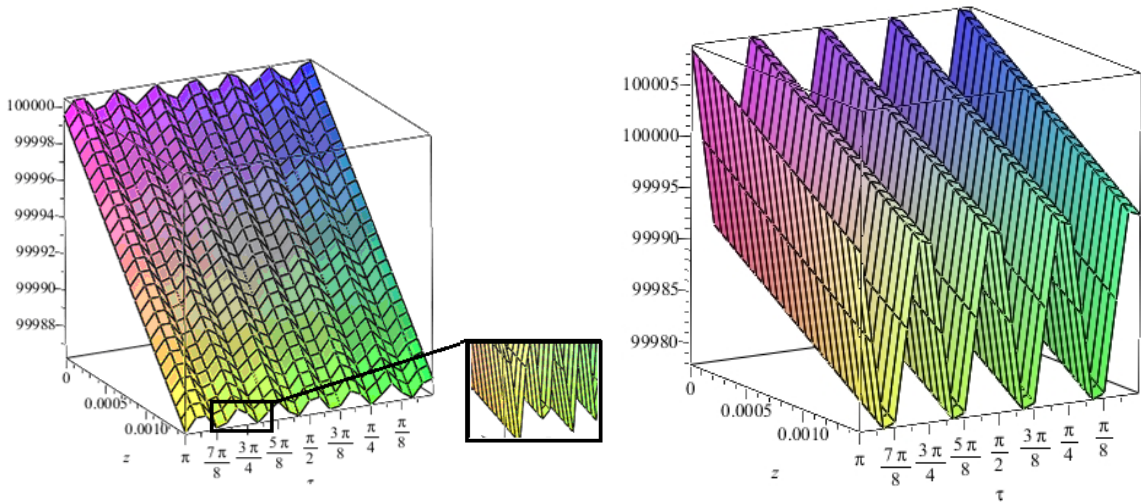
При збереженні гідромеханічних параметрів процесу вимушеного розпаду струменя, але збільшивши тільки амплітуду сигналу до 10,2 В, перетяжка зникла, тобто устаткувався режим монодисперсного розпаду струменя без утворення супутників (рис. 4.2 б). При розрахунках зміни тиску вздовж осі струміння спостерігається хвилеподібна залежність зміни тиску без будь-яких відхилень (рис. 4.2 г).



а)



б)



в)

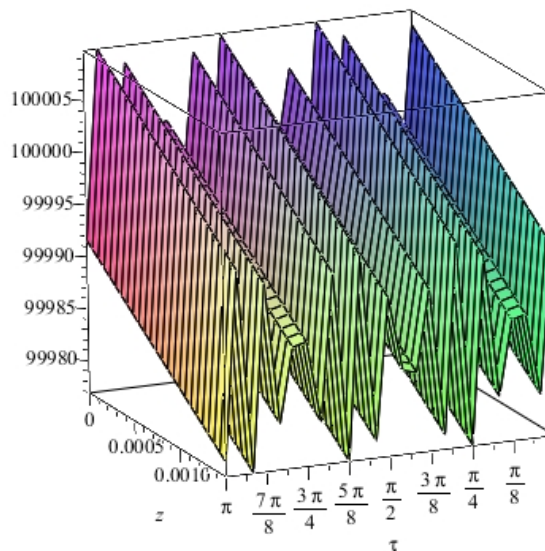
г)

Рисунок 4.2 – Результати дослідження струменя при частоті сигналу 380Гц: фізичний експеримент при амплітуді коливань а) 4,4 В; б) 10,2 В; результати теоретичного розрахунку за формулою (4.2) при амплітуді коливань: в) 4,4 В; г) 10,2 В

При заповненні кошика гранулятора розплавом до рівня 280 мм, а параметри вимушеного сигналу дорівнюють: амплітуда 10,6 В, частота 220 Гц, струмінь після витікання з отвору розпадається на основні краплі, які між собою з'єднані перемичками, після розриву яких утворюються явно виражені сателіти (рис. 4.3 а). При аналізі розвитку збурень на поверхні струменя за допомогою отриманих нами рівнянь, спостерігається нестабільна зміна тиску вздовж струменя. Тиск зростає та падає, і так по чергово (рис. 4.3 б), що відповідає режиму розпаду струменя з утворенням сателітів.



а)



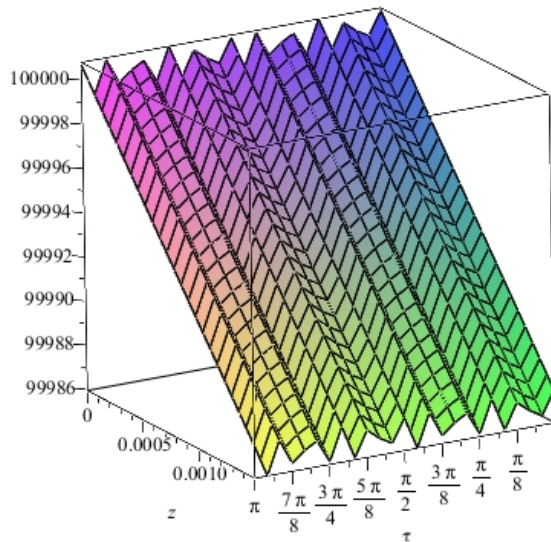
б)

Рисунок 4.3 – Результати дослідження струменя при частоті сигналу 280Гц та при амплітуді коливань 10,2 В: а) фізичний експеримент; б) результати теоретичного розрахунку за формулою (4.2).

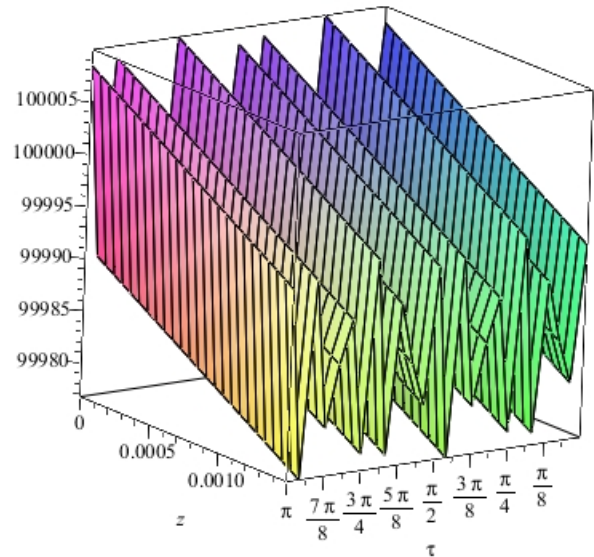
При заповненні кошика гранулятора розплавом до рівня 280 мм, а частота сигналу знаходиться в діапазоні 800 Гц і вище, відбувається розпил струменя з утворенням полідисперсного режиму розпаду струменя в незалежності від значення амплітуди сигналу (4,4 та 10,2 В) рис. 4.4 а. Дане явище спостерігається і при теоретичному розрахунку зміни тиску вздовж струменя з часом (рис. 4.4 б, в)



а)



б)



в)

Рисунок 4.4 – Результати дослідження струменя при частоті сигналу 750 Гц: фізичний експеримент при амплітуді коливань: а) 4,4 та 10,2 В; результати теоретичного розрахунку за формулою (4.2) при амплітуді коливань: б) 4,4 В; в) 10,2 В

4.2 Інженерна методика розрахунку гідромеханічних параметрів гранулятора для умов створення крапель монодисперсного складу

На підставі аналізу розрахунково-теоретичних залежностей, отриманих при математичному моделюванні гідродинаміки руху струменя що витікає з отвору вібраційного гранулятора в газове середовище, експериментальному дослідженні стендових моделей диспергаторів та комп'ютерному моделюванню гідродинаміки розплаву в об'ємі віртуальних моделей гранулятора, відпрацьована методика розрахунку диспергування розплавів та режимних і конструктивних параметрів вібраційних грануляторів для отримання продукту

з монодисперсним вмістом.

Для розрахунку гранулятора приймаємо що в процесі кристалізації зменшення діаметра сферичної краплі не відбувається, а зменшення об'єму здійснюється шляхом утворення усадкової раковини. Найбільшу дальність польоту матимуть гранули, що витікають в горизонтальному напрямку. Саме ці траєкторії визначатимуть зовнішні розміри факела зрошення. Відповідно до балістичної теорії руху сферичного тіла виконуються розрахунки траєкторій руху сферичного тіла в полі гравітаційних сил. Горизонтальна складова швидкості розраховується таким чином, щоб кордон факела зрошення збігався з контурами нижнього конуса грануляційної башти. Основні етапи розрахунку режиму роботи обертового вібраційного гранулятора та визначення геометричних характеристик модернізованого обладнання зведено до такого алгоритму:

- завдання початкових характеристик процесу гранулювання
- в залежності від діаметру башти обрати форму днища гранулятора, сферичне або тороєдальне;
- визначити швидкість витікання розплаву з отворів за формулою (1.1 а).
- за допомогою залежностей, наведених у підрозділі 2.3 та приведеною методикою в підрозділі 4.1 розрахувати діаметр утворених крапель (гранул) при вимушеному розпаді струменя;
- знаючи діаметр грануляційної башти та утворених гранул обмежити значення абсолютної швидкості, щоб виконувалися вище вказані вимоги;
- вибрати кількість та форму лопатей за результатами наведених у підрозділі 2.2;
- розрахунок частоти обертання гранулятора;
- провести аналіз впливу параметрів вимушеного сигналу (частота та амплітуда) на режим розпаду струменя по наведеній методиці в підрозділі 2.4;
- розрахунок геометричного розташування отворів витікання в кошику гранулятора.

Алгоритм комплексного розрахунку гідро- механічних показників обертового вібраційного гранулятора наведено в додатку А.

4.3 Висновки до четвертого розділу

1. Теоретичні дослідження з визначення значень параметрів, що впливають на характеристики диспергування рідини запропонованим методом показали схожість з практичними результатами, різниця знаходиться у допустимих межах (7%), що вказує на обґрунтованість припущень фізичної моделі та теоретичних викладок. Таким чином, запропоновану версію математичного опису процесу стаціонарного витікання струменю з подальшим розпадом на краплі, можна використовувати для аналізу процесу диспергування струменя.

2. Об'єднання отриманих експериментальних результатів з дослідження вимушеного розпаду струменя і теоретичних досліджень стали основою для проектування генератору низьких частот, при модернізації існуючих грануляторів які дозволяють:

- автоматично визначати оптимальну частоту сигналу при зміні рівня розплаву в чашоподібному днищі;
- вибирати режим роботи для літніх умов, коли потрібно менший розмір одержуваних крапель, і режим роботи ОБГ взимку, коли можна отримати більший розмір крапель, що в свою чергу дозволяє регулювати теплове навантаження башти;
- підвищити монодисперсність гранул (більше 98% цільової фракції), що покращує якість готової продукції і відповідає міжнародним стандартам, підвищує конкурентоспроможність цієї продукції на світовому ринку мінеральних добрив;

3. Розроблено інженерну методику для розрахунку гідро- та механічних параметрів вібраційного гранулятора для створення крапель монодисперсного складу.

РОЗДІЛ 5

РЕЗУЛЬТАТИ ПРОМИСЛОВИХ ВИПРОБУВАНЬ ВИРОБНИЦТВА АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ НА ГРАНУЛЯЦІЙНИХ БАШТАХ ТА ЇХ АНАЛІЗ

5.1. Опис технології виробництва аміачної селітри на грануляційних баштах АС-60

Під час виконання госпдоговірних науково-дослідних робіт за темами «Виготовлення, поставку та проведення пусконаладжувальних робіт грануляційного устаткування» (замовник ПрАТ «Сєверодонецьке об'єднання азот» та «Виготовлення науково-технічної продукції за завданням замовника кошика до гранулятора ОВГ 500/585» (замовник ПАТ «Концерн Стирол» Ostchem), пройшли промислові випробування та впровадження на підприємствах, які дозволили суттєво підвищення якості товарного продукту.

Результати випробування грануляційного устаткування на підприємстві ПрАТ «Сєверодонецьке об'єднання азот» приведено в додатку Б.

Промислові дослідження з отримання аміачної селітри проводилися на грануляційній башті АС-60 ПАТ «Концерн Стирол». Агрегат виробництва аміачної селітри АС- 60 має грануляційну башту круглого перерізу діаметром 16 м і заввишки 60 м, виготовлену з цегли. Для захисту від дії аміачної селітри, стіни футеровані кислототривкою цеглою.

У нижній частині башти, по всьому периметру, розташовані вікна, через які засмоктується повітря. Крім цього, повітря засмоктується і через зазори в конусах башти. Три залізобетонних конуси, футеровані залізом, що мають між собою зазор - утворюють низ башти. Під конусами розташований охолоджувач гранул типу «киплячого шару» [94,96].

У центрі стельового перекриття башти розміщується гранулятор. Висота робочої частини грануляційної башти від гранулятора до конуса

виходу готової продукції становить 30 метрів. У верхній частині башти змонтовано технологічне обладнання, що забезпечує отримання плаву аміачної селітри згідно з заданими параметрами. В існуючій технологічній схемі, на робочому покритті (відм. +30,5) було здійснено модернізацію вузла гранулювання. Модернізація здійснювалася за допомогою установки нового обладнання: модифікованого обертового вібраційного гранулятора (рис. 5.1), трансмісії з мотор-редуктором (ремінна передача), перетворювача частоти для асинхронних двигунів (для зміни швидкості обертання гранулятора), і вібросистеми (генератор низьких частот, блок управління, вібратор).

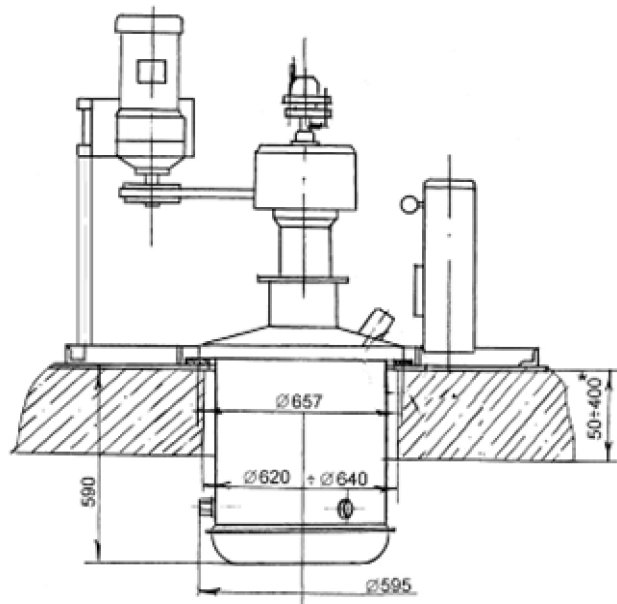
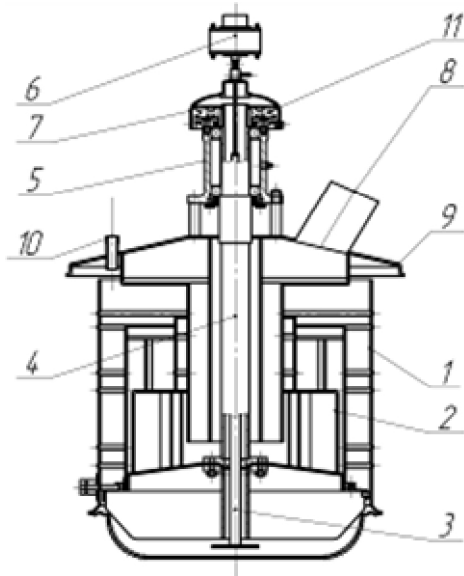


Рисунок 5.1 – Монтажна схема модифікованого обертового вібраційного гранулятора

Принцип роботи модифікованого обертового вібраційного гранулятора (рис. 5.2) полягає в наступному. Вібратор 6 встановлений у верхній частині гранулятора і з'єднаний зі штоком 3. Металевий ковпак 7 закріплений на підшипниковому вузлі 5. Підшипниковий вузол 5 встановлений на кришці 9, що має патрубки 8 і 10 відповідно, для введення розплаву та подачі пари перед пуском і зупинкою гранулятора. Шків 11 служить для передачі обертання валу 4 від мотор-редуктора (система приводу не зображено). У

прогрітий паром обертовий віброгранулятор по патрубку 8 подається очищений у фільтрі розплав, який проходить через розподільник 2 і надходить до отворів днища 1, звідки витікає у вигляді ламінарних струменів у обсяг грануляційної башти. Віброколивання від вібратора 6 передаються через шток 3 з випромінювачем у розплав, що знаходиться в днищі 1, і на струмені, сприяючи їх дробленню на рівномірні краплі.

Обертання віброгранулятора сприяє розосередженню гранул по різних траєкторіях, завдяки чому поліпшуються умови теплообміну в грануляційній башті, а також підвищується монодисперсність одержуваного продукту [97].



а)

б)

Рисунок 5.2 – Модифікований обертовий вібраційний гранулятор: а) схема; б) фотографія.

Мотор-редуктор трансмісії вузла гранулювання був приєднаний до перетворювача частоти для забезпечення зміни числа обертів корпусу гранулятора - від 50 до 70 об/хв. Суспензія аміачної селітри потрапляла у вузол гранулювання для диспергування за існуючої лінії, через яку зазвичай подається розплав, як при експлуатованому раніше грануляторі. Вібросистема дозволяє змінювати і контролювати частоту та амплітуду

синусоїдального сигналу вібрації. Частота сигналу регулюється в діапазоні 200–1000 Гц, а амплітуда змінюється в межах 50–100 мкм.

5.2 Опис методики проведення промислових досліджень

1. Змонтований гранулятор перевіряли на холостому ході без заповнення об'єму корпусу гранулятора розплавом аміачної селітри.
2. Встановили число обертів обертового гранулятора, рівне 33 об/хв, які змінювали на 48, 53, 58 об/хв.
3. Пропарювали "розплавопроводи" і диспергуючий пристрій.
4. Пускали на холостому ході гранулятор, а після початку надходження розплаву в корпус гранулятора відключали подачу пари.
5. Через 10–15 хвилин після пуску гранулятора і стабілізації режиму здійснювали відбір проб аміачної селітри внизу башти після охолоджувача типу «киплячого шару». Гранулометричний склад аміачної селітри і міцність гранул визначалися відповідно до ГОСТ 2-85.
6. Після відбору проб аміачної селітри змінювали робочі параметри гранулятора: частоту обертання корпусу гранулятора, частоту і амплітуду синусоїдального сигналу вібратора.
7. Після стабілізації режиму при кожній зміні робочих параметрів, відбір проб аміачної селітри, призначених для аналізу гранулометричного складу і міцності готового продукту, брали через годину внизу башти.
8. Після стабілізації режиму роботи вібраційного гранулятора також відбирали проби на вміст пилу аміачної селітри у відпрацьованому повітрі після грануляційної башти.
9. Встановлювали інші названі числа обертів вібраційного обертового гранулятора і повторювали весь цикл робіт.

Параметрами, які змінювали і контролювали в ході випробувань були:

- частота обертів гранулятора;
- частота і амплітуда синусоїдального сигналу генератора низьких частот;

- навантаження по розплаву аміачної селітри (рівень розплаву в корпусі гранулятора);
- гранулометричний склад продукту;
- міцність гранул;
- аналітичний контроль повітряних викидів та готового продукту;
- візуальний контроль налипання на стінках, конусах грануляційної башти.

5.3 Результати дослідно-промислових випробувань

Для підтвердження отриманих наукових результатів при застосуванні їх у розробці промислового апарату наведено показники дослідження фракційного складу гранул продукції і концентрація пилу в відпрацьованому повітрі (див. додаток Б).

На рис. 5.3 наведено фракційний склад продукту, одержаний на акустичних грануляторах конструкції НДІХІММАШ [66], експлуатованому і модифікованому грануляторі типу ОВГ.

Модифікований обертовий вібраційний гранулятор типу ОВГ забезпечив отримання продукту наступного гранулометричного складу: масова частка гранул розміром менше 1,0 мм – 0,02-0,2%, масова частка гранул розміром 2,0–4,0 мм – не менше 96%, при цьому масова частка гранул розміром 2,0–2,5 мм – не менше 88%, а вміст гранул розміром 2,0–3,0 мм – 90,1–99,0% [61]. Примусове відключення вібрації призводило до деякого погіршення гранулометричного складу продукту. Фракція гранул менше 1,0 мм – 0,42–0,78%, фракція гранул 2,0–4,0 мм - 89 – 94%. Така висока монодисперсність при відсутності вібрації досягнута за рахунок поліпшення гідродинаміки руху розплаву в грануляторі типу ОВГ. При цьому масова частка гранул розміром 2,0–2,5 мм становила 46–52%.

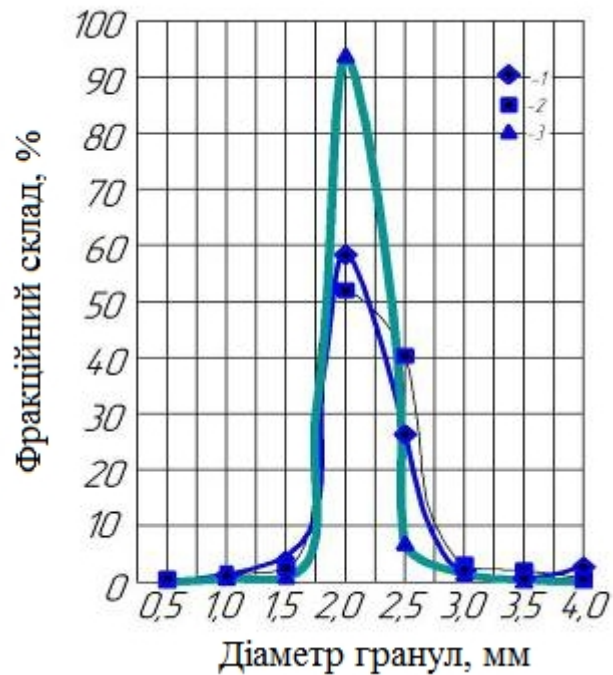


Рисунок 5.3 – Фракційний склад гранул аміачної селітри: 1 – експлуатований гранулятор типу ОВГ; 2 – акустичний гранулятор конструкції (НДІХІММАШ); 3 – модифікований гранулятор типу ОВГ

При зміні діаметру факела зрошення гранул у башті було відзначено вплив швидкості обертання днища гранулятора на монодисперсність і температуру готового продукту. При збільшенні швидкості обертання днища гранулятора зростає монодисперсність продукту і діаметр розподілу крапель по перерізу грануляційної башти (факел зрошення), що зменшує ймовірність зіткнення крапель між собою. Крім того, зменшення щільності зрошення крапель по перерізу грануляційної башти призводило до зниження її теплового навантаження. Оптимальна швидкість обертання днища гранулятора для умов виробництва аміачної селітри АС-60 ПАТ "КОНЦЕРН СТИРОЛ" знаходилася в інтервалі 48–58 об/хв. Гранулометричний склад продукту, що отримується при різних швидкостях обертання днища модифікованого обертового вібраційного гранулятора типу ОВГ, наведений на рис. 5.4.

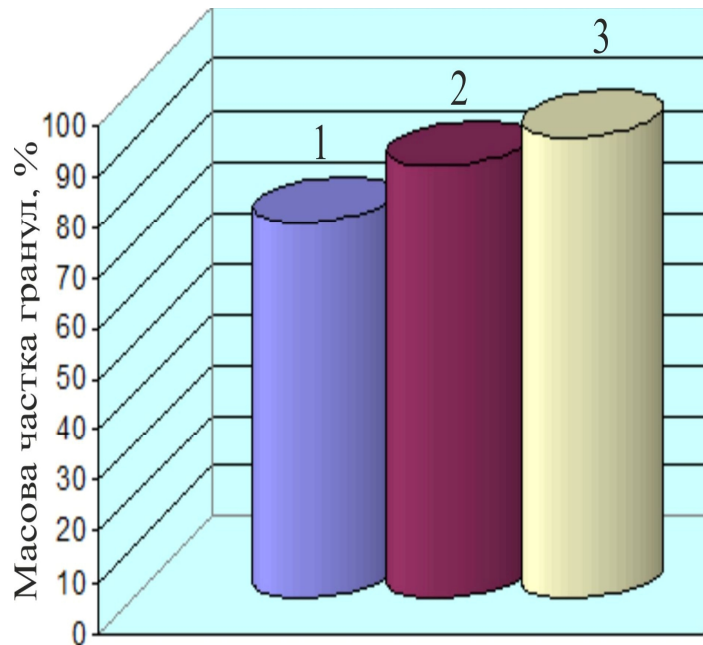


Рисунок 5.4 – Масова частка гранул розміром 2,0–2,5 мм при швидкості обертання кошика гранулятора: 1) 33 об/хв; 2) 48 об/хв; 3) 58 об/хв

Отримання продукту з зазначеним вище гранулометричним складом і оптимальною швидкістю обертання днища дозволило знизити температуру готового продукту на 2–5°C у порівнянні з температурою гранул, що одержуються на експлуатованих грануляторах.

При випробуванні модифікованого обертового вібраційного гранулятора типу ОВГ було відзначено значне скорочення вмісту пилу аміачної селітри в повітрі, який відводиться з башти. Цей показник становив по осьових вентиляторам від 22 до 48 мг/м³, при середніх значеннях від 22 до 38 мг/м³. Відключення вібраційної системи гранулятора призводило до збільшення вмісту пилу добрива в повітрі всього в 1,5 рази, що показує ефективність внесених змін у конструкцію модифікованого гранулятора.

Порівняльні дані по вмісту пилу аміачної селітри в повітрі, який відводиться з башти, при роботі грануляторів різних конструкцій, наведені на рис. 5.5 [99].

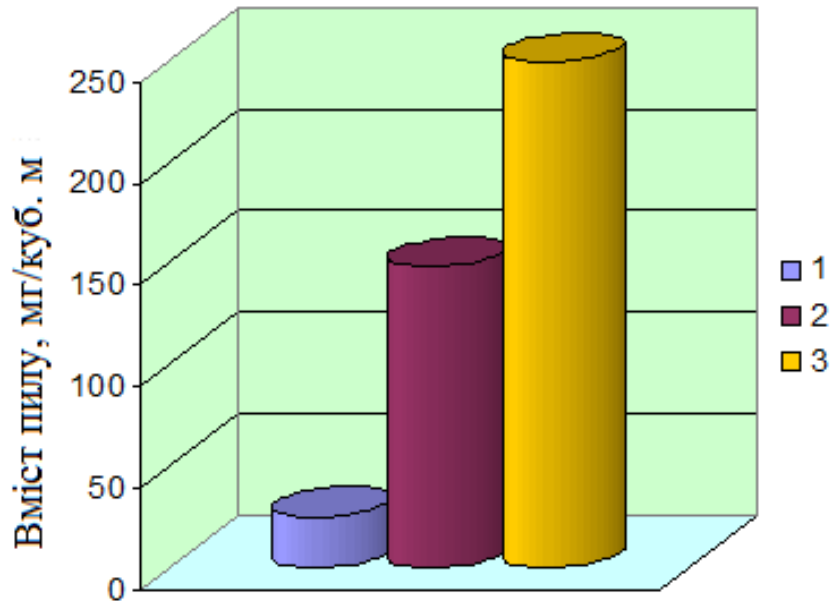


Рисунок 5.5 – Вміст пилу аміачної селітри в повітрі, що відходить з башти
 1) модифікований гранулятор типу ОВГ; 2) експлуатовані гранулятори типу ОВГ; 3) статичний гранулятор конструкції НДІХІММАШ

Випробування модифікованого вібраційного гранулятора типу ОВГ, що обертається, також підтвердили раніше проведені дослідження, в ході яких було відмічено вплив потужності вібрації, що накладається в об'ємі розплаву, на монодисперсність розпаду струменів на краплі.

Зниження потужності вібратора з 70 Вт до 40 Вт призводило до зменшення частки цільової фракції гранул 2,0–2,5 мм з 91,5 до 78,8 % збільшенню вмісту гранул фракції більше 2,5 мм. Гранулометричний склад продукту наведений на рис. 5.6.

Як видно з наведених графічних залежностей, застосування модернізованого гранулятора типу ОВГ дає можливість отримувати монодисперсні гранули розміром 2,0–3,0 мм більше 90 % і фракції менше 1,0 мм не більше 0,5 % і, навіть, можливе досягнення більш низької частки.

Крім того, застосування більш ефективною та гнучкою системи накладення вібрації дозволяє отримувати в продукті більше 85% гранул в діапазоні 2,0–2,5 мм, або не менше 65 % гранул фракції 2,5–3,0 мм. Все це

дає можливість підвищити монодисперсність продукту (рис. 5.7) і поліпшити якість одержаних азотних добрив при цьому зменшити викиди пилу аміачної селітри в навколишнє середовище.

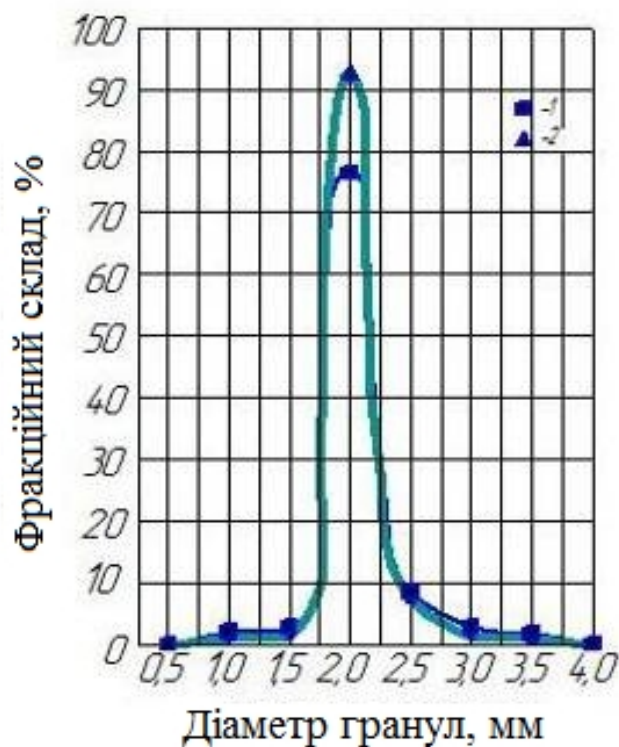


Рисунок 5.6 – Фракційний склад гранул аміачної селітри при потужність вібратора: 1) 40 Вт; 2) 70Вт

Міцність гранул, одержаних на модернізованому грануляторі, перебувала в діапазоні 1,2–1,5 кг/гранулу і залежала від кількості введеної добавки і діаметра одержаних гранул. Впливу від внесених конструктивних змін, у відому раніше конструкцію гранулятора типу ОВГ, на міцність гранул виявлено не було.

Характерні дані по гранулометричному складу аміачної селітри, отримані під час промислових досліджень роботи модифікованого обертового вібраційного гранулятора на підприємстві ПАТ «Концерн Стирол» Ostchem приведено в додатку В.

На основі теоретичних досліджень та проведених промислових випробувань модифікованого обертового вібраційного гранулятора були розроблені рекомендації що до робочих параметрів генератора низьких частот для отримання монодисперсного продукту (табл. 5.1). Так як в літній період температура повітря навколишнього середовища середньому складає 22 °С то для зменшення теплового навантаження на грануляційну вежу рекомендовано отримувати гранули товарним розміром 2,0–2,5 мм, а взимку – 2,5–3 мм. Крім того, за допомогою регулювання частоти обертання гранулятора, що в свою чергу впливає на факел зрошення, можна змінювати теплове навантаження грануляційної вежі.

Таблиця 5.1

Робочі параметри генератора низьких частот

Продуктивність за розплавом, м ³ /год	Рівень розплаву в корпусі гранулятора, м (%)	Параметри сигналу генератора низьких частот			
		Для отримання гранул діаметром 2,0–2,5 мм		Для отримання гранул діаметр 2,5–3 мм	
		Частота, Гц	Амплітуда, мкм	Частота, Гц	Амплітуда, мкм
40	0,11 (18)	345-360	70	335-345	100
45	0,15 (25)	378-425		340-370	
50	0,205 (34)	385-410		395-440	
55	0,305 (51)	370-400		380-420	

5.4 Одержані техніко-економічні показники

У світовій практиці застосовуються численні показники, що дозволяють аналізувати результат впровадження нової техніки у виробництво. До таких належить: економічність, ефективність використання техніки, що в включає в себе науково-технічний, економічний, ресурсно-екологічний та соціальний ефекти.

В порівнянні з експлуатованим грануляційним обладнанням, що використовувалось на виробництві аміачної селітри, модифікований

вібраційний гранулятор, за результатами досліджень. забезпечив: високу надійність при роботі; зменшення теплового навантаження на башту та налипання продукту в її об'ємі, зменшив пилоутворення та шкідливі викиди в атмосферу (з 225 до 35 мг/м³); можливість отримання продукту з більш рівномірним фракційним складом. Не значне пилоутворення під час прилювання в грануляційній вежі, дає можливість скоротити обладнання для очистки повітря від пилу.

Розрахунок ефективності впровадження нового гранулятора проведено згідно методики [100].

Річний економічний ефект розрахуємо по рівнянню

$$E = E_1 + E_2 - [(K_H - K_B) \cdot E_H / T_{об} \cdot A] \cdot A, \quad (5.1)$$

де E_1, E_2 – економічна ефективність від впровадження обладнання за рахунок зменшення непродуктивних втрат продукції з пилом та частиною некондиційної продукції, що повертається на повторну переробку, грн./рік;
 K_H, K_B – капітальні витрати по базовому та новому варіантах, грн.;
 E_H – нормативний коефіцієнт економічної ефективності, $E_H=0,35$;
 $T_{об}$ – виробничий цикл (ресурс) роботи обладнання, $T_{об}=5$ років;
 A – потужність виробництва, т/рік.

Економічна ефективність від впровадження обладнання за рахунок зменшення непродуктивних втрат продукції з пилом:

$$E_1 = V_{Б1} - V_{Н1}, \quad (5.2)$$

де $V_{Б1}, V_{Н1}$ – ціна продукції, що втрачається з пилом при використанні грануляторів базової та модифікованої конструкції обладнання, що було змонтовано та проведено промислові випробування (новий варіант), грн/т;
 A – потужність виробництва, т/рік.

Ціна продукції, що втрачається з пилом, при використанні грануляторів базової конструкції:

$$V_{B1} = V_{Bп} \cdot P_{п} \cdot k \cdot T_p \cdot C_{AC}, \quad (5.3)$$

де $V_{Bп}$ – вміст аміачної селітри в повітрі, що виходить з башти при використанні грануляторів базової конструкції, $V_{Bп} = 225 \cdot 10^{-9} \text{ т/м}^3$; $P_{п}$ – розхід повітря через башту, $P_{п} = 350\,000 \text{ м}^3/\text{год}$; k – кількість башт у виробництві, де було змонтовано модифікований гранулятор, $k=1$; T_p – річний цикл роботи виробництва, $T_p = 8\,000 \text{ год/рік}$; C_{AC} – ціна аміачної селітри, $C_{AC} = 960 \text{ грн./т}$ (ціна зазначена на час проведення випробувань).

$$V_{B1} = 225 \cdot 10^{-9} \cdot 350\,000 \cdot 1 \cdot 8\,000 \cdot 960 = 604\,800 \text{ грн./рік}$$

Ціна продукції, що втрачається з пилом при використанні модифікованого вібраційного гранулятора розплаву аміачної селітри:

$$V_{H1} = V_{Hп} \cdot P_{п} \cdot k \cdot T_p \cdot C_{AC}, \quad (5.4)$$

де $V_{Hп}$ – вміст аміачної селітри в повітрі, що виходить з башти при використанні модифікованого вібраційного гранулятора азотного добрива, $V_{Hп} = 35 \cdot 10^{-9} \text{ т/м}^3$; $P_{п}$ – розхід повітря через башту, $P_{п} = 350\,000 \text{ м}^3/\text{год}$; k – кількість башт в виробництві, $k=1$; T_p – річний цикл роботи виробництва, $T_p = 8\,000 \text{ год/рік}$; C_{AC} – ціна аміачної селітри, $C_{AC} = 960 \text{ грн./т}$

$$V_{H1} = 35 \cdot 10^{-9} \cdot 350\,000 \cdot 1 \cdot 8\,000 \cdot 960 = 94\,080 \text{ грн./рік}$$

$$E_1 = 604\,800 - 94\,080 = 510\,720 \text{ грн./рік.}$$

Економічна ефективність від впровадження обладнання за рахунок зменшення непродуктивних втрат продукції з часткою некондиційних гранул, що повертаються на повторну переробку:

$$E_2 = V_{B2} - V_{H2}, \quad (5.5)$$

де V_{B2} , V_{H2} – відповідно ціна продукції, що втрачається з некондиційними гранулами при використанні базового варіанту конструкції гранулятора та нового обладнання, грн/т;

$$V_{B2} = \text{Ч}_{\text{БНП}} \cdot A \cdot (\text{Ц}_{\text{АС}} - \text{Ц}_{\text{РАС}})/100,$$

$$V_{H2} = \text{Ч}_{\text{ННП}} \cdot A \cdot (\text{Ц}_{\text{АС}} - \text{Ц}_{\text{РАС}})/100,$$

де $\text{Ч}_{\text{БНП}}$, $\text{Ч}_{\text{ННП}}$ – частка некондиційної продукції в загальному об'ємі, що повертається на повторну переробку, при використанні базового варіанту конструкції гранулятора та нового обладнання, %;

$$\text{Ч}_{\text{БНП}} = 0,4\%; \text{Ч}_{\text{ННП}} = 0,08\%,$$

де A – потужність виробництва, т/рік; $\text{Ц}_{\text{РАС}}$ – ціна розчину аміачної селітри, грн./т основної речовини;

$$V_{B2} = 0,4 \cdot 780000 \cdot (960-150)/100 = 2\,527\,200 \text{ грн/рік}$$

$$V_{H2} = 0,08 \cdot 780000 \cdot (960-150)/100 = 505\,440 \text{ грн/рік}$$

$$E_2 = 2\,527\,200 - 505\,440 = 2\,021\,760 \text{ грн/рік}$$

Капітальні витрати по базовому та новому варіантах з урахуванням монтажних та пусконаладжувальних робіт: $K_1=210\,000$ грн.
 $K_2 = 500\,000$ грн.

Річний економічний ефект (без урахування екологічного ефекту від зменшення шкідливих викидів в атмосферу):

$$E=510720+2021760-[(500000-210000)/(5 \cdot 780000)] \cdot 780000=2474480 \text{ грн./рік}$$

Екологічний ефект від зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу:

$$E_e = Z_{\text{п}} \cdot \Delta M_{\text{пр}} \cdot k_e \cdot i_{\text{д}}, \quad (5.6)$$

де E_e – екологічний ефект від зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу, грн.; $Z_{\text{п}}$ – значення економічної оцінки питомих збитків від викидів шкідливих речовин в повітря (показник питомих збитків) для економічного регіону, грн./т; $\Delta M_{\text{пр}}$ – приведений об'єм зменшення маси викидів забруднюючих речовин, ум.т; k_e – коефіцієнт екологічної ситуації та екологічного стану повітря в регіоні; $i_{\text{д}}$ – індекс дефлятор по галузям промисловості.

Приведений об'єм зменшення маси викидів забруднюючих речовин розраховується по рівнянню:

$$\Delta M_{\text{пр}} = \sum \Delta M_{\text{іпр}} \cdot K_{\text{еі}}, \quad (5.7)$$

$$\Delta M_{\text{іпр}} = M_{\text{і1}} - M_{\text{і2}}, \quad (5.8)$$

$$M_{\text{і1}} = V_{\text{Бп}} \cdot P_{\text{п}} \cdot k \cdot T_{\text{р}}, \quad (5.9)$$

$$M_{\text{і2}} = V_{\text{Нп}} \cdot P_{\text{п}} \cdot k \cdot T_{\text{р}}, \quad (5.10)$$

де $M_{\text{і1}}$, $M_{\text{і2}}$ - приведені маси викидів забруднюючих речовин, відповідно на початок та кінець розрахункового періоду, т.

$$M_{\text{і1}} = 225 \cdot 10^{-9} \cdot 350000 \cdot 1 \cdot 8000 = 630 \text{ т}$$

$$M_{\text{і2}} = 35 \cdot 10^{-9} \cdot 350000 \cdot 1 \cdot 8000 = 98 \text{ т}$$

$$\Delta M_{\text{іпр}} = 630 - 98 = 532 \text{ т}$$

$$\Delta M_{\text{пр}} = 532 \cdot 6,7 = 3564,4 \text{ ум. т}$$

Економо-екологічний ефект від зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу

$$E_e = 14,5 \cdot 3564,4 \cdot 1,6 \cdot 3,5 = 289429,3 \text{ грн.}$$

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів розробки по агрегату виробництва аміачної селітри АС-60 (потужністю 780 тис. т/рік) – 2474480 грн./рік.

5.4 Висновки до п'ятого розділу

1. Проведено порівняльний аналіз роботи відомих грануляторів у виробництві аміачної селітри з модернізованим обертовим вібраційним гранулятором.

2. Проведені промислові випробування показали ефективність розробленого обладнання, яке дозволяє знизити питомі витрати на тону одержуваної продукції на 0,2-0,3%, підвищити ефективність роботи підприємства в цілому і поліпшити якість отримуваної продукції.

3. Вибір оптимального режиму роботи генератору низьких частот значно знижує кількість пилу в продукті (з 0,8–1,2% до 0,05–0,2%), зменшує втрати продукції з викидами в атмосферу (з 200–250 мг/м³ до 25–40 мг/м³), що призводить до поліпшення екологічної ситуації.

4. Приблизний економічний ефект від застосування модернізованого грануляційного обладнання за рахунок зниження втрат продукту з пилом становить понад 720 т/рік для агрегату АС-60 для однієї башти.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі подано вирішення важливого науково-технічного завдання – диспергування розплавів азотних добрив методом вимушеного розпаду струменів рідини, підвищення монодисперсності крапель та гранул.

1. У результаті проведення аналізу літературних джерел виявлено, що процес диспергування розплавів у баштах прилювання досліджений недостатньо, зокрема гідродинаміка у порожнині перфорованої оболонки із використанням лопатевої системи і струменя до розпаду на краплі з накладенням вібрації та при вільному режимі витікання. Визначено напрямки досліджень.

2. Запропоновано аналітичні рівняння для опису гідродинаміки витікання струменя, що дають можливість аналізувати процес диспергування струменя. Встановлено закономірності регульованого розпаду струменів рідини, що дає можливість доповнити методику розрахунку грануляторів розплаву азотних добрив, що дозволять отримувати гранули у вузькому фракційному діапазоні, при максимальній кількості часток, розмір яких може охолотитися у башті; забезпечити можливість регулювання розміру крапель залежно від вимог.

3. Моделювання процесу із використанням отриманих рівнянь дозволило уточнити методику розрахунку гідродинаміки витікання струменів розплаву з ОВГ і розробити рекомендації з автоматичного керування частотою вібратора ОВГ, залежно від гідродинамічних параметрів розплаву всередині оболонки диспергатора.

4. Експериментально досліджена гідродинаміка витікання струменя з отвору із накладанням вимушених коливань. На підставі рівнянь гідродинаміки запропоновано математичну модель, що враховує поширення коливань тиску вздовж струменя.

5. Об'єднання отриманих експериментальних результатів і теоретичних досліджень стало основою для проектування генератора низьких частот при модернізації існуючих грануляторів, що дозволяють:

- автоматично визначати оптимальну частоту сигналу при зміні рівня розплаву в корпусі гранулятора;

- вибирати режим роботи для літніх умов, коли потрібний менший розмір одержуваних крапель, і режим роботи ОВГ взимку, коли можна отримати більший розмір крапель, що у свою чергу, дозволяє регулювати теплове навантаження башти;

- підвищити монодисперсність гранул (більше 98 % цільової фракції), що покращує якість готової продукції і відповідає міжнародним стандартам, підвищує конкурентоспроможність цієї продукції на світовому ринку мінеральних добрив.

6. Вибір оптимального режиму роботи генератора низьких частот значно знижує кількість пилу в продукті (із 0,8–1,2 % до 0,05–0,2 %), зменшує втрати продукції з викидами в атмосферу (із 200–250 мг/м³ до 25–40 мг/м³), що приводить до поліпшення екологічної обстановки.

7. Модернізовано відому конструкцію обертового вібраційного гранулятора з урахуванням автоматичного блока керування актуатором та обертами гранулятора розплаву.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. 90980 Україна, МПК В01 J2/02. Обертвий вібраційний гранулятор розвлавів / 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. – 2012. – № 1–2. – С. 36–39.
3. Чеблаков Н. В. Приллированный и гранулированный карбамид: свойства и перспективы / Н. В. Чеблаков, Ю. А. Сергеев, А. В. Солдатов // Газохимия, 2010. – № 11. – С. 14–20.
4. Касим Р. Т. Способи отримання крапель монодисперсного складу / Р. Т. Касим, М. С. Скиданенко, В. І. Склабінський // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, м. Суми, 17–20 квітня 2012 р.: тези доповідей. – Суми : СумДУ, 2012. – Ч. 2. – С. 116–117.
5. Склабинский В. И. Параметрическая оптимизация стадии грануляции с учетом энергосберегающих аспектов / В. И. Склабинский, Н. П. Кононенко // 2012. – Т. 8, вып. 4. – С. 73–76.
6. Таран А. Л. Алгоритм расчета форсуночного гранулятора для производства известково – аммиачной селитры в банях / А. Л. Таран, Е. В. Долгалева, Ю. А. Таран // Вестник МИТХТ. – 2006. – Т. 1, № 3. – С. 42–46.
7. Казакова Е. А. Гранулирование и охлаждение азотсодержащих удобрений / Е. А. Казакова. – М.: Химия, 1980. – 288 с.
8. 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. – 2013. – №1. – С. 35–41.
9. Скиданенко М. С. Перспективи отримання мікрогранул у вібраційних

- грануляторах / М. С. Скиданенко, А. Є. Артюхов, В. І. Склабінський // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, Суми, 18-22 квітня 2011 р.: тези доповідей. – Суми: СумДУ, 2011. – Ч. 1. – С. 117.
10. Холин Б. Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости / Б. Г. Холин // М., "Машиностроение", 1977. – 182 с.
11. Олевский В. М. Производство аммиачной селитры в агрегатах большой единичной мощности / В. М. Олевский . – М. : Химия, 1990. – 286 с.
12. Соколов В. И. Современные промышленные центрифуги / В. И. Соколов. – М. : Машиностроение, 1967. – 524 с.
13. Холин Б. Г. О гидродинамическом парадоксе центрифуги / Б. Г. Холин // Интенсификация технических процессов в химической и машиностроительной промышленности. – 1970. № 3. – С. 7–13.
14. Баранов Э. И. Обоснование и расчет гидродинамического парадокса, возникающего при истечении жидкости из отверстий перфорированной вращающейся оболочки / Э. И. Баранов, С. И. Якушко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2012. – № 4. – С. 7.
15. Афанасьев В. Н. О некоторых особенностях капельных потоков / В.Н. Афанасьев // Теплофизика высоких температур. – 1998. – Т. 36, №1. – С. 94–101.
16. Eggers J. Physics of liquid jets / J. Eggers, E. Villermaux // Reports on Progress in Physics. – 2008. – 71. No 3, P. 036601–036679.
17. Lin S. P. Breakup of liquid sheets and jet / S. P. Lin. – Cambridge university press. – 2003. – P. 297.
18. Hove W. Breakup of diminutive Rayleigh jets / W. Hove, S. Gekle, J. H. Snoeijer, M. Versluis, M. P. Brenner, D. Lohse // Physics of fluids. – 2010. – Vol. 22. – P. 487–496.

19. Дж. В. Стреттон (Лорд Релей). Теория звука / Дж. В. Стреттон // пер. с англ. – Н.П. Успенского С.А. Каменецкого. – 2-е изд. – М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. – 354 с.
20. Малкин А. Я. Поверхностные неустойчивости / А. Я. Малкин // Коллоидный журнал. – 2008. – Т 70, № 6. – С. 725–742.
21. Вивденко М. И. Исследование условий получения равномерных капель размером 1-0,5 мм / К. Н. Шабалин, М. И. Вивденко // Химия и химическая технология. – 1965. – Т. 8, № 4. – С. 685–690.
22. Ентов В. М. Динамика свободных струй и пленок вязких и реологически сложных жидкостей / В. М. Ентов, А. Л. Ярин // ВИНТИ. Итоги науки техники. Сер. "Механика жидкости и газа". – 1984. – Т 17. – С. 112–197.
23. Mayer W. O. Coaxial atomization of a round liquid jet in a high gas stream: a phenomenological study / W. O. Mayer // Experiments in Fluids. – 1994. – Vol. 16. – P.401–410.
24. Iciek J. The hydrodynamics of a free, liquid jet and their influence on direct contact heat transfer - I. Hydrodynamics of a free, cylindrical liquid jet/ J. Iciek // Int. J Multiphase Flow. – 1982. – Vol. 8. N 3. – P. 239–249.
25. Рожков А. Н. Динамика и разрушение упруговязких жидкостей / А. Н. Рожков // Известия российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2005. – № 6. – С. 3–24.
26. Асланов С. К. К теории распада жидкой струи на капли / С. К. Асланов // ЖТФ, – 1999. – Т. 69, № 11. – С. 131–132.
27. Sterling A. The instability of capillary jets / A. Sterling, C. Sleicher // J. Fluid Mech. – 1975. – Vol. 68, Pt. 3 – P. 477–495.
28. Mc Carthy M. Review of stability of liquid jets and the influence of nozzle design / M. Mc Carthy, N. Molloy // Chem. Eng. J. – 1974. – Vol. 7. N 1. – P. 1–20.
29. Гунбин В. Ф. Истечение струй из малых отверстий / В.Ф. Гунбин // Тр. Моск. энерг. ин-та. – 1986. – Вып. 119. – С. 27–39.

- 30.Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1970. – 224 с.
- 31.Cline Н. The effect of harmonics on capillary instability of liquid jets / Н. Cline, Т. Anthony // J. Appl. Phys. – 1978. – Vol. 49, N 6. – P. 3203–3208.
- 32.Аликин А. Р. Исследование эволюции спектра колебаний поверхности струи при вынужденном капиллярном распаде / А. Р. Аликин, В. В. Блаженков, В. Ф. Гунбин, С. И. Щеглов // ИФЖ, 1991. – Т. 60, № 4. – С. 550–553.
- 33.Чесноков Ю. Г. Нелинейное развитие капиллярных волн в струе вязкой жидкости/ Ю. Г. Чесноков // Журнал технической физики. – 2000. – Том. 70. Вып. 8. – С. 31–38.
- 34.Липатов Г. Н. О работе генератора монодисперсных капель с вибрирующей иглой / Г. Н. Липатов, С. М. Контуш // Физ. Аэродисперсных систем., 1973. – Вып. 9. – С. 34–36.
- 35.Chaudhary К. The nonlinear capillary instability of a liquid jet. Part 3. Experiments on satellite drop formation and control/ К. Chaudhary, Т. Махworthy // J. Fluid. Mech. 1980. – Vol. 96, N 2. – P. 287–298.
- 36.Блаженков В. В. О генерации упорядоченных потоков монодисперсных капель методом вынужденного капиллярного распада струй/ В. В. Блаженков, А. Ф. Гиневский, В. А. Грирогьев, А. С. Дмитриев // Докл. АН СССР. 1990. – Т. 313, №6. – С. 1412-1417.
- 37.Блаженков В. В. Нелинейная эволюция волн при вынужденном капиллярном распаде струи / В. В. Блаженков, А. Ф. Гиневский, В. Ф. Гунбин и др. // Изв. РАН. Сер. Механика жидкости газа. 1993. – № 3. – С. 54–60.
- 38.Hilbing J. Н. Droplet size control in liquid jet breakup/ J. Н Hilbing, S. D.Heister // Phys. Fluids.– 1996. –Vol. 8. P. 1574-1581.
- 39.Cossati G. A new laser based technique for instability growth rate evaluation in liquid jets/ G. Cossati, А. Coghe // Experiments in Fluids. – 1993. – Vol. 14. – P. 233–240.

40. Vassalo P. Satellite formation and merging in liquid jet breakup/ P. Vassalo, N. Ashgriz // Proc. Roy. Soc Lond. – 1991. – Vol. A. – P. 269–286.
41. Rutland D. F. A non-linear effect in the capillary instability of jets / D. F. Rutland, G.J. Jameson // J. Fluid Mech. – 1971. – Vol. 46. – P. 267–271.
42. Изучение переходной области вынужденного капиллярного распада струй жидкости / В. В. Блаженков, А. Ф. Гиневский, В. Ф. Гунбин и др. // Изв. РАН. Сер. Механика жидкости газа. 1995. – №4. – С. 68–74.
43. Тарасевич С. Э. Средний диаметр капель, образующихся при распаде жидких струй и пленок / С. Э. Тарасевич, А. Б. Яковлев // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2003. – № 4. – С. 52–57.
44. Peregrine D. The bifurcation of liquid bridges / D. Peregrine, G. Shoker, A. Symon // J. Fluid Mech. 1990. – Vol. 212. – P. 25–39.
45. Reddy K. Finite element solution of viscous jet flows with surface tension / K. Reddy, R. Tanner // Computers and Fluids. – 1978. – Vol. 6. – P. 83–91.
46. Ashgriz N. Satellite formation and merging in liquid jet breakup/ N. Ashgriz, F. Mashayek // Proc. Roy. Soc. Lond. – 1991. – Vol. A. – P. 269–286.
47. Кротов В. В. Универсальные законы распада струи / В. В. Кротов // Доклады Академии наук. – 2006. – Т. 408, № 1. – С. 71–74.
48. Eggers J. Nonlinear dynamics and breakup of free-surface flows / J. Eggers // Reviews of modern physics. – 1997. – Vol. 69, N 3. – P. 865–929.
49. Bousfield D. The breakup of viscous jets with large velocity modulations/ D. Bousfield, I. Stockel, C. Nanivadekar // J. Fluid Mech. – 1990. – Vol. 218. – P. 601–617.
50. Hilbing J. H. Droplet size control in liquid jet breakup / J. H. Hilbing, S. D. Heister // Physics of Fluids.– 1996. Vol. 8 – P. 1574–1581.
51. Розина Е. Ю. Капиллярно-вибрационное распыление жидкости/ Е. Ю. Розина // Акустичний Вестник. – 2002. Т.5. №2. – С. 43-53.
52. Tjahjadi M. Satellite and subsatellite formation in capillary breakup / M. Tjahjadi, H. Stone, J. Ottino // J. Fluid Mech. – 1992. – Vol. 243. – P. 297–317.

53. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич // – М.: Физматиз, 1959. – с. 700.
54. Yuen M. Nonlinear capillary instability of a liquid jet/ M. Yuen // Ibid – 1968. – Vol. 33, N1. – P. 151–163.
55. Nayfeh A. Nonlinear stability of a liquid jet/ A. Nayfeh // Phys. Fluids. – 1970. – Vol. 13, N1. – P. 841–847.
56. Разумовский Н. А. Математическая модель вынужденного капиллярного распада струй / Н. А. Разумовский // Инженерно-физический журнал. – 1991. – Т. 60, № 4. – С. 558–561.
57. Гиневский А. Ф. Нелинейная динамика свободной поверхности при капиллярном распаде жидких струй/ А. Ф. Гиневский, А.С. Дмитриев // Физика и техника монодисперсных систем: тезисы докладов 2 Всесоюзной конференции. М. : 1991. – С. 3–5.
58. Lafrance P. Nonlinear breakup of a liquid jet/ P. Lafrance// Ibid, – 1974. – Vol. 17, N 10. – P. 1913–1914.
59. Chaudhary K. The nonlinear capillary instability of a liquid jet / K. Chaudhary, L. Redekopp // J Fluid Mech. – 1980. – Vol. 96, Pt. I. – P. 257–274.
60. Маркова М. П. О нелинейном развитии капиллярных волн в струе жидкости/ М. П. Маркова, В. Я. Шкадов // Изв. АН СССР Сер. «Механика жидкости и газа». – 1972. – № 3. – С. 30–37.
61. Блаженков В. В. О вынужденном капиллярном распаде струй жидкости // В. В. Блаженков, А. Ф. Гиневский В. Ф. Гунбин, А. С. Дмитриев // Изв. АН СССР. Сер. «Механика жидкости и газа». – 1988. – №2 – С. 53–61.
62. Sirignano W. A. Review of theory of distortion and disintegration of liquid streams / W. A. Sirignano, C. Mehring // Progress in energy and combustion science. – 2000. – Vol. 26, – P. 609–655.
63. 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

- конференції с міжнародним участєм (17-19 мая 2011 г.): тези доповідей. - Дніпропетровськ: Державний вищий навчальний заклад "Український державний хіміко-технологічний університет", 2011. – С. 72–73.
64. 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*. – 2009. – Vol. 5 (1), p. 56–66.
65. Скиданенко М. С. Розповсюдження коливань тиску у зоні формування крапель віброгранулятор / М. С. Скиданенко, В. І. Склабінський // *Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте: Международная научно-практическая Интернет-конференция, 18 – 19 июня 2013 г.: тезисы докладов*. – С. 28–36.
66. Чернышев А. К. Аммиачная селитра: свойства, производство, применение / А. К. Чернышев, Б. В. Левин, А. В. Туголуков и др. – М., 2009. – 544 с.
67. ANSYS CFX 12.0: Users Manual / ANSYS Inc., 2007.
68. Хитрых Д. Модуль Pre/Post ANSYS CFX / Д. Хитрых, Д. Плыкин // *ANSYS Solutions*. Русская редакция – 2006. – № 1. – С. 24–31.
69. Скиданенко М. С. Аналіз гідродинаміки в порожнистій перфорованій оболонці відцентрового вібраційного гранулятора / М. С. Скиданенко // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Серія: Технології органічних і неорганічних речовин. – 2014. – № 3/7 (69). – С. 30–35.
70. Михайлов А. К. Конструкции и расчет центробежных насосов высокого давления / А. К. Михайлов, В. В. Малюшенко. – М. : Машиностроение, 1971. – 304 с.
71. Скиданенко М. С. Дослідження гідродинаміки пристроїв для створення монодисперсних мікрокрапель / М. С. Скиданенко, В. І. Склабінський, А. Є. Артюхов., С. О. Лугова // *Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і системах сталого розвитку: збірник наукових статей Третью Міжнародної науково-практичної конференції (10–12 травня 2012 р.): тези доповідей*. – Київ-Рубіжне, Національний технічний університет

- України "КП", 2012. – С. 85–87.
72. Crowe C. T. *Multiphase flow handbook* / New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – p. 1128.
73. Вулис Л. А. Теория струй вязкой жидкости / Л.А. Вулис, В.П. Кашкаро. – М.: Наука, 1965. – с.432.
74. Шкадов В. Я. Течение вязкой жидкости. / В. Я. Шкадов, З. Д. Запрянов – М.: Моск. ун-та, 1984. – 200с.
75. Кочин Н. Е. Теоретическая гидромеханика, ч. II / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. – изд. 4, – Физматгиз, 1963. – 728 с.
76. Shingareva, I. *Solving nonlinear partial differential equations with Maple and Mathematica* / I. Shingareva, C. Lizarraga-Celaya. – Springer Wien New York, – 2011. – 359 p.
77. 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. 2010. – Т. 5. №1. – С. 9–28.
78. Скиданенко М. С. Аналіз гідродинаміки стаціонарного витікання струменя / М. С. Скиданенко, В. І. Склабінський // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – 2013. – №1. – С. 79–85.
79. Скиданенко М. С. Теоретичне дослідження гідродинаміки руху рідини в струмені вимушених коливань / М. С. Скиданенко // Сучасні технології у промисловому виробництві: III Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція, м. Суми, 22 – 25 квітня 2014 р. : тези доповідей. – Суми: СумДУ, 2012. – Ч. 2. – С. 79.
80. Склабінський В. І. Експериментальне дослідження впливу температури та концентрації розчину на якість монодисперсних гранул / В. І. Склабінський, А. Є. Артюхов, Скиданенко М. С. // Наукові праці ОНАХТ. Серія: Технічні науки. – 2012. – Т. 2, вип. 41. – С. 127–129.
81. Бэйнз А. Организация исследований в химической промышленности. Условия, цели и стратегия / А. Бэйнз, Ф. Бредбери, С. Саклинг: :пер. с англ. В. Воронина – М.: Химия, 1974. – 336 с.

82. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента. Т.2. / Н. Джонсон, Ф. Лион; пер. с англ. Э.К. Лецкого, Е.В. Марковой– М.: Мир, 1972. – 516 с.
83. Тюрин Ю. Н. Статический анализ данных на компьютере / Ю. Н. Тюрин, А. А. Макаров. – М.: ИНФРА-М, 1998. – 528 с.
84. Дикий Н. А. Основы научных исследований / Н. А. Дикий, А.А. Халатов. – К.: Выща школа. Головное изд-во, 1985. – 223 с.
85. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. 2-е изд., перераб. и доп. – Энергоатомиздат. Ленингр. 1991. – 304 с.
86. Hahn B. Essential Matlab for engineers and scientists / B. Hahn, D. Valentine. – Academic press. – 2010. – 480 p.
87. <http://habrahabr.ru/post/114335/>
88. 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. – 2014. – №3/2(17). – С. 15–22.
89. Скиданенко М. С. Исследование процесса истечения струи жидкости из отверстия перфорированной оболочки приллера / М. С. Скиданенко, В. И. Склабинский, Н. П. Кононенко // Вісник НТУ ХП. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2014. – № 26 (1069). – С. 186–192.
90. Скиданенко М. С. Визначення впливу фізико-хімічних властивостей середовищ на якість монодисперсних мікрогранул / М. С. Скиданенко, В. І. Склабінський, А. Є. Артюхов, А. В. Іванія // Хімія та хімічні технології: Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених (ССТ–2011) (24–26 листопада 2011 р.). тези доповідей. - Львів: Львівська політехніка, 2011. – С. 196–197.
91. Артюхов А. Е. Исследование условий истечения струи и формирования монодисперсных микрокапель в потоке охлаждающей среды / А. Е. Артюхов, М. С. Скиданенко // II Международная Казахстанско-Российская

- конференция по химии и химической технологии, посвященная 40-летию КарГУ имени академика Е. А. Букетова: материалы конференции (28 февраля–2 марта 2012 г.): тезисы докладов. - Караганда, Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова, 2012. – С. 43–47.
92. Скиданенко М. С. Вплив геометричних параметрів отвору та сили сигналу на монодисперсний розпад струменя / М. С. Скиданенко, В. І. Склабінський // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 23-26 квітня 2013 р.: тези доповідей. – Суми: СумДУ, 2013. – Ч. 2. – С. 125.
93. Склабінський В. І. Підвищення ефективності отримання монодисперсних гранул / В. І. Склабінський, А. Є. Артюхов, М. С. Скиданенко // І Міжнародна науково-технічна конференція "Хімічна технологія: наука та виробництво", 7-9 листопада 2012 року, м. Шостка. – Суми : Сумський державний університет, 2012. – С. 97.
94. Классен П. В. Основы техники гранулирования / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. – М. : Химия, 1982. – 272 с.
95. Классен П. В. Основные процессы технологии минеральных удобрений/ П. В. Классен, И. Г. Гришаев. – М.: Химия, 1990. –304 с.
96. Олевский В. М. Технология аммиачной селитры / В. М. Олевский. – М. : Химия, 1978. – 312 с.
97. Генералов М. Б., Расчет оборудования для гранулирования минеральных удобрений / М. Б. Генералов, П. В. Классен, А. Р. Степанова, И. П. Шомин. – М.: Машиностроение, 1984. – 191 с.
98. Склабинский В. И. Эффективность промышленного внедрения модернизированного вращающегося вибрационного гранулятора плава в агрегатах получения аммиачной селитры / В. И. Склабинский, Н. П. Кононенко, М. С. Скиданенко // Хімічна промисловість України. – 2012. – № 3 (110). – С. 73–76

99. Скиданенко М. С. Теоретичне дослідження гідродинаміки руху рідини в струмені вимушених коливань / М. С. Скиданенко // Сучасні технології у промисловому виробництві: III Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція, м. Суми, 22 – 25 квітня 2014 р.: тези доповідей. – Суми: СумДУ, 2012. – Ч. 2. – С. 79.
100. Эйдинов А. М. Применение нормативных методов в управлении химическими предприятиями / А. М. Эйдинов, М.Г. Ширин. – М. : Химия, 1987. – 208 с.

ДОДАТОК А

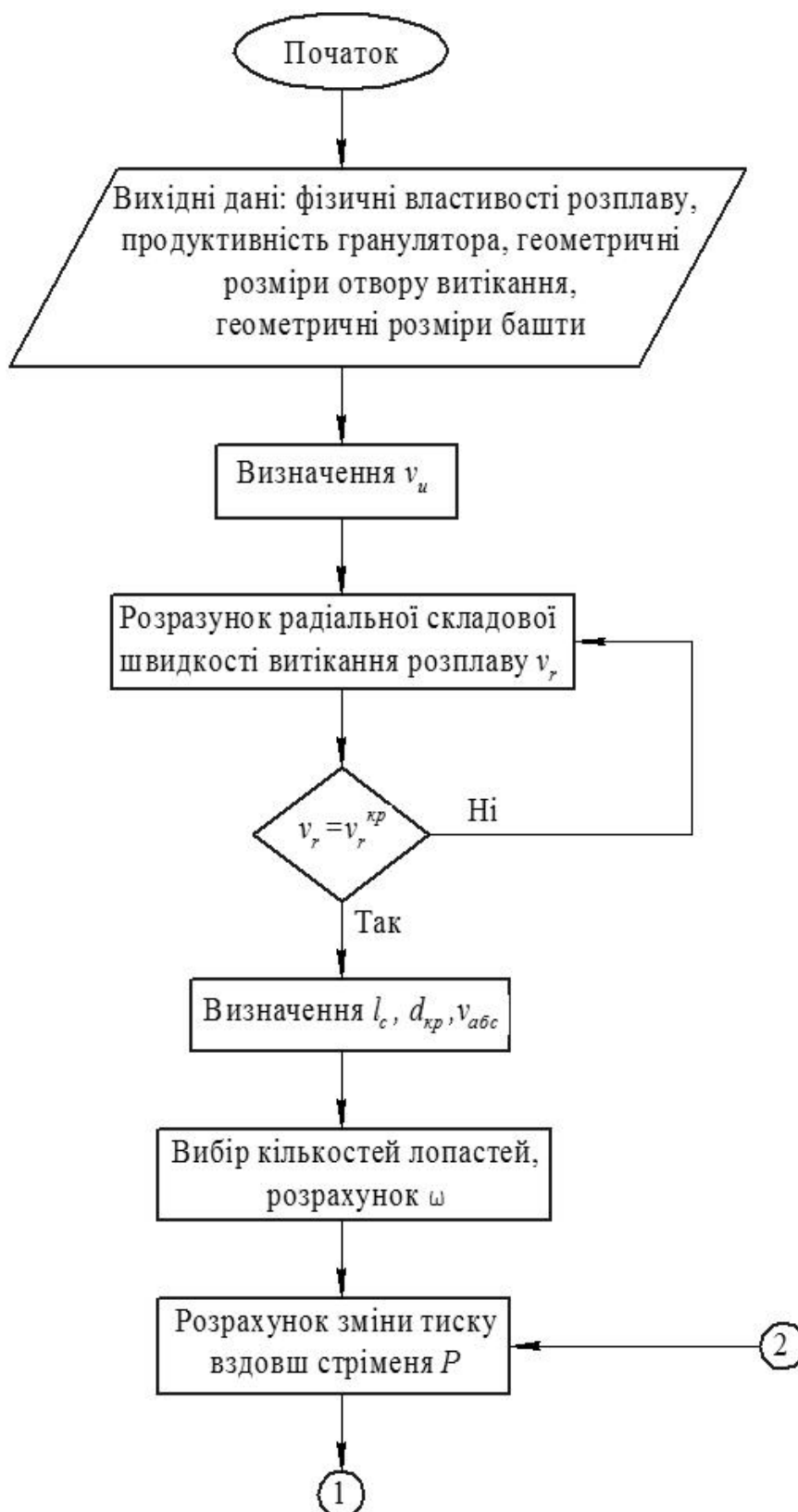
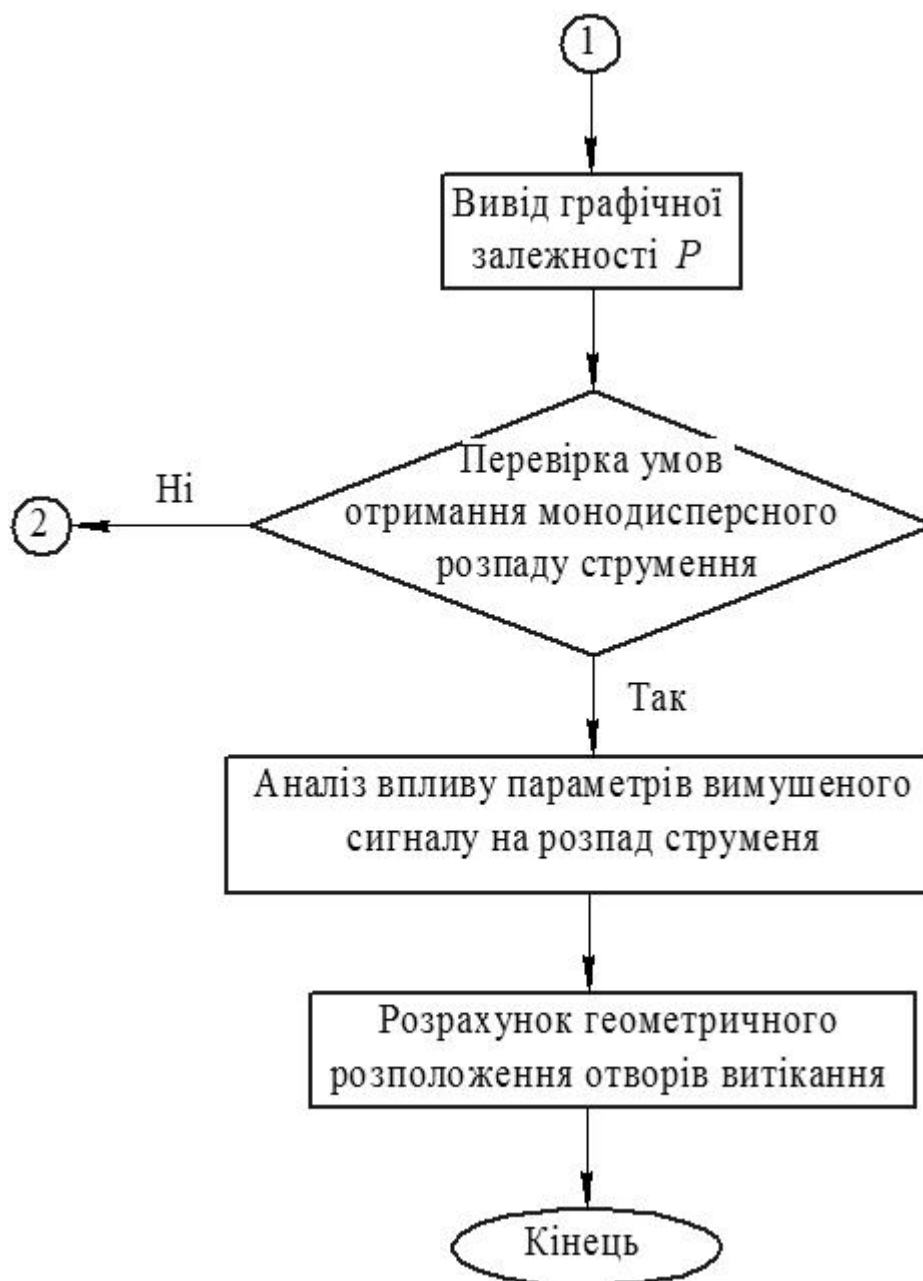


Рис. А. 1. Блок-схема розрахунку гідромеханічних параметрів гранулятора для умов створення крапель монодисперсного складу та його інженерного розрахунку

Продовження рис. А. 1. Блок-схема розрахунку гідромеханічних параметрів гранулятора для умов створення крапель монодисперсного складу та його інженерного розрахунку (фрагмент 2)



ДОДАТОК Б

УКРАЇНА

ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
“СЕВЕРОДОНЕЦЬКЕ ОБ’ЄДНАННЯ
АЗОТ”

93403, м. Северодонецьк-3, Луганської обл.
вул. Пивоварова, 5 Телефон 6-93-39
Телетайп 118656 “Знамя”
Телекс 115160 “Луг” УХ
Телефакс (064-52) 2-99-69, 2-30-30
П.р. 26003017450001
У відділенні №12 філії ПАТ “КБ “Надра”
Луганське регіональне управління
МФО 304193
і.к. 33270581



УКРАИНА

ЧАСТНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
“СЕВЕРОДОНЕЦКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
АЗОТ”

93403, г. Северодонецк-3, Луганской обл.
ул. Пивоварова, 5 Телефон 6-93-39
Телетайп 118656 “Знамя”
Телекс 115160 “Луг” УХ
Телефакс (064-52) 2-99-69, 2-30-30
Т.с. 26003017450001
В отделении №12 филиала ПАО “КБ “Надра”
Луганское региональное управление
МФО 304193
и.к. 33270581



№ _____



“Затверджую”
Технічний директор

І.В.Волохов
2012р.

АКТ

**про впровадження науково-технічних результатів дисертаційної роботи
на здобування наукового ступеня кандидата технічних наук
Скиданенко Максима Сергійовича**

Даним актом засвідчується, що наукові результати, технологічні рекомендації та конструктивні параметри корзини для гранулятора, отримані в дисертаційній роботі М.С. Скиданенко "Гідромеханічні показники пристроїв для отримання дрібних монодисперсних крапель та гранул", впровадженні при розрахунку корзини до гранулятора ВВГ 500/585 на 4400 отворів $d=1,3$ мм.

Результати математичного моделювання та серії експериментальних досліджень, дослідного варіанту корзини для гранулятора в складі технологічної схеми баштового гранулювання сечовини, проведені здобувачем, представляють науково-практичну цінність у перспективі отримання монодисперсних гранул баштовим способом.

У дисертаційній роботі розроблена інженерна методика розрахунку гідромеханічних показників корзини для гранулятора.

Запропоновані результати використані для розроблення корзини для гранулятора ВВГ 500/585 для гранулювання сечовини.

Застосування результатів досліджень дозволяє підвищити монодисперсність гранул сечовини, що призводить до покращення якості товарної фракції.

Голова комісії
Начальник виробництва

Кобзарь А.М.

Член комісії
Начальник цеха карбаміду

Деревянко А.О.

Начальник відділу очищення газу та грануляції

Лапченко О.П.

Продовження ДОДАТКА Б

ЧАО «СЕВЕРОДОНЕЦЬКЕ ОБ'ЄДИНЕННЯ АЗОТ» цех карбамида М-3

14.11.12

РЕЗУЛЬТАТИ ІСПЫТАНИЙ
Вибрационного гранулятора плава ВВГ СК-06

№ п/п	Дата/Время отбора пробы	Нагрузка по плаву, т/час	Част. вибр. резон., мм/с	Част. вибр., Гц	Уровень плава в корзине, %	Фракционный состав, %					Прочность гранул, кгс/гран.	Примечание
						Менее 1,0 мм	1,0-4,0 мм	2,0-4,0 мм	Более 4,0 мм	Более 6,0 мм		
1	30.10.12	50	255	393	36	0,22	99,77	98,33	0,0	0,0	0,82	
2	1.11.12	51	277	396	42	0,2	99,8	98,77	0,0	0,0	0,9	
3	2.11.12	50,6	281	396	45	0,22	99,78	97,51	0,0	0,0	0,85	
4	3.11.12	50,6	281	396	46	0,17	99,83	96,51	0,0	0,0	0,81	
5	4.11.12	48,8	274	394	45	0,31	99,69	95,76	0,0	0,0	0,95	
6	5.11.12	50,7	278	396	45	0,26	99,74	98,72	0,0	0,0	0,87	
7	6.11.12	50,9	235	397	32	0,24	99,89	96,83	0,0	0,0	0,86	
8	7.11.12	50,7	252	398	33	0,29	99,71	97,34	0,0	0,0	0,89	
9	8.11.12	51,2	247	404	34	0,1	99,9	98,93	0,0	0,0	0,82	
10	9.11.12	50,9	281	395	34	0,14	99,86	98,21	0,0	0,0	0,89	
11	10.11.12	51,6	272	454	35	0,22	99,78	98,73	0,0	0,0	0,82	
12	11.11.12	50,2	287	447	37	0,17	99,83	98,54	0,0	0,0	0,81	
13	12.11.12	50,9	191	434	36	0,16	99,84	97,68	0,0	0,0	0,85	
14	13.11.12	50,8	250	384	39	0,18	99,82	98,04	0,0	0,0	0,79	
15	14.11.12	50,5	0	0	36	0,93	99,07	96,52	0,08	0,0	-	

Начальник цеха

Технолог

Начальник лаборатории

Деревянко А.А.

Шевченко В.А.

Дроздова И.Г.



14.11.12

ДОДАТОК В

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
 Технічний директор
 ПАТ "КОНЦЕРН СТИРОЛ"
 В.В. Пономаренко
 " " " " 2013р.



АКТ

**про впровадження науково-технічних результатів дисертаційної роботи
 на здобування наукового ступеня кандидата технічних наук
 Скиданенко Максима Сергійовича**

Даним актом засвідчується, що наукові результати, технологічні рекомендації та конструктивні параметри корзини для гранулятора, отримані в дисертаційній роботі М.С. Скиданенко "Гідромеханічні показники пристроїв для отримання дрібних монодисперсних крапель та гранул", впровадженні при розрахунку корзини до гранулятора ВВГ ГОАС-12.

Результати математичного моделювання та серії експериментальних досліджень, дослідного варіанту корзин для гранулятора в складі технологічної схеми баштового гранулювання аміачної селітри, проведені здобувачем, представляють науково-практичну цінність у перспективі отримання монодисперсних гранул баштовим способом.

У дисертаційній роботі розроблена інженерна методика розрахунку гідромеханічних показників корзини для гранулятора.

Запропоновані результати використані для розроблення корзини для гранулятора ВВГ ГОАС-12 для гранулювання аміачної селітри.

Застосування результатів досліджень дозволяє підвищити монодисперсність гранул аміачної селітри, що призводить до покращення якості товарної фракції.

Начальник цеху АС та КА

А.В. Понедельник

Технічний керівник цеху АС та КА

С.О. Горбатюк

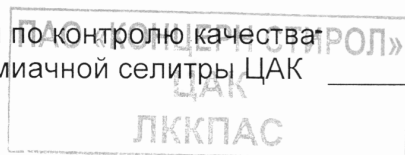
Продовження ДОДАТКА В

**Результаты испытаний гранулятора ВВГ ГОАС-12
в цехе по производству АС и КА ПАО "КОНЦЕРН СТИРОЛ"**

№ п/п	Дата/ время	Содержание пыли аммиачной селитры в отходящем воздухе, мг/м ³				
		Осевой вентилятор №1 (ист.83)	Осевой вентилятор №2 (ист.84)	Осевой вентилятор №3 (ист.85)	Осевой вентилятор №4 (ист.86)	Средние
1	20.02.2013г./ 13 ⁴⁰ -14 ⁴⁰	21,2	21,4	21,0	24,6	22,1
2	21.02.2013г. 13 ³⁵ -14 ³⁰	16,6	34,47	21,0	20,65	23,2
3	22.02.2013г./ 13 ⁴⁰ -14 ³⁵	16,6	20,8	21,5	25,5	21,1
4	26.02.2013г./ 13 ⁵⁰ - 14 ⁴⁵	25,8	34,9	25,8	43,4	32,5
*5	27.02.2013г. 10 ¹⁵ - 11 ¹⁵	25,5	33,8	25,7	34,5	29,9

**Примечание: отбор проб проводился при выключенной вибросистеме гранулятора*

Зав. лаборатории по контролю качества
производства аммиачной селитры ЦАК



О.Г. Баранова

27.02.13г.

Продовження ДОДАТКА В

Результаты испытаний гранулятора ВВГ ГОАС-12 в цехе АС и КА ПАО "КОНЦЕРН СТИРОЛ"

№	Дата время	Напр. т/час	Уров. плава в корз., %	Частота вibr., Гц	Число обор. корз., об./мин	Гран состав продукции, %										Прочность, кг/гранулу	Тем. гранул, °С	Тем. воз., °С	Примечан ия
						менее 1мм	1-2 мм	2,0- 2,5 мм	2,5- 3,0 мм	3,0-4,0 мм	более 4,0 мм	более 5,0 мм	более 6,0 мм	2-4 мм	1-4 мм				
	20.02.13																		
1	10 ⁴⁶		45	0	33	0,52	3,8	53,4	30,8	11,1	0,16	-	-	-	95,3	99,32	1,5		
2	10 ³⁰		48	0	33	0,3	3,91	52,9	32,68	9,98	0,14	-	-	-	95,56	99,56			
3	11 ³⁷		50	360	33	0,2	0,37	73,8	17,48	7,13	1,2	-	-	-	98,4	98,78	1,4		
4	11 ³⁷		50	360	33	0,004	1,04	74,0	16,98	6,48	1,3	-	-	-	97,46	98,70	1,4		
5	13 ³⁵		49	360	33	0,28	0,36	78,0	11,16	9,87	0,28	-	-	-	99,03	99,7	1,3		
6	13 ³⁵		49	360	33	0,02	0,65	78,4	13,0	7,75	0,18	-	-	-	99,15	99,8			
7	14 ⁴⁰		54	380	33	0,004	0,52	72,25	19,18	7,85	0,18	-	-	-	99,28	99,82	1,3		
8	14 ⁴⁰		54	380	33	0,012	0,55	70,74	20,28	7,96	0,32	-	-	-	99,11	99,67			
9	15 ²⁰		44	400	33	0,02	1,1	67,82	25,42	5,36	0,21	-	-	-	98,67	99,77	1,2		
10	15 ²⁰		44	400	33	0,02	0,79	68,62	24,74	5,56	0,11	-	-	-	99,08	99,87			
	21.02.13																		
11	9 ⁴⁰		54	400	33	0,3	4,09	68,55	23,24	3,53	0,17	-	-	-	95,44	99,53	1,3		
12	9 ⁴⁰		54	400	33	0,15	1,76	62,58	31,47	3,84	0,09	-	-	-	98,00	99,76			
13	13 ³⁰		61	400	48	0,028	0,004	84,15	14,27	1,32	-	-	-	-	99,97	99,97	1,4		
14	14 ²⁰		51	400	53	0,11	0,17	91,5	7,5	0,63	-	-	-	-	99,72	99,89			
15	15 ³¹		46	360	53	0,05	0,38	91,64	7,06	0,86	0,012	-	-	-	99,56	99,94	1,3		
	22.02.13																		
16	12 ⁰⁰		60	360	53	0,12	1,0	89,5	7,8	1,3	0,24	-	-	-	98,64	99,64	1,3		
17	14 ³⁰		40	360	53	0,10	3,45	72,6	20,6	3,2	0,04	-	-	-	96,41	99,86	1,2	пуск гран.	
18	15 ¹⁵		42	400	53	0,2	0,8	89,71	8,4	1,0	0,08	-	-	-	98,92	99,72	1,2		
	25.02.13																		
19	10 ⁴⁰		45	400	53	0,03	1,0	78,84	16,9	3,18	0,04	-	-	-	98,95	99,96	1,4		
20	11 ³⁰		40	420	58	0,0024	0,26	85,36	1,9	1,39	0,06	-	-	-	99,65	99,94	1,5		
21	15 ¹⁵		40	440	58	0,01	2,95	23,24	67,16	6,56	0,08	-	-	-	96,96	99,91	1,4		
22	16 ⁰⁰		40	400	58	0,04	3,80	66,44	23,78	6,56	0,08	-	-	-	99,88	99,88	1,4		

Зав. лабораторией по контролю качества производства аммиачной селитры ПАО «КОНЦЕРН СТИРОЛ» _____ О.Г. Баранова

ПАО «КОНЦЕРН СТИРОЛ»
ЛККПАС

Продовження ДОДАТКА В

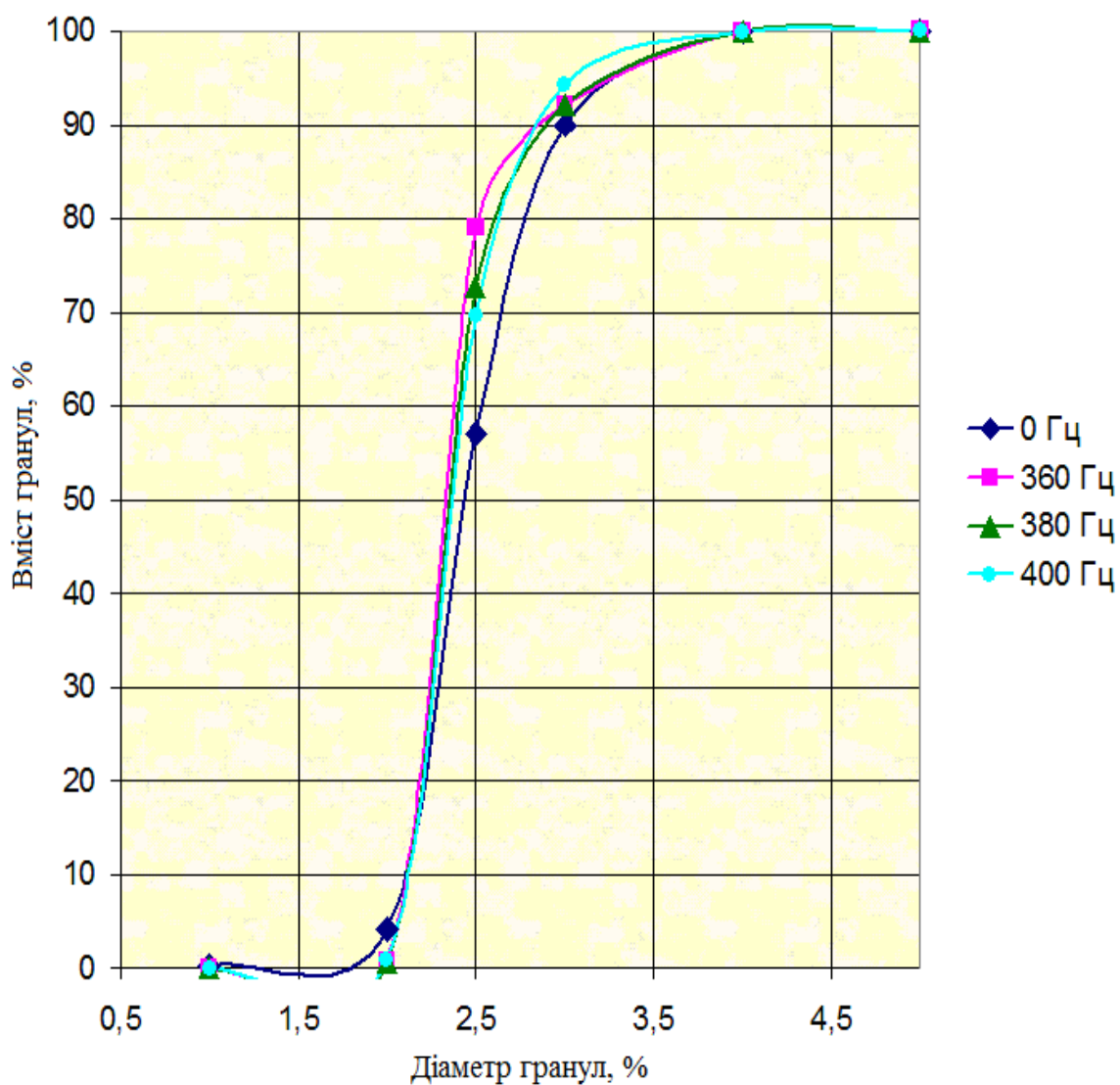


Рисунок 1 – Інтегральна залежність масової частки гранул аміачної селітри (за результатами ситового аналізу), отримана за наступних умов роботи гранулятора: рівень плаву в корпусі гранулятора 52%, число обертів корпусу гранулятора 33 об/хв.

Продовження ДОДАТКА В

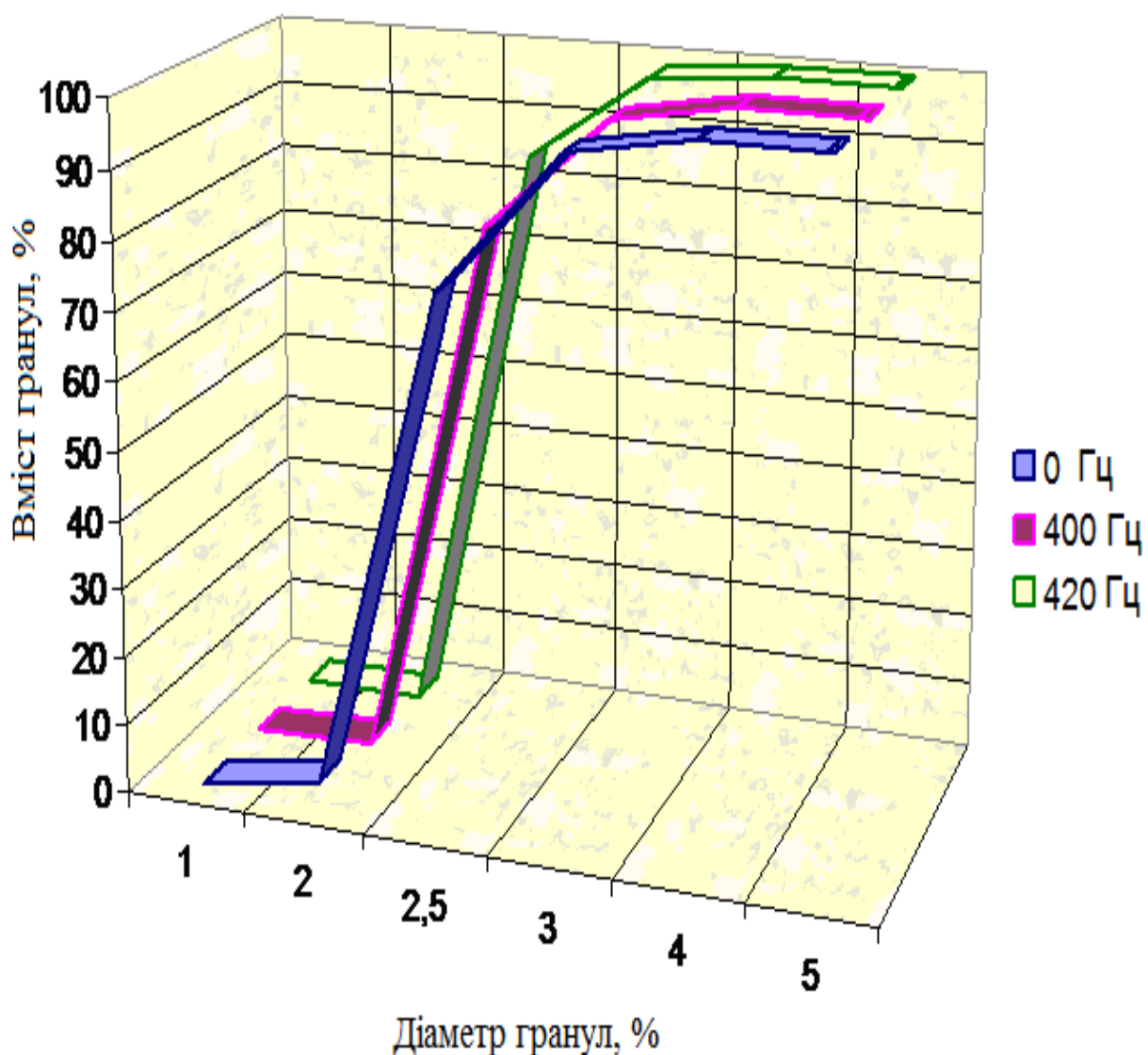


Рисунок 2 - Інтегральна залежність масової частки гранул аміачної селітри (за результатами ситового аналізу), отримана за наступних умов роботи гранулятора: рівень плаву в корпусі гранулятора 41 %, число обертів корпусу гранулятора 53 об/хв.

Продовження ДОДАТКА В

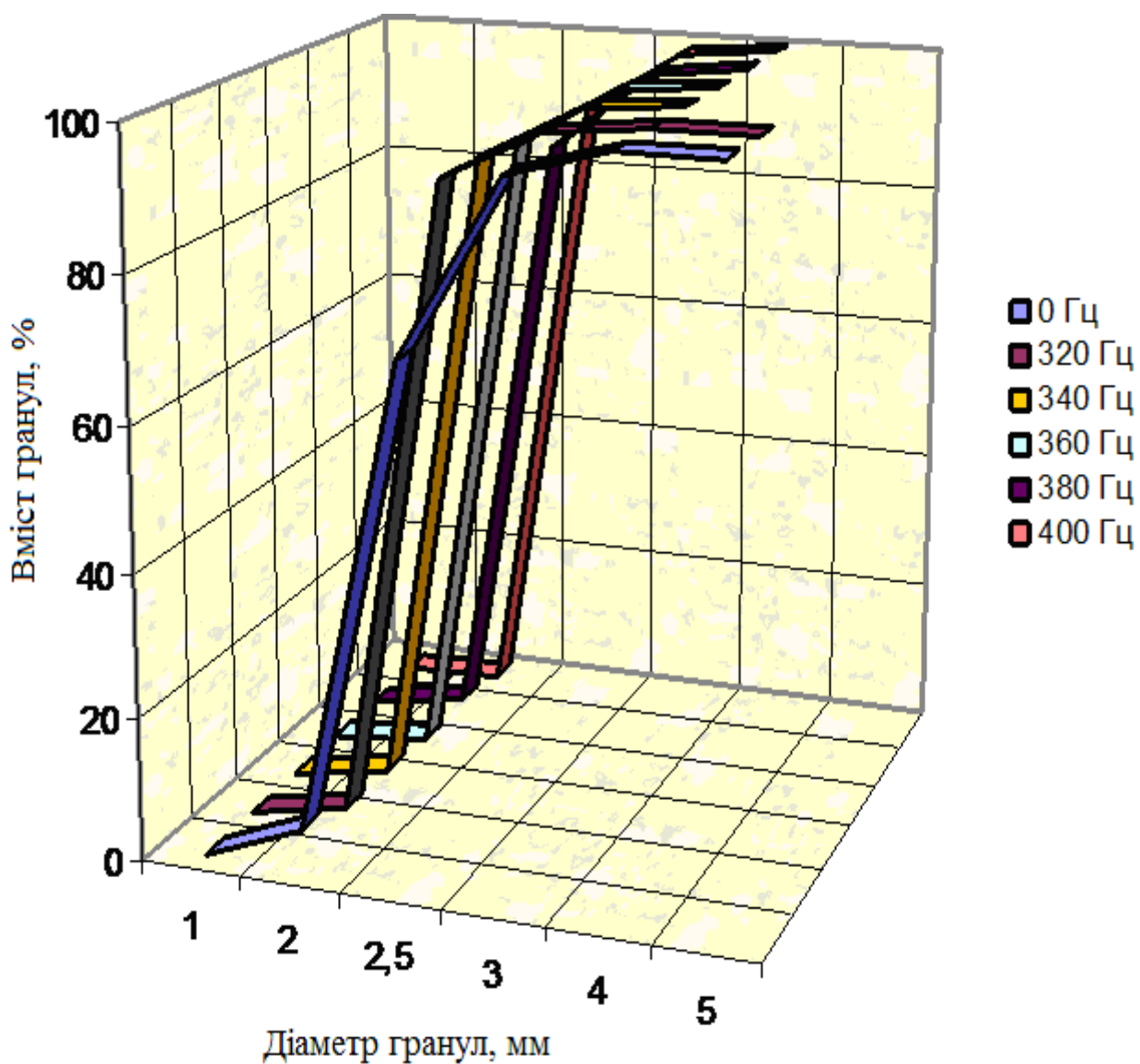


Рисунок 3 - Інтегральна залежність масової частки гранул аміачної селітри (за результатами ситового аналізу), отримана за наступних умов роботи гранулятора: рівень плаву в корпусі гранулятора 41 %, число обертів корпусу гранулятора 58 об/хв.