

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавра

**на тему: «Чисельне дослідження динамічних характеристик
елементів віброгранулятора»**

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

ОПП: Комп'ютерний інжиніринг в
механіці

Виконав: студент групи КМ-71

Яковчук В.В.

Керівник: проф. Павленко І.В.

Рецензент: зав. кафедри Загорулько А.В.

Суми 2021

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра: 51 с., 27 рис., 26 дж.

Об'єкт дослідження: гідромеханічні процеси при віброгрануляції плаву.

Предмет дослідження: вібраційні характеристики коливань перфорованої оболонки.

Мета роботи: покращення динамічних характеристик елементів віброгранулятора для забезпечення якісного гранулометричного складу одержуваної сировини.

Завдання:

1. Проаналізувати способи і пристрої для одержання сировини із заданим гранулометричним складом.
2. Розрахувати власні частоти корзини віброгранулятора з рідиною.
3. Провести моделювання гідродинаміки плаву рідини засобами «ANSYS»
4. Розрахувати динамічні характеристики зубчастого з'єднання.

Існуючою проблемою розвитку віброгрануляторів визначення вібраційних характеристик перфорованого ковша, наповненого рідиною до певного рівня. Для вирішення даної проблеми, проведено огляд літератури та зроблено на основі цього вибір напрямів дослідження. Детально розглянути конструкцію та принцип роботи віброгранулятора, розроблено математичну модель демпфованих коливань для побудови амплітудно-частотної характеристики його еліптичного днища. Досліджено динаміку зубчастих коліс приводу віброгранулятора з використанням програмного комплексу «ANSYS».

ПЕРФОРОВАНА ОБОЛОНКА, КОЛИВАННЯ, ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є, КОНІЧНЕ ЗУБЧАСТЕ ЗАЧЕПЛЕННЯ.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Огляд літератури та вибір напрямку досліджень.....	6
1.1 Види та типи грануляторів.....	6
1.2 Типи проблем, що виникають під час експлуатації вібраційних грануляторів.....	19
1.3 Висновки до першого розділу.....	21
2. Математичне моделювання процесу вібраційної грануляції гелю в активному гідродинамічному середовищі.....	23
2.1 Розроблення одномасової моделі, що описує вібраційний стан гранулятора.....	23
2.2 Побудова амплітудно частотної характеристики коливань.....	33
2.3 Висновки до другого розділу.....	38
3. Чисельне моделювання процесу вібраційної грануляції гелю в активному гідродинамічному середовищі	39
3.1 Розробка моделі для розрахунку процесу вібраційної грануляції гелю в активному гідродинамічному середовищі.....	39
3.2 Результати числових моделювань впливу вібрації диску випромінювача на циліндричний корпус.....	40
3.3 Розрахунок приводу віброгранулятора	42
3.4 Висновки до третього розділу.....	45
Висновки.....	47
Перелік джерел посилань.....	49

ВСТУП

Широко розповсюдженими каталізаторами та виробництвом ядерного палива є технологія золь-гель, що включає декілька етапів, а саме: підготовку сировини, її розподіл у краплі, утворення гранул у газі, а потім у рідких середовищах, видалення гранул з поділом рідини.

Створення нових гранульованих матеріалів в активному гідродинамічному середовищі здійснюється з використанням вібраційних приладів, що широко використовуються в різних галузях промисловості. Таким приладом являється вібраційний гранулятор, який пропонується використовувати на стадії диспергування. Однією з проблем розвитку цих грануляторів є визначення вібраційних характеристик перфорованого ковша, наповненого рідиною до певного рівня.

Вібрація відіграє важливу роль у роботі обладнання та терміні його служби, оскільки це може призвести до поломок. Надійність і довговічність будь-якого механізму – одне з основних завдань, яке ставлять перед їх розробниками. А враховуючи, що головним «інструментом» для прямої функції грануляторів є вібрація, її вивчення відіграє важливу роль для всього апарату.

У зв'язку з цим, метою роботи є підвищення вібраційної надійності віброгранулятора.

Поставлені наступні задачі:

1. Проаналізувати способи і пристрої для одержання сировини із заданим гранулометричним складом.
2. Розрахувати власні частоти корзини віброгранулятора з рідиною.
3. Провести моделювання гідродинаміки плавучої рідини засобами «ANSYS»
4. Розрахувати динамічні характеристики зубчастого з'єднання.

Предмет дослідження: вібраційні характеристики коливань перфорованої оболонки.

Мета роботи: покращення динамічних характеристик елементів віброгранулятора для забезпечення якісного гранулометричного складу одержуваної сировини.

У ході досліджень було вирішено використовувати модулі потоку та перехідні структурні модулі програмного забезпечення ANSYS Workbench.

Робота складається з чотирьох розділів, висновків та переліку посилань.

У першому розділі представлено результати огляду літератури та зроблений на основі цього вибір напрямків досліджень.

У другому розділі більш детально розглянуто конструкцію та принцип роботи віброгранулятора, проведено математичне моделювання процесу вібраційної грануляції гелю в активному гідродинамічному середовищі.

У третьому розділі описано розроблення математичної моделі демпфованих коливань для побудови амплітудно-частотної характеристики еліптичного днища віброгранулятора.

У четвертому розділі проведено розрахунок приводу віброгранулятора. А саме: дослідження динаміки зубчастих коліс з використанням програмного комплексу ANSYS Workbench та його модуля Explicit Dynamics. Особлива увага приділялася зоні контакту зубчастих коліс. Проводилася перевірка зачеплення зубчастої пари, аналізуючи залежність осередненої сили по контактній поверхні від часу.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Види та типи грануляторів

На сьогоднішній день сфера використання грануляторів розширилася, адже грануляція це важливий процес у ряді галузей промисловості, включаючи сільськогосподарські хімікати, переробку мінеральних речовин, фармацевтичні препарати, харчові продукти та миючі засоби.

Грануляція, як правило, необхідна для поліпшення текучості порошку і механічних властивостей гранул. Гранули формуються додаванням рідких сполучних речовин або розчинів розчинників. При використанні більшої кількості грануляційної рідини можна отримати частинки з меншим діаметром і більш жорсткі і тверді гранули, тобто скорочується кількість дрібних частинок грануляту.

Існує безліч змінних в процесі контролю роботи гранулятора, починаючи від швидкості подачі грануляційної рідини і закінчуючи часом резонансу камери гранулятора, і всі вони впливають на розмір часток по-різному.

Гранулятори мають різну форму перфорованої оболонки (рис. 1.1), зазвичай вони мають осьову симетрію.

По формі робочої частини (перфорованої оболонки) гранулятори можна поділити на наступні типи:

- циліндричні (циліндричні, циліндричні ступеневі);
- конічні (конічні, конічні із зворотними конусами, конічні із гофрами);
- кулястої форми (сферичні, параболоїдальні, чашоподібні, ступеневі, кулясті із гофрами);

За наявністю внутрішніх пристроїв в корзині гранулятора (перфорованої оболонки) їх можна класифікувати на:

- без внутрішніх пристроїв;

- з внутрішніми пристроями, які в свою чергу поділяються на:
 - з радіальними лопатами;
 - з незалежно обертовими лопатами;
 - з горизонтальними перегородками;
 - з лопатами гвинтового профілю;
 - із внутрішнім перфорованим циліндричним розподільником.

Окрім цього, гранулятори поділяються на:

- статичні;
- вихрові гранулятори з тангенціальним уведенням плаву в перфоровану оболонку;
- вихрові гранулятори з турбіною для розкручування плаву;
- динамічні або гранулятори, що обертаються.

В останні роки перевагу в основному віддають відцентровим циліндричним і конічним грануляторам та грануляторам з чашоподібними оболонками. Це пояснюється простотою їх виготовлення й кращими показниками для одержання досить рівномірних крапель рідини або гранул.

Перфоровані й пористі оболонки є основними елементами конструкцій відцентрових грануляторів плаву, масообмінних колон, розпилювачів рідини фільтруючих центрифуг. В свою чергу ці апарати знаходять широке застосування в ряді технологічних процесів хімічної промисловості. Так, відцентрові гранулятори широко застосовують для гранулювання плавів аміачної селітри, сечовини та складних добрив [1-2].

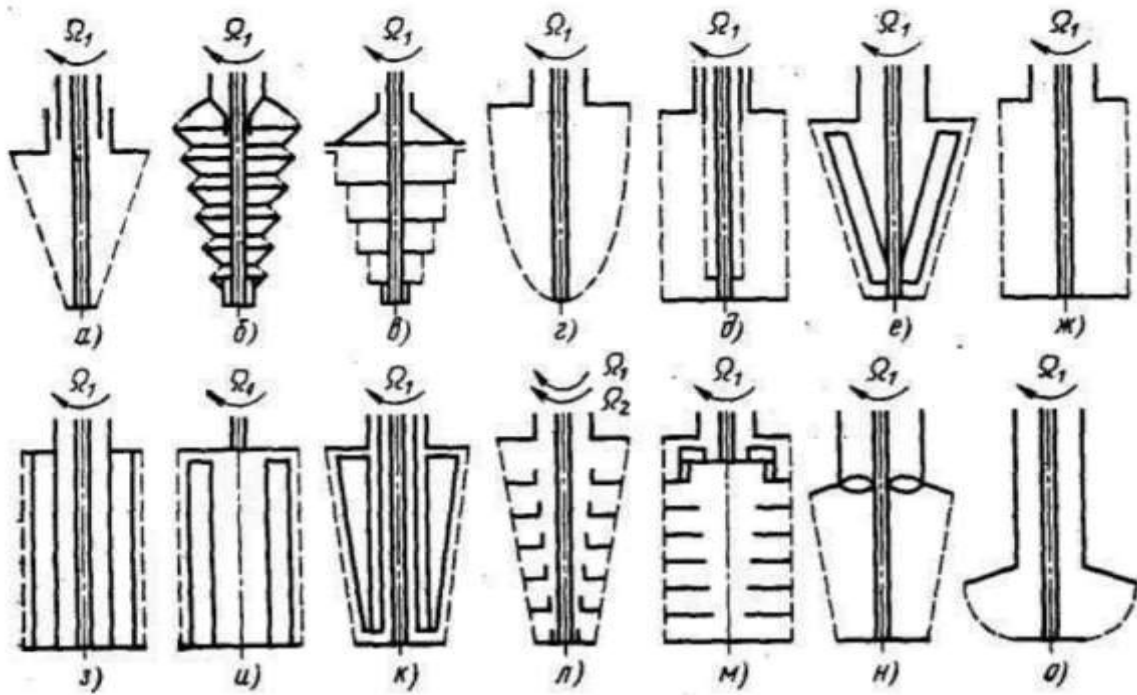


Рисунок 1.1 - Форма перфорованих обертових оболонок, використовуваних у промисловості для диспергування й розподілу рідин і плавів: а) – порожня конічна; б) – порожня зі зворотними конусами; в) – ступенева порожня; г) – порожня параболоїдної форми; д) – циліндрична із внутрішнім перфорованим циліндричним розподільником; е) – конічна з радіальними лопатами; ж) – порожня циліндрична; з, і) – циліндричні з радіальними лопатами; к) – конічного з незалежно обертовими лопатами; л) – конічна з горизонтальними перегородками; м) – циліндрична з горизонтальними перегородками; н) – конічна з лопатами гвинтового профілю; о) – чашоподібна.

Гранулятор відцентрового типу (рис. 1.2) виготовляється з нержавіючої сталі й обертається із частотою 400-450 об/хв. При роботі таких грануляторів основне навантаження по гранулам доводиться на відносно невеликий кільцевий простір, що перебуває на відстані 4-6 м від осі грануляційної башти, а її центральний і бічний обсяги практично не працюють. Внаслідок різної кутової швидкості, навіть у випадку використання кращих відцентрових

грануляторів, у башту викидаються неоднакові по розмірах краплі плаву, на охолодження й формування яких потрібні різний час і різна висота польоту. Відцентрові гранулятори [2-5] найкраще відповідають вимогам для грануляції плавів, що містять суспензії і для плавів складних добрив. Основними труднощами при гранулюванні плавів, що містять суспензії, є часті забивання отворів твердими частками. Відфільтрувати частки суспензії, що закупорюють отвори витікання, в ряді випадків не можливо, тому що ці частки суспензії є або складовою частиною добрива, або їх вводять у плав для зменшення злежуваності. Для таких плавів необхідні конструкції грануляторів, в яких необхідно створити гідродинамічний режим, що сприяє виходу часток домішок через отвори витікання. При цьому бажано, щоб розмір отворів витікання був максимальним і в той же час забезпечував одержання досить рівномірних гранул заданого розміру.

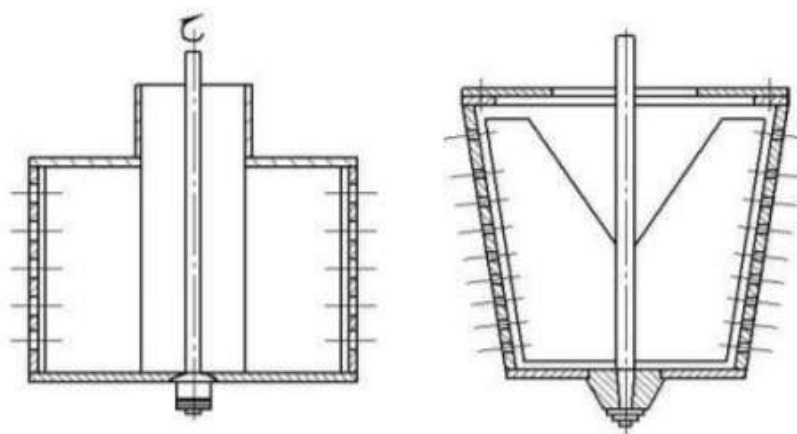


Рисунок 1.2. Відцентрові гранулятори циліндричної (а) і конічної форми (б)

Особливістю вихрових грануляторів [3-6] є те, що за допомогою лопатей, які розкручують рідину, або внаслідок тангенціального введення рідини у перфоровану оболонку, рідині надається обертальний рух щодо нерухливих стінок оболонки. Змінюючи значення тиску рідини в оболонці та відносну швидкість, можна міняти перетин струменів рідини, які витікають із отворів оболонки в широких межах. Тонкі струмені рідини можна одержувати

при витіканні рідини з отворів значно більшого діаметру, чим у випадку, коли відносна швидкість $v_{\text{відн}} = 0$. Це істотно підвищує надійність роботи гранулятора, дозволяє змінювати перетин струменів і, отже, гранули шляхом зміни величини $v_{\text{відн}}$.

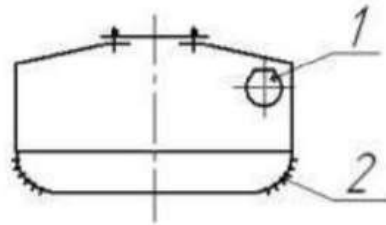


Рисунок 1.3. Вихровий гранулятор з тангенціальним уведенням плаву 1 в перфоровану оболонку 2

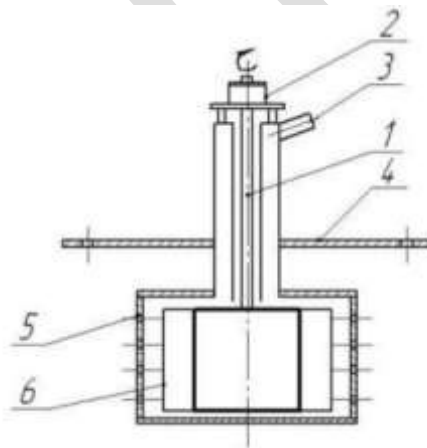


Рисунок 1.4. Вихровий гранулятор з турбіною для розкручування плаву: 1— вал; 2 — вузол підшипників; 3— вхід плаву; 4 — кріпильний фланець; 5 — нерухома перфорована оболонка; 6 — обертова турбіна

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. 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. 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 [3]. До недоліків статичного гранулятора можна віднести порівняно невеликий розмір отворів витікання, що супроводжується швидким забиванням отворів витікання розплавом, а отже необхідністю встановлювати фільтри для розплаву. Перший із зазначених недоліків є перешкода використання статичних грануляторів у разі диспергування суспензії - розплаву мінеральних добрив з твердим порошковим наповнювачами. 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.

У статичних віброгрануляторах вібрація створюється різними способами: з накладанням вібрації за рахунок впливу гідроакустичного генератора, в інших - пневмомеханічним вібратором або електромагнітним [7-8]. В корпусі акустичного гранулятора встановлена пластина, яка при взаємодії зі сплавом, що проходить через сопло, 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. Акустичні гранулятори дозволяють отримати збільшений однорідний гранулометричний склад продукту

Віброгранулятори з верхнім мембранним випромінювачем коливань — це одна з перших конструкцій грануляторів вібраційного типу [6-9]. На рис. 1.5, показаний цей пристрій. У грануляторі є патрубок 1 для уведення плаву, розподільна решітка 2, перфороване чашоподібне днище 3 з отворами для

витікання плав. У верхній частині порожнина днища має еластичну або пружну мембрану 4, з'єднана за допомогою штока 5 з механічним або електродинамічним вібратором 8 тієї або іншої конструкції. Вібратор 8 установлений на амортизаційній підкладці 7. Чашоподібне перфороване днище кріпиться до корпусу фланцевою сполукою 6. Віброгранулятор працює в таким чином. Плав по патрубку 1 через розподільну решітку 2 надходить у порожнину чашоподібного днища 3 і витікає у вигляді струменів з отворів днища 3 у грануляційну башту. Одночасно вібратор 8 через шток 5 приводить в дію мембрану 4, розташовану в плав, у коливальний рух із фіксованою частотою. У порожнині днища 3 у плав поширюються пружні хвилі. Це приводить до періодичної зміни тиску (напору) плав перед отворами витікання й відповідно до періодичної зміни швидкості витікання плав з отворів. При цьому на поверхні струменів плав, що витікають зі змінною швидкістю, утворюються збурювання (звуження й розширення) із частотою, рівній частоті вібратора. Якщо відстань між двома сусідніми звуженнями більше довжини окружності незбуреного струменя, то збурювання швидко росте під дією сили поверхневого натягу плав, і струмінь розпадається на рівномірні краплі. Падаючи у вежі назустріч потоку холодного повітря, краплі плав кристалізуються, перетворюючись у гранули. При роботі на змушених коливаннях в якості мембрани може бути використаний фторопласт або гофрована нержавіюча сталь. При роботі в режимі резонансу мембрану виготовляють із титану або нержавіючої сталі. Форма мембрани може бути опуклою або плоскою. Плоска мембрана простіше у виготовленні.

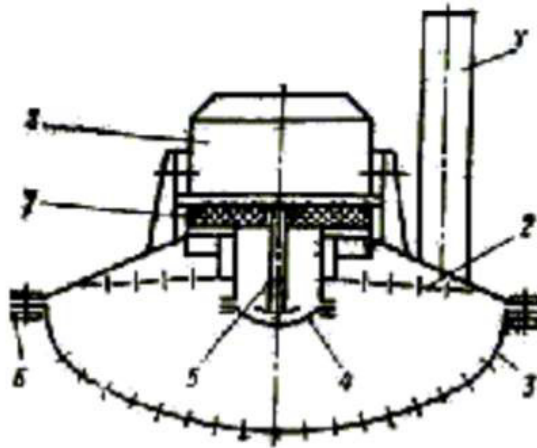


Рисунок 1.5. Вібраційний гранулятор з мембранним випромінювачем

Віброгранулятор з мембраною-днищем. У цьому грануляторі мембрана, що випромінює коливання, являє собою плоску центральну неперфоровану частину чашоподібного днища (рис. 1.6). У перших конструкціях такого гранулятора кульковий вібратор був прикріплений під днищем у центрі [10-12]. Згодом вібратор 10 був винесений наверх і з'єднаний із центральною частиною днища стрижнем 3.

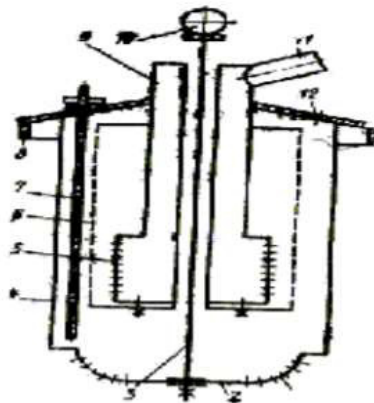


Рисунок 1.6. Модифікація вібраційного гранулятора

Гранулятор працює в такий спосіб. Плав по трубі 11 по кільцевому каналу 9 через розподільник 5 (тієї або іншої конструкції) надходить у порожнину перфорованого днища 1 і витікає з отворів у цьому днищі. Центральна частина 2 днища 1 діаметром 100-300 мм виготовлена плоскою й без отворів. При роботі вібратора 10 днище 1, з'єднане зі стрижнем 3, вібрує,

випромінюючи акустичні коливання в плав, що заповнює порожнину днища. Це приводить до дроблення струменів плаву на рівномірні краплі, як в описаному вище грануляторі. Якщо в гранулятор разом із плавом попадає повітря, то пухирці повітря сепаруються на вільній поверхні плава й виходять із гранулятора через отвір 12. У корпусі 4 гранулятора встановлений пьезометричний датчик 7 для контролю рівня плаву в грануляторі й регулювання навантаження. Для запобігання засмічування отворів витікання випадковими твердими частками й для сепарування пухирців повітря передбачена сітка 6. У башті гранулятор установлюється на опорне й ущільнювальне кільце 8.

Для стабілізації напору плаву перед отворами витікання розроблений віброгранулятор із простим і надійним поплавковим регулятором рівня плаву [13] (рис. 1.7). Цей гранулятор має вібратор 1, з'єднаний стрижнем 6 з перфорованим днищем 7, патрубок 2 для підведення плаву, датчик 3 напору, кришку 4. Для регулювання рівня в грануляторі передбачена поворотна заслінка 5, пов'язана з поплавком 6. У днище 7 є отвори 8 для витікання плаву. Змінна фільтрувальна сітка 9 запобігає засмічуванню отворів 8 випадковими частинками, які можуть бути в плаву, і сепарує пухирці повітря. Розподільник 10 служить для рівномірного введення плаву. У верхній частині гранулятора передбачене фланцеве ущільнення 11. У грануляторі над вільною поверхнею плаву може підтримуватися заданий тиск повітря, що вводиться по патрубку 12. При певному рівні плаву поплавець 6 спливає й прикриває поворотну заслінку 5, запобігаючи подальшому підвищенню рівня.

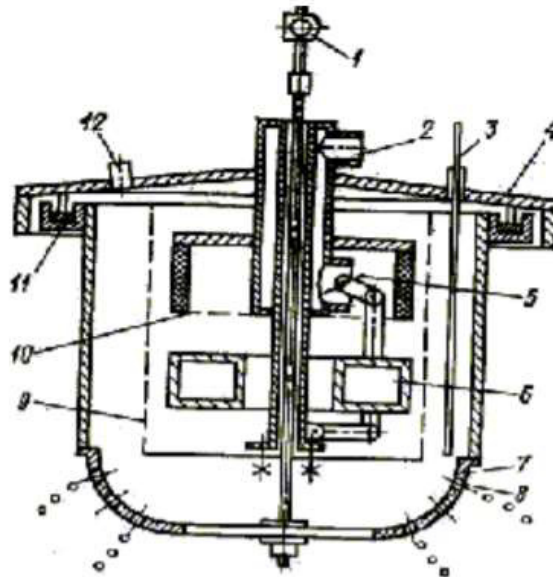


Рисунок 1.7. Віброгранулятор з поплавковим регулятором рівня

Для тонкого регулювання пропускної здатності гранулятора при постійному рівні плаву над вільною поверхнею плаву створюється будь-який заданий тиск повітря, що надходить по патрубку 12. П'єзометричний датчик рівня 3 дозволяє контролювати загальний напір плаву перед отворами витікання. Цей гранулятор забезпечує стабілізацію процесу гранулоутворення й високу якість гранул.

При грануляції плавів спостерігаються зіткнення рівномірних крапель, отриманих при вібродрібленні струменів, з утворенням гранул з подвоєною й навіть потроєною масою. Азотно-тукові заводи випробували віброгранулятори з отворами витікання від 0,8 до 1,4 мм. При цьому ситовим аналізом і візуальним контролем було встановлено, що кількість подвоєних гранул істотно залежить від діаметра отворів витікання, напору плаву перед отворами витікання, різниці між температурою плаву й температурою його кристалізації [6,13]. Застосування віброгранулятора із плоским перфорованим днищем дозволяє здійснити процес вібродріблення в більш широкому діапазоні навантажень. Однак такий віброгранулятор дає вертикальний вузький щільний факел гранул, що погіршує умови теплообміну й веде до їхніх зіткнень і злиття в польоті, налипанню на стінках вежі. Усунути зазначені

недоліки можна зміною форми перфорованого днища. Віброгранулятор із днищем у вигляді кільцевих, симетричних відносно вісі гофр, у яких на одному горизонтальному рівні просвердлені отвори, а їхні осі спрямовані під різними кутами до горизонту, показаний на рис. 1.8.

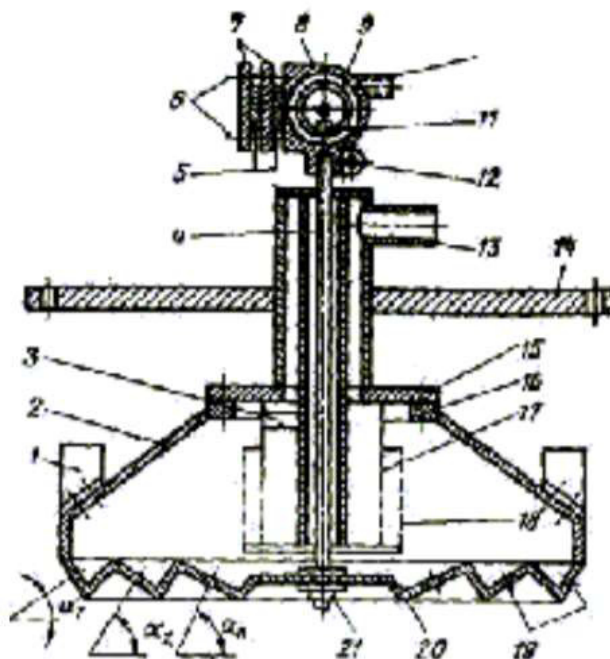


Рисунок 1.8. Віброгранулятор з гофрованим днищем

На віброгранулятор встановлюється вібратор 8, який має обойму 9 від шарикопідшипника, тангенціальне уведення 10 для подачі стисненого повітря, сталева кулька 11, вільно розміщену у біговій доріжці обойми 9, пластинурезонатор 5, кріпильні пластини 7, болти 6, хомут 12 для кріплення, стрижень 4, закріплений гайкою 21 до нижньої частини гофрованого перфорованого днища 20 з отворами 19 для витікання плаву. Устя отворів розташовані в одній горизонтальній площині, але під різними кутами до обрїю. На кришці 2 є додаткові вібратори 1 для створення крутильних коливань при роботі на плав, що містить велику кількість часток шламу. Труба 13 служить для підведення плав в гранулятор, а сітки 17, 18 призначені для рівномірного розподілу плав перед отворами витікання та для ламінаризації потоку плав. Патрубок 3 призначений для видалення газів із гранулятора. Фланці 15 і 16

служать для з'єднання нижньої й верхньому частин гранулятора, а фланець 14 для кріплення гранулятора в башті. Віброгранулятор працює наступним чином. Плав по трубі 13, подається в гранулятор, проходить через розподільні сітки 17 та 18 і через отвори 19, 29 просвердлені в днищі 20 витікає у вигляді струменів у башту або апарат під різними кутами до обрію. Тому що гирло отворів 19 розташовані в одній горизонтальній площині, а їх вісі за рахунок осесиметричних гофрів розташовані під різними кутами до обрію, при роботі на будь-яких напорах швидкість витікання плаву із всіх отворів буде однакової, а факел розбризкування буде розширюватися, що поліпшує умови теплообміну й запобігає злиттю гранул у польоті. Так як швидкість витікання плаву із всіх отворів однакова, то при роботі вібратора 8, що повідомляє центральній частини днища 20 коливання заданої стабільної частоти, на струмені плаву будуть накладатися збурювання з однаковою довжиною хвилі. Це приведе до дроблення всіх струменів на строго рівномірні краплі й при малих напорах. Стиснене повітря на вібратор 8 подається по тангенціальному уведенню 10. Взаємодіючи з кулькою 11, повітряний вихор надає кульці обертовий рух. Виникаюча відцентрова сила через стрижень 4 діє на центральну частину днища 20, де немає отворів. При коливаннях центральній частини днища 20 у плаву, що заповнює гранулятор, і по днищу 20 поширюються пружні хвилі, що приводять до утворення регулярних збурень на струменях плаву, що приводить до розпаду струменів на строго рівномірні краплі. Замість кулькового пневматичного вібратора можна використовувати будь-який вібратор, наприклад електродинамічний або електромагнітний, або мембранний випромінювач коливань (його встановлюють над перфорованим днищем). При використанні кулькового вібратора для узгодження частоти роботи вібратора з оптимальною релеєвською частотою можуть бути передбачені дві або більше пластини-резонатори 5, розрахованих на різні частоти. Властивість кулькового вібратора така, що він настроюється на частоту одного з резонаторів (залежно від тиску стисненого повітря, яке подається по патрубку 10). Міняючи тиск повітря перед патрубком 10, можна

міняти частоту збурень 30 струменів, що необхідно при зміні напору плаву перед отворами 19 більш ніж в 2 рази. Використання описаного гранулятора доцільно при напорах плаву 0,3-0,1 м з одержанням гранул \varnothing 2,5-3 мм. Однак для кристалізації таких великих крапель плаву необхідно збільшити час польоту гранул аміачної селітри у вежі до 5,5-7 с [14,15], що можливо або в результаті збільшення висоти або підвищення швидкості повітря у башті.

Коли неприпустима наявність у гранулометричному складі значної кількості гранул, що зштовхнулися («здвоєні» гранули), доцільно здійснювати обертання віброгранулятора за допомогою привода. При цьому кожна гранула буде рухатися по різних траєкторіях. Це зменшує кількість зіткнень гранул в 5-8 разів у порівнянні з даними для статичних грануляторів і при використанні отворів \varnothing 1,2-1,5 мм дозволяє одержати практично монодисперсний продукт. Особливо важливо це при грануляції плаву карбаміду, тому що краплі подвоєної маси не встигають кристалізуватися у баштах висотою 20 -30 м. Одна з конструкцій обертового віброгранулятора показана на рис. 1.9 [16,17]. Як вібратор можна застосувати сирену або кульковий вібратор. Застосування обертових віброгрануляторів - найбільш раціональний шлях одержання монодисперсних гранул у великих промислових масштабах.

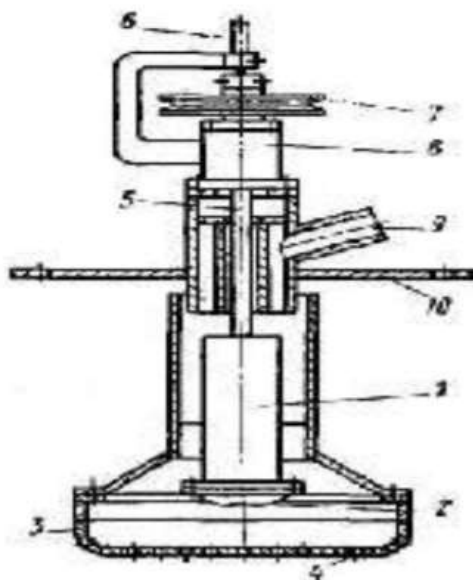


Рисунок 1.9 - Обертний вібраційний гранулятор: 1 - вібратор; 2 - мембрана; 3 - перфорована оболонка; 4 - отвору витікання; 5 - порожній вал; 6 - патрубок для введення повітря; 7 - шків; 8 - вузол підшипників; 9 – патрубок введення плаву; 10 – фланець

1.2 Типи проблем, що виникають під час експлуатації вібраційних грануляторів

Вібраційна система віброгрануляторів розрахована для роботи на певному навантаженні по плаву. Зміни витрати плаву спричиняють відмову у роботі вібросистеми, що призводить до вільного розпаду струменів [18-20]. Крім того, зміни витрати плаву можуть привести до роботи вібросистеми у нестабільному режимі, що приводить до розбіжності частотних характеристик вібросистеми зі швидкістю витікання плаву з отворів, що, у свою чергу, погіршує якість продукту.

В результаті досліджень віброгрануляторів було визначено вплив вібраційних характеристик і потоку рідини через отвори на зміну тиску в струмені розплаву, що дозволяє прогнозувати параметри розпаду струменів для отримання монодисперсних крапель, що призводить до поліпшення якості готового продукту. Зокрема, дослідження дозволили встановити взаємозв'язок між розташуванням джерела вимушених коливань у внутрішньому просторі вібраційного гранулятора, діаметром крапель і краплями-супутниками в процесі розпаду струменя рідини, і, як наслідок, поліпшення якості одержуваного продукту та мінімізації втрат цільового продукту. Крім того, існує проблема забруднення отворів перфорованих оболонок [21]. Тому вплив вібрації на навколишнє середовище та складові елементи вібраційного гранулятора є найважливішими критеріями забезпечення їх надійної та ефективної роботи.

Слід зазначити, що вібраційний потік у навколишнє середовище також залежить від плавної передачі руху від двигуна до виконавчого механізму.

Диспергування здійснюється як взаємодією струменя рідини з потоком газу, так і за допомогою вібрацій, що передаються від приводу в робоче середовище та кошик [22,23]. Для цього, зокрема, використовуються зубчасті шестерні. Однак, поки працює зачеплення, биття може відбуватися через потрапляння в зубчасте колесо кожного зубця шестерні, що негативно впливає на робочий привід і гранулятор в цілому. Такий внесок у вібраційний вплив на навколишнє середовище може суттєво погіршити ефективність процесу грануляції та якість цільового продукту.

Конічні шестерні широко використовуються для плавної передачі обертального руху в промисловому обладнанні та машинах. За формою зуба їх можна класифікувати як прямі, кругові та тангенціальні.

Конічні шестерні складніші у виготовленні, ніж циліндричні, оскільки необхідно підтримувати допуски на кути осі та товщину зубів [24]. Їх також важче встановити через необхідність точного фіксування осевого положення та забезпечення збігу вершин конусів.

Конічні шестерні мають такі переваги як плавне та безшумне зчеплення в порівнянні з іншими типами передач та мінімальне биття завдяки плавному зчепленню.

Конічні зубчасті передачі можна класифікувати за формою зуба: прямі, кругові, тангенціальні (рис. 1.10).

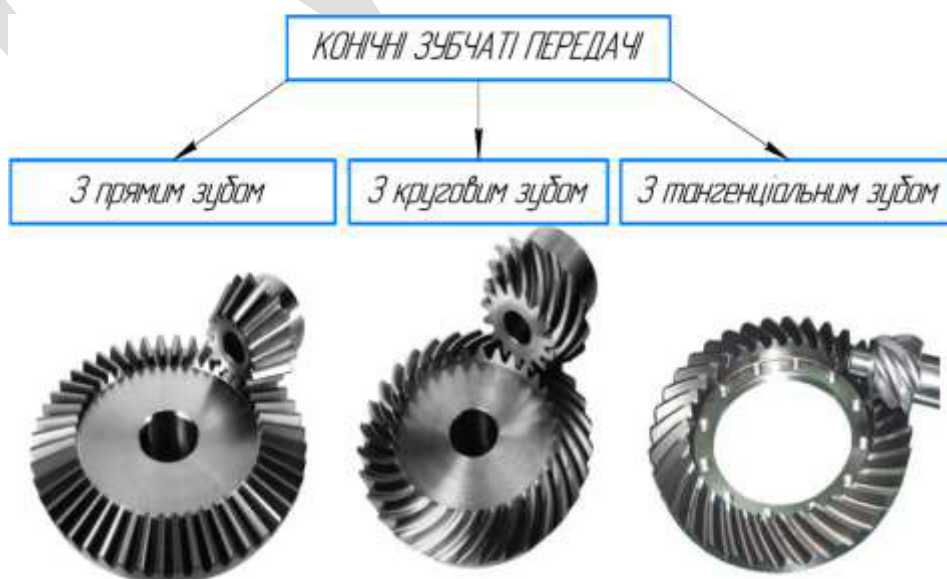


Рисунок 1.10 – Типи конічних зубчатих передач

Одним із видів конічних передач з круговою лінією зуба є передачі з двояко випуклими та двояко ввігнутими зубами, при цьому шестерня зазвичай виготовляється з двояко випуклими, а колесо з двояко ввігнутими зубами. Основною перевагою таких передач є зменшення контактних навантажень і збільшення плавності ходу за рахунок того що вони мають різну кривизну у двох напрямках [25,26]. Підвищення плавності ходу та зменшення биття досягається за рахунок високоточного проектування та виготовлення зубчатої передачі. Для досягнення високої ступені точності розмірів, що контролюються та вимірюються, а саме товщина зуба у вимірювальному перерізі та висота до хорди у вимірювальному перерізі, шестерні та колеса такої передачі, їх виготовляють на фрезерних ЧПК станках.

1.3 Висновки до першого розділу.

За останній час було зроблено багато технологічних відкриттів, завдяки чому підвищилася якість технології грануляції та з'явилася можливість знайти оптимальні рішення для кожного асортименту продукції. Для диспергування розплавів використовують кілька видів грануляторів: обертові, статичні, вібраційні. Використовуються також відцентрові механічні форсункові гранулятори.

Аналізуючи потреби та мету, які переслідує та чи інша промисловість, вона може використати найдоцільніший для цього спосіб: якщо перевага надається швидкості (якої можна досягнути, наприклад, витрачаючи менше часу на усунення засмічень отворів гранулятора), а щільність зрошення розплавом башт при цьому не є пріоритетною, то підійдуть обертові гранулятори; перевага навпаки надається чистоті розплаву та щільності зрошення поперечного перерізу башт – статичні віброгранулятори. Так як

грануляція набуває все більшого значення, можливість такого вибору є дуже важливою.

У багатьох віброгрануляторах використовуються конічні зубчасті передачі. Їхніми перевагами є плавне та безшумне зчеплення, у порівнянні з іншими типами передач, мінімальне биття та відносно невеликі контактні навантаження.

САНДІ

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРАЦІЙНОЇ ГРАНУЛЯЦІЇ ГЕЛЮ В АКТИВНОМУ ГІДРОДИНАМІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

2.1 Розроблення одномасової моделі, що описує вібраційний стан гранулятора

Розглянемо більш детально конструкцію та принцип роботи віброгранулятора (рисунок 2.1). Розплав подається у патрубок входу плаву 3 проходячи через розподільник 6 встановлений в циліндричному корпусі 4 потрапляє до перфорованого днища 5, в якому проходить перемішування плаву за допомогою напірних лопатей 7, що забезпечує його рівномірне витікання з отворів. При цьому від електродвигуна через зубчасту передачу передається за допомогою вібровузлу передаються коливання з певною частотою та амплітудою через плав на перфороване днище. Вібровузол являє собою актуатор до якого під'єднаний шток, через який вібрації передаються на диск, який розташований над центральною частиною перфорованого днища. Саме дослідження передачі вимушених коливань через шар розплаву до днища являє собою актуальну задачу.

Враховуючи складність описання передачі вібрацій від диску через плав до днища за допомогою аналітичних методів, для дослідження процесу було вирішено використовувати чисельні, що реалізовані в програмному комплексі ANSYS Workbench, а саме його модулях Fluent Flow, що базується на методі скінченних об'ємів, та Transient Structural, що базується методі скінченних елементів, об'єднані за допомогою System Coupling.

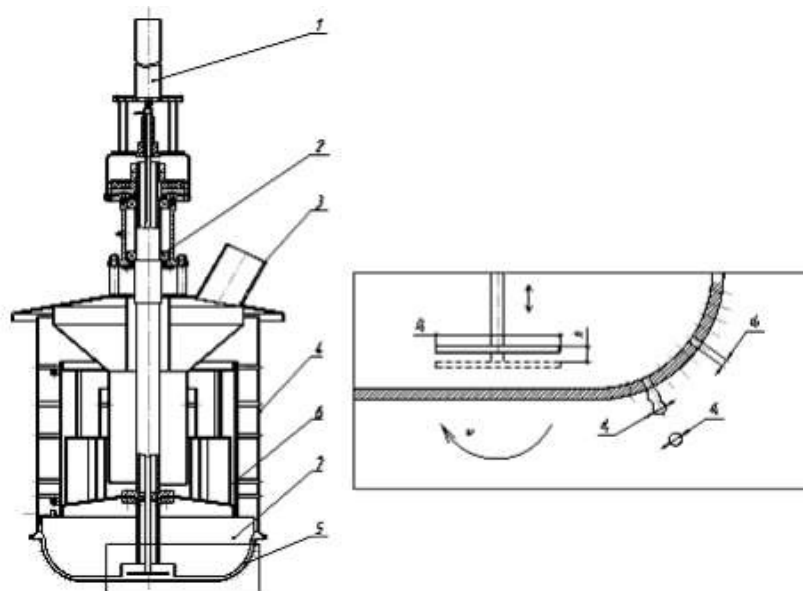


Рисунок 2.1 – Конструкція віброгранулятора: 1 – вібровузол; 2 – підшипниковий вузол; 3 – патрубок входу плаву; 4 – циліндричний корпус; 5– перфороване днище; 6 – розподільник; 7 – напірні лопаті

За останній час було зроблено багато технологічних відкриттів, завдяки чому підвищилася якість технології грануляції та з'явилася можливість знайти оптимальні рішення для кожного асортименту продукції. Для диспергування розплавів використовують кілька видів грануляторів: обертові, статичні, вібраційні. Використовуються також відцентрові механічні форсункові гранулятори.

Аналізуючи потреби та мету, які переслідує та чи інша промисловість, вона може використати найдоцільніший для цього спосіб: якщо перевага надається швидкості (якої можна досягнути, наприклад, витрачаючи менше часу на усунення засмічень отворів гранулятора), а щільність зрошення розплавом башт при цьому не є пріоритетною, то підійдуть обертові гранулятори; перевага навпаки надається чистоті розплаву та щільності зрошення поперечного перерізу башт – статичні віброгранулятори. Так як грануляція набуває все більшого значення, можливість такого вибору є дуже важливою.

Першим етапом будь яких чисельних розрахунків являється побудова тривимірної розрахункової моделі, що буде включати спрощення для пришвидшення розрахунків, полегшення побудови розрахункової сітки та інтерпретації результатів. Враховуючи, що задачею розрахунків є дослідження передачі вібрації від вібропристрою через плав до перфорованого днища на першому етапі розрахунків введемо наступні спрощення та допущення:

- шток через який передається вібрація від актуатора до диску випромінювача абсолютно жорсткий, а отже можна не вводити його в розрахункову геометрію та задавати граничні умови для диску;
- витікаючи струмені води не впливають на вібрації перфорованого днища, тому на першому етапі розрахунків враховуватись вони не будуть;
- припускається, що циліндричний корпус та перфороване днище не рухомі.

Отримана розрахункова геометрія показана на рисунку 2.2, що була додатково розділена на зони для забезпечення точності розрахунків. Розглянемо детальніше налаштування використані при побудови скінчено об'ємної розрахункової сітки для модулю Fluent Flow. Для зони 1 використовувався метод найоптимальніший для тіл видавлювання Sweep, з наступними налаштуваннями: Number of Division – 25; Element Order – Linear; Free Face Meshing Type - Quad. Цей же метод був використаний для зони 2 (Number of Division – 75; Element Order – Linear; Free Face Meshing Type - Quad). Для зон був використаний. Для зон 3, 5, 6 використовувався метод Multi Zone, з налаштуваннями Hex Dominant, що дозволяє побудувати розрахункову сітку переважно з гекса елементів (Element Order – Quadratic; Free Face Meshing Type - Quad). Для зони 4 використовувались глобальні налаштування розрахункової сітки, а саме: Element Order – Linear, Element Size – 5 мм, Capture Curvature – Yes, Curvature Min Size – 25 мкм, Curvature Normal Angle – 18°. Отримана розрахункова сітка складається з 2,5 мільйонів елементів. Необхідно відміти, що зона 5 була виділена на висоті 300 мм від нижньої точки днища, для задання в модулі Fluent Flow початкової поверхні розділу фаз.

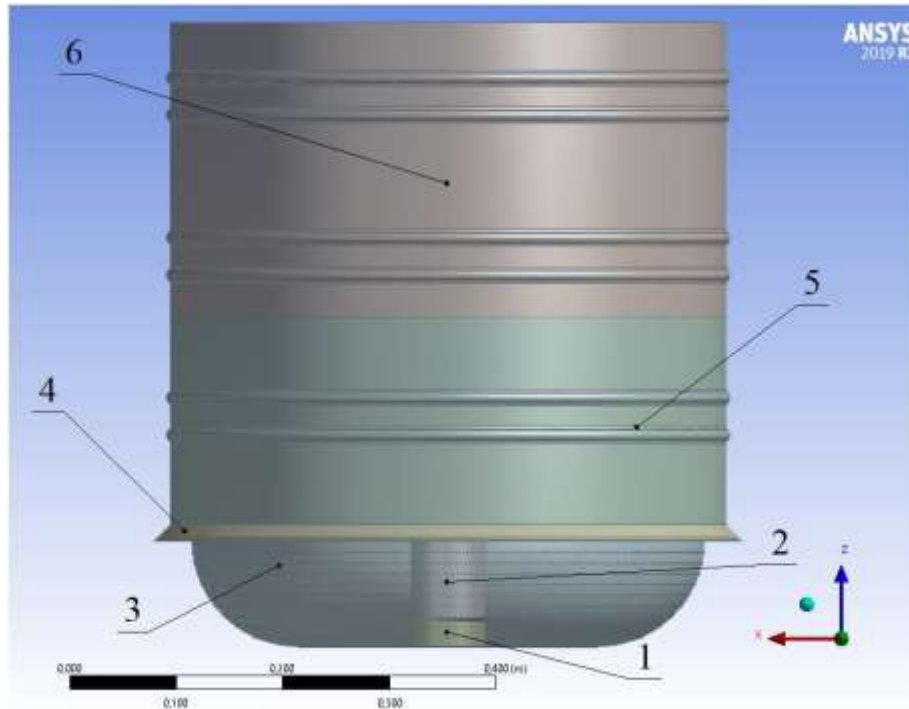


Рисунок 2.2 – Тривимірна розрахункова геометрія

Отримана розрахункова сітка складається з 2,5 мільйонів елементів та має наступні показники якості: мінімальна ортогональність 0,02 (при допустимому значенні 0,001); максимальною скошеністю 0,94 (при допустимому значенні 0,95) та коефіцієнті росту елементів 57. Поперечний розріз отриманої розрахункової сітки показаний на рисунку 2.3.

Після побудови розрахункової сітки наступним етапом було налаштування поверхонь, які необхідні для завдання граничних умов та динамічної сітки (забезпечення можливості руху диску випромінювача). Дані поверхні вказані на рисунку 2.4.



Рисунок 2.3 – Тривимірна скінчено об'ємна розрахункова сітка

Розглянемо детальніше налаштування модулю Fluent Flow. Враховуючи порядки величини переміщення, очікувані значення швидкості основної та другорядної фаз (близькі до нуля) Першочергово обираємо тип аналізу – нестационарний та вмикаємо необхідність врахування сили тяжіння, обираючи напрямок вектору прискорення вільного падіння – протилежний до додатного напрямку осі OZ. Насуним являється вибір моделі багатофазного потоку – Volume of Fluid, що рекомендована для випадків, що характеризуються чітким розмежування між об'ємами двох фаз. Головною фазою була обрана вода, другорядною фазою – повітря. Для моделі було обрано наступні опції: тип моделювання поверхні розділу фаз – Sharp (різкий), що застосовуються у випадку вільної поверхні рідини; формулювання – Explicit (явний), що використовує для вирахування форми поверхні розділу фаз послідовну-лінійну побудову інтерфейсу; було активовано налаштування Implicit Body Force Formulation, для врахування діючих об'ємних сил, в тому числі це дозволить покращити збіжність задачі за рахунок часткової рівноваги

градієнту тиску та об'ємних сил в рівнянні імпульсу. Ще одним важливим налаштуванням являється $\text{Volume Fraction Cutoff} = 1 \cdot 10^{-6}$ (даний параметр дозволяє вказати нижнє граничне значення для об'ємної частки, а отже усі значення об'ємної частки в домені нижче цього значення встановлюються рівними нулю) та $\text{Courant Number} = 0.25$ (число Куранта, що використовується для обчислення об'ємної частки, воно не співпадає з загальним числом Куранта, що використовується для рівнянь транспорту). Звичайно, що додатково були задані умови взаємодії фаз, а саме моделювання сил поверхневого натягу на гранці розділу повітря/вода, з коефіцієнтом 0.075 н/м . В якості моделі течії рідини була обрана ламінарна модель.

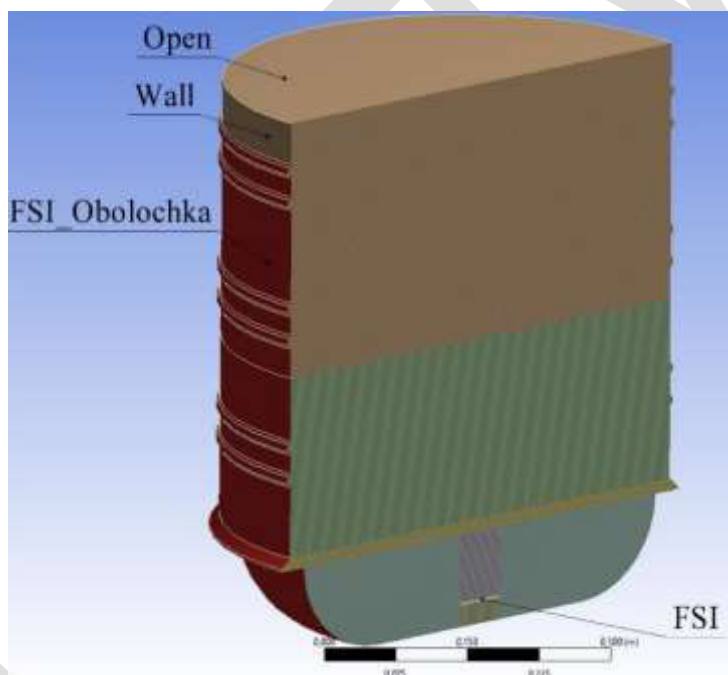


Рисунок 2.4 – Граничні умови

Розглянемо більш детально поверхні для задання граничних умов. Всі поверхні FSI, wall, FSI_Obolochka, open були обрані як стінки, з умовою No Slip, а значить швидкість рідини на всіх стінках дорівнює швидкості руху стінки. В якості робочих умов було обрано тиск рівний атмосферному та задана «робоча густина» як густина повітря, дане налаштування виключає

зростання гідростатичного тиску в фазі з найменшою густиною, покращуючи точність округлення для балансу імпульсів.

Одним з найважливіших етапів при розрахунку зв'язаних задач являється налаштування динамічної сітки. В модулі Fluent доступні наступні методи: Smoothing (згладжування елементів), Layering (розмноження або видалення елементів сітки), Remeshing (перебудова сітки). Для того, щоб визначити який метод необхідно обрати в даному випадку була звернута увага на наступні параметри характерні розміри елементів побудованої розрахункової сітки (мінімальна довжина грані елементу 15 мкм, максимальна довжина грані елементу 6,1 мм), розташування найменших елементів (всі вони знаходяться в зоні 4 рисунок 2.2), максимальне переміщення диску випромінювача (50 мкм). Оскільки, максимальні переміщення диску випромінювача менші ніж мінімальний розмір елементів в зонах 1 та 2 (рисунок 2.2) для перебудови розрахункової сітки без появи елементів нульового об'єму достатньо буде використовувати метод динамічних сіток Smoothing, використання якого являється менш затратним ніж інші методи, оскільки число вузлів та зв'язки між ними не змінюються. В якості додаткового параметру було обрано Spring Contact Factor, що дозволяє забезпечити за необхідності збереження положення вузлів, які знаходяться поблизу стінки. Даний параметр може змінюватись в межах від 0 до 1, в даному випадку був заданий рівний 0,1. Number of Iterations = 100 – кількість ітерацій за яку Fluent повинен стиснути/розтягнути елементи. Після вибору методу перебудови сітки необхідно задати тип руху границь та сіткових зон показаних на рисунку 2.4. Серед них для поверхонь wall, open був заданий тип Stationary, що означає передписання гранці, або в цілому сітковій зоні властивості абсолютно твердого тіла, а отже границя або область не будуть деформуватись. Такий вибір пояснюється тим, що рух рідини в середині корпусу гранулятору не буде впливати на них. Для внутрішньої області гранулятору був заданий тип Deforming, що б забезпечити перебудову сітки в об'ємі рідини, що знаходиться в середині гранулятору. В опціях до даного

типу було обрано налаштування, що вказує на необхідність використання глобальних налаштувань динамічної сітки для її перебудови в даній області. У випадку поверхонь FSI, FSI_Obolochka був обраний тип System Coupling який використовується у випадку сполучення двох модулів.

Наступним етапом являється налаштування безпосередньо вирішувача. Першочергово звичайно, що обирається чисельний алгоритм зв'язку тиску та швидкості, що використовує комбінацію рівнянь нерозривності та імпульсу та виводу рівнянь тиску. В даному випадку був обраний метод Coupled не зважаючи на те що він являється більш обчислювально затратним ніж інші, при цьому він являється більш точним. При його використанні необхідно ввести число Куранту, в даному випадку для забезпечення стабільності вирішення задачі на кожному часовому кроці він був заданий рівним 100. Наступним кроком виберемо метод просторової дискретизації, а саме для тиску – PRESTO!, у зв'язку з тим, що на границі розділу фаз відбувається стрибок тиску; для градієнту – Least-Squares Cell-Based, рекомендований для неструктурованих сіток і являється найменш обчислювально затратним порівняно з іншими схемами; для моменту – Second Order Upwind, являється схемою другого порядку точності; для об'ємної доли – Geo-Reconstruct, обирається автоматично при виборі формулювання – Explicit; для часу – First Order Upwind.

Після налаштування вирішувача необхідно провести ініціалізацію задачі. Та заповнити зону 1 – 5 рідиною, для цього був використаний інструмент Patch Interface та Refinement Criterion, що дозволяє обрати розміри регіону заповненого водою при цьому уточнивши в ньому сітку (зменшивши розміри комірки). При цьому максимальний рівень уточнення (Maximum Refinement Level) був заданий рівний 2, розміри регіону задані такими, що відповідають заповненню корзини на 300 мм від днища. Отримана розрахункова сітка після використання вищевказаної функції показана на рисунку 2.5. Другим кроком налаштовуємо Patch Interface (оновлення регіону), у якості фази якою буде заповнено регіон обираємо воду. У якості

додаткових налаштувань обираємо Volumetric Smoothing та задаємо Smoothing Relaxation Factor рівний 0,25, що дозволяє забезпечити чіткість поверхні розділу фаз.



Рисунок 2.5 – Розрахункова сітка з виділеною областю для рідини

Останнім кроком в налаштуванні розрахунку в модулі Fluent Flow являється завдання максимальної кількості ітерацій за 1 часовий крок. Для забезпечення точності вирішення було задано 30 ітерацій.

Після налаштування модулю Fluent Flow наступним етапом являється налаштування модулю Transient Structural, що починається з вибору матеріалу для кожного елемента конструкції, в даному випадку була обрана сталь. Наступним етапом являється побудова скінчено елементної розрахункової сітки при цьому використовувались лінійні елементи, що являються менш обчислювально затратними та мають достатню точність.

Після побудови скінчено елементної розрахункової сітки задавалися граничні умови, на поверхні, що вказані на рисунку 2.6. При цьому з робочих умов відомо, що диск випромінювач коливається з частотою $\omega = 360$ Гц та амплітудою $A = 50$ мкм, а отже його рівняння руху має вигляд:

$$x = A \cdot \sin \omega t. \quad (2.1)$$

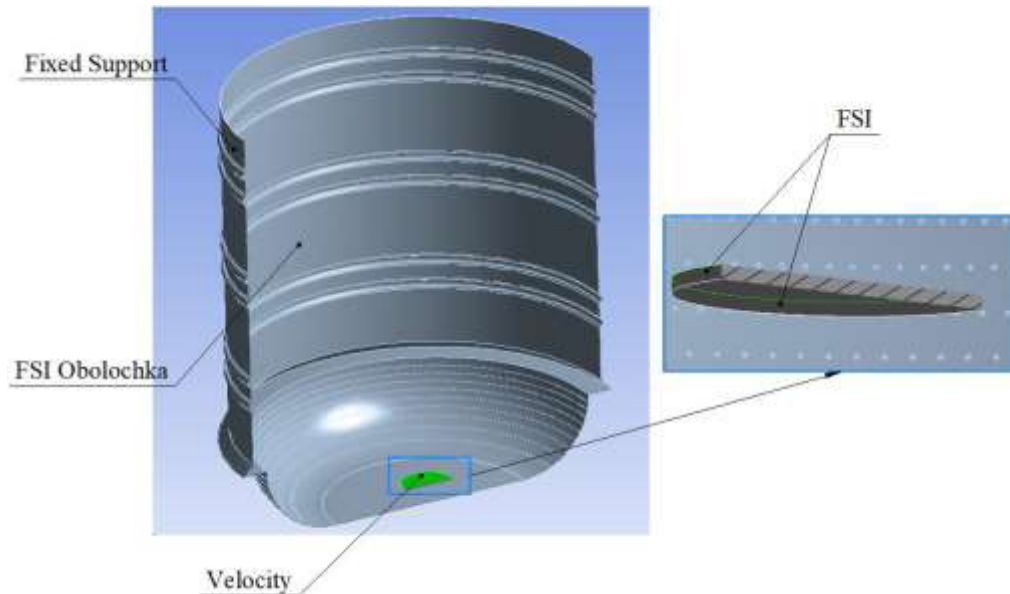


Рисунок 2.6 – Поверхні для завдання граничних умов для розрахунку у модулі Transient Structural

При цьому враховуючи необхідність вирішення пов'язаної задачі завдання одразу рівняння руху на диск випромінювача не представляється можливим. Саме тому завдавалася віброшвидкість наступним рівнянням, на поверхні Velocity (рисунок 2.6):

$$V = A \cdot \omega \cdot \cos \omega t. \quad (2.2)$$

Ще однією особливістю вирішення пов'язаних задач являється необхідність завдання всіх параметрів в системі СІ, отже $A \cdot \omega = 0,113 \text{ м/с}$, $\omega = 2260 \text{ с}^{-1}$. Нижня частина та бічна поверхня диску випромінювача була задана як FSI, гранична умова яка показує, що через цю поверхність відбувається зв'язок між двома модулями. В тому числі до поверхонь через які проходить поєднання розрахунків відноситься FSI Obolochka.

Фінальним етапом являється налаштування модулю System Coupling, в якому першочергово налаштовується часовий крок, що буде використовуватись для обох модулів. Він був обчислений з точки зору

забезпечення 10 підкроків за один період коливання ($T = 0,0027$ с), а отже $0,00027$ с. Після чого налаштовується передача даних між попередньо обраними поверхнями в обох модулях, а саме з FSI_Obolochka (Fluent) на FSI_Obolochka (Transient Structural) передається сила, з якої рідина діє на поверхню. Це означає, що розрахунок в Fluent являється джерелом для модулю Transient Structural. Що стосується пари поверхонь FSI то модуль Transient Structural служить джерелом переміщень для границі в Fluent.

2.2 Побудова амплітудно частотної характеристики коливань

Аналіз результатів розрахунку починається з оцінки деформацій, що викликає коливання диску випромінювача, яке вказано на рисунку 2.7.

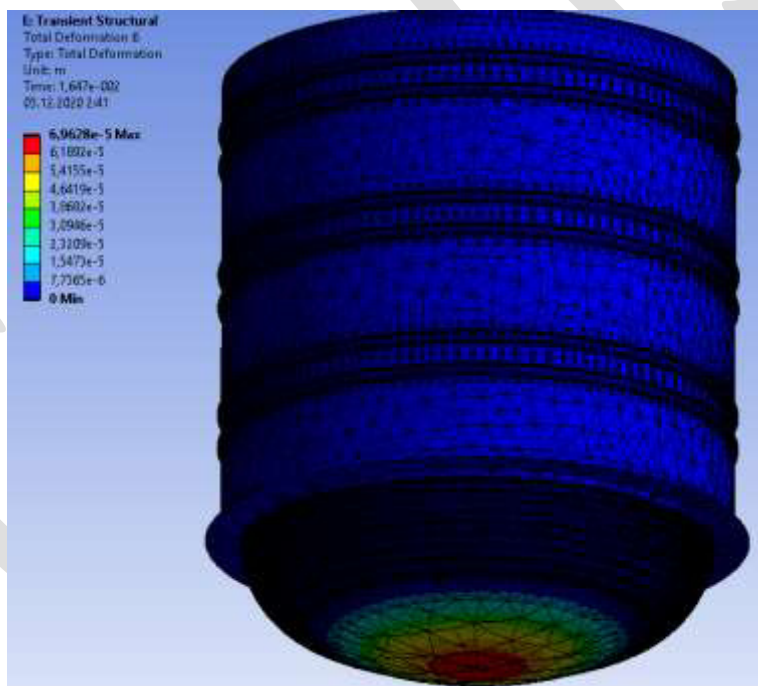


Рисунок 2.7 – Максимальні деформації корпусу гранулятора

Як видно, з рисунку 2.7 найбільші деформації корпусу мають місце під диском, та складають 70 мкм, а отже можна ввести термін ефективної площі диска, що в даному випадку складає 24 %. Для отримання більшого розуміння про дію диску випромінювача на поверхню розглянемо структуру потоку між

ними, вектори швидкості наведені на рисунку 2.8 в моменти часу, що відповідають крайньому нижньому положенню диску. Як видно з рисунку 2.8 під час руху диску утворюються завихрення потоку по бокам, а отже при створенні математичної моделі руху рідини їх необхідно враховувати.

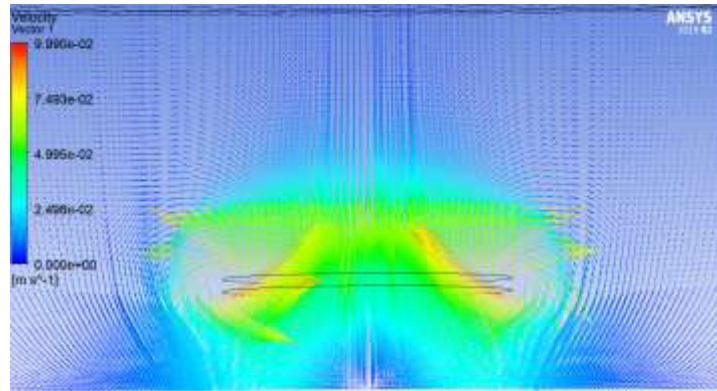


Рисунок 2.8 – Вектори швидкості рідини при крайньому нижньому положенні диску

Розглянемо більш детально рух циліндричного корпусу та перфорованого днища під дією диску випромінювача. На рисунку 2.9 вказана траєкторія руху ефективної частини днища, як видно вона являє собою косинусоїду. Для визначення амплітуди та частоти коливань застосуємо швидке перетворення Фур'є, що дозволяє розкласти коливання на елементарні (гармонічні) складові

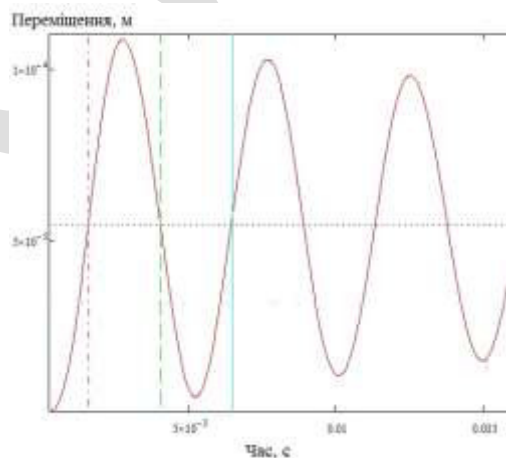


Рисунок 2.9 – Траєкторія руху ефективної частини днища

Для цього був застосований MathCAD, в який імпортувалась матриця максимальних переміщень перфорованого днища, а отже точки, що знаходиться під центром диску випромінювача. При цьому використовувалось 64 точки, частота виводу точок була 3704 c^{-1} , набір даних показаний на рисунку 2.10 а, результати на рисунку 2.10 б.

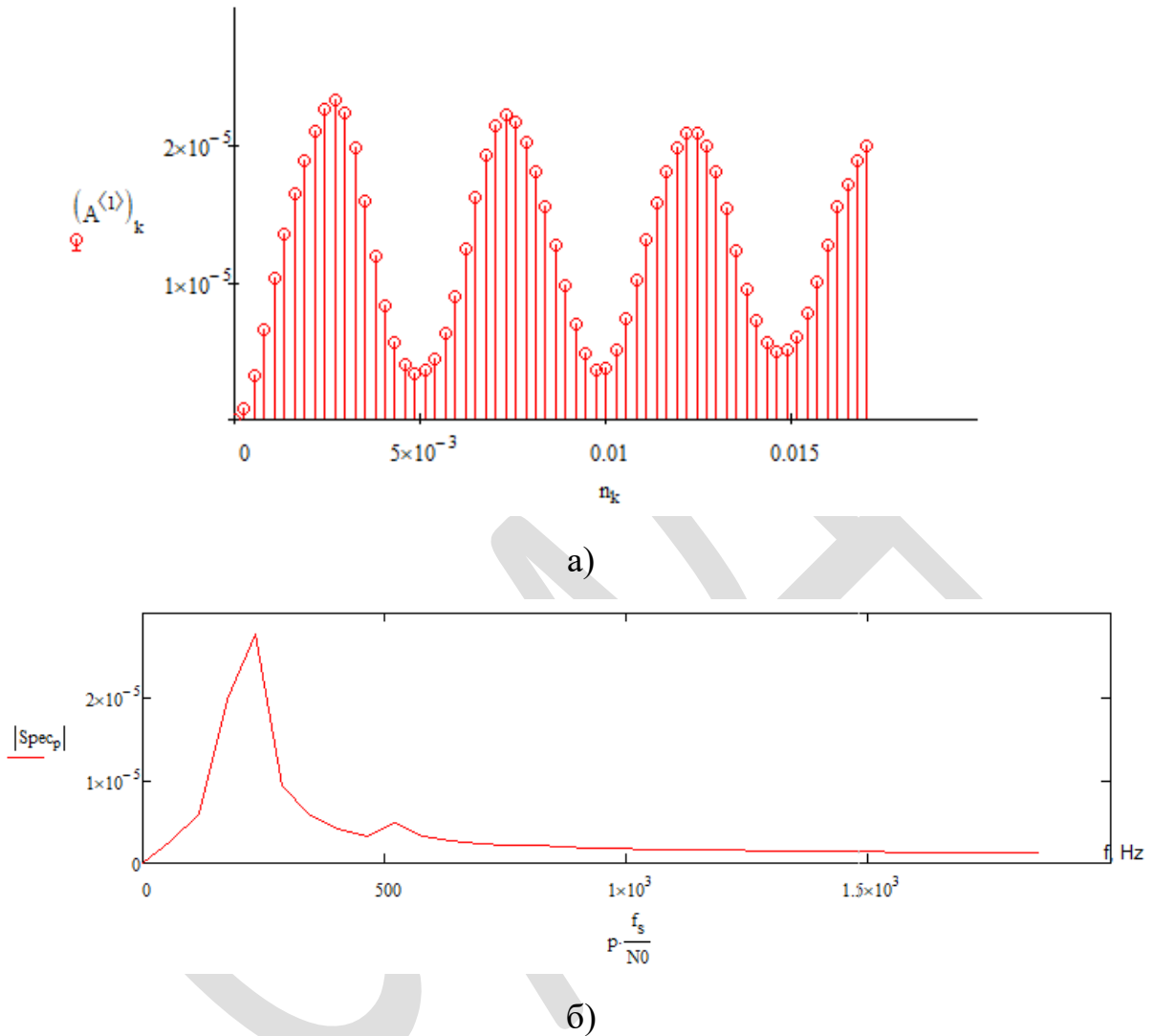


Рисунок 2.10 – Вихідні дані для перетворення Фур'є (а), результат перетворення (б)

За результатами перетворень було визначено, що дані коливання складаються з двох гармонічних, що мають наступні частоти та амплітуди, головною з н є 231 Гц , з амплітудою 27 мкм ; другою частотою є 520 Гц , та амплітудою $4,8 \text{ мкм}$.

Розглянемо коливання бічних поверхонь перфорованого днища на рисунку 2.11 а показані їх деформації, та на рисунку 2.11 б - траєкторії їх руху. З огляду на отримані результати проведемо швидке перетворення Фур'є, щоб отримати гармонічні складові коливання перфорованої частини днища.

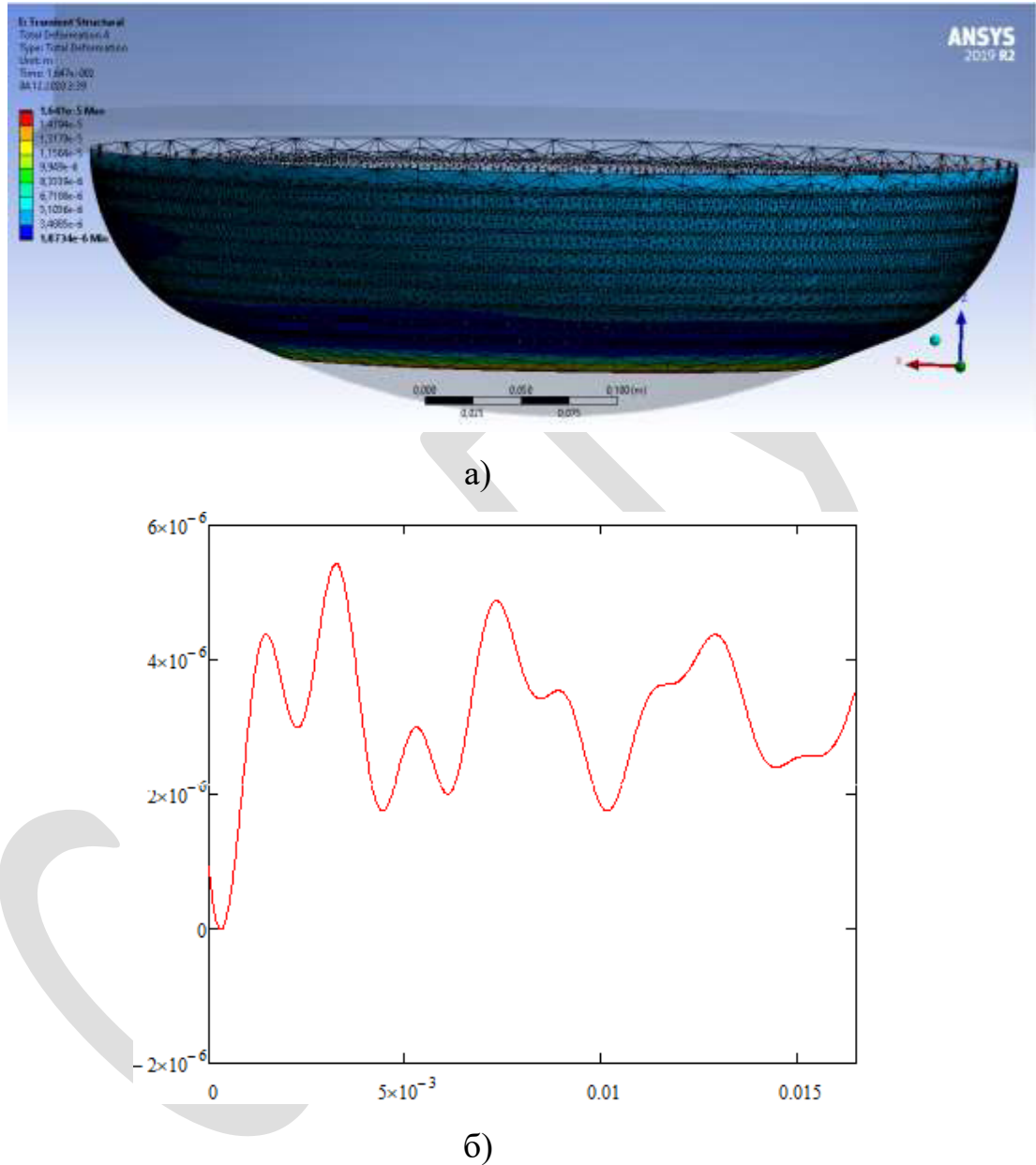


Рисунок 2.11 – Переміщення перфорованої частини днища (а), залежність його деформацій від часу (б)

Як і в попередньому випадку для перетворення використовується MathCAD, в який імпортувалась матриця максимальних переміщень бічних поверхонь перфорованого днища. При цьому використовувалось 64 точки,

частота виводу точок була 3704 с^{-1} , набір даних показаний на рисунку 2.12 а, результати на рисунку 2.12 б.

За результатами перетворень було визначено, що головною частотою являється 520 Гц , з амплітудою 2 мкм .

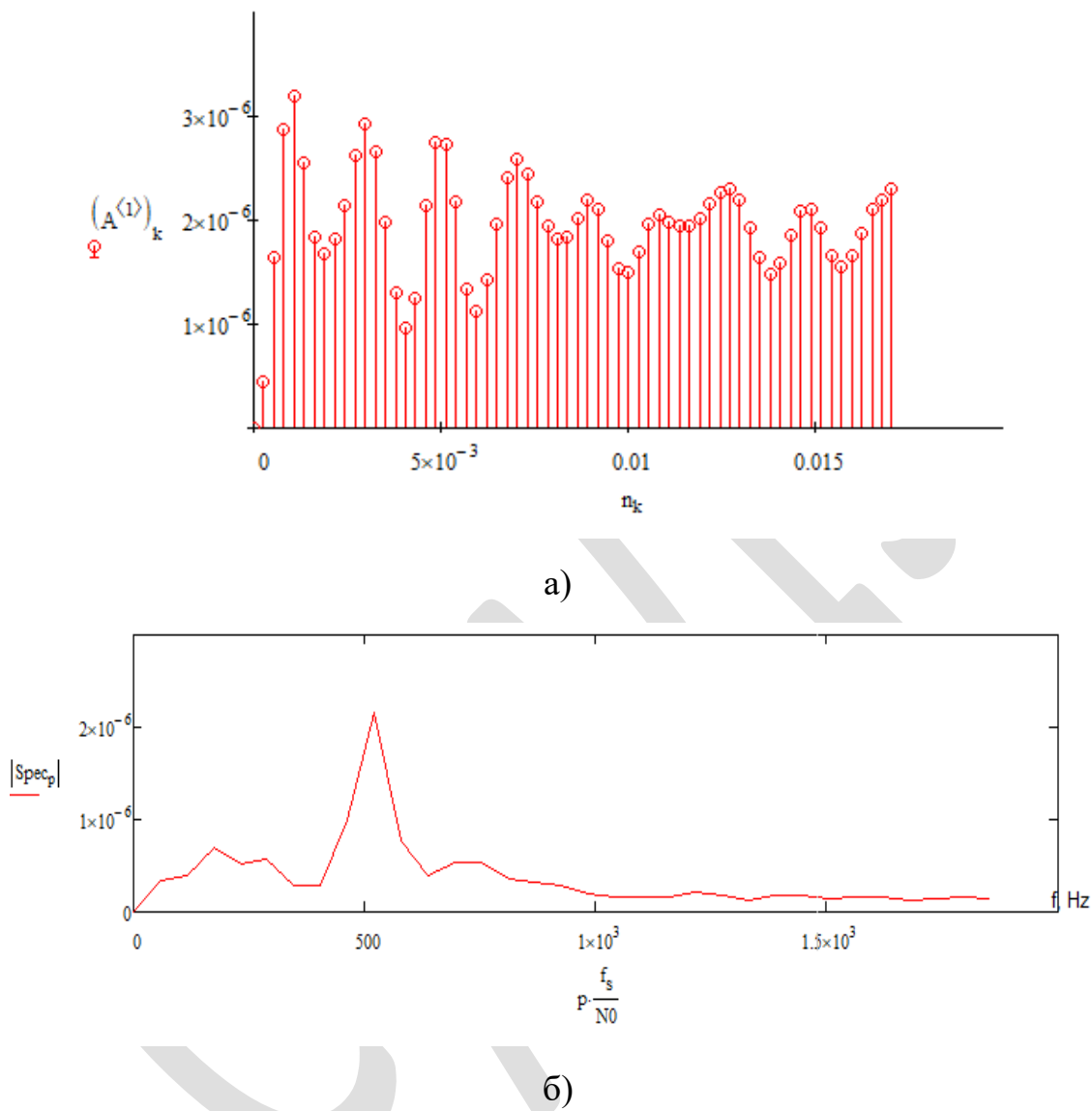


Рисунок 2.12 – Вихідні дані для перетворення Фур’є (а), результат перетворення (б)

За результатами проведених числових моделювань та їх аналізу за допомогою аналізу Фур’є було визначено, що коливання нижньої частини днища, складається з двох гармонічних коливань 230 Гц та 520 Гц , що відрізняються практично в два рази.

2.3 Висновки до другого розділу

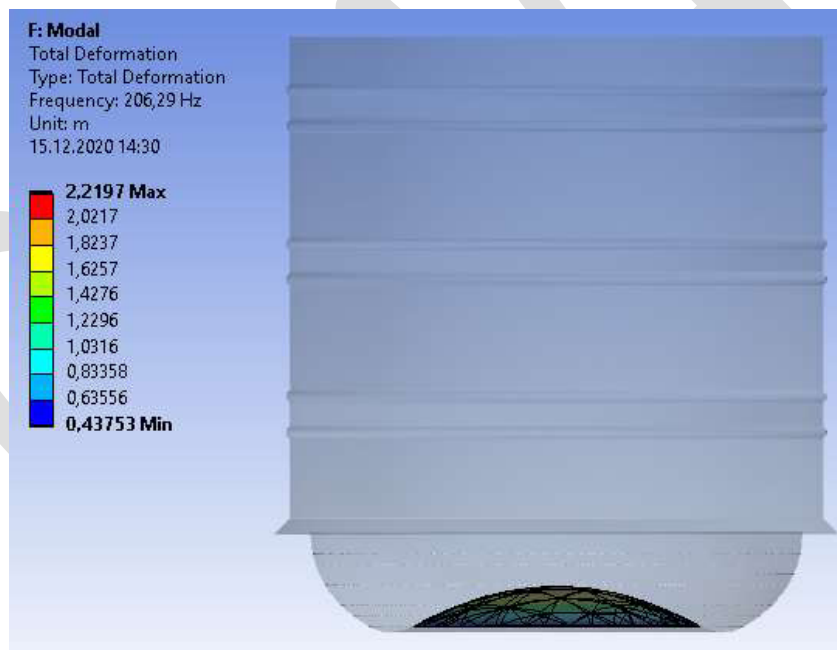
У даному розділі описано розробку моделі для розрахунку процесу вібраційної грануляції: розписано етапи побудови тривимірної розрахункової геометрії, задання граничних умов та етапи побудови розрахункової сітки і програмування вирішувача.

За допомогою отриманих результатів проведених числових моделювань та їх аналізу з використанням аналізу Фур'є, було визначено гармонічні коливання, частота яких дорівнює 230 Гц та 520 Гц.

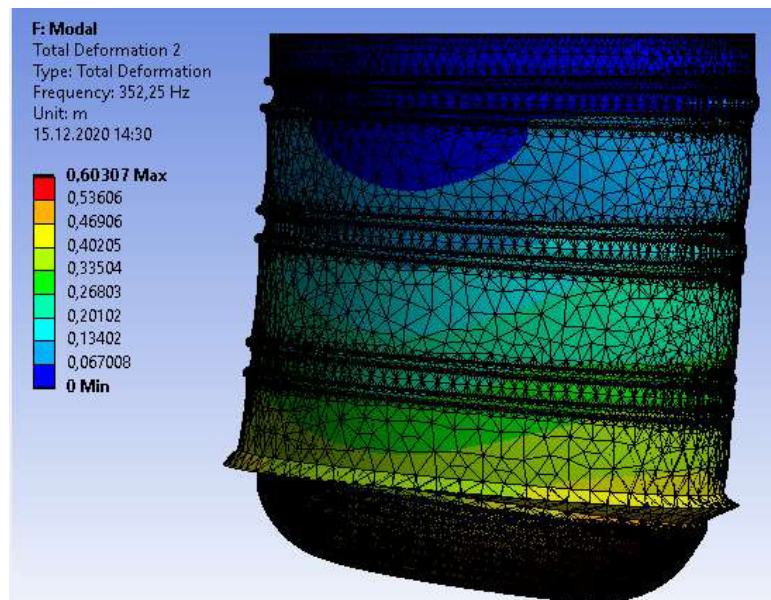
3. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРАЦІЙНОЇ ГРАНУЛЯЦІЇ ГЕЛЮ В АКТИВНОМУ ГІДРОДИНАМІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

3.1 Розробка моделі для розрахунку процесу вібраційної грануляції гелю в активному гідродинамічному середовищі

Для проведення модального аналізу за допомогою ANSYS Workbench використовувалась розрахункова геометрія на рисунку 2.5, при цьому задавалось тільки закріплення на поверхні Fixed Support, диск випромінювача повністю виключався з розрахунку. В результаті були отримані форми та частоти вільних коливань корпусу гранулятора, вони вказані на рисунках 3.1 а та б, відповідно.



а)



б)

Рисунок 3.1 – Форми вільних коливань корпусу гранулятора:

а – перша; б – друга.

Характер коливань на другій формі пояснює не симетричність деформацій середньої частини перфорованого днища корзини вказаної на рисунку 2.10.

За результатами розрахунку було визначено, що перша частота вільних коливань 205 Гц, а друга 380 Гц, третя – 450, четверта – 550 Гц.

3.2 Результати числових моделювань впливу вібрації диску випромінювача на циліндричний корпус

Для попереднього оцінювання характеристик коливань днища застосовується традиційна дискретна математична модель, яка враховує інерційні, жорсткісні та демпфуючі властивості функціональних елементів (рис. 3.2):

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F(t), \quad (3.1)$$

де $F(t)$ – зовнішня сила; m – еквівалентна маса; c – коефіцієнт та жорсткості; b – коефіцієнт демпфування, що підлягає оцінюванню за даними чисельного експерименту.

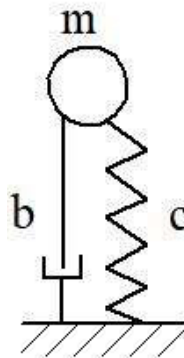


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема

Для визначення невідомих параметрів моделі, а саме коефіцієнту згасання n використовувались дані, одержані при моделюванні вимушених коливань днища під дією одиничної зовнішньої дії із застосуванням програмного комплексу ANSYS. Як зазначалось вище, частота коливань «ефективної площі» перфорованого днища складає 231 Гц, що відповідає частоті вільних не демпфованих коливань 205 Гц. Отже, коефіцієнт загасання визначається за формулою:

$$n = \sqrt{\omega_0^2 - \omega^2}; \quad (3.2)$$

де ω_0 – частота вільних не депфованих коливань.

Розрахований за даною формулою коефіцієнт загасання складає 107 Гц.

За наявності періодичної зовнішньої сили ця модель зводиться до безрозмірної форми:

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_0^2 x = a_0 \sin \omega t, \quad (3.3)$$

де a_0 – амплітуда віброприскорення диска випромінювача; $n = 0,5b/m$ – коефіцієнт згасання коливань; ω_0 – власна частота системи.

Для розв'язання вищезазначеного диференціального рівняння застосовується метод комплексних амплітуд:

$$x = Ae^{i\omega t}; \dot{x} = i\omega Ae^{i\omega t}; \ddot{x} = -\omega^2 Ae^{i\omega t}; \sin\omega t = e^{i\omega t}; \quad (3.4)$$

При підстановці співвідношень (3.4) у формулу (3.3)

$$-\omega^2 Ae^{i\omega t} + 2ni\omega Ae^{i\omega t} + \omega_0^2 Ae^{i\omega t} = a_0 e^{i\omega t}; \quad (3.5)$$

після тотожних перетворень одержуємо амплітуду коливань днища:

$$A = \frac{a_0}{|\omega_0^2 - \omega^2 + 2ni\omega|} = |A|e^{i\varphi}, \quad (3.6)$$

де залежності для визначення амплітуди і фази коливань днища мають такий вигляд:

$$\begin{cases} |A| = \frac{a_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2n\omega)^2}}; \\ \varphi = \operatorname{arg} \left(\frac{2n\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \end{cases} \quad (3.7)$$

3.3 Розрахунок приводу віброгранулятора

Для дослідження кінчного зубчастого зачеплення з двояко-випуклою та двояко-ввігнутою геометрією зуба було використано програмний комплекс ANSYS Workbench, а саме його модуль Explicit Dynamics.

Слідуючим етапом проектування є побудова сітки скінченних елементів для дослідження динаміки зубчастих коліс. Зоні контакту зубчастих коліс слід приділити значну увагу. Для дослідження зони контакту був використаний інструмент Contact Sizing. За його допомогою в зоні контакту був заданий максимальний розмір елемента 1 мм. В загальних налаштуваннях був обраний

метод побудови скінченно елементної розрахункової сітки Curvature, з середнім розміром елементу 5 мм. Отримана розрахункова сітка показана на рисунку 4.1.

Наступним кроком було налаштування контакту. Тип якого був обраний Frictional, коефіцієнт тертя задавався 0,15; формулювання - Augmented Lagrange. Також був налаштований Body interaction (Type - Frictional). В якості граничних умов було обрано закріплення ступиці коліс по всім ступеням свободи крім обертового навколо осі. Також для шестерні задавалась частота обертання, що дорівнює 35 рад/с.

Одним з важливих елементів розрахунку являється налаштування Analysis Settings: Maximum Numbers of Cycles: $1e+7$ s; End Time – 0.028 s (час одного повного оберту); Solver Type – Low Velocity.

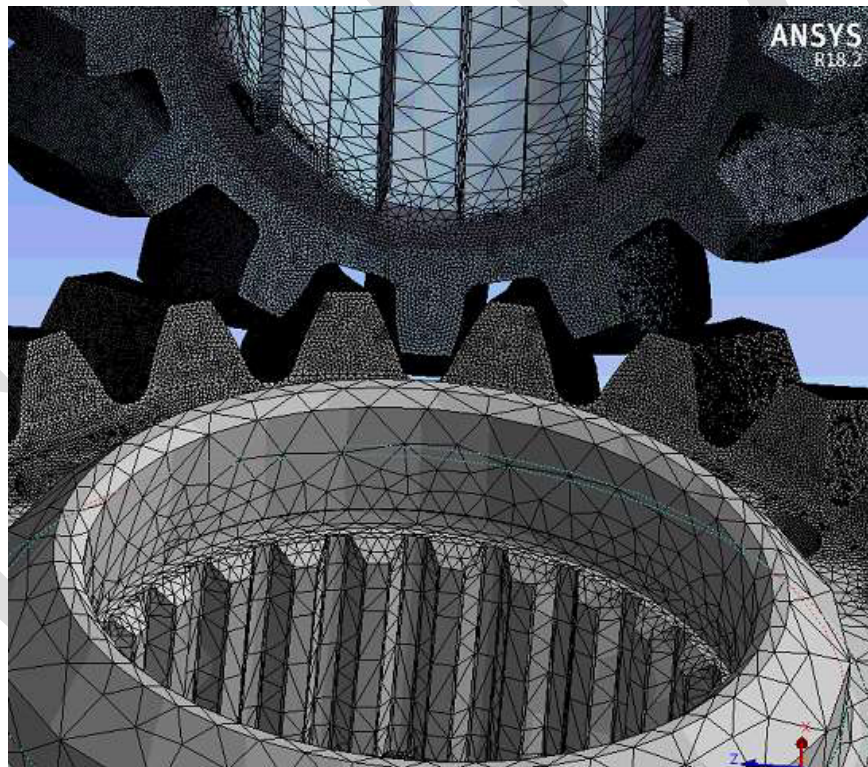


Рисунок 4.1 - Тривимірна розрахункова сітка конічної зубчатої передачі

Як вказувалось вище, для перевірки зачеплення зубчатої пари доцільним являється аналіз не тільки площі контактної поверхні, а й

осередненої сили по контактній поверхні від часу. Дана залежність наведена на рисунку 4.2.

Як видно з нього закусування зубців не відбувається. При чому процес взаємодії зубчастих коліс умовно можна розділити на два етапи:

- перший етап – вихід на робочий режим, при якому сила контактної взаємодії має меншу амплітуду порівняно з наступним етапом. Необхідно відмітити, що на початку обертання сила контактної взаємодії дорівнює нулю, оскільки зуб шестерні встановлений рівно посередині між двома зубами колеса.
- другий етап – нормальна робота зубчастої пари. Як видно з рисунку 4.2 при виході зубчастої пари на робочий режим збільшується амплітуда коливання контактної сили з різким її зменшенням. При цьому з'являється ділянка зменшення сили, порівняно з основною амплітудою.

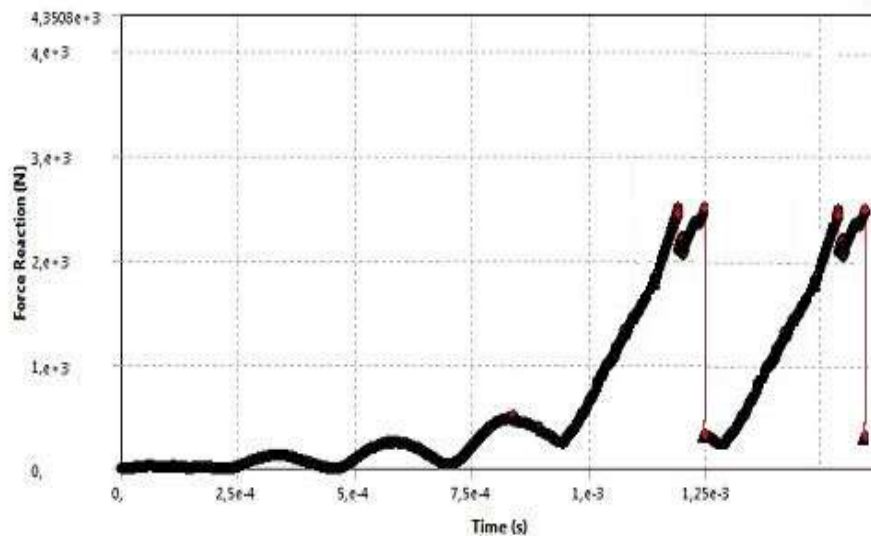
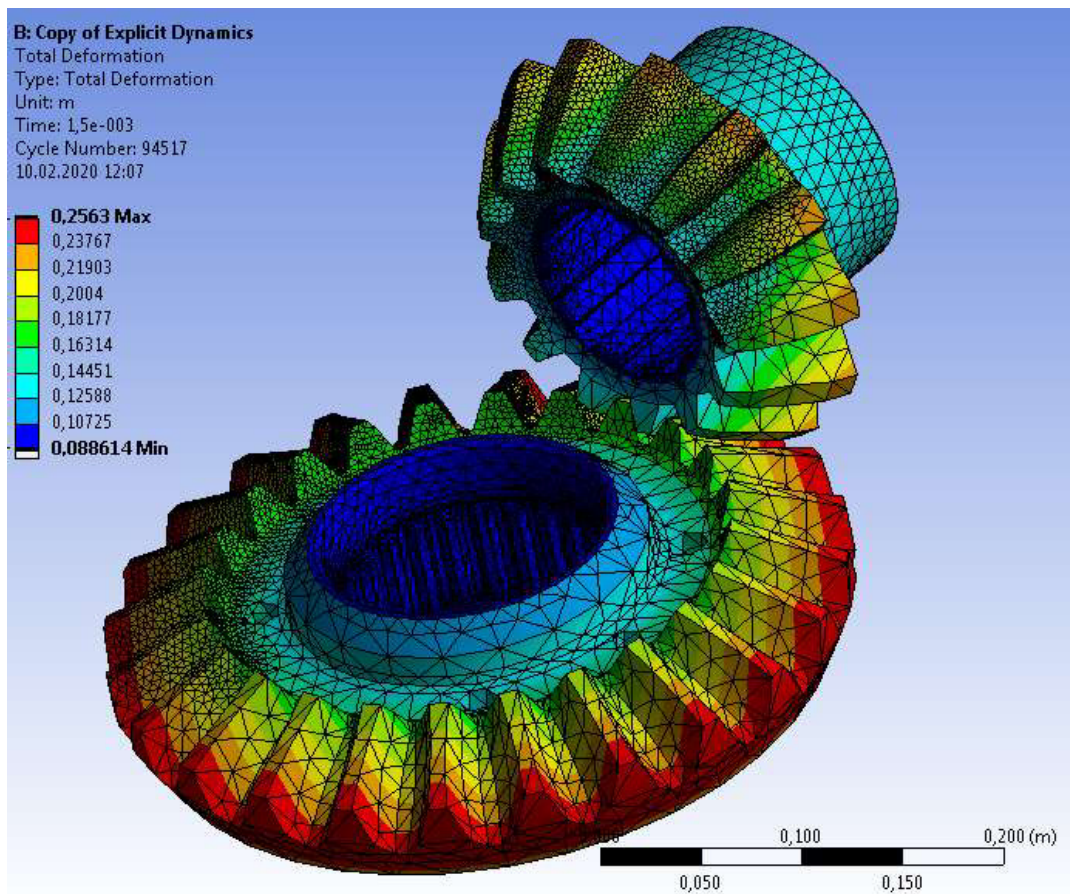


Рисунок 4.2 – Залежність осередненої сили по контактній поверхні від часу

На рисунку 4.3 вказано переміщення кожної точки зубчастої пари.



Рисунку 4.3 - Переміщення кожної точки зубчастої пари

3.4 Висновки до третього розділу

Провівся модальний аналіз корпусу гранулятора, у результаті чого були отримані форми та частоти вільних коливань корпусу гранулятора.

Оцінюючи характеристики коливань днища, застосовувалася традиційна дискретна математична модель, яка враховує інерційні, жорсткісні та демпфуючі властивості функціональних елементів. Також у розділі описано визначення невідомих параметрів моделі, а саме коефіцієнту згасання n . При цьому використовувались дані, одержані при моделюванні вимушених коливань днища під дією одиначної зовнішньої дії із застосуванням програмного комплексу ANSYS.

При дослідженні конічного зубчастого зачеплення з двояко-випуклою та двояко-ввігнутою геометрією зуба за допомогою програмного комплексу

ANSYS Workbench, а саме його модуля Explicit Dynamics, було виявлено, що при виході зубчастої пари на робочий режим збільшується амплітуда коливання контактної сили водночас з різким зменшенням цієї сили. Також знайдено залежність осередненої сили по контактній поверхні від часу, з якої видно, що закусування зубців не відбувається.

Для детальнішого розгляду процесів роботи даного віброгранулятора, у майбутньому планується провести спектральний аналіз.

САНД

ВИСНОВКИ

У роботі розглянута задача числового моделювання процесу вібраційної грануляції гелю в активному гідродинамічному середовищі.

Проаналізувавши способи і пристрої для одержання сировини із заданим гранулометричним складом.

Описана розробка моделі для розрахунку власних частот корзини віброгранулятора з рідиною. Для цього побудовано тривимірну розрахункову геометрію, яка була додатково розділена на зони. Ці зони використовувалися при побудові скінченно об'ємної розрахункової сітки для забезпечення точності розрахунків. Отримана розрахункова сітка складається з 2,5 мільйонів елементів та має наступні показники якості: мінімальна ортогональність 0,02 (при допустимому значенні 0,001); максимальною скошеністю 0,94 (при допустимому значенні 0,95) та коефіцієнті росту елементів 57. За допомогою отриманих результатів проведених числових моделювань та їх аналізу з використанням аналізу Фур'є, було визначено гармонічні коливання, частота яких дорівнює 230 Гц та 520 Гц.

Представлені результати числових моделювань впливу вібрації диску випромінювача на циліндричний корпус. Наведена дискретна математична модель для попереднього оцінювання характеристик коливань днища, а саме побудови амплітудно-частотної характеристики. Дана модель враховує інерційні, жорсткісні та демпфуючі властивості функціональних елементів. У тому числі наведена методика визначення невідомих характеристик моделі за результатами числового моделювання, а саме коефіцієнту затухання демпфованих коливань.

Також у даній роботі, використовуючи програмний комплекс ANSYS Workbench, було проведено дослідження конічного зубчастого зачеплення з двояко-випуклою та двояко-ввігнутою геометрією зуба. За його результатами побудовано залежність осередненої сили по контактній поверхні від часу, яка дає зрозуміти, що закусування зубців не відбувається.

Чисельні методи дозволяють з достатнім ступенем точності визначити основні параметри вібраційного грануляційного процесу. На основі цих результатів представляється можливим вдосконалити конструкцію та режими роботи обладнання для гранулювання.

Таким чином, у роботі запропоновано загальний підхід щодо покращення динамічних характеристик елементів віброгранулятора для забезпечення якісного гранулометричного складу одержуваної сировини.

САНДІ

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ ПОСИЛАНЬ

1. Холин Б.Г., Кирный Л.Г., Кононенко Н.П. Основные направления исследований и внедрения в производство грануляционного и массообменного оборудования / Вісник Сумського державного університету. Науковий журнал, серія «Технічні науки»: Суми. – Видавництво СумДУ. – 2001. – № 9(30)-10(31) – с.10.
2. Холин Б.Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости. М., Машиностроение, 1977, 182 с.
3. Казакова Е.А. Гранулирование и охлаждение азотосодержащих удобрений. М., «Химия», 1980, 288с.
4. Холин Б.Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости. М., Машиностроение, 1977, 182 с.
5. Осіпов В.А., Кононенко М.П., Хібарна Л.О., Грищенко Л.Ю. Обладнання для грануляції плавів азотних та комплексних добрив. Звіт про патентні дослідження, СумДУ, 2007, 77с
6. Розробка енергозберігаючого обладнання та параметрична оптимізація процесу грануляції азотних добрив баштовим методом : звіт про НДР (заключний) / Кер. В.А. Осіпов. - Суми : Сумський державний університет, 2011. - 87 с.
7. Холин Б.Г., Кононенко Н.П. Некоторые аспекты развития азотной промышленности в Украине / Вісник Сумського державного університету. Науковий журнал, серія «Технічні науки»: Суми. – Видавництво СумДУ. – 2001. – № 9(30)-10(31) – с.58.
8. Afif, A. A., Wulandari, P., Syahriar, A. (2020). CFD analysis of vertical axis wind turbine using ANSYS Fluent. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1517(1), 012062, doi:10.1088/1742-6596/1517/1/012062.
9. Saleh, S. N., Barghi, S. (2016). Reduction of fine particle emission from a prilling tower using CFD simulation. Chemical Engineering Research and Design, Vol. 109, pp. 171–179.

10. Li, Z., Kind, M., Gruenewald, G. (2010). Modeling fluid dynamics and growth kinetics in fluidized bed spray granulation. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, Vol. 2(4), pp. 235–248
11. Muhammad, A., Rahmanian, N., Pendyala, R. (2013). Flow analysis of melted urea in a perforated rotating bucket. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 372, pp. 340–345.
12. Skydanenko, M., Sklabinskyi, V., Saleh, S. (2019). CFD simulation of ammonium nitrate melt in a perforated rotating bucket. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 598–506, doi: 10.1007/978-3-319-93587-4_52, 498-506.
13. Saleh, S. N.; Saaed, O., Skydanenko, M. (2019). CFD assessment of jet flow behavior in an alternative design of a spray dryer chamber. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 863–870, doi: 10.1007/978-3-030-22365-6_86.
14. Ali, K. (2015). Design of a spray tower for the granulation of melt. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, Vol. 18(1), pp. 111–117.
15. Zhang, J., Richards, C. M. (2006). Dynamic analysis and parameter identification of a single mass elastomeric isolation system using a Maxwell-Voigt model. *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 128(6), pp. 713–721, doi: 10.1115/1.2345676.
16. Ni, S., Chen, Q. (2011). Dynamic research on vibration-impact crushing system of a bilateral single-mass. *Advanced Materials Research*, Vol. 308–310, pp. 1914–1917, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.308-310.1914.
17. Ostroha, R., Yukhymenko, M., Lytvynenko, A., Bocko, J., Pavlenko, I.: Granulation process of the organic suspension: fluidized bed temperature influence on the kinetics of the granule formation. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 463–471 (2019), doi: 10.1007/978-3-319-93587-4_48.

18. Lebedev V., Tonkonogyi V., Yakimov A., Bovnegra L., Klymenko N. Provision of the Quality of Manufacturing Gear Wheels in Energy Engineering. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 89-96. Springer, Cham (2019), doi: 10.1007/978-3-319-93587-4_10
19. Markovic, K., Franulovic, M.: Contact stresses in gear teeth due to tip relief profile modification. *Engineering Review*, vol. 31(1), p. 19–26 (2011).
20. Potghan, D., Sharma, S.: Stress reduction by introducing stress relieving features of spur gear used in lathe headstock. *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology*, vol. (8), pp. 182–189 (2015).
21. Farhan, M., Karuppanan, S., Patil, S.S.: Frictional contact stress analysis of spur gear by using finite element method. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 772, pp. 159–163 (2015), doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.772.159.
22. Jani, S.S., Shah, J.B.: Design, modelling and analysis of helical gear pair using ANSYS and AGMA standards for calculating a bending and contact stress on gear profiles. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, vol. 3(2), 4707, pp. 3813–3821 (2017).
23. Lad, V., Singh, L.P.: Design modelling and analysis of helical gear using CATIA, ANSYS and AGMA. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 7(4), pp. 221–226 (2016).
24. Thu, M.P., Min, N.L.: Stress Analysis on Spur Gears Using ANSYS Workbench 16.0. *International Journal of Science and Engineering Applications*, vol. 7(8), pp. 208–213 (2018).
25. Ghosh, S., Ghosh, R., Patel, B., Srivastava, T., Barman, R. N.: Structural analysis of spur gear using ANSYS Workbench 14.5. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 7, pp. 132–141 (2016).
26. Krol, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Modeling of vertical spindle head for machining center. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1553, 012012 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1553/1/012012.