

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Інститут (факультет) ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого

Кафедра Машини і апарати харчових та фармацевтичних виробництв

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)

\_\_\_\_\_ доц. Блаженко С.І.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ проф. Гавва О.М.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"

(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми Інжиніринг харчових та біотехнологічних виробництв

на тему: Дослідження руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах

Виконав: здобувач 2 курсу, групи бм

Дринькевич Микола Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник: доц. Доломакін Юрій Юрійович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультанти

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що в цій кваліфікаційній роботі немає запозичень із праць інших авторів без відповідних посилань.

Здобувач \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2021 р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут *Навч.-науковий інженерно-технічний інст. ім. акад. І.С. Гулого*

Кафедра *Машини і апарати харчових та фармацевтичних виробництв*

Освітній ступінь *бакалавр*

Спеціальність *133 «Галузеве машинобудування»*

(код і назва)

Освітньо-професійна програма *Інжиніринг харчових та біотехнологічних виробництв*

(назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

*проф. Гавва О.М.*

“ ” \_\_\_\_\_ 2021 року

## З А В Д А Н Н Я

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

*Дринькевич Микола Олегович*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Дослідження руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах*

керівник роботи *Доломакін Юрій Юрійович, доцент, к.т.н.*

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закл. вищої осв. від “05” листопада 2020 року № 925-кв

2. Строк подання здобувачем роботи *01 лютого 2021 р.*

3. Вихідні дані до роботи *технічний паспорт обладнання; кресленики обладнання; навчальна нормативна та спеціальна література*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *анотація, зміст; вступ, будова та принцип роботи обладнання, мета і задачі досліджень, опис та робота у програмному комплексі EDEM, моделювання процесу змішування сипких субстанцій, розрахункова частина, охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях, рекомендації щодо монтажу та експлуатації апарату загальні висновки, список використаних літературних джерел, додатки*

5. Перелік графічного матеріалу



## Анотація

Робота присвячена пошуку шляхів підвищення ефективності барабанного змішувача. Змішування матеріалу є важливим і невід'ємним етапом практично в кожному промисловому виробництві і пріоритетним напрямком технічного прогресу в промисловості є вдосконалення технологічних процесів, заміна морально і фізично застарілого обладнання. Для аналізу ефективності існуючих конструкцій барабанного змішувача представлені результати дослідження потоків часток матеріалу в робочій зоні апарата, які досліджувалися шляхом моделювання процесу в САЕ-комплексі. В роботі приведений алгоритм розрахунку потоку часток в програмному комплексі EDEM, розроблено розрахунковий та аналітичний аналіз ефективності перемішування трьох видів змішувачів. Для підвищення ефективності барабанного змішувача важливо дослідити поведінку сипкого продукту у його камері для подальшого його конструювання з метою її збільшення принаймні до значень 90 %.

*Ключові слова:* барабанний змішувач, конструкція, ефективність, частинка, моделювання, EDEM.

## Annotation

The work is devoted to finding ways to increase the efficiency of the drum mixer. Mixing of material is an important and integral stage in almost every industrial production and the priority of technical progress in industry is the improvement of technological processes, replacement of obsolete and physically obsolete equipment. To analyze the efficiency of the existing designs of the drum mixer, the results of the study of material particle flows in the working area of the apparatus, which were studied by modeling the process in the CAE complex, are presented. The algorithm of particle flow calculation in the EDEM software package is presented in the work, the calculation and analytical analysis of mixing efficiency of three types of mixers is developed. To increase the efficiency of the drum mixer, it is important to investigate the behavior of the bulk product in its chamber for further design in order to increase it to at least 90%.

**Key words:** drum mixer, design, efficiency, particle, modeling, EDEM.

## ЗМІСТ

Вступ.....	
1. Будова та принцип роботи обладнання.....	
1.1 Загальна характеристика сипких матеріалів.....	
1.2 Будова і принцип роботи аналогів змішувача.....	
2. Мета і задачі досліджень.....	
3. Опис та робота у програмному комплексі EDEM.....	
4. Моделювання процесу змішування сипких субстанцій.....	
4.1 Математичні моделі руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах.....	
4.2 Поняття процесу змішування.....	
4.3 Послідовність роботи у EDEM.....	
4.4 Моделювання процесу змішування у EDEM.....	
4.5 Результати динамічних характеристик руху часток у барабані.....	
5. Розрахункова частина.....	
5.1 Визначення конструктивно-кінематичних параметрів.....	
5.2 Основні кінематичні параметри.....	
5.3 Розрахунок витрачаємої потужності.....	
5.4 Кінематичний розрахунок привода.....	
6. Рекомендації, щодо монтажу та експлуатації апарату.....	
7. Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях.....	
Висновки.....	
Література.....	

## Вступ

Фармацевтичне та мікробіологічне виробництво в нашій країні має великі перспективи розвитку. Однією з актуальних проблем сьогодення як для фармацевтичної галузі, та для інших галузей промисловості є технічне переоснащення, впровадження нового, більш якісного обладнання, а також модернізація вже існуючих машин та апаратів. Широке впровадження модернізованого обладнання дасть змогу досягти подальшого збільшення продуктивності праці, покращення якості продукції, зниження собівартості.

Для моделювання ряду процесів хімічних, фармацевтичних, харчових виробництв, важливим є дослідження поведінки сипкого матеріалу в обертовому барабані. Кількість досліджень, присвячених даній тематиці, значно збільшилась за останній час. Потрібно відмітити роботи, які є пов'язані із параметричним аналізом частинок під час обертання барабана. Серед них є роботи, присвячені розрахункам товщини спадаючого шару, розрахункам середнього часу перебування гранул, а також дослідженням верхніх і нижніх кутів укосу.

Для оцінки факторів, які впливають на поведінку сипкого матеріалу, проводився ряд експериментів з метою збору необхідних даних для подальшого моделювання і оцінки його розрахункової моделі.

Однією з найважливіших вимог, що стосується виготовлення таблеток, є якість таблетуючої суміші. Застосування ефективних змішувачів є основним шляхом до якості таблеткових препаратів.

Для отримання таблетувальної маси, що складається, як правило, з кількох порошкоподібних компонентів, потрібне їх ретельне перемішування, внаслідок чого попередньо розділені компоненти після їх рівномірного розподілу у змішаному об'ємі утворюють однорідну суміш. Гомогенність суміші надзвичайно важлива з точки зору вимог охорони здоров'я до рівномірного розподілу в об'ємі готової форми лікарської речовини.

Якісне змішування у виробництві порошків, таблеток та драже представляє

собою складну технологічну задачу, так як об'єм діючих речовин малий по відношенню до загального перемішуваного об'єму.

Якість отриманої суміші залежить від великої кількості змінних фізико-хімічних властивостей окремих компонентів: гранулометричного складу, щільності, вологості, кута штучного відкосу, адгезії та ін.

В хіміко-фармацевтичній промисловості використовують типові змішувачі, які можна класифікувати за наступними ознаками:

- 1) за режимом процесу: періодичні і безперервні;
- 2) за конструктивними ознаками: черв'ячні, лопатеві, барабанні та ін. ;
- 3) за способом впливу на суміш: механічні, гравітаційні, відцентрові;
- 4) за способом розвантаження: ручне чи автоматичне розвантаження.

У вітчизняній хіміко-фармацевтичній промисловості найбільше розповсюдження знайшли змішувачі періодичної дії: барабанні з обертальним корпусом, черв'ячні, лопатеві, змішувачі з псевдозрідженням сипкого продукту, відцентрової дії з обертальним конусом та усереднювачі.

## 1. Будова та принцип роботи обладнання

Найвні у літературі дані, які відносяться до руху сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах не описують в повній мірі сегрегацію компонентів сипких матеріалів за їх фізико-механічними властивостями, що є одним з важливих факторів для підвищення ефективності змішування сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах.

### 1.1 Загальна характеристика сипких матеріалів

Часто в технічній літературі використовується поняття зернистого матеріалу наряду із сипким матеріалом. Це пояснюється розділенням зернистих матеріалів на зв'язні і сипкі у зв'язку із різною пористістю. Сипкий матеріал описується наступними властивостями: насипною густиною (об'ємною вагою), гігроскопічністю, гранулометричним складом, корозією, крихкістю, вибухонебезпечністю, вологістю, самозаймистістю, опором переміщенню щодо твердих поверхонь, шкідливістю та отруйністю для здоров'я персоналу, липкістю, зв'язністю та рухливістю частинок матеріалу, абразивністю, злежуваністю. Важливе значення на рух дисперсійного середовища відіграють обертові барабанні апарати.

Нижче за текстом описані способи визначення властивостей сипких матеріалів та властивості сипких матеріалів.

Гранулометричний склад. Гранулометричним склад сипкого матеріалу – це кількісний розподіл складових частинок за їх величиною; крупність частинки визначається її найбільшим розміром (рис. 1.1). Гранулометричний склад сипкого матеріалу зазвичай визначається просіюванням порцій матеріалу крізь набір сит.

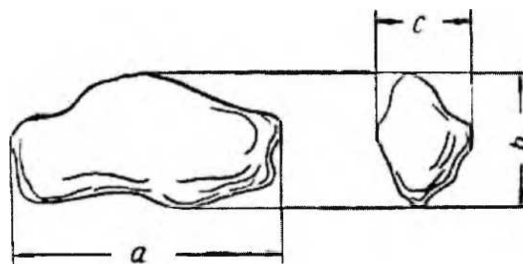


Рисунок 1.1 - розміри частинок сипкого матеріалу:  $a$  – найбільший розмір;  $b$ ,  $c$  – розміри частинки

Сипкі матеріали в залежності від розміру типових кусків поділяються на ряд категорій:

А) крупно кускові ( $a_{max} > 160$  мм);

Б) середньо кускові ( $60 < a_{max} < 160$  мм); в) дрібно кускові ( $10 < a_{max} < 60$  мм);

Г) крупнозернисті ( $2 < a_{max} < 10$  мм); д) дрібнозернисті ( $0,5 < a_{max} < 2$  мм);

Е) порошкоподібні ( $0,05 < a_{max} < 0,5$  мм);

Ж) пиловидні ( $a_{max} < 0,05$  мм).

Насипна густина (об'ємна вага). Насипною густиною  $\rho_n$  сипкого матеріалу називається маса одиниці займаного їм об'єму. Зазвичай насипна густина визначається в  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Насипна густина визначається за формулою

$$\rho_n = \frac{G_0 - G_1}{V_1},$$

де  $G_0$  - вага посуду з сипким матеріалом;

$G_1$  - власна вага посуду;

$V_1$  - об'єм посуду.

Класифікація сипких матеріалів по об'ємній вазі: а) легкі (об'ємна вага менше  $600 \text{ кг}/\text{м}^3$ ); б) середні (об'ємна вага лежить в межах від  $600$  до  $1100 \text{ кг}/\text{м}^3$ ); в) важкі (об'ємна вага лежить в межах від  $1100$  до  $2000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ); г) дуже важкі (об'ємна вага від  $2000 \text{ кг}/\text{м}^3$  і більше).

Питомою вагою сипкого матеріалу називається середня питома вага складових його твердих частинок. Для визначення питомої ваги сипкого матеріалу в скляну судину насипають порцію сухого матеріалу, наливають рідину, що змочує, але не розчинює частинки матеріалу, ретельно перемішують їх і потім визначають об'єм отриманої суспензії; питома вага  $\delta$  визначається по формулі:

$$\delta = \frac{G_{cm}}{V_c - V_p'}$$

де  $G_{cm}$  - вага порції сухого матеріалу;

$V_c$  - об'єм суспензії;

$V_p$  - об'єм рідини.

Опір сипких матеріалів переміщенню щодо поверхні твердих тіл, що викликається силою тертя, характеризується коефіцієнтом зовнішнього тертя  $f_l$ , який визначають за допомогою трибометра.

Розрізняють коефіцієнт тертя сипкого матеріалу об тверді поверхні в стані спокою і в стані відносного руху; порівняльні випробування показують, що коефіцієнт тертя об тверді поверхні в русі складає 70...90 % величин коефіцієнта тертя у спокої. Коефіцієнт зовнішнього тертя знаходять за формулою:

$$f_l = \frac{T - T_p}{F},$$

де  $m$  - зрушуючи зусилля;

$T_p$  - опір рамки;

$F$  - вертикальне навантаження.

При орієнтовних розрахунках у тих випадках, коли дійсне значення коефіцієнта тертя даного сипкого матеріалу об стінки барабана невідоме, але відоме значення коефіцієнта тертя даного сипкого матеріалу об матеріал іншого роду, необхідний коефіцієнт тертя може бути знайдений з наступного наближеного співвідношення, побудованого на середніх даних різних випробувань.

$$f_{1c} : f_{1d} : f_{1r} : f \approx 15 : 16 : 17 : 20,$$

де  $f_{1c}$  – коефіцієнт тертя сипкого матеріалу об сталь;

$f_{1d}$  – коефіцієнт тертя сипкого матеріалу об дерево;

$f_{1r}$  – коефіцієнт тертя сипкого матеріалу об гуму;

$F$  – коефіцієнт внутрішнього тертя, до якого приблизно прирівнюється коефіцієнт тертя по бетону.

Відносна взаємна рухливість частинок сипкого матеріалу визначається наявністю сил щеплення між окремими частинками і величиною сил тертя, що

виникає при переміщенні частинок відносно друг друга.

Злежуваністю сипких матеріалів називається властивість матеріалів втрачати рухливість частинок при тривалому зберіганні в бункерах, силосах і інших судинах. До злежуваності схильні такі матеріали, як глина, вапно, сода, цемент та інші. Деякі сипкі матеріали особливо схильні до злежування в умовах підвищеної вологості, наприклад, пісок, кам'яна сіль і ін.

Липкістю називається властивість деяких сипких матеріалів прилипати до твердих тіл. Липкістю володіють порошкоподібні і пилоподібні фракції сипких матеріалів, головним чином вологих. Проте і деякі сухі матеріали є липкими; так, наприклад, сіра і тальк прилипають до сталі, крейда прилипає до дерева.

## **1.2 Будова і принцип роботи аналогів змішувача**

Вирішення задачі приготування однорідної суміші викликає ряд проблем. Ці проблеми пов'язані з широким спектром змін фізико-механічних властивостей матеріалів, які підлягають переробленню, з вимогами, які ставляться до якості і до складу продукту, продуктивності, енерго- та металоємкості обладнання.

Важливим фактором, що стримує вирішення задачі підвищення ефективності змішувачів, є сегрегація компонентів сипких матеріалів за їх фізико-механічними властивостями. Це явище призводить до погіршення якості кінцевого продукту в силу коливань його властивостей за об'ємом складу, що може проявитись зниженням ефективності хімічних реакцій, якості отриманих матеріалів [3].

На рисунку 1.2 зображена схема обертового барабанного апарата.

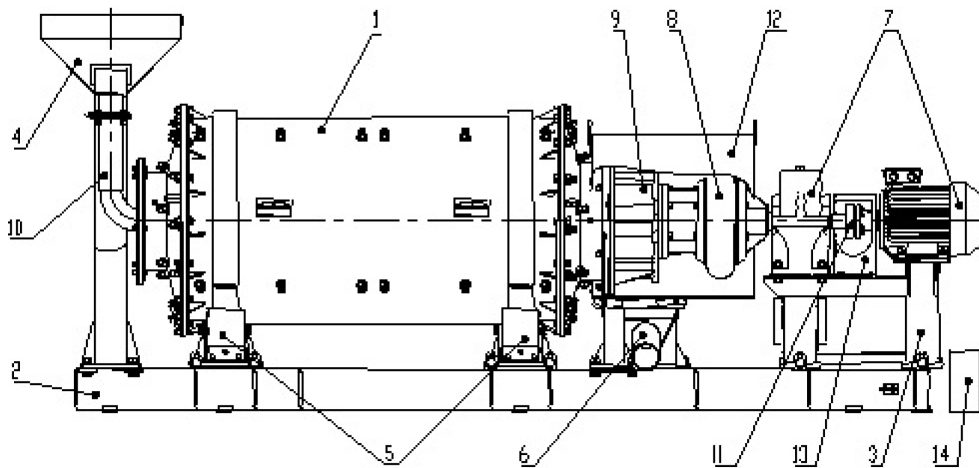


Рис. 1.2 Загальний вигляд обертового барабанного апарата  
 1 – барабан; 2 – рама; 3 – рама вертикальна; 4 – бункер завантажувальний;  
 5 – кожух; 6 – бункер розвантажувальний; 7 - привод; 8 - цапфа; 9 –  
 пристрій завантажувальний; 10 – патрубок; 11 - муфта; 12 - загорожа; 13 –  
 кожух; 14 – панель керування

На рух сипкого матеріалу в барабанних апаратах впливає багато факторів: твердість, вміст вологи, вміст цінного компонента та шкідливих домішок, характер включень зерен, хімічні властивості та інші характеристики. Виходячи з цього, на підприємствах фармацевтичної промисловості застосовуються різні схеми змішування. Вибір тієї чи іншої схеми визначається фізико-механічними характеристиками сипкого матеріалу [4].

### **Опис обладнання для дослідження руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах**

Збільшення продуктивності апаратів барабанного типу з найменшими витратами енергетичних та матеріальних ресурсів, у який відбувається змішування сипких матеріалів, вимагає дослідження руху сипких матеріалів в барабанних апаратах. Вирішення цієї задачі в інтересах хімічних, фармацевтичних, харчових та металургійних виробництв.

Метою і задачами проведення патентних досліджень є:

- моніторинг установок, які дозволяють визначити траєкторію руху матеріалу;

- визначення патентноспроможності та інших форм захисту інтелектуальної власності, що має відношення до установок для дослідження сипкого матеріалу.

На сьогоднішній день дослідженням траєкторії руху сипких матеріалів в апаратах барабанного типу займаються багато інститутів, проектних організацій та заводів. Незважаючи на це, підвищення продуктивності барабанних апаратів неможливе лише за рахунок теоретичного моделювання процесу змішування сипких матеріалів в обертовому барабані, не проводячи дослідження поведінки частинок матеріалу в апаратах барабанного типу. Наразі багато правил та закономірностей розрахунку подібного устаткування не є достатньо ефективними та точними через те, що вони отримані емпіричним шляхом. Постійно ведеться інженерний та науковий пошук вдосконалення технології змішування сипких матеріалів, розробка нових машин та принципів роботи, що забезпечують підвищення їх ефективності та продуктивності.

Для змішування сипких матеріалів широко використовуються різноманітні барабанні апарати (рисунок 1.3). Проте низька інтенсивність протікаючих процесів та їх локалізація в обмеженій зоні приводить до більш довгої реалізації технологічного процесу змішування частинок матеріалу.

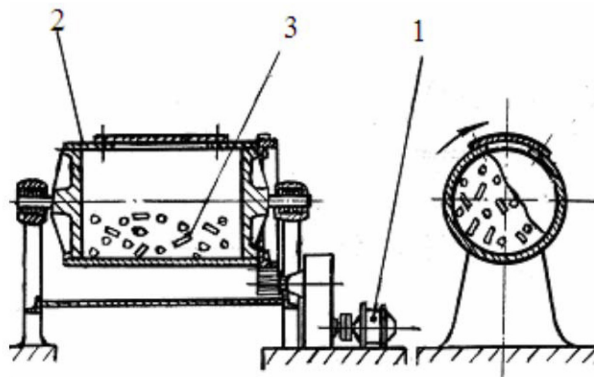


Рис. 1.3 Барабанний пристрій для змішування сипких матеріалів:

1 – привід; 2 – барабан; 3 – сипкий матеріал

Змішування є однією з найважливіших операцій при виготовленні матеріалів та виробів з порошків. Воно полягає в приготуванні однорідної механічної суміші із порошків різного хімічного та гранулометричного складу.

Задачі змішування – перетворення сукупності частинок твердих компонентів в макрооднорідну суміш.

Результат змішування визначається формою та величиною частинок, кількістю компонентів, які змішуються, а також співвідношенням їх кількостей, коефіцієнтом тертя між частинками, здатністю частинок до злипання та іншими факторами.

Найбільш розповсюдженим є механічне змішування компонентів в кульових млинах, які є аналогічними до тих, що застосовуються при подрібненні. При змішуванні в кульовому млині відбувається одночасне подрібнення компонентів. Якщо подрібнення або змішування небажане, то використовуються змішувачі різних типів. Це можуть бути барабанні, в тому числі так звані “п’яні бочки”, застосування яких на сьогоднішній день обмежене через недостатню ефективність, шнекові, лопатеві, відцентрові, планетарні, конусні та установки безперервної дії.

При змішування компонентів з кардинально відмінними густинами використовують особливі прийоми. Наприклад, застосовують завантаження компонентів по частинах, змішуючи спочатку найбільш легкі з більш важким компонентом, а потім до такої суміші додають інші компоненти. В деяких випадках хороші результати досягаються при змішуванні у вакуумі компонентів з різною густиною. В цьому випадку поводження компонентів не залежить від їх густини і частинки всередині змішувача рухаються з однаковими швидкостями, що забезпечує високу рівномірність об’ємного розподілу компонентів в суміші.

У випадку поганих технологічних характеристик суміші (низька текучість, пресованість) її піддають грануляції, під якою розуміють операцію утворення стійких комків сфероїдальної форми, що складаються з порівняно великої кількості частинок.

Результати змішування контролюють або за фізико-технологічними властивостями шихти, визначаючи гранулометричний склад, насипну масу, текучість, пресованість, або за хімічним аналізом проб. На практиці зазвичай

контролюють частину технологічних характеристик суміші і проводять хімічний аналіз проб з неї [9].

На рисунку 1.4 зображена схема пристрою для змішування сипких матеріалів [10].

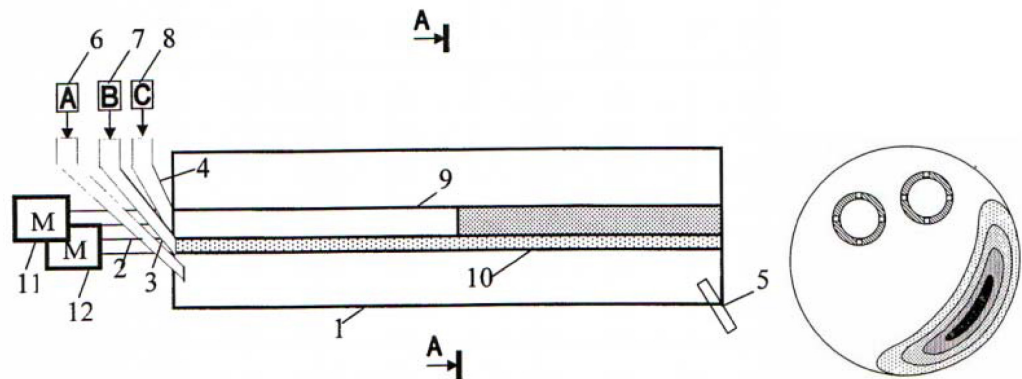


Рис. 1.4 Пристрій для змішування сипких матеріалів:

1 – барабан; 2-4 – вузли завантаження; 5 – вузол розвантаження однорідної суміші; 6-8 – дозатори безперервної подачі компонентів А, В, С; 9, 10 – перфоровані труби; 11, 12 – приводи; А, В, С – сипкі матеріали (А – основний компонент)

Пристрій, що зображений на рисунку 1.10, працює наступним чином. Основний матеріал А завантажують через вузол завантаження 2. Інші сипкі матеріали завантажують у вузли завантаження 3, 4, після чого потрапляють в перфоровані труби. Приводи 11 та 12 обертають труби 9, 10 навколо своєї осі, в результаті чого матеріал з труб через отвори перфорації змішується із основним сипким матеріалом А. Труба 9 перфорована тільки на деякій відстані від вузла розвантаження однорідної суміші 5.

Переваги: швидке та якісне змішування за рахунок рівномірного і поступового завантаження одного із сипких матеріалів, що підлягають змішуванню.

Недоліки: складність виробництва перфорованої труби.

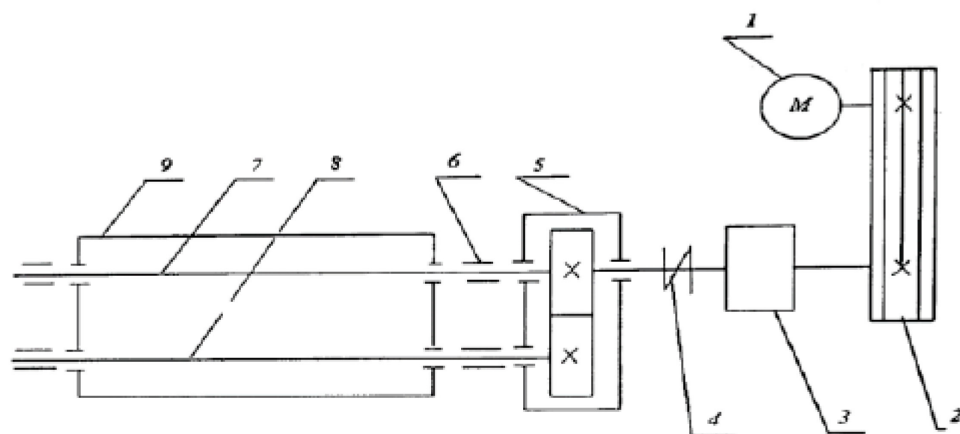
#### Основні принципи змішування і типи змішувачів

Існує багато конструктивних реалізацій змішувачів сипких матеріалів, одним із найбільш розповсюджених є лопатеві. Лопатеві змішувачі відносяться

до універсальних змішувальних машин. У них можна змішувати як зволожені матеріали і пасти, так і сухі сипучі матеріали. Виготовляються вони з одним або в більшості випадків з двома валами, на яких змонтовані змішувальні елементи. У лопатевих змішувачах для змішування і осьового переміщення сипучих матеріалів служать лопатки, спіралі, переривчасті витки шнека або гвинтові стрічки, закріплені на одному або двох паралельних валах, пропущених через корпус змішувача [3, 4]. Перетин корпусу цих змішувачів може мати одну з наступних форм: циліндричну, коритоподібну, овальну.

Лопатеві змішувачі є змішувачами безперервної дії з примусовим перемішуванням, відрізняються простою конструкцією, великою продуктивністю і легкістю обслуговування. Недоліки лопатевих змішувачів: не забезпечується ретельне змішування компонентів і лопаті змішувача вганяють повітря в змішують масу, що погіршує її пластичність.

Двовальні лопатеві змішувачі (рис. 1.5) при меншій довжині краще змішують матеріали, ніж одновальні. Вони бувають з однаковим і різним числом оборотів лопатевих валів, прямоточні і протиточні, для перемішування сухих і зволжених матеріалів, з водяним і паровим зволоженням [3, 4].



**Рисунок 2** – Кінематична схема двовального лопатевого змішувача

1 - електродвигун; 2 - клинопасова передача; 3 - редуктор; 4 - муфта; 5 - зубчаста передача; 6 - підшипник; 7 – лопатевий привідний вал; 8 – лопатевий головний вал; 9 – корпус

Корпус змішувача змонтований в рамі, яка є несучою конструкцією всього змішувача. Рама кріпиться нерухомо на фундаменті при монтажі. На

корпусі змішувача передбачені ребра жорсткості, що виключають вібрацію при роботі. Усередині корпусу встановлено лопатевий привідний і головний вали на підшипниках кочення, які в свою чергу встановлені на опорах (швелерах). Вали з закріпленими на них лопатями, є головними робочими органами змішувача і служать для безперервного змішування компонентів [3-5]. Для зручності складання вали виконані знімними і встановлюються в зібраному вигляді.

Лопатевий привідний вал пов'язаний з головним валом циліндричними шестернями, зануреними в масляну ванну. Обертові частини змішувача мають ого- рожу для забезпечення безпеки робітникам. Вали, обертаючись назустріч один одному в підшипниках, взаємодіють зі змішуваним матеріалом і змішують його. Інтенсивно перемішуючись, суміш просувається уздовж змішувача до розвантажувальної воронки [2, 4]. Для введення рідких компонентів в кришці змішувача передбачені форсунки розпилювальні, які забезпечують своєчасне зволоження матеріалу [2, 3].

У двовальному змішувачі вали можуть обертатися назустріч один одному або в одну сторону. Перемішуючі елементи, що закріплюються на валах, як правило, однотипні (або лопатки, або стрічки чи ін.). Однак є черв'ячно-лопатеві змішувачі, у яких перемішуючі елементи чергуються: наприклад, лопатки чергуються з витками шнека. Напрямок гвинтових ліній, за якими монтується перемішуючі елементи, в двовальних змішувачах може бути однаковим або різним. В останньому випадку один з валів повинен мати значно більшу транспортуючу здатність з тим, щоб забезпечити проходження змішуваного матеріалу уздовж змішувача від місця завантаження до місця вивантаження. Змішувач, в залежності від характеристики цього пристрою може акумулювати значну масу матеріалу, що забезпечує більший час його перебування в змішувачі, а це, у свою чергу, призводить до високої якості змішування і ефективному придушенню пульсацій подачі компонентів.

Змішувач (деклараційний патент № UA31116A заявл. 15.12.2000, Бюл.

№7, МКІ В01F7/08)

Змішувач містить корпус з вхідним і вихідним отворами, порожній перфорований шнек з гвинтовою переривчастою нарізкою, що зміщена в місці розриву по зовнішній поверхні, де задній кінець встановлено в змішувально - дроселюючому елементі, який відрізняється тим, що шнек забезпечено приводним пристроєм, і на його внутрішній поверхні виконано 2-о західну гвинтову безперервну нарізку з протилежним напрямом навивки відносно гвинтової нарізки на зовнішній поверхні, а передній кінець шнека встановлено в змішувально - дроселюючому елементі.

Винахід відноситься до галузі пристроїв для отримання гомогенних емульсій і суспензій, а саме до динамічних змішувальних пристроїв для середовищ із всілякою питомою вагою.

Відомо роторний апарат, який містить корпус, загрузочний і розгрузочний патрубків та робочий орган, що зроблено у вигляді ротора з каскадом підшипників кочення, який оснащено обичайкою, яка розташована між внутрішньою та зовнішньою обіймами підшипників з напрямними, розташованими з обох сторін обичайки по гвинтової лінії

До недоліків цього роторного апарата належить віднести малу ступінь отримуваних сумішей, так як таке конструктивне рішення не дозволяє суттєво збільшити напруги зсуву, які беруть участь у процесах диспергування та гомогенізації.

Відомо також змішувач, який містить корпус з вхідним та вихідним отворами, порожній шнек з гвинтовою нарізкою по зовнішній поверхні і гвинтовою канавкою по внутрішній поверхні та нерухомий сердечник, який розміщено у порожнині шнека. Напрям витків гвинтової канавки шнека виконано протилежно до гвинтової нарізки на його зовнішній поверхні

Недоліком такого змішувача є його низька змішувальна здатність із-за безперервної зовнішньої гвинтової нарізки. Потік компонентів, що проходить через змішувач, здобуває закрутку по гвинтової лінії, але не має можливості розбиття на дрібні потоки з подальшим злиттям, що визначає якість змішання.

Найближчим за технічною суттю до винаходу є змішувач, який вибраний прототипом, що містить корпус зі вхідним і вихідним отворами, порожній шнек з гвинтовою нарізкою по зовнішній поверхні та нерухомий сердечник, який розміщено у порожнині шнека. Нарізка шнека виконана переривчастою зі зсуванням в місці розриву на кут до  $90^\circ$ , а кут підйому подальшої частини гвинтової нарізки перевищує кут підйому попередньої у напрямі до вихідного отвору. Для розбиття потоку інгредієнтів на більш дрібні з подальшим їх злиттям порожній шнек перфорований отворами, осі яких нахилені до осі шнека. Для надання шнеку обертового руху за рахунок набігання потоку, що змішується, на гвинтову нарізку, між нерухомим сердечником і одним кінцем шнека, а також між корпусом і другим кінцем шнека встановлені підшипники кочення

Недоліком такого змішувача є: незадовільна якість продукту при переробці емульсій і суспензій; залежність часу змішання (для досягнення заданої якості) від в'язкості перероблюємої емульсії і суспензії, тиснення та швидкості набігання потоку на зовнішню гвинтову нарізку шнека, яка приводить останній до обертання.

В основу винаходу покладено задачу створити такий змішувач, в якому регулювання швидкості обертання шнека і зменшення шляху змішання компонентів дало б змогу інтенсифікувати процес перемішування, збільшити ступінь однорідності і розширити можливість переробки емульсій і суспензій у широкому діапазоні в'язкостей.

Поставлена задача досягається тим, що у змішувачі, що містить корпус із вхідним та вихідним отворами, порожній перфорований шнек з гвинтовою переривчастою, зміщеною у місці розриву, нарізкою по зовнішній поверхні, задній кінець якого встановлено в змішально-дроселюючому елементі, у відповідності з винаходом шнек оснащено приводним пристроєм і на його внутрішній поверхні виконано 2-о західну безперервну гвинтову нарізку з протилежним напрямом навивки відносно гвинтової нарізки на зовнішній поверхні, а для додаткового подрібнення твердої фази передній кінець шнека

встановлено в змішально-дроселюючому елементі, який зроблено у вигляді підшипника кочення.

Використання шнека, на внутрішній поверхні якого виконано безперервну 2-о західну гвинтову нарізку, що встановлено з обох кінців у змішально-дроселюючому елементі, дає змогу збільшити ступінь однорідності вихідного продукту внаслідок змінення траєкторії руху компонентів, до того ж використання приводного пристрою, яким оснащено шнек, дозволяє розширити діапазон в'язкостей емульсій і суспензій за рахунок регулювання швидкості обертання шнека.

На рис.1 показано змішувач, що складається із змішуючого і приводного пристрою. Змішуючий пристрій складається із корпусу 1 що містить вхідний 2 і вихідний 3 отвори. В середині корпусу встановлено порожній перфорований шнек 4 на зовнішній поверхні якого виконано гвинтову преривчасту нарізку у вигляді лопатей 5, 6 7 з кутом атаки який збільшується за напрямом до вихідного отвору 3. Перфорація шнека являє собою отвори 8, осі яких нахилені до осі шнека 4. На внутрішній поверхні шнека 4 виконано 2-о західну безперервну гвинтову нарізку 9 з протилежним напрямом навивки відносно гвинтової нарізки на зовнішній поверхні. Шнек 4 встановлено з обох кінців у змішально-дроселюючих елементах 10, 11 що виконані, наприклад, у вигляді підшипників кочення. Передній підшипник 10 встановлено таким чином, що поряд зі своєю основною функцією (опора обертання) він виконує роль, по-перше, дроселюючого елемента, який розподіляє основну частину потоку у внутрішню порожнину шнека, і, по-друге, змішального елемента через який проходить частина потоку компонентів, що змішуються. Задній підшипник 11 окрім своєї основної функції виконує роль змішально-дроселюючого елемента. Від осьового переміщення шнек 4 утримують дистанційні шайби 12 та підтискні гайки 13. На передньому кінці шнека 4 виконано з'єднувальну муфту 14 та вікна 15 для уводу змішувальних інгредієнтів у внутрішню порожнину 16 шнека.

Приводний пристрій складається із двигуна 17, приводного штока 18, з'єднувальних муфт 19, 14 та вузла ущільнення 20 приводного штока.

Змішувач працює таким чином. Вихідні інгредієнти надходять у вхідний отвір 2 Частина потоку, що проходить через підшипник 10, підлягає інтенсивному перемішуванню, агломеровані частки твердої фази подрібнюються під впливом деформацій, які сприймаються від тіл кочення підшипника, транспортуються по кільцевому каналу 21 між внутрішньою поверхнею корпусу 1 та зовнішньою поверхнею шнека 4 лопатями 5, 6, 7 гвинтової переривчастої нарізки шнека.

У зв'язку з тим, що прохідний переріз підшипника 10 малий відносно прохідного переріза вікон 15 шнека, основна частина потоку через вікна 15 потрапляє у внутрішню порожнину 16 шнека та двозахідною гвинтовою безперервною нарізкою 9 транспортується в напрямі, протилежному основному потоку, та перетікає через отвори 8 шнека в кільцевий канал 21 У кільцевому каналі 21 відбувається змішання потоків і транспортування їх лопатями 5, 6, 7 зовнішній гвинтової переривчастої нарізки шнека до вихідного отвору 3 змішувача через підшипник 11 Тверда фаза, що проходить через підшипник 11, достатньо підлягає подрібненню та інтенсивному змішуванню.

Таке проходження інгредієнтів через змішувач викликає багаторазовий розділ та змішання потоків, а за рахунок проходження через підшипники відбувається додаткове подрібнення та якісне диспергування твердої фази в рідку внаслідок деформацій, що сприймаються від тіл кочення підшипників.

Використання запропонованого пристрою дозволяє суттєво інтенсифікувати процес перемішування та диспергування твердої фази.

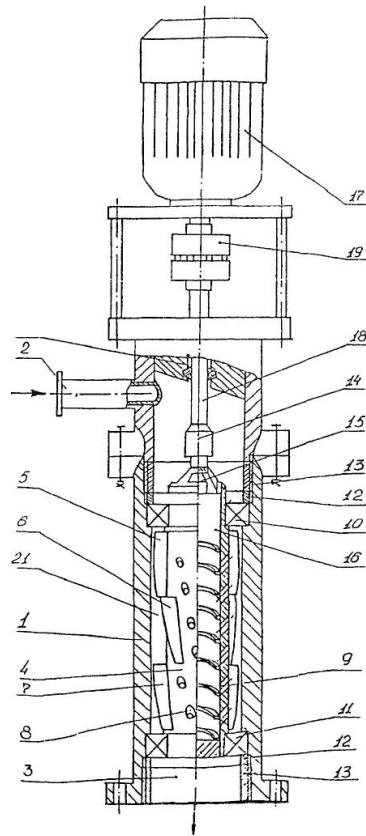


рис. 1

### 3.3.2.Змішувач (декларацийний патент №UA33726А заявл. 15.02.2001, Бюл. №1, МКІ В01F7/08)

Змішувач, містить корпус із завантажувальним і вивантажувальним вікнами а також перемішуючий пристрій у вигляді встановлених на валу двох концентричних спіралей, який відрізняється тим, що внутрішня спіраль закріплена безпосередньо до валу та виконана у вигляді конічного шнеку із рівномірно зростаючим кроком і навивкою в ту ж сторону, що і зовнішня спіраль, причому, співвідношення кроку внутрішньої спіралі до діаметру по всій довжині змішувача постійне, а и мінімальний крок більший, ніж постійний крок зовнішньої спіралі.

Винахід належить до механізмів для змішування дисперсних матеріалів, наприклад, для змішування сапропелю, торфу з мінеральними добривами.

Відомий змішувач безперервної дії, що містить привод горизонтальний корпус із завантажувальним і вивантажувальним штуцерами та вал із шнеком, витки якого мають загальні поздовжні лопаті виконані у вигляді пластин

закріплених по периферії шнека вздовж всієї його довжини. Недоліком такого змішувача є велика тривалість процесу змішування дисперсних матеріалів для досягнення високої однорідності суміші внаслідок неможливості перерозподілу частинок матеріалу між порціями, на які поділяють матеріал витки шнека.

Відомий також змішувач, що містить корпус, перемішувачий пристрій, виконаний у вигляді коаксіально встановлених спіральних стрічок, та патрубку входу і виходу продукції. Внутрішня спіральна стрічка обладнана еластичною стрічкою, розміщеною по м зовнішній поверхні. Недоліком такого змішувача є висока енергоємність процесу змішування внаслідок утворення протилежно направлених потоків матеріалу коаксіально встановленими спіральними стрічками.

Найбільш близьким за технічною суттю до змішувача, що пропонується, є змішувач для дисперсних матеріалів. Він містить корпус із завантажувальним і вивантажувальним вікнами та перемішувачий пристрій у вигляді встановлених на валу концентричних спіралей протилежної навивки. Внутрішня спіраль виконана із змінним діаметром, рівномірно зростаючим пропорційно довжині змішувача і які визначаються за відповідними співвідношеннями. Відношення кроку до діаметру внутрішньої спіралі по всій її довжині постійне. Суттєвими недоліками такого змішувача є висока енергоємність процесу змішування внаслідок утворення протилежно направлених потоків матеріалу концентричними спіралями, а також виникнення застійних зон з матеріалом біля валу перемішувача і велика тривалість процесу змішування за рахунок низької транспортуючої здатності матеріалу в осьовому напрямку обома спіралями.

В основу винаходу поставлено завдання у відомому змішувачі шляхом зміни його конструкції забезпечити отримання нового технічного результату, що полягає у зниженні енергоємності та тривалості процесу змішування і усуненні появи застійних зон біля валу.

Поставлене завдання вирішується наступним чином:

У відомому змішувачі, що містить корпус із завантажувальним і вивантажувальним вікнами, а також перемішуючий пристрій у вигляді встановлених на валу двох концентричних спіралей, відповідно до винаходу, який пропонується, внутрішня спіраль закріплена безпосередньо до валу та виконана у вигляді конічного шнеку із рівномірно зростаючим кроком і навивкою в ту ж сторону, що і зовнішня спіраль, причому, співвідношення кроку внутрішньої спіралі до її діаметру по всій довжині змішувача постійне, а її мінімальний крок більший ніж постійний крок зовнішньої спіралі.

Всі суттєві відмінні ознаки спрямовані на досягнення однієї мети, а саме зниження енергоємності та тривалості процесу змішування, а також усунення появи застійних зон біля валу.

На рис. 2 зображений запропонований змішувач у поздовжньому розрізі.

Змішувач містить корпус 1 із завантажувальним 2 і вивантажувальним 3 вікнами і перемішуючий пристрій у вигляді вала 4, на якому встановлено дві концентричні спіралі 5 і 6. Внутрішня спіраль 5 закріплена безпосередньо до валу 4 і виконана у вигляді суцільного конічного шнеку із рівномірно зростаючим до виходу змінним кроком. Зовнішня спіраль 6 встановлена на валу 4 на радіальних стійках 7. Крок і діаметр зовнішньої спіралі 6 постійні по всій довжині змішувача. Обидві спіралі мають односторонні навивки.

Змішувач працює наступним чином:

Після включення механізму приводу через завантажувальне вікно 2 в корпус 1 подають компоненти, які підлягають змішуванню. При обертанні вала 4 частинки матеріалу, які знаходяться біля корпусу, піднімаються зовнішньою спіраллю 6, ковзають по ній і попадають до центру змішувача, занурюючись в масу потоку створеного, закріпленою безпосередньо до валу 4, внутрішньою спіраллю 5. За рахунок того, що мінімальний крок внутрішньої спіралі 5 більший постійного кроку зовнішньої спіралі в, в змішувачі утворюються потоки матеріалу із різними осьовими швидкостями, причому, січення і осьова швидкість потоку матеріалу створеного внутрішньою спіраллю змінюється вздовж довжини змішувача внаслідок встановлення її із змінним кроком та

діаметром. Змішування відбувається за рахунок перерозподілу порцій матеріалу між потоками, які утворені зовнішньою та внутрішньою спіралями. Досягнувши кінця змішувача, отримана суміш вивантажується через вікно 3.

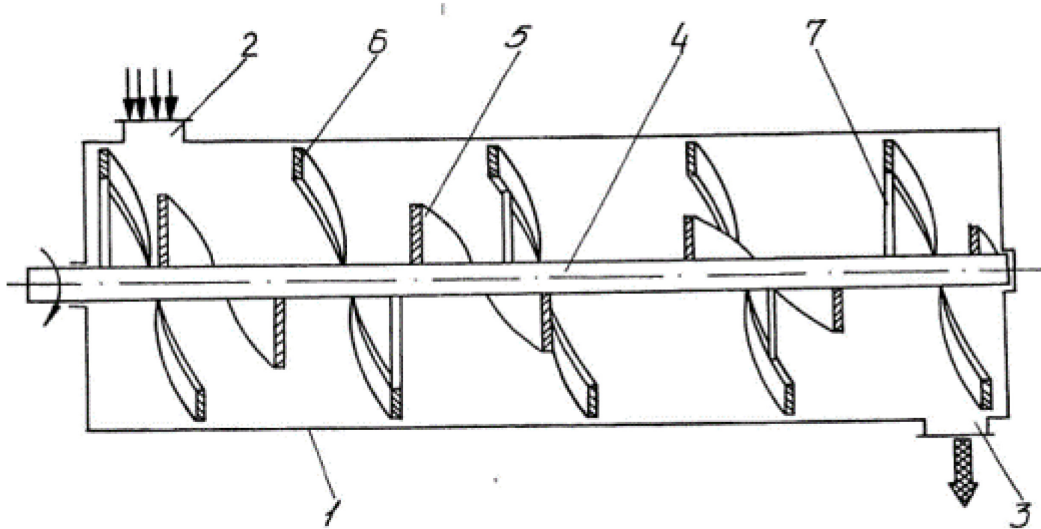


рис. 2

### 3.3.3.Змішувальний пристрій (декларційний патент № UA41757A заявл. 17.09.2001, Бюл. №8, МКІ В01F7/08)

Змішувальний пристрій містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною зонами і обертові вали з лопатками, який відрізняється тим, що на корпусі встановлені завантажувальний та вивантажувальний стрічкові транспортери, кожух розміщений еквідистантно від траєкторії руху кінців лопаток, зверху над валами встановлені скатні лотки, а лопатки обох валів у спільній зоні дії розміщені одні між одними у почерговій послідовності, причому на валах у площинах, перпендикулярних їх, осям, встановлена різна парна кількість лопаток під почерговою знакозмінним кутом до цієї ж площини.

Винахід належить до пристроїв для змішування матеріалів і може бути використаний для змішування сапропелю з мінеральними добривами.

Відомий пристрій для змішування сипучих матеріалів, що містить барабан, на зовнішній поверхні якого розміщені лопатки, і кожух. Лопатки розміщені попарно під кутом одна відносно одної меншим  $180^\circ$ . Недоліком такого пристрою є низька інтенсивність процесу змішування внаслідок коротко

тривалості дії лопаток на матеріал та швидкого спрацювання кожуха при ударній дії абразивних частинок матеріалу (мінеральних добрив).

Відомий також ігристий для сухого змішування пестицидів з мінеральними добривами, що містить стрічковий конвеєр, змішувальний барабан з лопатками і відбиваючий кожух. Відбиваючий кожух обладнаний рухомо встановленими скатними пластинами і екраном із пружного матеріалу. Лопатки змішувального барабана розміщені на його поверхні по утворюючій у шахматному порядку. Недоліками такого пристрою є низька інтенсивність процесу змішування внаслідок коротко тривалості дії лопаток на матеріал та відсутності перерозподілу його частинок у поперечному напрямку.

Найбільш близьким за технічною суттю до змішувального пристрою, що пропонується, є змішувальний пристрій, який містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною зонами й обертаючі вали з лопатками, встановленими по гвинтовій лінії. Гвинтова лінія кожного валу виконана із кроком, рівним половині довжини валу, і має два відрізки з протилежно направленими витками. При цьому лопатки гвинтової лінії одного напрямку встановлені під кутом  $45^\circ$  до площини поперечного січення валу і утворюють із лопатками гвинтової лінії протилежного напрямку кут  $90^\circ$ , обернений вершиною в сторону, протилежну напрямку обертання. Пристрій обладнаний кожухом, встановленим відносно корпусу із зазором, що з'єднує завантажувальну й розвантажувальну зони. Суттєвим недоліком такого пристрою є низька інтенсивність процесу змішування внаслідок відсутності перерозподілу частинок матеріалу між порціями, що знаходяться у сусідніх між виткових просторах гвинтової лінії, а також внаслідок наявності "мертвих зон" у пристрої, при проходженні матеріалу через які відсутня дія лопаток на нього (зазор вздовж площини симетрії пристрою між гвинтовими лініями двох паралельних валів, зазор між гвинтовою лінією валу й кожухом).

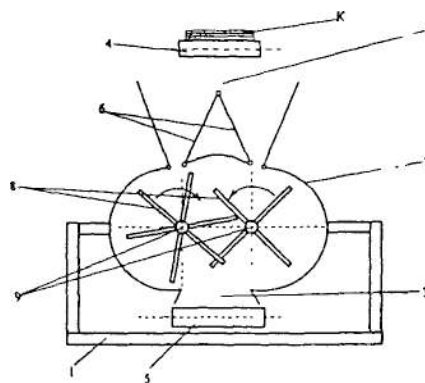
В основу винаходу поставлене завдання шляхом зміни конструкції відомого змішувального пристрою забезпечити отримання нового технічного результату, що полягає у інтенсифікації процесу змішування.

Поставлене завдання вирішується наступним чином.

У відомому змішувальному пристрої, що містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною зонами і обертаючі вали з лопатками відповідно до винаходу, що пропонується, встановлені завантажувальний та вивантажувальний стрічкові транспортери, кожух розміщений еквідистантно від траєкторії руху кінців лопаток, зверху над валами встановлені скатні лотки, а лопатки обох валів у спільній зоні дії розміщені одні між одними у почерговій послідовності, причому на валах у площинах, перпендикулярних їх, осям, встановлена різна парна кількість лопаток під почерговою знакозмінним кутом  $\pm 45^\circ$  до цієї ж площини.

На рис. 3 зображений змішувальний пристрій, загальний вид; на рис 4, 5 - розміщення лопаток на валах.

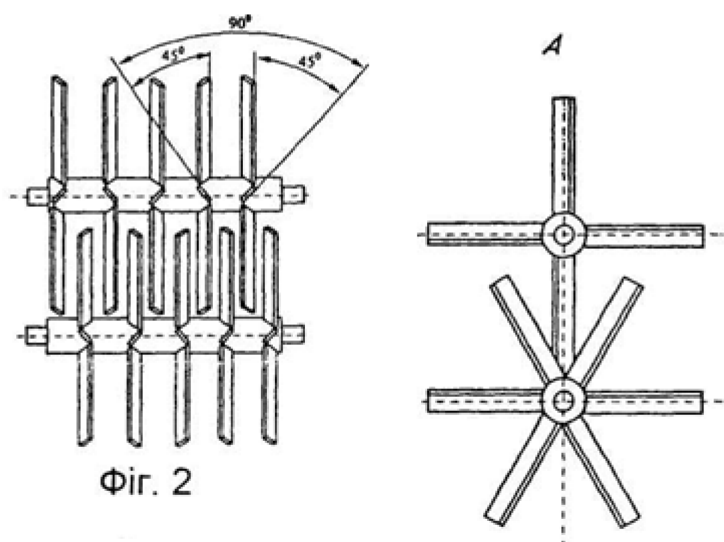
Змішувальний пристрій містить корпус 1 із завантажувальною 2 і вивантажувальною 3 зонами, завантажувальний 4 і вивантажувальний 5 стрічкові транспортери, скатні лотки 6, кожух 7, встановлений еквідистантно від траєкторії руху кінців лопаток 8, обертаючі вали 9 із лопатками 8, які мають спільну зону дії і розміщені в ній одні, мають різну парну кількість лопаток 8 в площинах, перпендикулярних їх, осям, які встановлені під почерговою знакозмінним кутом  $\pm 45^\circ$  до цих же площин.



Змішувальний пристрій працює наступним чином:

Компоненти К, які змішуються, пошарово накладені на стрічковий транспортер 4, безперервним потоком подаються у завантажувальну зону 2 на скатні лотки 6. При русі компонентів по скатних лотках 6 вони частково

змішуються та поділяються на два потоки. Внаслідок ударної дії лопаток 8 ці потоки рухаються назустріч один одному з великою швидкістю і в результаті співудару відбувається взаємопроникнення частинок компонентів та відповідно їх інтенсивне змішування. Оскільки лопатки 8, які знаходяться в одній площині, перпендикулярній осі валу 9, встановлені на ньому з почергово знакозмінним кутом  $\pm 45^\circ$  до цієї ж площини, то напрям потоків у горизонтальній площині почергово змінюється від ударної дії кожної лопатки на кут  $90^\circ$ , що сприяє перерозподілу частинок компонентів у поперечному напрямку потоку. Потоки в результаті співудару втрачають швидкість, потрапляють на лопатки та переміщуються вздовж вертикальної площини. За рахунок устанавлення на валах різної кількості лопаток відбувається зсування шарів потоку у горизонтальній площині. Суміш через вивантажувальну зону 3 подається на стрічковий транспортер 5.



Таким чином, змішування відбувається по трьох взаємно-перпендикулярних напрямках, за рахунок чого забезпечується висока ефективність процесу змішування, причому використання ефекту співудару частинок призводить до зниження енергоємності цього процесу.

## 2. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Задача дослідження руху сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах представляє великий інтерес. Особливе значення надається дослідженню траєкторії руху сипкого матеріалу при низьких та високих швидкостях обертання барабана. На основі аналізу робочих процесів цих систем всі види руху оброблюваного матеріалу можуть бути зведені до двох найбільш характерних рухів в'язкої ньютонівської рідини та сипкого тіла [6].

Рух сипкого матеріалу в обертовому барабані можна класифікувати на два граничних режими: інерційний та квазистатичний. Квазистатичний режим руху сипкого матеріалу характеризується малою швидкістю зсуву та описується теорією граничної рівноваги. Інерційний режим характеризується порівняно великими швидкостями зсуву та описується “теорією швидких рухів гранульованого середовища”.

Мета дослідження – імітаційне визначення режимів роботи сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах. Підвищення ефективності та працездатності змішувача є актуальною темою у зв'язку зі значними витратами на процес змішування, ремонт обладнання та витратами часу на проведення процесу.

Об'єкт дослідження – процес переміщення сипкого середовища, технологічні процеси в барабанному змішувачі, для змішування дисперсних мас.

Методи дослідження – математичне моделювання роботи барабанного змішувача, на основі моделювання процесу перемішування з використанням сучасних CAE – систем.

Предмет дослідження: особливості динаміки руху сипкого середовища в обертових барабанних апаратах при низьких і середніх швидкостях обертання.

Вихідними даними для розрахунку є продуктивність змішувача кг/год.

Інерційний режим передбачає появу в матеріалі внутрішніх напружень. Це пов'язано із переносом частинами матеріалу імпульсу. Для апаратів, в яких відбувається змішування сипких матеріалів, характерний цей режим руху сипкого матеріалу. Квазистатичний режим руху сипкого матеріалу передбачає

появу між частинками сипкого матеріалу сухого кулонівського тертя та внаслідок цього внутрішні напруження.

В даній роботі досліджується траєкторія руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах. Для них притаманний рух (циркуляція) основного потоку матеріалу по замкненому контуру різної складності. Рух сипкого матеріалу по циркуляційному контуру забезпечує або перемішуючий орган, або ж спеціальні транспортери. Зона руху перемішуючого органу складає незначну частку загального робочого об'єму змішувача. Найбільш поширені змішувачі циркуляційного типу – планетарно-шнекові, відцентрово-лопатеві, змішувачі з центральною циркуляційною трубкою. До основних переваг цього типу змішувачів відноситься простота та надійність конструкції, невисока споживана енергія. Але їх широке застосування в промисловості обмежене через недостатньо високу якість отримуваної суміші, особливо при змішуванні компонентів, які схильні до сегрегації. Впорядкований характер руху частинок в циркуляційних змішувачах дає змогу, в результаті моделювання процесу, який протікає в змішувачі, прогнозувати отримуваний результат, а також видавати рекомендації по проведенню процесу змішування і характеру завантаження компонентів, що змішуються. Це доволі важко зробити для інших типів змішувачів через неупорядкований характер руху частинок матеріалу [7].

Результати роботи: наявні в літературі дані, які відносяться до руху сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах не описують в повній мірі сегрегацію компонентів сипких матеріалів за їх фізико-механічними властивостями, що є одним з важливих факторів для підвищення ефективності змішування сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах.

Проведені дослідження дають можливість визначати траєкторію руху сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах.

Дана магістерська робота може бути корисною при дослідженні, проектуванні та виробництві обладнання для змішування сипких матеріалів в барабанних апаратах.

### 3. Опис та робота у програмному комплексі EDEM

Компанія *DEM Solutions Ltd.* є провідним світовим розробником технологій комп'ютерного моделювання процесів виробництва і переробки сипких матеріалів: від вугілля і руди до ґрунту і медикаментів.

З дня свого заснування *DEM Solutions* працює з компаніями-представниками таких галузей світової промисловості, як гірничодобувні розробки, землерийне і будівельне обладнання, сільськогосподарська техніка, фармацевтичне виробництво, товари широкого вжитку, хімікати і пластики, нафтогазова галузь, друк. *DEM Solutions* співпрацює з державними науково-дослідними інститутами і групами.

Програмне забезпечення *DEM Solutions* допомагає проводити технічну експертизу. Рішення *DEM Solutions* дають можливість формувати стійкий прибуток від інвестицій за рахунок скорочення витрат на створення прототипів і тестування, зниження ризиків переробки і несправності обладнання, посилення контролю якості готової продукції, прискорення інновацій у виробництві.

#### Призначення та можливості EDEM

Метод дискретних елементів (DEM, англ. *Discrete element method*) – загальна назва ряду чисельних методів, призначених для розрахунку руху великої кількості частинок, таких як молекули, піщинки, гравій, галька та інших гранульованих середовищ.



За допомогою технології методу дискретних елементів, програмне забезпечення *EDEM* дозволяє компаніям моделювати складну поведінку твердих частинок на окремому частковому рівні, надаючи інформацію про їх мікро- та макромеханічну поведінку, яку важко або неможливо отримати експериментально. Це дозволяє детально аналізувати операції з обробки широкого спектру матеріалів, від піску до порошків для таблеток.

*EDEM* може моделювати основні макромеханічні явища, що проявляються твердими частинками, такі як когезія, стисливість, гіпопластичність, розширення, дисипація енергії тертя тощо.

Він може використовуватися як інструмент прогнозування для цілого ряду обладнання, включаючи зберігання та вивантаження, перемішування, транспортування, змішування, гранулювання, сушіння, ущільнення та нанесення покриттів.

Рішення *EDEM* було розроблено для забезпечення інженерів новими і потужними інструментами моделювання руху потоків сипких матеріалів. Технічні можливості *EDEM* включають: візуалізацію результатів інженерного дизайну у тривимірному середовищі, створення прототипів процесів, пошук і усунення несправностей для широкого кола галузей промисловості і інженерних дисциплін.

*EDEM* являє собою потужну систему автоматизованого конструювання (CAE), забезпечену сучасними засобами дискретного моделювання елементів. Програмне забезпечення реалізує складні процеси симуляції та аналізу, що допомагають при вирішенні комплексних проблем дизайну, створення прототипів і розробці ефективних методів виробництва та переробки сипких матеріалів.

*EDEM* дозволяє швидко створювати моделі гранульованих систем твердих тіл із заданими параметрами. Щоб домогтися точного зображення форми реальних частинок, їх автоматично спроектовані (CAD) моделі можна імпортувати в систему. Функціональні можливості *EDEM* дозволяють комбінувати механічні, речовинні та інші фізичні властивості в процесі моделювання молекулярної системи твердих тіл. Готові моделі зручно зберігати в бібліотеці, що спрощує і прискорює процес реалізації проекту користувачем.

Система *EDEM* управляє даними про кожну окрему частинку (масі, температурі, швидкості і т. далі.) та про діючі на неї сили. Програмне забезпечення *EDEM* здатне враховувати і форму частинок. Для завершальної

обробки проекту *EDEM* містить інструменти аналізу даних і тривимірної візуалізації руху частинок.

Технологія *Particle Factory* надає метод з'єднання частинок у тверді тіла відповідно до геометричної моделі, імпортованої з систем CAD або CAE у вигляді цілісної структури або комірки. Геометричні моделі можна групувати, щоб призначати для кожної з груп індивідуальну кінематику.

Рішення *EDEM* поєднується з програмами CFD для моделювання систем твердо-рідких фаз на шкалі частинок. Це дає можливість спостерігати взаємодії «частинка-частинка» і «частинка-група частинок», які є визначальними факторами поведінки молекул.

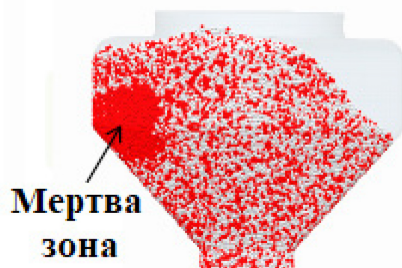
Це потужна програма до будь-якого комплекту сервісів CAE. Використання його можливостей дозволяє комплексно представляти процес моделювання частинок і виконання технологічних операцій.

Продукт *EDEM* включає наступні додатки:

- EDEM Creator – створення та ініціалізація потоків сипких матеріалів;
- EDEM Simulator – моделювання взаємодій між окремими об'єктами;
- EDEM Analyst – аналіз даних та візуалізація результатів, отриманих за допомогою EDEM Simulator.

*EDEM* використовується для змішування порошків і дозволяє:

- зрозуміти механіки змішування шляхом аналізу конвективних потоків та зон дифузії;
- визначити мертві зони та зони поганого змішування;



- прогнозувати швидкість змішування;

- визначити масштабні коефіцієнти.

Основні можливості *EDEM*:

- Зручна специфікація матеріалів, взаємодій, коефіцієнтів;
- Призначений для користувача вибір одиниць вимірювання;
- Експорт матеріалів і компонентів в керовану БД;
- Генерація крупинок сипких речовин різної форми;
- Імпорт частинок з шаблонів CAD і відсканованих документів;
- Накладення поверхонь, що містять безліч опуклих геометричних примітивів;
- Потужна система автоматизованого розрахунку параметрів частинок, в тому числі моменту інерції і маси;
- Швидке моделювання різних геометричних тіл, в тому числі кубів, багатокутників і циліндрів;
- Створення часток за допомогою інструменту Particle Factory;
- Об'єднання частинок у випадкову або ґратчасту структуру;
- Проста специфікація ряду таких режимів, як лінійна і кутова швидкість, розмір і напрямок. Опції включають лінійне, нормальне і логарифмічно нормальний розподіл ймовірностей;
- Призначення лінійного або синусоїдального переміщення або обертання для кожної окремої деталі.

#### **4. Моделювання процесу змішування сипких субстанцій**

Для дослідження характеристик середньої швидкості руху тіл, що змішуються, і їх числа зіткнень представляється можливим використання різного розрахункового програмного забезпечення, зокрема DEM-системи, в якій можна реалізувати процес руху змішуємих тіл, і побудувати електронно-цифрову модель CAE-системі і провести ряд чисельних експериментів. EDEM є провідним на ринку програмним забезпеченням для дискретних елементів (DEM) для моделювання сипучих матеріалів і їх взаємодію один з одним та обладнанням.

Порошки – один з найпоширеніших промислових сировинних ресурсів у фармацевтичній, харчовій, хімічній, та інших технологічних галузях. Типова переробка порошку включає кілька етапів, таких як зберігання, транспортування, змішування, агломерація, сушіння, ущільнення тощо.

Порошкові матеріали становлять суттєві проблеми в процесі промислового виробництва через їх складну поведінку та їхні змінні фізичні властивості, які дуже чутливі до відносно невеликих змін в робочих умовах, таких як вологість навколишнього середовища та температура.

Загальні операційні проблеми включають деформацію бункера, погану агломерацію, сегрегацію та мертві зони під час перемішування, неоднорідне ущільнення тощо.

Розуміння впливу експлуатаційних умов та властивостей порошку на продуктивність процесу необхідне для досягнення високого ступеня надійності та ефективності в промислових операціях.

##### **4.1 Математичні моделі руху сипкого матеріалу в обертових барабанних апаратах**

Сипкий матеріал займає по своїх властивостях проміжне місце між твердим тілом і рідиною. Сипкий матеріал не має постійної щільності. Щільність залежить від того, як розташовані частинки одна відносно іншої, які їхні розміри і які сили взаємодії між ними. Властивості сипкого матеріалу

змінюються в залежності від ущільнюючого навантаження, вологості, від того, як довго частинки перебували в спокої.

Один з очевидних прийомів моделювання сипкого є розгляд силової взаємодії безлічі частинок і застосування при дослідженнях статистичних методів. Однак в силу складності подібного моделювання розрахунки базуються на феноменологічній моделі, де сипке середовище розглядається як турбулентний рух в рідинному середовищі.

В моделі повинен бути опис основних чинників, що впливають на виробничий процес для забезпечення отримання максимально точного визначення значень параметрів апарату та отримати інформацію про способи пришвидшення виробництва (геометричні характеристики, граничні умови, фізичні властивості середовищ, турбулентність) і можливість рішення рівнянь. Математичні моделі дуже швидко вдосконалюються та надають все більше інформації щодо шляху збільшення розмірності моделі (разом з методами чисельного рішення), та щодо більш точного опису фізичних процесів, що протікають. Реалізація математичної моделі ускладнюється рішенням і моделюванням для задачі.

На підставі середніх арифметичних значень величин виконане детерміноване описання руху частинок у турбулентному закрученому потоці [13]. Це означає, що в суцільній фазі пульсаційні поля швидкості не взаємодіють. Цей метод призначений для застосування для матеріалу, частинки якого перевищує або близький до турбулентності за масштабом. Крім того, даний метод простий у реалізації та має досить високу точність, що важливо при інтегруванні та обчисленні рівнянь для пульсаційного руху матеріалу. Метод є універсальним через те, що апроксимація емпіричним шляхом не потрібна для значень, що використовуються в стохастичних і дифузійних моделях типу коефіцієнта інтенсивності для випадкових впливів або коефіцієнта турбулентної дифузії.

Популярним є метод обчислення з використанням числа Рейнольдса та усереднених рівнянь Нав'є – Стокса турбулентних течій. Оскільки рівняння є

нелінійними, то рівняння з використанням числа Рейнольдса є незамкнутими. Тому необхідне використання рівнянь турбулентності для їх замикання. Моделювання на основі рівнянь Рейнольдса проходить з використанням всього спектру різномасштабних структур. При цьому властивості великомасштабних структур змінюються в залежності від властивостей обраних для розгляду течій. Іншими словами, одержані математичні моделі, в яких використовують моделі турбулентності та напівемпіричні рівняння не можуть описувати різні типи турбулентних течій, а це означає що математичні моделі не є універсальними.

Розвиток ЕОМ, чисельних алгоритмів, моделей турбулентності визначили появу робіт, у яких розрахунок гідродинаміки ведеться на основі чисельного рішення рівнянь гідромеханіки [15].

При використанні системи рівнянь Нав'є – Стокса рух рідини розглядається в площині, перпендикулярній до осі апарата, де має місце тільки тангенціальна і радіальна складові швидкості. Отже осьова швидкість приймаються рівними нулю як і похідні по осьовій координаті. Також передбачається, що сталий рух рідини. Автором також робиться допущення, виходячи з умови нерозривності розподілу радіальної швидкості, що  $v_r = \text{const}$ .

## 4.2 ПОНЯТТЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ

В сучасних галузях промисловості широко поширене виробництво сумішей сипучих порошкоподібних матеріалів, наприклад, в хімічній, фармацевтичній, харчовій, машинобудівній та інших галузях. Процес змішування відноситься до механічних процесів хімічної технології, швидкість яких визначається законами фізики твердих тіл [1].

Метою процесу змішування є отримання максимально однорідної суміші двох або більше компонентів. Однак отримання сумішей сипучих матеріалів з високою однорідністю розподілу компонентів є технологічно дуже складним завданням. У роботі [2] виділені основні проблеми, що виникають при змішуванні, серед яких виділена проблема сегрегації компонентів при

змішуванні, яка призводить до розшарування компонентів і не дозволяє отримати повністю однорідну суміш в принципі. Відомо досить велике число досліджень з виявлення механізмів сегрегації, але її вплив на кінетику змішування вивчено набагато менше.

Однак від однорідності одержуваних сумішей безпосередньо залежать споживчі властивості вироблених з них виробів. Наприклад, нерівномірний розподіл інгредієнтів в лікарських таблетках в кращому випадку веде до зниження лікувального ефекту, а нерівномірний розподіл компонентів будівельної суміші знижує міцність виготовленого з неї виробу.

Змішування умовно складається з трьох елементарних процесів [3]:

- конвективне змішування - це переміщення групи суміжних частинок з одного об'єму місця суміші в інше;
- дифузійне змішування - це поступове переміщення частинок різних компонентів через новоутворені межі їх розділу;
- змішування зсувом - при якому суміжні шари частинок рухаються відносно один одного.

Дифузійне змішування відбувається в значній мірі в барабанних і вібраційних змішувачах. У першому випадку при наявності поверхні розділу частка може переміщатися в будь-якому напрямку при зіткненні з іншою. У другому випадку маса набуває властивостей псевдорідини, і в шарі створюються умови для вільного переміщення частинок.

Конвективне змішування відбувається в горизонтальних лопатевих і вертикальних шнекових змішувачах [2, 3]. Швидкість змішування залежить від частоти обертання ротора і інтенсивності обміну часток.

Механізм змішування зсувом характерний для протиточних стрічкових змішувачів, що мають зовнішню і внутрішню спіралі і переміщують продукт в протилежних напрямках.

У змішувачах в процесі сумішоутворення одночасно беруть участь всі три механізми змішування в більшій чи меншій мірі. Внаслідок розбіжності фізико-

механічних властивостей компонентів змішування сипучих компонентів супроводжується протилежним процесом - сегрегацією готової суміші [2, 3].

Сегрегація – це зосередження частинок, що мають близькі розміри, форму і масу в різних місцях змішувача під дією сил тяжіння (гравітаційних сил).

Закінчення процесу змішування слід встановлювати в той момент, коли явище сегрегації ще не почало помітно проявлятися.

У загальному випадку процес змішування є зміна концентрації будь-якого компонента у часі в робочій камері змішувача (рис. 1).

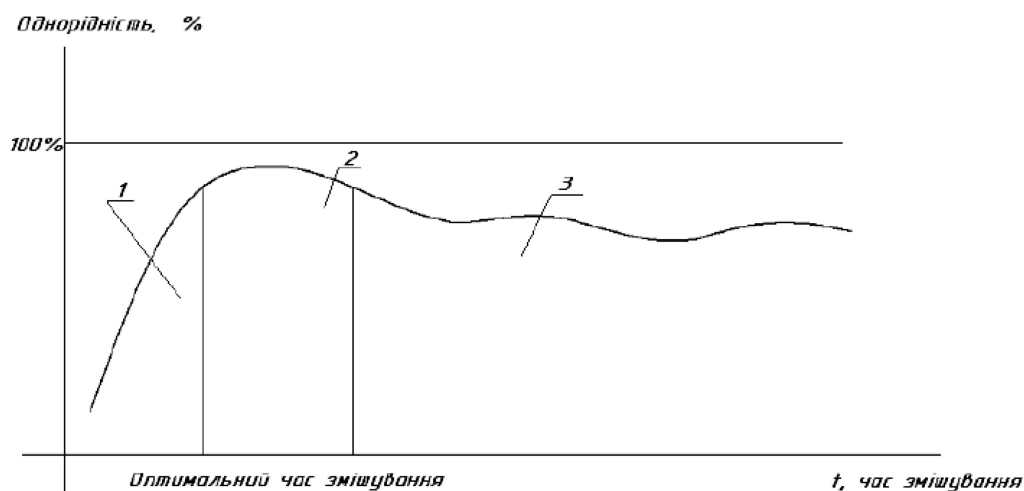


Рисунок 1 – Крива змішування. 1 – конвективне змішування; 2 – дифузійне змішування; 3 - сегрегація

Для змішувачів періодичної дії в загальному вигляді можна показати наявність трьох основних зон на кривій, що характеризує процес, званої кривої змішування [3].

Якщо розділити за часом змішування на три інтервали, то в першому переважає конвективне змішування, у другому – дифузійне, в третьому – сегрегація. Причому може наступити такий стан, при якому де- який час сегрегація переважатиме, і суміш частково знову розсиплеться. При продовженні процесу знову можуть переважити явища змішування.

Перші два процеси сприяють рівномірному розподілу часток в суміші, останній перешкоджає цьому. Тому доцільно закінчення процесу встановлювати в той момент, коли явище сегрегації ще не почало помітно проявлятися, тобто необхідно закінчувати процес в кінці другого інтервалу змішування.

### 4.3 Послідовність роботи у EDEM

Моделювання DEM починається з задання всім частинкам конкретного положення і початкової швидкості. Потім сили, що впливають на кожну частинку, розраховуються, виходячи з початкових даних і відповідних фізичних законів.

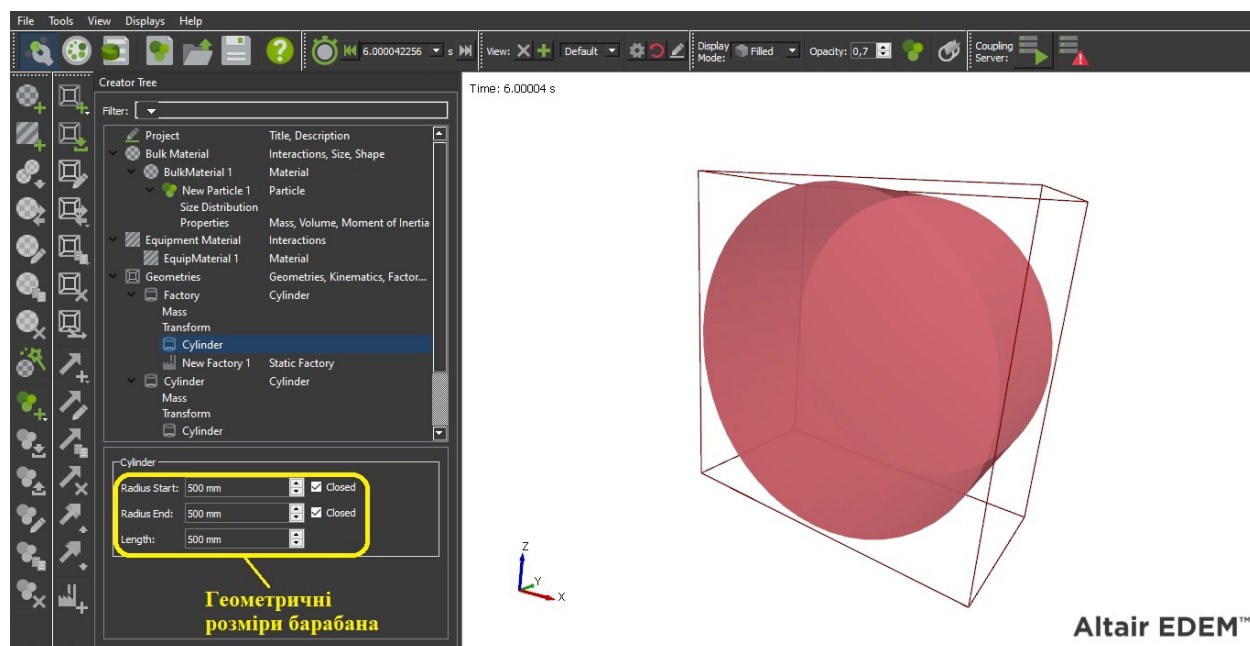
Наступні сили можуть мати вплив у макроскопічних моделях:

- тертя, коли дві частинки торкаються один одного;
- відскакування, коли дві частинки стикаються;
- гравітація (сила тяжіння між частками через їх маси), яка має відношення тільки при астрономічному моделюванні.

На молекулярному рівні, ми можемо розглядати

- Силу Кулона, електростатичне тяжіння або відштовхування частинок, що несуть електричний заряд;
- Відштовхування Паулі, коли два атоми розташовані поблизу один від одного;
- Силу Ван дер Ваальса.

Всі ці сили складаються, щоб знайти результуючу силу, що впливає на кожну частинку.



Щоб розрахувати зміну в положенні і швидкості кожної частки протягом

певного часового кроку згідно законів Ньютона, використовується метод інтеграції. Після цього нове положення використовується для розрахунку сил протягом наступного кроку, і цей цикл програми повторюється доти, поки моделювання не закінчиться.

Типові методи інтеграції використовувані в методі дискретного елемента:

- алгоритм Верлета,
- швидкість Верлета,
- метод стрибка.

Коли до уваги приймаються далекодіючі сили (гравітація, сила Кулона), взаємодії кожної пари частинок необхідно розраховувати. Число взаємодій, а отже, ресурсомісткість розрахунку, зростає зі збільшенням кількості часток квадратично, що не прийнятне для моделей з великим числом частинок. Можливий шлях вирішити цю проблему - об'єднати деякі частинки, які розташовані на відстані від даної частинки, в одну псевдочастинку. Розглянемо, наприклад, взаємодію між зіркою і віддаленою галактикою: помилка, що виникає через об'єднання маси всіх зірок у віддаленій галактиці в одну точку, незначна. Для того, щоб визначити, які частки можуть бути об'єднані в одну псевдочастинку, використовуються так звані деревні алгоритми. Ці алгоритми розподіляють всі частинки у вигляді дерева, квадрандера у разі двомірної моделі і октадера у разі тривимірної моделі.

Моделі в молекулярній динаміці ділять простір, в якому відбувається процес, що моделюється, на клітинки. Частинки, що йдуть через одну сторону осередку просто вставляються з іншого боку (періодичні граничні умови); так само відбувається і з силами. Сили перестають прийматися в розрахунок після так званої дистанції відсікання (зазвичай половина довжини осередку), так що на частинку не впливає дзеркальне розташування тієї ж частинки на іншій стороні клітинки. Таким чином, можна збільшувати кількість частинок простим копіюванням осередків.

#### **4.4 Моделювання процесу змішування у EDEM**

Для розрахунку процесу змішування завдаємо параметри дискретного матеріалу. Для цього у дереві проекту створюємо новий матеріал з характеристиками представленими на рисунку. Під час розрахунку буде використовуватися два діаметри матеріалу 1,0 мм та 0,5 мм. Далі приведено послідовність вводу показників і розрахунок властивостей частинок для діаметра 1,0 мм (рис. 3).

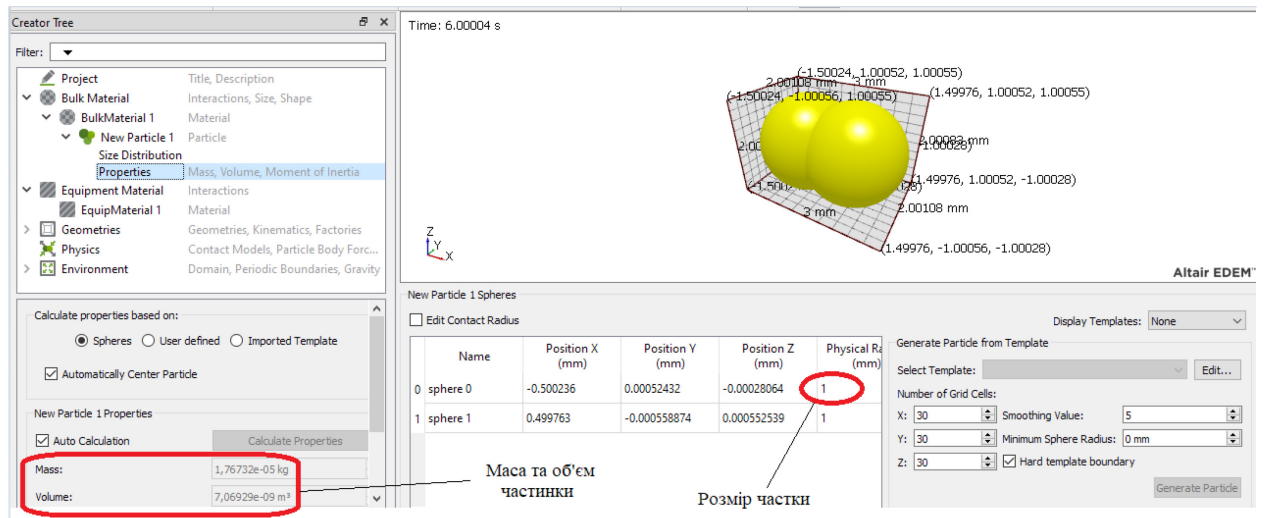
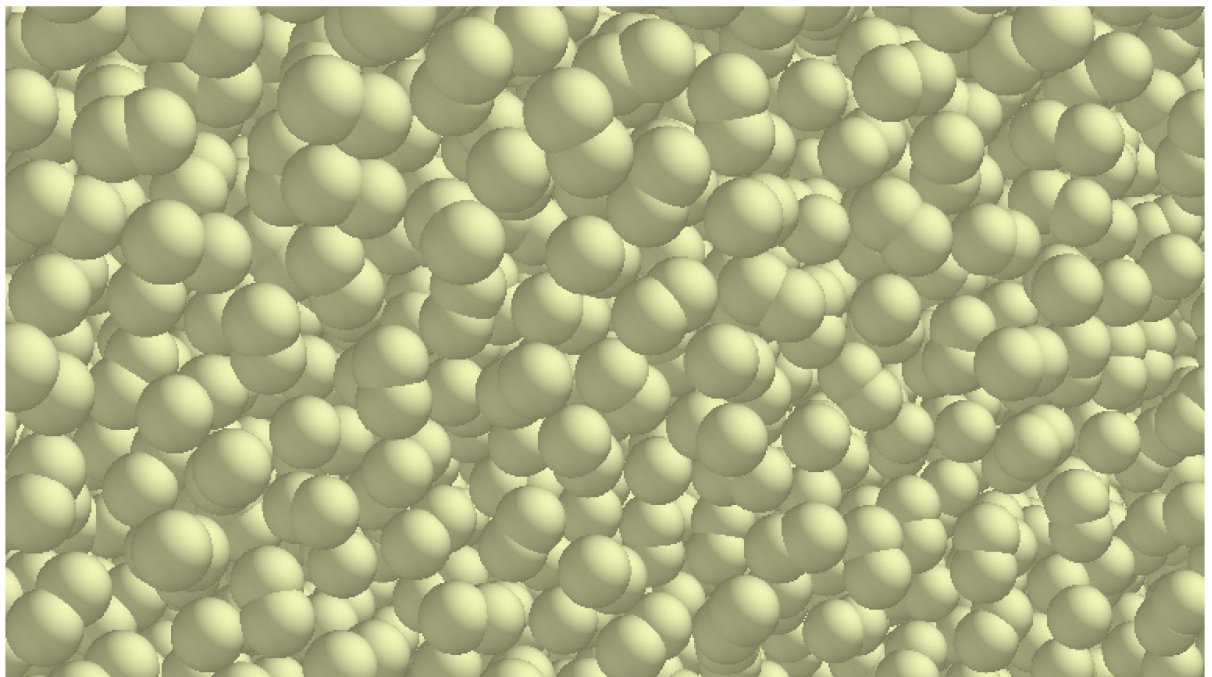
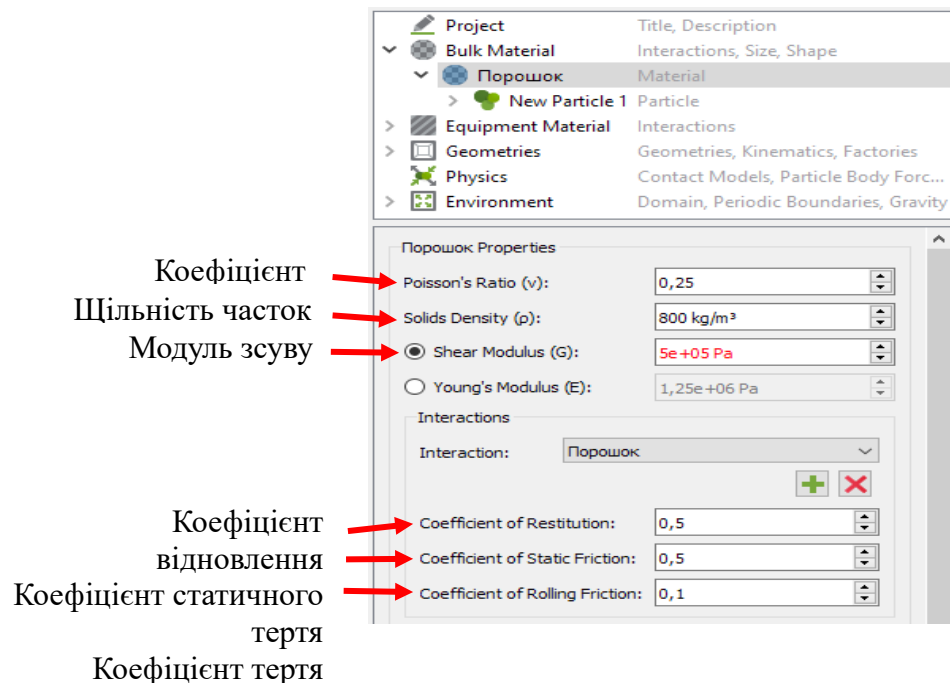


Рис. 3 завдання діаметру 1,0 мм для частинки матеріалу (edem)

При розрахунку властивостей частинок матеріалу з діаметром 1,0 мм в програмі EDEM задаємо наступні параметри: у вікні «Calculate properties based on:» обираємо «Spheres» та «Automatically Center Particle», далі в полі «New Particle 1 Properties» обираємо «Auto Calculation».

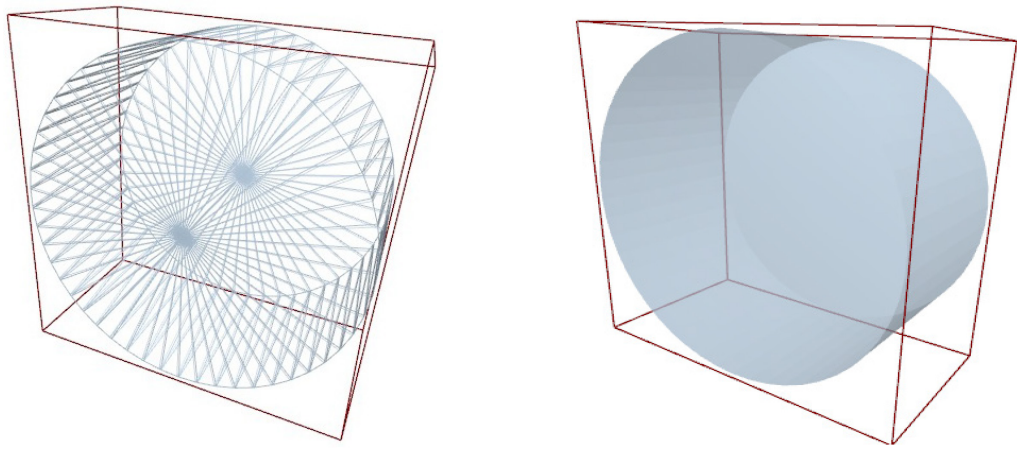


Задаємо об'ємні властивості матеріалу. У вікні «Material 1 Properties» для частинок діаметром 1,0 мм задаємо наступні значення: *Poisson`s Ratio* ( $\nu$ ): 0,2; *Solids Density* ( $\rho$ ): 800 kg/m<sup>3</sup>; *Shear Modulus* ( $G$ ): 2e+07 Pa; *Coefficient of Restitution*: 0,2; *Coefficient of Static Friction*: 0,5; *Coefficient of Rolling Friction*: 0,01. Для частинок діаметром 0,5 мм виконується аналогічна послідовність операцій.



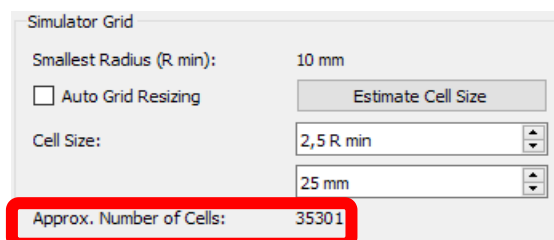
Далі задаємо характеристики матеріалу обладнання, в якому буде відбуватися процес. У вікні «EquipMaterial 1 Properties» задаємо наступні значення: *Poisson`s Ratio* ( $\nu$ ): 0,3; *Solids Density* ( $\rho$ ): 7800 kg/m<sup>3</sup>; *Shear Modulus* ( $G$ ): 7e+08 Pa; *Coefficient of Restitution*: 0,5; *Coefficient of Static Friction*: 0,5; *Coefficient of Rolling Friction*: 0,01.

За допомоги імпорту додаємо геометричну модель барабанного змішувача [5-6]. Для цього в дереві моделі необхідно обрати геометрія (geometry) натиснути ПКМ та вибрати імпорт геометрії (import geometry). Після задаємо кінематику (add kinematic) та обираємо для кожного валу лінійне обертання (linear rotation) з необхідними параметрами - вікні «specification» задаємо start time: 2 s; *initial velocity*: 65 rpm; у полі «axis of rotation» на вісі x (end): задаємо 4500 mm; у полі «point of action» на вісі z: задаємо 475 mm.

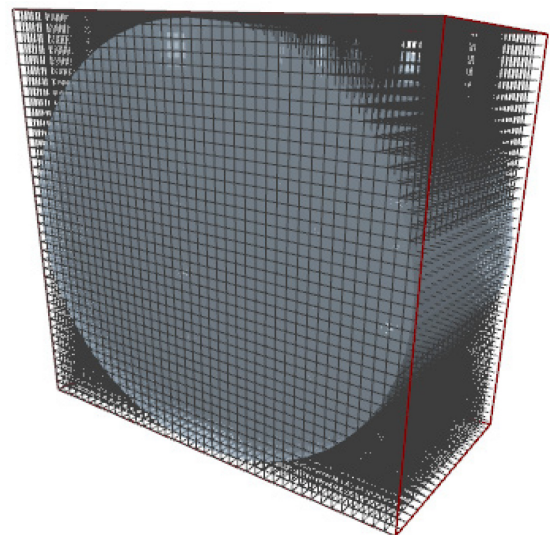


Після вибору усіх параметрів наступним кроком є додавання факторів (add factory) для кожного матеріалу, де у вікні «particle generation» вказується кількість матеріалу (total number: 1000; target number (per second): 3000); вибір часу (start time:  $1e - 6$  s); початкова швидкість матеріалу (у полі parameters/material velocity: fixed) та інші параметри.

По закінченні створення моделі симуляції необхідно перейти у розділ симулятор (simulator) та задати параметри, які необхідні безпосередньо для розрахунку (у вікні «simulator settings» потрібно обрати time integration: euler; fixed time step: 20%; total time: 6 s; target save interval: 0,01 s; cell size: 2,5 r min; number of cpu cores: 12). Далі натискаємо запуск симуляції (start simulating).

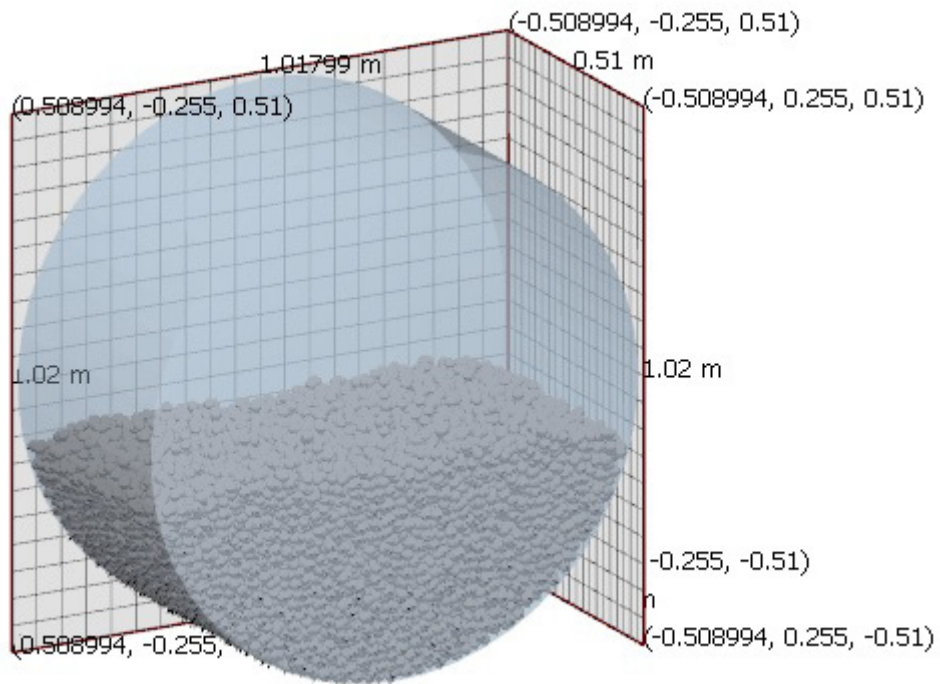


Приблизна кількість вузлів сітки

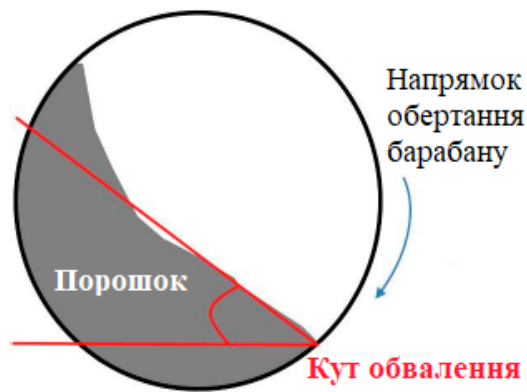


По завершенню симуляції нам буде, про це повідомлено у повідомленні симуляція завершена (simulated complete). Після цього переходимо у розділ аналізування «analyst» та будуємо графіки по отриманим даним.

Протягом 6 с було проведено симуляцію, цього вистачило, аби побачити місця, які потребують у подальшому вдосконалення конструкції.



### Кут підйому(обвалення) шару часток при обертанні у циліндричному барабані



$$\alpha = \varphi + \arcsin \frac{\omega^2 r \sin \varphi}{g},$$

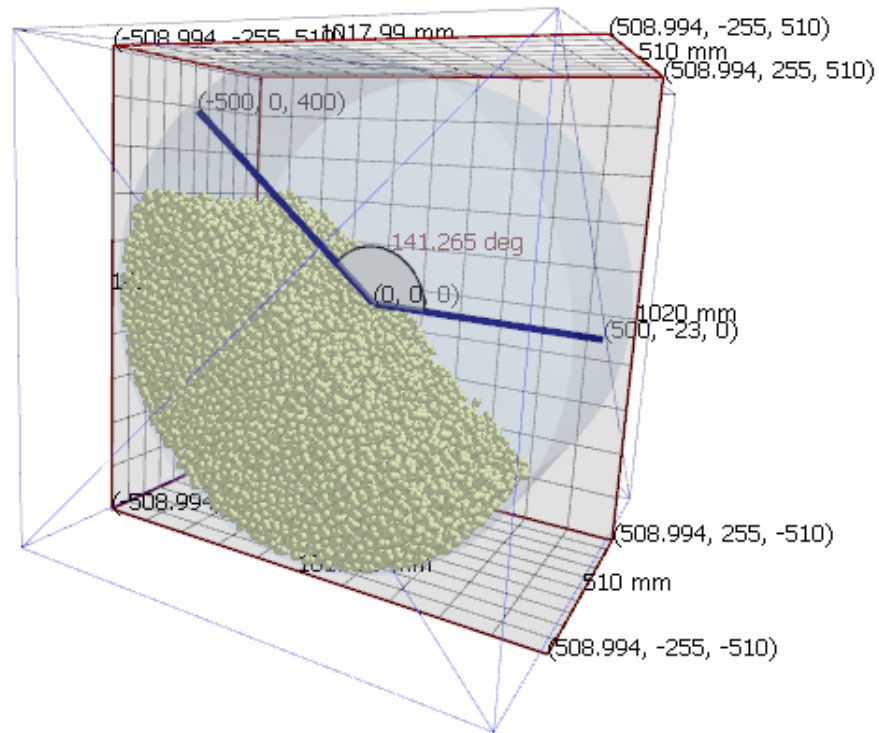
де  $\alpha$  – граничний кут підйому шару часток у барабані,

$\varphi$  – кут скочування часток,

$r$  – радіус барабана,

$\omega$  – кутова швидкість обертання барабана,

$g$  – прискорення вільного падіння



Згідно розрахунків програмного комплексу, граничний кут обвалення шару часток у барабані що обертається буде дорівнювати:

$$\alpha = 180^\circ - 141,265^\circ = 38^\circ 44' 10''.$$

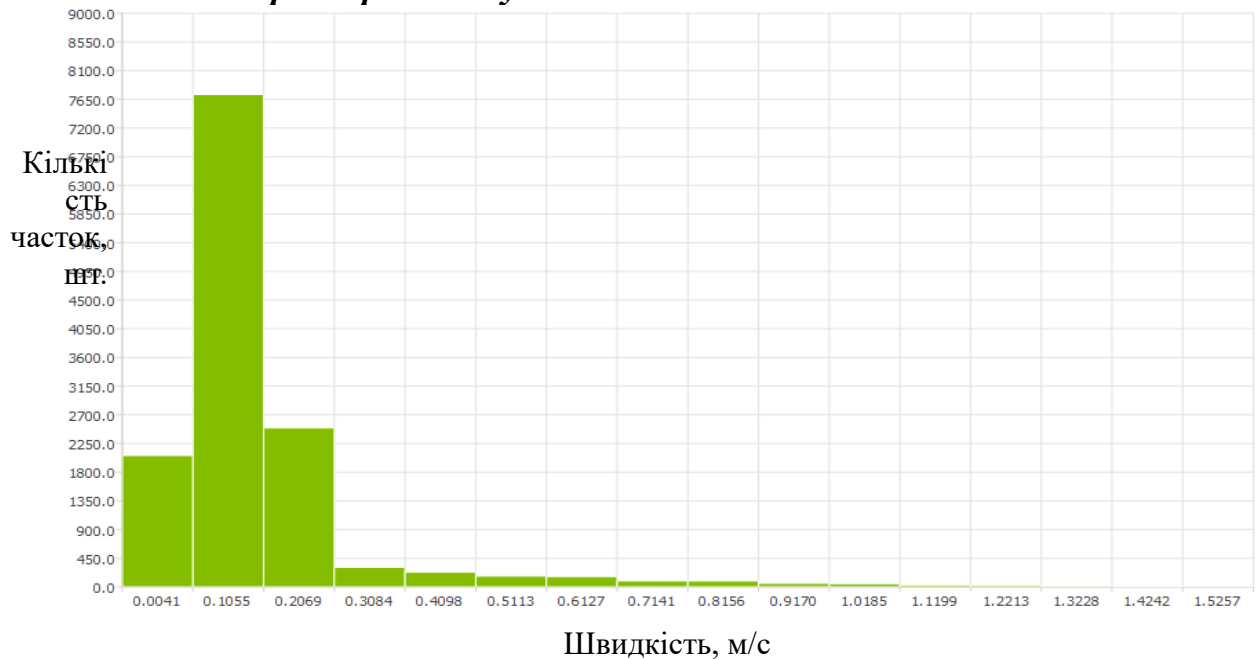
#### 4.5 Результати динамічних характеристик руху часток у барабані

У даній праці проводилося 3 розрахунки: 1) 3 лопаті під кутом  $45^\circ$ ; 2) 3 лопаті під кутом  $90^\circ$ ; 3) 2 лопаті під кутом  $45^\circ$ . На рисунку 4 представлено рух часток матеріалу у змішувачі з 2 лопатями під кутом  $45^\circ$  як найбільш показовий.

На рисунках представлені графіки, на яких зображені залежності гранул від швидкості, кількості та інше, при зміні кутів лопатів та їх кількості. Такі результати дають змогу усвідомити, що кут та кількість лопатів у двовальному змішувачі грає велику роль, так як вони виконують одразу дві ролі – перемішування матеріалу та його переміщення уздовж корпусу до вивантажувальної воронки. Також необхідно враховувати швидкість обертання валів та час перемішування, аби уникнути сегрегації і отримати якісну суміш. Представлені результати графіків для змішувача з 2 лопатями під кутом  $45^\circ$  як найбільш показового.

Серед безлічі характеристик, що розглядаються серед вихідним даних в модулі analyst edem для оцінювання ефективності процесу змішування в барабанному змішувачі були вивчені: середня швидкість переміщення частинок; кількість зіткнень між ними.

***Гістограма розподілу кількості часточок за швидкістю***



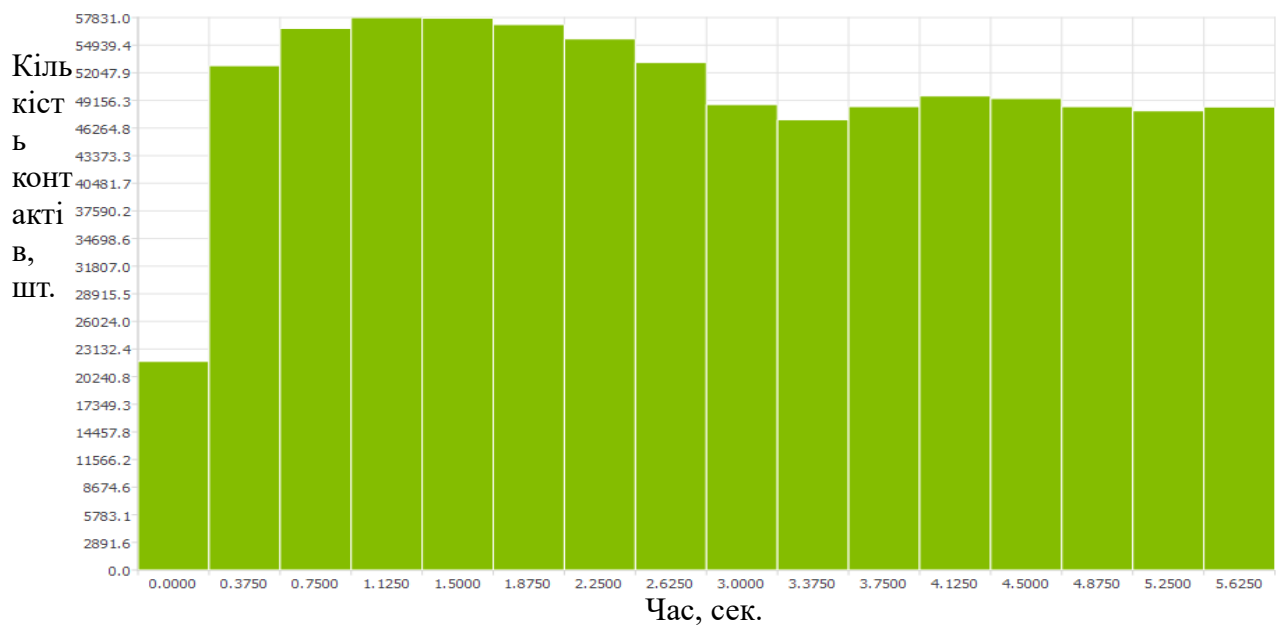
На графіку (рис. 5) показано, що найбільша кількість часток має швидкість 0,0041...0,4098 м/с.

***Гістограма розподілу дистанції пройденої частками***

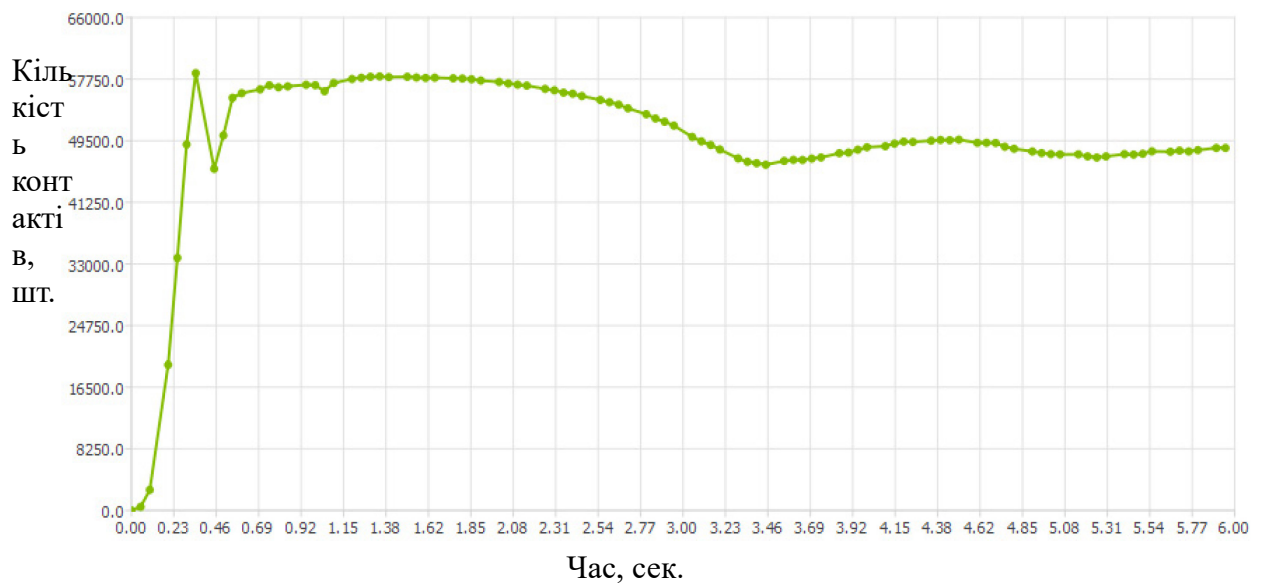


Гістограма вказує на дистанцію яку у середньому проходить певна кількість часток.

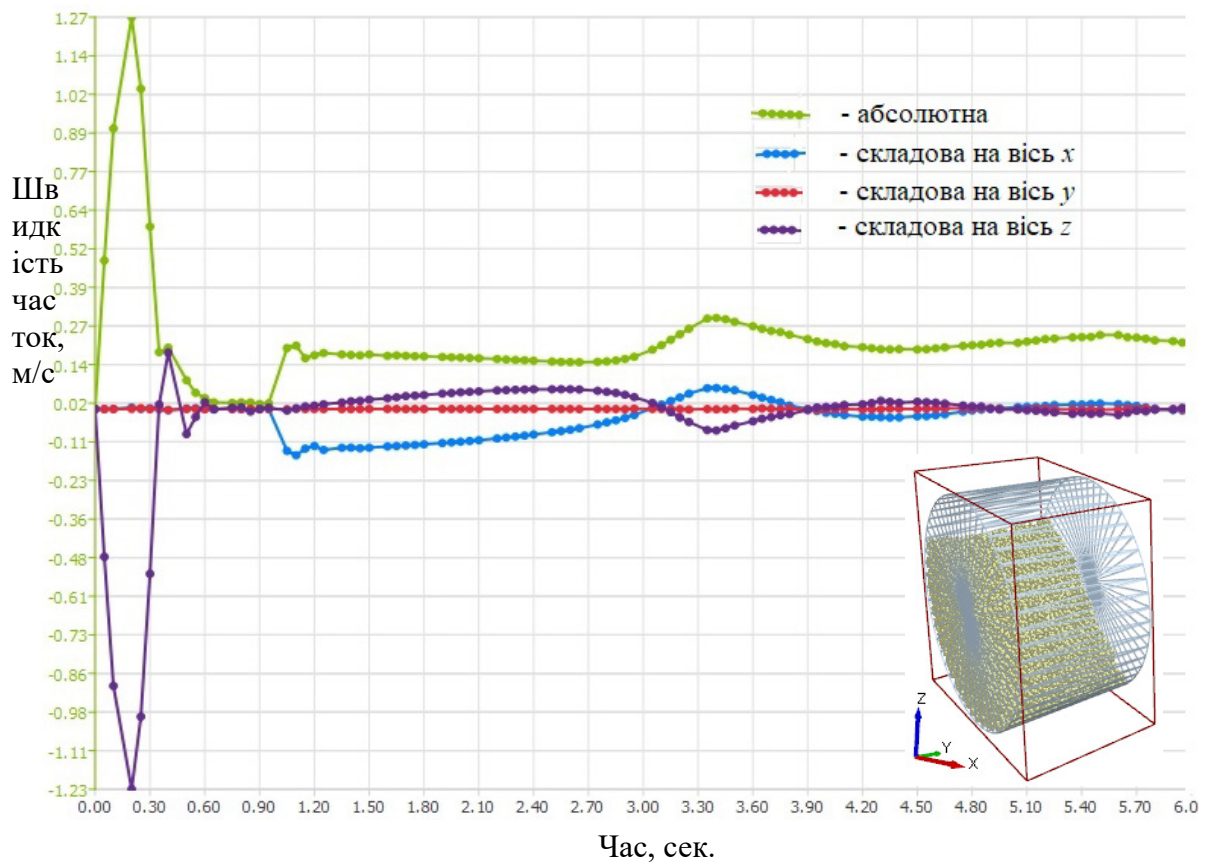
***Гістограма кількості контактів між частками на певному етапі змішування***



Відповідно на наступному графіку зображена так само кількість контактів між частками на певному часовому проміжку обертання барабана.



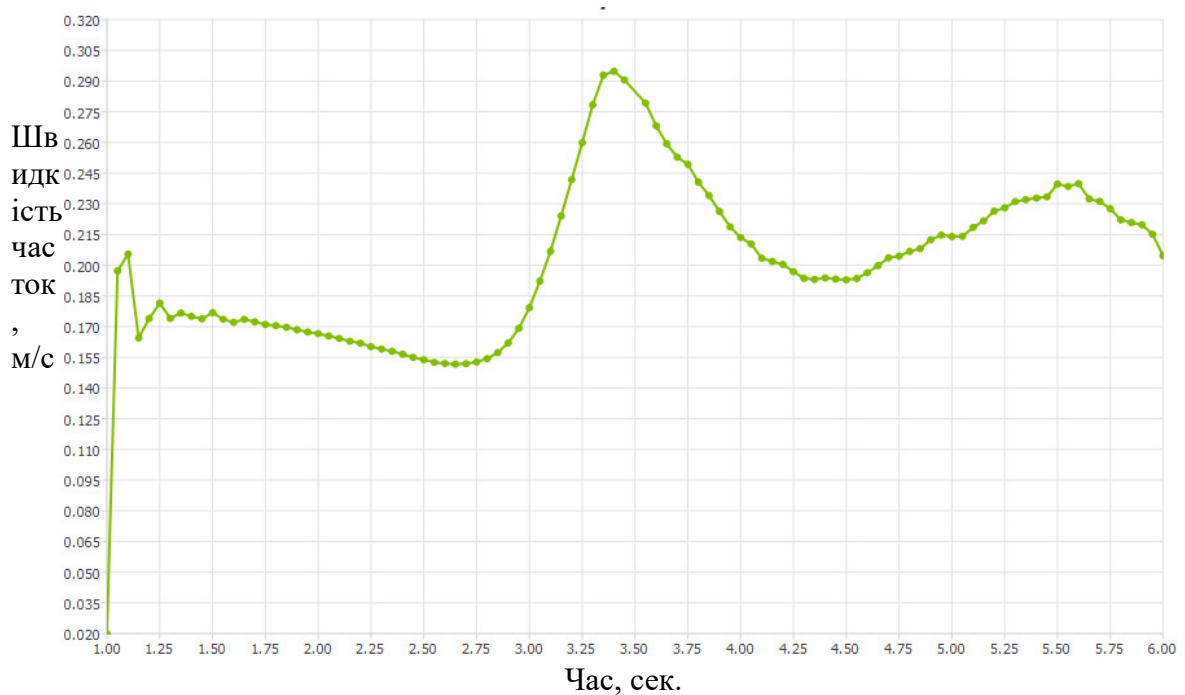
Наступна частина результатів розкриває розподілення швидкості часток у середині барабана у вигляді проєкцій на вісі  $x$ ,  $y$  та  $z$  та у вигляді результуючої абсолютної швидкості.



Максимальну зміну швидкості на протязі першої секунди ми не приймаємо до уваги, тому що це швидкість завантаження часток у середину барабану.

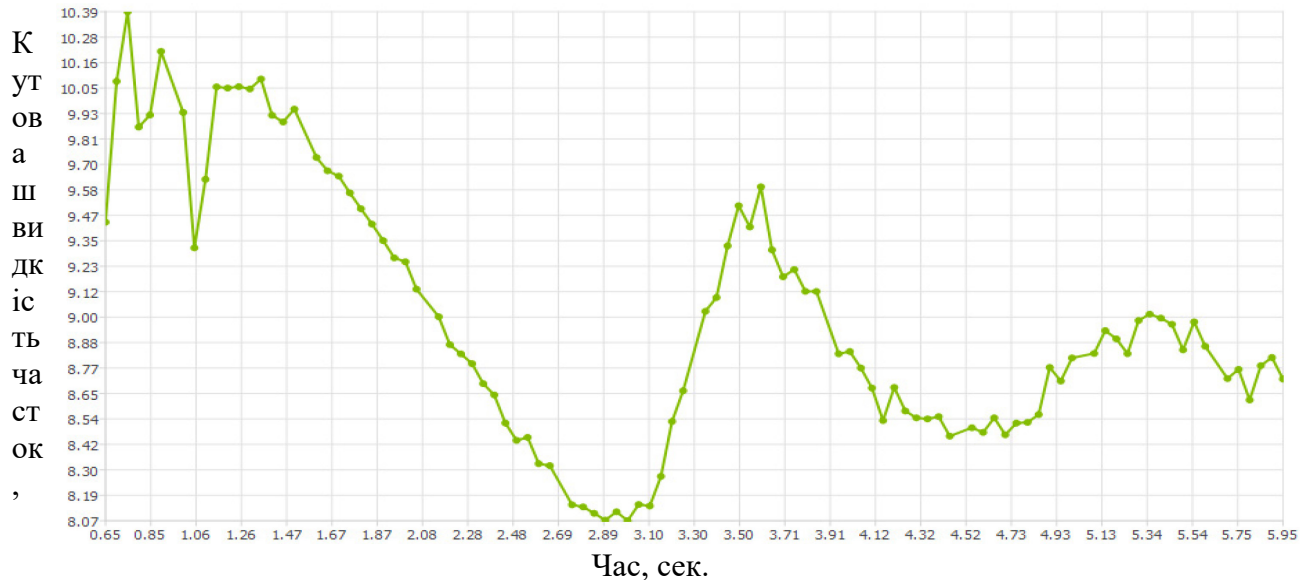
І далі наводимо абсолютну швидкість часток, як результуючу складових на вісі координат без урахування першої секунди завантаження.

***Абсолютна швидкість часток у середині барабана що обертається***



Робимо висновок що максимальна швидкість якої досягають частки у середині барабана становить біля 0,3 м/с, мінімальне значення 0,15 м/с. Середнє значення буде коливатись біля значення 0,21 м/с.

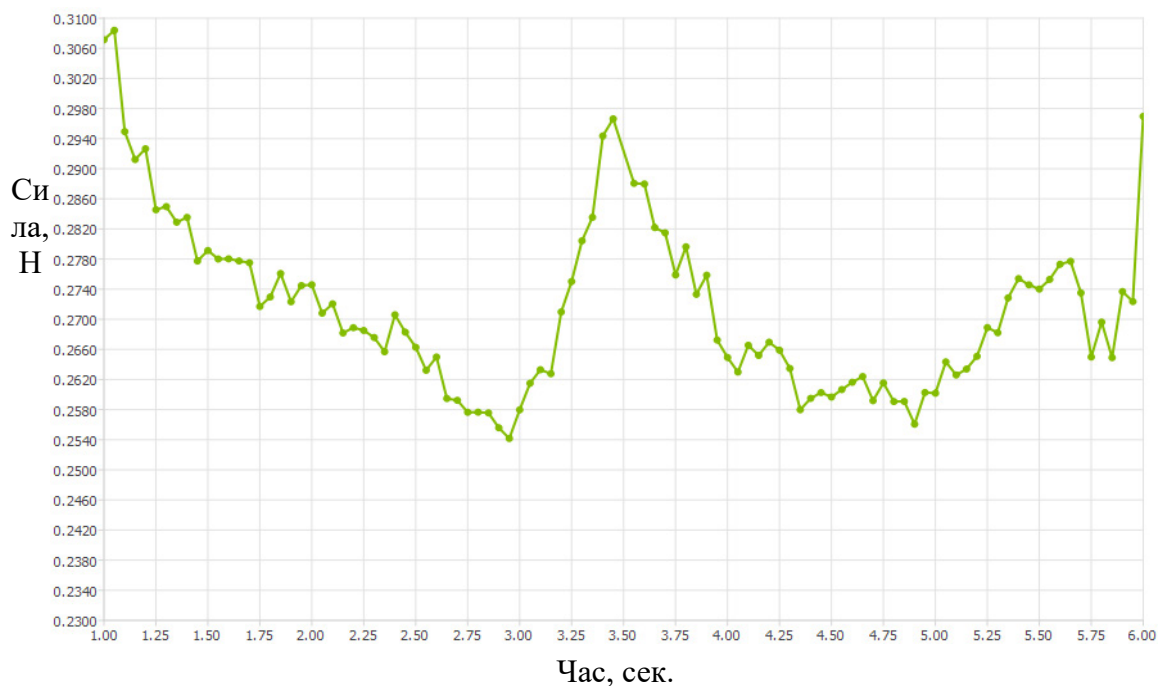
### ***Кутова швидкість часток у середині барабана що обертається***



Наступний графік описує зміну кутової швидкості часток, це значення коливається у межах 8...10 рад/с.

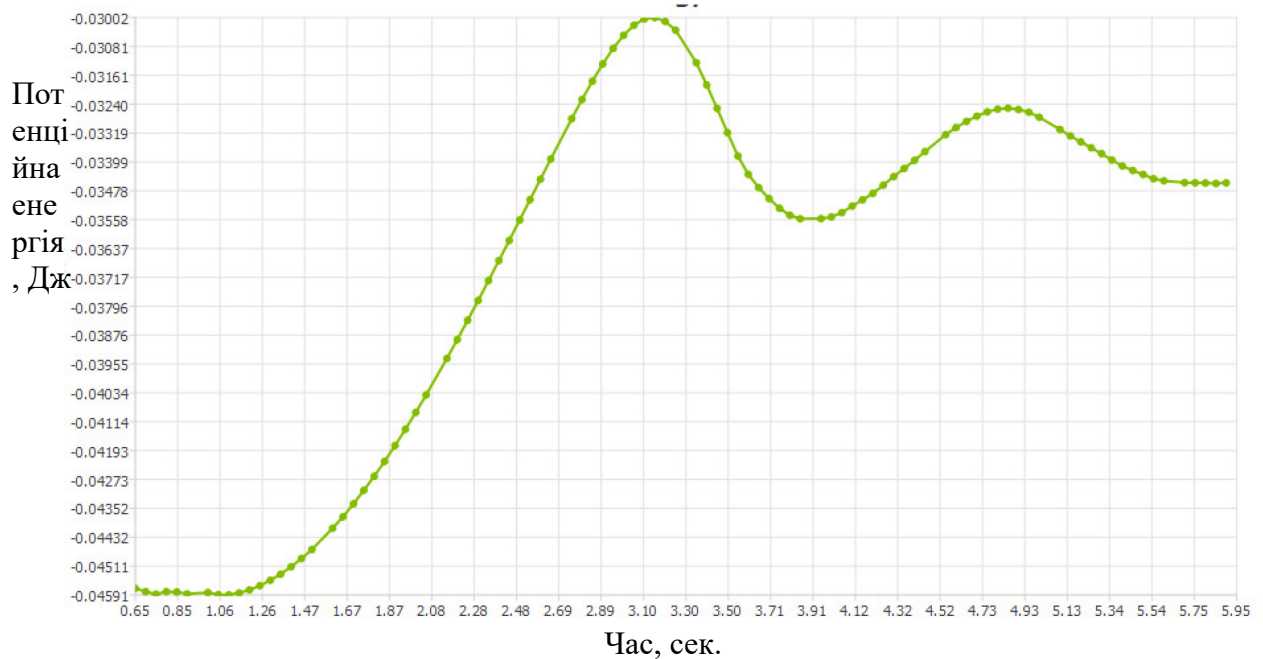
Далі наведені результати динамічних характеристик системи барабан-частки, необхідні для розрахунків проектуємої конструкції.

### ***Сила що діє на частки у середині барабана що обертається***



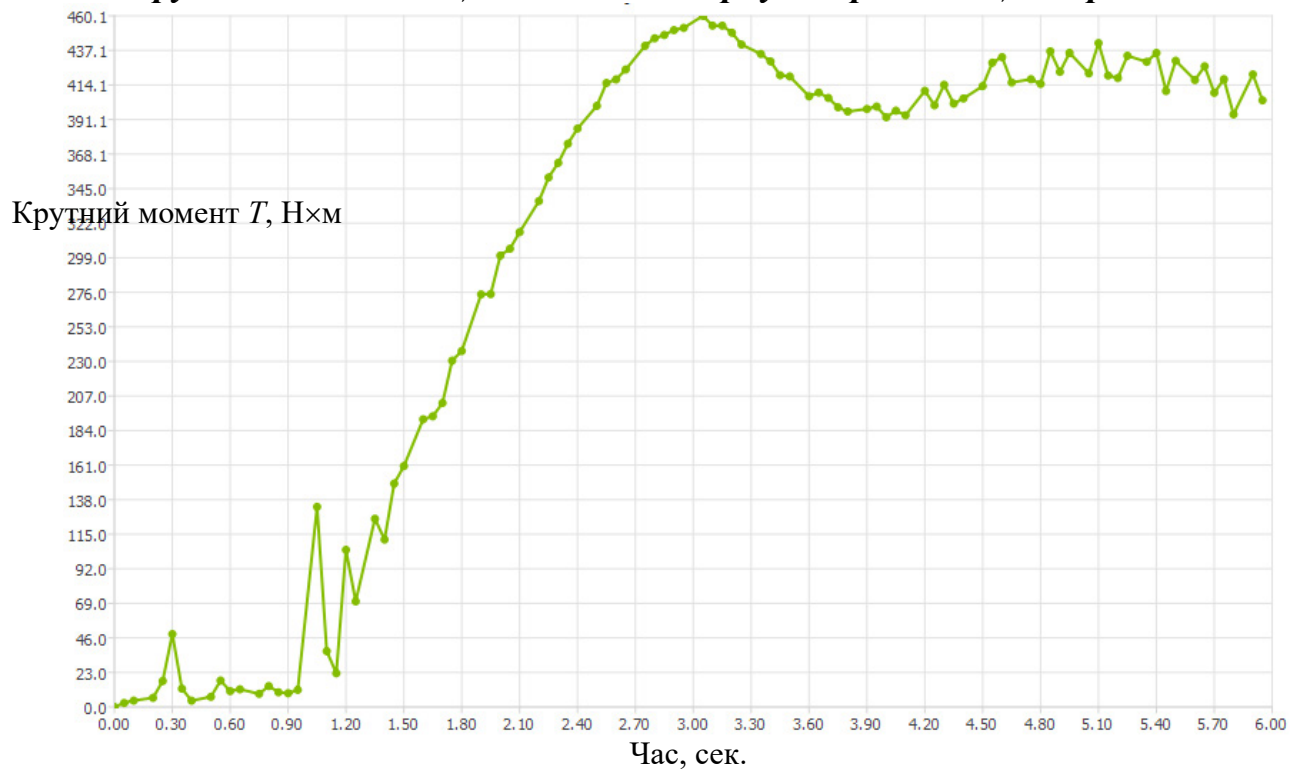
Першими наведемо данні що описують вплив на частку динамічних характеристик, а саме силовий вплив та зміну потенційної енергії частки.

### *Зміна потенційної енергії частки у середині барабана що обертається*



Для визначення потужності приводу, що буде приводити в рух барабанний змішувач, було визначено зміну крутного моменту у часі.

### *Крутний момент що виникає на корпусі барабана що обертається*



Знаючи крутний момент, можемо визначити потужність приводу змішувача за формулою:

$$N = T \times \omega,$$

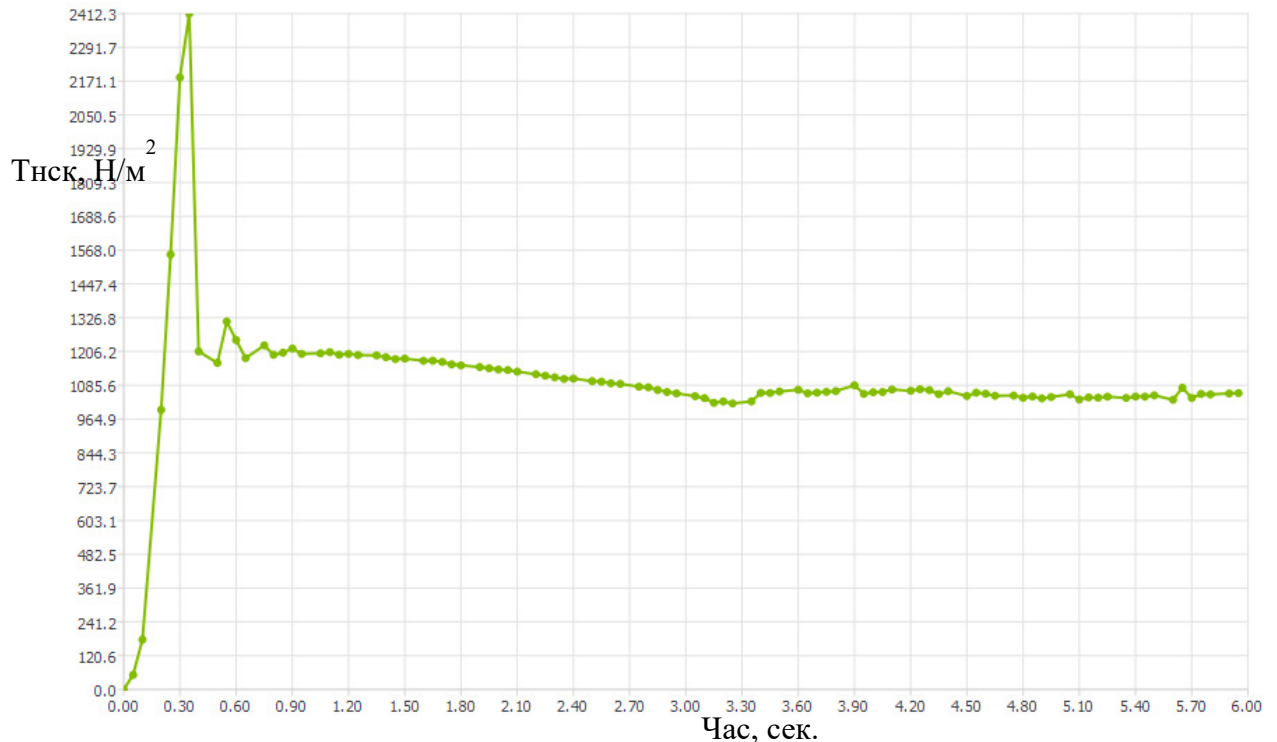
де  $T$  – крутний момент на вісі барабана, Н×м;  $\omega$  – кутова швидкість обертання барабана, рад/с.

Знаючи максимальне значення крутного моменту на вісі барабана (460 Н×м), та межі його кутової швидкості обертання (2,1...5,2 рад/с), матимемо приблизні значення потужності приводу барабанного змішувача:

$$N = T \times \omega = 460 \times (2,1 \dots 5,2) = 966 \dots 2392 \text{ Вт.}$$

Наступна динамічна характеристика що необхідна для розрахунку конструкції барабана, а саме товщини його стінки, представлена на графіку зміни величини тиску що діє на його внутрішню поверхню.

### *Тиск на внутрішній поверхні барабана від часток під час його обертання*



Висновки. Виходячи з усього вищезазначеного, раціональним є використання змішувача з 2 лопатями, встановленими під кутом  $45^\circ$ , так як змішування матеріалу відбувається швидко та якісно, але існує застійна зона, її можливо позбутися змінивши конструкцію короба змішувача. Вона присутня через те що, лопаті не дістають до короба і через це майже не має контакту з матеріалом.

За допомогою САD-системи компас-3D розроблено фізичну 3D модель барабанного змішувача. В САЕ-комплексі EDEM проведено розрахунок потоків суміші та моделювання процесу змішування, що відбувається в машині.

Для підвищення ефективності барабанного змішувача запропоновано змінити конструкцію лопатей та їх кут встановлення. Розроблено розрахунковий та аналітичний аналіз ефективності перемішування трьох видів змішувачів. Дослідження показали, що змішувач з двома лопатями, під кутом  $45^\circ$  має найбільшу ефективність змішування, яка становить 91,7 %.

## 5. Розрахункова частина

Машини для змішування призначені для одержання однорідних сумішей, що складаються із двох або більше компонентів.

Змішувачі для сипких продуктів дають або безпосередньо готову продукцію, або напівфабрикат, що використовується в іншому технологічному процесі. Вони поділяються на обертові й транспортувальні.

До обертових змішувачів належать барабанні й конічні змішувачі різних типів, змішувачі з обертовими кубами. До транспортувальних змішувачів для сипких продуктів належать стрічкові, лопатеві й шнекові.

Змішування варто розглядати як процес створення рівномірного розподілу часток окремих компонентів у повному обсязі шляхом перегрупування їх під дією зовнішніх сил.

Основним якісним показником змішування є однорідність отриманої суміші. Однорідною вважається суміш, у якій вміст компонентів у будь-якому її обсязі не відрізняється від заданого вмісту для всієї суміші.

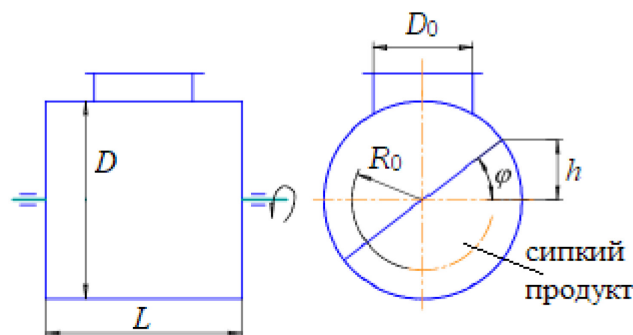


Рис. 5.1 Схема барабанного змішувача

Змішувальні барабани можуть мати циліндричну, циліндро-біконічну та біконічну форму (рис. 5.1). Вісь обертання барабана може бути як горизонтальна так і похила.

### 5.1 Визначення конструктивно-кінематичних параметрів

Обсяг суміші, яка одночасно знаходиться в барабані,  $m^3$

$$V_3 = (\Pi_{зм} \times t) / 3600 = (20 \times 120) / 3600 = 0,67$$

де  $\Pi$  – продуктивність змішувача,  $m^3/год$ ;  $t$  – час замішування суміші,  $t = 120$  сек.

Робочий об'єм суміші в барабані, м<sup>3</sup>

$$V_P = V_3 / K_B = 0,67 / 0,67 = 1$$

де  $K_B$  – коефіцієнт виходу суміші ( $K_B = 0,67$ )

Основні розміри барабана

Внутрішній діаметр (м):

$$D_0 = (0,78 \dots 0,83) \times V_P^{0,33} = 0,83 \times 1^{0,33} = 0,83$$

Товщина стінки барабана (м):

$$\delta = (0,015 \dots 0,020) \times D_0 = 0,020 \times 0,83 = 0,016$$

зовнішній діаметр (м):

$$D_H = D_0 + 2\delta = 0,83 + 2 \times 0,016 = 0,863$$

$$L_B = (2,5 \dots 2,6) \times D_0 = 2,6 \times 0,83 = 2,15$$

$$A = (1,75 \dots 1,78) \times D_0 = 1,78 \times 0,83 = 1,477$$

$$C = (0,12 \dots 0,13) \times D_0 = 0,13 \times 0,83 = 0,108$$

$$B = L_B - A - C = 2,15 - 1,477 - 0,108 = 0,565$$

Фактичний геометричний об'єм барабана, м<sup>3</sup>

$$V_\Gamma = (\pi/4) \times D_0^2 \times L_B = (3,14/4) \times 0,83^2 \times 2,15 = 1,163$$

Фактичний коефіцієнт заповнення:

$$\Psi_{\text{факт}} = V_P / V_\Gamma = 1/1,163 = 0,86$$

( $\Psi = 0,33 \dots 0,40$ )

При розходженні значень  $\Psi_{\text{факт}}$  и  $\Psi$  рекомендується змінити розміри барабана.

Змінюємо внутрішній діаметр барабана  $D_0$

$$D_0 = 1,13 \times V_P^{0,33} = 1,13 \times 1^{0,33} = 1,13 \text{ м}$$

Товщина стінки барабана (м):

$$\delta = (0,015 \dots 0,020) \times D_0 = 0,020 \times 1,13 = 0,0226$$

зовнішній діаметр (м):

$$D_H = D_0 + 2\delta = 1,13 + 2 \times 0,0226 = 1,175$$

$$L_B = (0,8 \dots 0,85) \times D_0 = 0,83 \times 1,13 = 0,938$$

$$A = (1,75 \dots 1,78) \times D_0 = 1,78 \times 1,13 = 2,01$$

$$C = (0,12 \dots 0,13) \times D_0 = 0,13 \times 1,13 = 0,147$$

$$B = L_B - A - C = 2,938 - 2,01 - 0,147 = 0,781$$

$$C' = (0,18 \dots 0,19) \times D_0 = 0,18 \times 1,13 = 0,203$$

$$A' = (1,75 \dots 1,78) \times D_0 = 1,78 \times 1,13 = 2,011$$

$$B' = L_B - A' - C' = 2,938 - 2,011 - 0,203 = 0,724$$

Фактичний геометричний об'єм барабана, м<sup>3</sup>

$$V_{\Gamma} = (\pi/4) \times D_0^2 \times L_B = (3,14/4) \times 1,13^2 \times 0,938 = 0,94$$

$$\Psi_{\text{факт}} = V_P / V_{\Gamma} = 1 / 2,94 = 0,34$$

Розміри опорного бандажа і опорних роликів (кожний розмір після його визначення округлюється до нормального лінійного значення), м:

Діаметр опорного ролика

$$d_p = (0,18 \dots 0,22) \times D_0 = 0,1822 \times 1,13 = 0,2 \text{ м}$$

Ширина опорного ролика

$$b_p = (0,32 \dots 0,36) \times d_p = 0,36 \times 0,2 = 0,072 \text{ м}$$

Діаметр вісі опорного ролика

$$d_0 = (0,20 \dots 0,25) \times d_p = 0,25 \times 0,2 = 0,05 \text{ м}$$

Кут установки опорних роликів

$$\beta = 32 \dots 36^\circ = 36^\circ$$

Товщина опорного бандажа

$$h_B = (0,024 \dots 0,026) \times D_0 = 0,026 \times 1,13 = 0,0294 \text{ м}$$

Величина зазору між бандажем і барабаном

$$\Delta = (0,005 \dots 0,01) = 0,01 \text{ м}$$

Ширина опорного бандажа

$$b_B = b_p + (0,04 \dots 0,05) = 0,089 + 0,05 = 0,139 \text{ м}$$

діаметр опорного бандажа

$$D_B = D_0 + 2 \times (\delta + \Delta + h_B) = 1,13 + 2 \times (0,0226 + 0,01 + 0,0294) = 1,254 \text{ м}$$

*Додаткові розміри вузлів і деталей*

Після визначення кожен розмір округлюється до нормального лінійного значення.

Діаметр зубчатого венця

$$D_{зв} = D_B + (0,005 \dots 0,015) = 1,254 + 0,015 = 1,269 \text{ (1,2) м}$$

Ширина зубчатого венця

$$b_{зв} = (0,085 \dots 0,095) \times D_{зв} = 1,269 \times 0,095 = 0,12 \text{ м}$$

## 5.2 Основні кінематичні параметри

Критична кутова швидкість ( $c^{-1}$ ) і частота обертання барабана ( $хв^{-1}$ )

$$\omega_{кр} = \sqrt{g \times (\sin \gamma_0 - f \times \cos \gamma_0)} / R_0$$

$$n_{кр} = 30 \omega_{кр} / \pi$$

де  $g - 9,81 \text{ (м/с}^2\text{)}$ ;  $f -$  коефіцієнт тертя суміші о лопать;  $f = 0,4 \dots 0,5$ ;  $\gamma_0 -$  кут внутрішнього тертя суміші;  $\gamma_0 = 43 \dots 45^\circ$ ;  $R_0 -$  найбільший внутрішній радіус барабана, м;  $R_0 = D_0/2$

$$R_0 = 1,13/2 = 0,565$$

$$\omega_{кр} = \sqrt{9,81 \times (0,7 - 0,4 \times 0,7)} / 0,565 = \sqrt{7,2924} = 2,7 \text{ с}^{-1}$$

$$n_{кр} = 30 \times 2,7 / 3,14 = 25,8 \text{ хв}^{-1}$$

Номінальна кутова швидкість обертання,  $c^{-1}$

$$\omega_{ном} = (0,9 \dots 0,95) \times \omega_{кр} = 0,95 \times 2,7 = 2,56 \text{ с}^{-1}$$

номінальна частота обертання,  $мин^{-1}$

$$n_{ном} = 30 \omega_{ном} / \pi = (30 \times 2,56) / 3,14 = 24,5 \text{ об/хв}$$

## 5.3 Розрахунок витрачаємої потужності

### 5.3.1 Визначення робочих навантажень

Сила тяжіння суміші  $H$ :

Повна:

$$G_{см} = V_3 \times \rho_{см} \times g = 0,67 \times 1500 \times 9,81 = 9859 \text{ Н}$$

Піднімаєма за рахунок сил тертя:

$$G_1 = 0,85 G_{см} = 0,85 \times 9859 = 8380 \text{ Н}$$

Піднімаєма лопатями:

$$G_2 = 0,15 G_{см} = G_{см} - G_1 = 9859 - 8380 = 1479 \text{ Н}$$

де  $V_3 -$  об'єм готового замісу,  $м^3$ ;  $\rho_{см} -$  щільність суміші  $кг/м^3$ ;  $g = 9,81$   
 $м/с^2$

Сила тяжіння барабана:

$$G_B = K_B \times \rho_{ст} \times L \times g \times (D_H^2 - D_0^2) \times (\pi/4) = 1,23 \times 7850 \times 2,938 \times 9,81 \times (1,175^2 - 1,13^2) \times 3,14/4 = 22671 \text{ Н}$$

де  $K_B$  – коефіцієнт, враховуючий масу бандажа лопатей, фланців і т.п.;  $K_B = 1,15 \dots 1,23$ ;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $\rho_{ст}$  – щільність сталі,  $7850 \text{ кг/м}^3$

### 5.3.2 Розрахунок потужності, що витрачається на перемішування

Середня висота підйому перемішуємих компонентів за рахунок сил тертя ( $h_1$ ) і в лопатях ( $h_2$ ) м:

$$h_1 \approx R_0$$

$$h_1 \approx 0,565 \text{ м}$$

$$h_2 = (1 + \sin\gamma_0) \times R_0 = (1 + 0,7) \times 0,565 = 0,96$$

час одного оберту барабана, с:

$$t_{об} = 60/n_{ном} = 60/24,5 = 2,45 \text{ с}$$

час під'єму суміші в лопатях  $t_1$  и падіння компонентів суміші з висоти  $h_2(t_2)$ , с:

$$t_1 = (90 + \gamma_0)/(60 \times n_{ном}) = (90 + 45)/(60 \times 24,5) = 0,1 \text{ с}$$

$$t_2 = (2 \times h_2/g)^{0,5} = (2 \times 0,96/9,81)^{0,5} = 0,44 \text{ с}$$

де  $n_{ном}$  – номінальна частота обертання барабана,  $\text{хв}^{-1}$ ;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

Кількість циркуляцій суміші за 1 оборот барабана за рахунок сил тертя ( $Z_1$ ) і в лопатях ( $Z_2$ ),  $\text{об}^{-1}$

$$Z_1 = 360/2 \times \gamma_1 = 360/2 \times 90 = 2 \text{ об}^{-1}$$

$$Z_2 = t/(t_1 + t_2) = 2,45/(0,1 + 0,44) = 4,537 \text{ об}^{-1}$$

де  $\gamma_1$  – кут переміщення суміші,  $\gamma_1 = 2 \times \gamma_0$

Потужність, яка витрачається на перемішування, Вт:

$$N_1 = (G_1 h_1 Z_1 + G_2 h_2 Z_2) \times n_{ном} / 60 = (8380 \times 0,565 \times 2 + 1479 \times 0,96 \times 4,537) \times (24,5/60) = 6502,98 \text{ Вт}$$

### 5.3.3 Розрахунок потужності, що витрачається на подолання сил тертя в опорах змішувача

Потужність, що витрачається на подолання сил тертя в опорах, визначається залежно від конструкції змішувача, Вт:

Для змішувачів циклічної дії з периферійним приводом.

$$N_2 = (G_{cm} + G_6) / \cos \beta \times (D_6 + d_p) / d_p \times (\mu_1 + \mu_2 d_0 / 2) \times \omega_{ном}$$

де  $\omega_{ном}$  – номінальна кутова швидкість обертання барабана,  $c^{-1}$ ;  $\mu_1$  – коефіцієнт тертя кочення, приведений к валу або вісі підшипника опорного пристрою;  $\mu_1 = 0,01 \dots 0,015$ ;  $\mu_2$  – коефіцієнт (плече) тертя кочення бандажа по опорним роликам;  $\mu_2 = 0,0008 \dots 0,001$  м;  $d_0$  – діаметр вісі опорного ролика, м;  $D_6$  – діаметр опорного бандажа, м;  $d_p$  – діаметр опорного ролика, м;  $\beta$  – кут установки опорних роликів, град.

$$N_2 = ((9859 + 22671) / 0,809) \times ((1,254 + 0,248) / 0,248) \times \\ \times (0,001 + ((0,015 \times 0,062) / 2)) \times 2,56 = 912,36 \text{ Вт}$$

Повна витрачаєма потужність, Вт

$$N_{пол} = N_1 + N_2 = 6502,98 + 912,36 = 7415,34 \text{ Вт}$$

## 5.4 Кінематичний розрахунок привода

### 5.4.1. Визначення загального ККД привода

Загальний ККД привоу змішувача буде залежати від обраної кінематичної схеми змішувача і особливостей його привоу: того чи іншого типу редуктора, наявності відкритої зубчастої або клинопасової передачі, наявності зубчастого синхронізатора і з'єднувальних муфт

$$\eta_{пр} = \eta_{ред} \times \eta_{пер} \times \eta_m^x$$

де  $\eta_{ред}$  – к.к.д. редуктора;  $\eta_{пер}$  – к.к.д. відкритої передачі;  $\eta_m$  – к.к.д. муфти;  $x$  – число муфт

$$\eta_{пр} = 0,97 \times 0,95 \times 0,99 = 0,912285$$

### 5.4.2 Вибір електродвигуна

Для змішувачів з гравітаційним перемішуванням і периферійним приводом рекомендується використовувати асинхронні електродвигуни змінного струму (4А, АО і т.д.) з синхронною частотою обертання  $n_c = 1000 \dots 1500 \text{ хв}^{-1}$ .

Необхідна потужність на валу електродвигуна, кВт:

$$N_{\text{тр}} = N_{\text{пол}} / 10^3 \times \eta_{\text{пр}} = 7415,34/912,285 = 7,528 \text{ кВт}$$

де  $N_{\text{пол}}$  – повна споживаєма потужність, Вт;

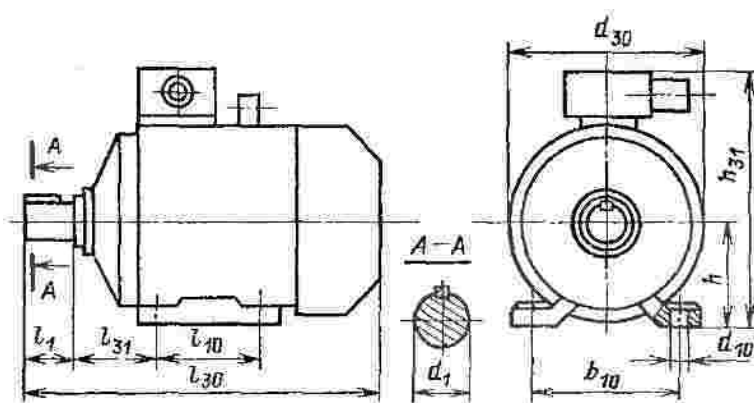
Умова вибору електродвигуна  $N_{\text{дв}} \geq N_{\text{тр}}$

Технічна характеристика електродвигуна.

Марка 4А132М6 У3

Потужність ( $N_{\text{дв}}$  кВт) = 7,5 кВт

Частота обертання ( $n_{\text{дв}}$ ,  $\text{хв}^{-1}$ ) = 1000  $\text{хв}^{-1}$



Типо-розмір двигуна	Кількість полюсів	Габаритні розміри, мм				Установочні і приєднувальні розміри, мм							Маса в кг
		L30	h2	d1	b2	l1	L31	l2	d30	d10	b1	h1	
4А132 М6 У3	6	530	350	38	535	80	89	190	302	12	216	132	93

Попередні передаточні числа привода.

Визначаємо загальне передаточне число привода:

$$u = \frac{n_{\text{д}}}{n_{\text{б}}} = \frac{1000}{24,5} = 40,8;$$

тут  $n_{\text{д}}$  – фактична частота обертання вала двигуна;

$n_{\text{б}}$  - оптимальна частота обертання барабана.

Прийmemo передаточне число відкритої передачі (зубчате колесо  $z_5$  и венець  $z_6$ )  $u_{on} = 9$ .

Тоді передаточне число закритого двохступінчатого редуктора визначиться з виразу:

$$u_p = \frac{u}{u_{on}} = \frac{40,8}{9} = 4,53,$$

передаточне число тихохідної ступені редуктора

$$u_m = 0,88 \cdot \sqrt{u_p} = 0,88 \cdot \sqrt{4,53} = 2$$

передаточне число швидкохідної передачі редуктора

$$u_o = \frac{u_p}{u_m} = \frac{4,53}{2} = 2,26$$

## 5.5 Кінематика привода

Обчислюємо потужності, числа обертів, кутові швидкості, крутний момент на всіх зубчастих колесах привода. Для цього скористаємося наступними формулами:

для розрахунку потужності -  $N_i = N_D \cdot \eta_i$ ;

для підрахунку числа обертів -  $n_i = \frac{n_D}{u_i}$

для визначення кутової швидкості -  $\omega_i = \frac{\pi \cdot n_i}{30}$

для визначення крутного моменту -  $M_i = \frac{N_i}{\omega_i}$

тут:  $N_i$ ;  $\eta_i$ ;  $n_i$ ;  $u_i$ ;  $\omega_i$ ;  $M_i$ ; - відповідно потужність, ККД, передаточне число, кутова швидкість і крутний момент відповідного ланцюга привода.

а) швидкохідний вал редуктора:

$$N_1 = N_D \cdot \eta_1 = 7,5 \cdot 0,97 = 7,275 \text{ кВт};$$

$$n_1 = n_D = 1000 \text{ об/хв};$$

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,72 \text{ с}^{-1};$$

$$M_1 = \frac{N_1}{\omega_1} = \frac{7,275}{104,72} = 0,069 \text{ кН}\times\text{м.}$$

б) проміжний вал закритого редуктора (друге зубчате колесо):

$$N_2 = N_d \cdot \eta_2 = 7,5 \cdot 0,93 = 6,975 \text{ кВт};$$

$$n_2 = \frac{n_d}{u_6} = \frac{1000}{2,26} = 442,5 \text{ об/хв};$$

$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30} = \frac{3,14 \cdot 442,5}{30} = 46,3 \text{ с}^{-1};$$

$$M_2 = \frac{N_2}{\omega_2} = \frac{6,975}{46,3} = 0,15 \text{ кН}\times\text{м.}$$

Так як друге і третє зубчаті колеса посаджені на один вал, то розраховуємо параметри для них будуть однакові  $N_2 = N_3 = 6,975 \text{ кВт}; n_2 = n_3 = 442,5 \text{ об/хв}; \omega_2 = \omega_3 = 46,3 \text{ с}^{-1}; M_2 = M_3 = 0,15 \text{ кН}\times\text{м.}$

в) тихохідний вал редуктора:

$$N_4 = N_d \cdot \eta_4 = 7,5 \cdot 0,884 = 6,63 \text{ кВт};$$

$$n_4 = \frac{n_d}{u_p} = \frac{1000}{4,53} = 220,7 \text{ об/хв};$$

$$\omega_4 = \frac{\pi \cdot n_4}{30} = \frac{3,14 \cdot 220,7}{30} = 23,11 \text{ с}^{-1};$$

$$M_4 = \frac{N_4}{\omega_4} = \frac{6,63}{23,11} = 0,287 \text{ кН}\times\text{м.}$$

Так як четверте і п'яте зубчаті колеса посаджені на один вал, то розраховуємо параметри для них будуть однакові  $N_4 = N_5 = 6,63 \text{ кВт}; n_4 = n_5 = 220,7 \text{ об/хв}; \omega_4 = \omega_5 = 23,11 \text{ с}^{-1}; M_4 = M_5 = 0,287 \text{ кН}\times\text{м.}$

г) відкрита передача (параметри всього механізму)

$$N_6 = N_d \cdot \eta_6 = 7,5 \cdot 0,824 = 6,18 \text{ кВт};$$

$$n_6 = \frac{n_d}{u} = \frac{1000}{40,8} = 24,5 \text{ об/хв};$$

$$\omega_6 = \frac{\pi \cdot n_6}{30} = \frac{3,14 \cdot 24,5}{30} = 2,57 \text{ с}^{-1};$$

$$M_6 = \frac{N_6}{\omega_6} = \frac{6,18}{2,57} = 2,41 \text{ кН}\times\text{м.}$$

## Попередні силові параметри привода

$i$	$N_i$ , кВт	$n_i$ , об/хв	$\omega_i$ , с <sup>-1</sup>	$M_i$ , кН×м
1	7,275	1000	104,72	0,069
2	6,975	442,5	46,3	0,15
3	6,975	442,5	46,3	0,15
4	6,63	220,7	23,11	0,287
5	6,63	220,7	23,11	0,287
6	6,18	24,5	2,57	2,41

**5.5.1 Матеріали і допустимі напруження зубчастих коліс**

Вирішальний вплив на працездатність зуба надають два напруги, що виникають під дією двох сил: окружний  $P$  і радіальної  $R$ , контактна ( $G_n$ ) і напруга вигину ( $G_f$ ), які змінюються в часі по переривчастих (пульсуючому) циклу і є причиною втомного руйнування зубів. Напруга  $G_n$  призводить до контактного викошування поверхні зубів, а  $G_f$  - до поломки зубів, тому зубчасті колеса розраховують за контактним напруженням і перевіряють по напруженням вигину.

При розрахунках на міцність сил, діючих на зуб, трохи збільшують множенням їх на коефіцієнт  $k_p = 1,2 \div 1,3$ , який враховує нерівномірність розподілу навантаження по довжині зуба і додаткові динамічні навантаження, що виникають через неточності виготовлення.

Для пари зубчастих коліс рекомендується певне поєднання машинобудівних матеріалів. При цьому провідне зубчасте колесо прийнято називати «шестернею», а відоме колесо - просто «колесом». Зуби шестірні частіше вступають в силовий контакт і, отже, працюють у більш важких умовах. Шестерню (або провідне колесо) виготовляють з міцнішого матеріалу в порівнянні з веденим колесом.

Величину допустимого напруги в першому наближенні можна розрахувати орієнтуючись на менш міцний елемент пари, яким є колесо, за формулою:

$$[G_n] = 1,8 \cdot HB_{cp} + 67;$$

де:

$HB_{cp}$  – середня твердість по Брінеллю для матеріалу колеса, МПа.

Допустиме напруження згину розраховують як для шестерні, так і для колеса по формулі:

$$[G_f] = 1,03 \cdot HB_{cp}.$$

Згідно рекомендації для коліс закритого редуктора приймаємо:

Табл. № 3

Матеріали зубчатих коліс (закрита передача)

Тип колеса	Термообробка	Твердість, МПа	Марка сталі
Ведуче (шестерня)	поліпшення + ТВЧ	$HRC = 45 \div 50$	35ХМ
Відоме (колесо)	поліпшення	$HB = 269 \div 302$	45, 40Х, 40ХН

$HRC$  – твердість по Роквеллу (шкала С), можна прийняти  $HB = 310 \div 370$  МПа.

Для відкритої передачі (третя пара), яка включає колеса  $z_5$  і  $z_6$  приймаємо відповідно:

Табл. № 4

Матеріали зубчатих коліс (відкрита передача)

Тип колеса	Термообробка	Твердість, МПа	Марка сталі
Ведуче (шестерня)	поліпшення	$HB = 269 \div 302$	35ХМ
Відоме (колесо)	поліпшення	$HB = 235 \div 262$	45, 40Х, 40ХН

а) допустимі контактні напруження для кожної пари зубчатих коліс закритого редуктора:

$$HB_{cp} = \frac{269 + 302}{2} = 285,5 \approx 286 \text{ МПа};$$

$$[G_n] = 1,8 \cdot HB_{cp} + 67 = 1,8 \cdot 286 + 67 = 581,8 \approx 582 \text{ МПа};$$

б) допустимі напруження згину для кожної шестерні закритого редуктора:

$$HB_{cp} = \frac{310 + 370}{2} = 340 \text{ МПа};$$

$$[G_f]_{\text{ш}} = 1,03 \cdot HB_{cp} = 1,03 \cdot 340 = 350,2 \approx 350 \text{ МПа}.$$

в) допустимі напруження згину для кожного колеса закритого редуктора:

$$HB_{cp} = \frac{269 + 302}{2} = 285,5 \approx 286 \text{ МПа};$$

$$[G_f]_{\text{к}} = 1,03 \cdot HB_{cp} = 1,03 \cdot 286 = 294,58 \approx 295 \text{ МПа}.$$

г) допустимі контактні напруження для коліс відкритої передачі:

$$HB_{cp} = \frac{235 + 262}{2} = 248,5 \approx 248 \text{ МПа};$$

$$[G_n]_{\text{к}} = 1,8 \cdot HB_{cp} + 67 = 1,8 \cdot 248 + 67 = 513,4 \approx 513 \text{ МПа};$$

б) допустимі напруження згину для шестерні відкритої передачі:

$$HB_{cp} = \frac{269 + 302}{2} = 285,5 \approx 286 \text{ МПа};$$

$$[G_f]_{\text{ш}} = 1,03 \cdot HB_{cp} = 1,03 \cdot 286 = 294,58 \approx 295 \text{ МПа}.$$

в) допустимі напруження згину для колеса відкритої передачі:

$$HB_{cp} = \frac{235 + 262}{2} = 248,5 \approx 248 \text{ МПа};$$

$$[G_f]_{\text{к}} = 1,03 \cdot HB_{cp} = 1,03 \cdot 248 = 255,44 \approx 255 \text{ МПа}.$$

### 5.5.2 Міжосьові відстані зубчатих коліс

В приводі барабана рекомендується застосовувати прямозубі зубчаті колеса. Для кожної пари коліс міжосьова відстань розраховується за умови контактної міцності або за контактним напруженням.

Знаючи допустимі контактні напруження, знайдемо міжосьову відстань за формулою:

$$a = (u \pm 1) \sqrt[3]{\left(\frac{k}{[G_n] \cdot u}\right)^2 \cdot \frac{M_p}{\varphi_a}};$$

де:  $k = 315$  – для прямозубих передач;

$u$  – передаточне число зубчатої пари;

$M_p$  – розрахунковий крутний момент на ведучому колесі, Н×м:

$$M_p = M \cdot k_p;$$

тут:  $M$  – номінальний момент на том же колесі;

$k_p$  - коефіцієнт  $k_p = 1,2 \div 1,3$ , який враховує нерівномірність розподілення навантаження по довжині зуба і додаткові динамічні навантаження, виникаючі із-за неточності виготовлення.

$[G_n]$  - допустиме контактне напруження;

$\varphi_a = \frac{b_2}{a}$  - коефіцієнт довжини зуба; де  $b_2$  – ширина колеса;  $a$  – міжосьова відстань.

Значення,  $\varphi_a$  попередньо обираємо у відповідності з рекомендованими з нормального ряду чисел. При розрахунку першої ступені привода приймаємо  $\varphi_a = 0,315$ ; при розрахунку другої  $\varphi_a = 0,4$ ; при розрахунку третьої ступені  $\varphi_a = 0,075$  і визначається не умовами міцності, а геометрією барабана.

а) міжосьова відстань бистрохідного вала редуктора:

$$a_{\delta} = (u_{\delta} \pm 1) \sqrt[3]{\left(\frac{k}{[G_n] \cdot u_{\delta}}\right)^2 \cdot \frac{M_p}{\varphi_a}} = (2,26 + 1) \sqrt[3]{\left(\frac{315}{582 \cdot 2,26}\right)^2 \cdot \frac{0,0537 \cdot 10^6 \cdot 1,2}{0,315}} = 74,52 \text{ мм};$$

а) міжосьова відстань тихохідного вала редуктора:

$$a_m = (u_m \pm 1) \sqrt[3]{\left(\frac{k}{[G_n] \cdot u_m}\right)^2 \cdot \frac{M_p}{\varphi_a}} = (2 + 1) \sqrt[3]{\left(\frac{315}{582 \cdot 2}\right)^2 \cdot \frac{0,102 \cdot 10^6 \cdot 1,2}{0,4}} = 84,58 \text{ мм};$$

а) міжосьова відстань відкритої передачі:

$$a_{on} = (u_{on} \pm 1) \sqrt[3]{\left(\frac{k}{[G_n] \cdot u_{on}}\right)^2 \cdot \frac{M_p}{\varphi_a}} = (9 + 1) \sqrt[3]{\left(\frac{315}{513 \cdot 9}\right)^2 \cdot \frac{0,855 \cdot 10^6 \cdot 1,2}{0,075}} = 399,33 \text{ мм}.$$

Для зручності попередні геометричні параметри привода зведемо в таблицю.

Табл. № 5.

Попередні геометричні параметри привода

Зубчата пара	$i$	$u_i$	$a_i$ , мм	$\varphi_a$
Швидкохідна	1	2,26	74,52	0,315
	2			
Тихохідна	3	2	84,58	0,4
	4			
Відкрита передача	5	9	399,33	0,075

Якщо порівняти міжосьова відстань  $a_3 = 0,399$  м з внутрішнім радіусом барабана  $R_6 = 0,61$  м, то відповідно бачимо, що міжосьова відстань  $a_3$  мала і не задовольняє умовам сумісності по завантаженню. Тобто, якщо взяти міжосьову відстань яка вийшла в результаті розрахунків ми не зможемо завантажити в барабан об'єм суміші даний за завданням.

Тому для третього ступеня, шестерня  $z_5$  і вінець  $z_6$ , міжосьову відстань знайдемо не по допустимим контактним напруженням, а виходячи з розмірів змішувального барабана. Міжосьову відстань знайдемо з припущення, що ділильний діаметр вінця  $d_6 = m_{on} \cdot z_6$  перевищує діаметр бандажа  $D_6 = 2 \cdot R_6 = 2 \cdot 0,61 = 1,22$  м не менш ніж на  $3 \div 4$  модуля  $d_6 \geq D_6 + (3 \div 4) \cdot m_{on}$ .

Звідки маємо:

$$m_{on} \geq \frac{D_6}{z_6 - (3 \div 4)}$$

тут:

$m_{on}$  – модуль зачеплення відкритої передачі (шестерня  $z_5$  и венець  $z_6$ );

$z_6$  – число зубців венця;

$D_6$  – діаметр бандажа барабана.

Задамося числом зубців  $z_5 = 20$ . Тоді  $z_6 = z_5 \cdot u_{on} = 20 \cdot 9 = 180$ , тоді модуль зубчатого венця буде рівен:

$$m_{on} \geq \frac{1254}{180 - 3} = 7,08 \text{ мм.}$$

Розрахункове значення модуля округлюємо до найближчого стандартного  $m_{on} = 7$  мм.

Тоді міжосьова відстань визначиться за формулою:

$$a_{on} = \frac{m_{on} \cdot (z_5 + z_6)}{2} = \frac{7 \cdot (20 + 180)}{2} = 700 \text{ мм.}$$

При розрахунку необхідно слідкувати за дотриманням нерівності  $(d_6 - D_6) \geq 3 \cdot m_{on}$  при не дотриманні умови робиться перерахунок, при цьому беруться інші коефіцієнти.

Ділильний діаметр бандажа зубчатого венця  $d_6 = m_{on} \cdot z_6 = 7 \cdot 180 = 1260$  мм.

$$(1260 - 1220) \geq 3 \cdot 7$$

$$40 > 21.$$

### Уточнені геометричні параметри зубчастої передачі

Швидкохідна зубчаста пара редуктора.

а) Задамося числом зубців ведучого колеса  $z_1 = 20$ , тоді число зубців веденого колеса відповідно дорівнює:

$$z_2 = z_1 \cdot u_{\delta} = 20 \cdot 2,26 = 45,2 \approx 45.$$

Число зубців округляємо до найближчого цілого, приймаємо  $z_2 = 45$ .

б) Уточнюємо передаточне число ступені, з врахуванням отриманого числа зубців:

$$u_{\delta y} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{45}{20} = 2,25.$$

в) Знайдемо модуль зачеплення:

$$m_1 = m_2 = m_{\delta} = \frac{2 \cdot a_{\delta}}{z_1 + z_2} = \frac{2 \cdot 74,52}{20 + 45} = 2,2 \text{ мм};$$

тут:

$m_1$  – модуль зачеплення ведучого колеса швидкохідної зубчастої пари редуктора (шестерня);

$m_2$  – модуль зачеплення веденого колеса швидкохідної зубчастої пари редуктора;

$m_{\delta}$  – модуль зачеплення швидкохідної зубчастої пари редуктора;

$a_{\delta}$  – міжосьова відстань швидкохідної зубчастої пари редуктора, була визначена раніше (попередньо) по допустимим контактним напруженням.

Округляємо значення модуля до найближчого стандартного значення  $m_{\delta} = 2$ .

г) Знаючи модуль числа зубців, розраховуємо ділильні діаметри зубчатих коліс для швидкохідної зубчастої пари редуктора:

для колеса:

$$d_1 = m_{\delta} \cdot z_1 = 2 \cdot 20 = 40 \text{ мм};$$

для шестерні:

$$d_2 = m_6 \cdot z_2 = 2 \cdot 45 = 90 \text{ мм};$$

д) Уточнимо міжосьову відстань:

$$a_6 = \frac{d_1 - d_2}{2} = \frac{40 + 90}{2} = 65 \text{ мм}.$$

е) Довжини зубців знайдемо з нової міжосьової відстані, з урахуванням обраних значень  $\varphi_a$  для колеса и шестерні швидкохідної зубчатої пари:

для колеса:

$$b_2 = \varphi_a \cdot a_6 = 0,315 \cdot 72 = 22,68 \approx 23 \text{ мм};$$

для шестерні:

$$b_1 = 1,1 \cdot b_2 = 1,1 \cdot 23 = 25,3 \approx 25 \text{ мм}.$$

Тихохідна зубчата пара редуктора.

а) Задамося числом зубців ведучого колеса  $z_3 = 20$ , тоді число зубців веденого колеса відповідно дорівнює:

$$z_4 = z_3 \cdot u_m = 20 \cdot 2 = 40.$$

Число зубців приймаємо  $z_4 = 40$ .

б) Передаточне число ступені залишиться колишнім, так як числа зубців отримали одразу цілими (без округлень).

в) Знайдемо модуль зачеплення:

$$m_3 = m_4 = m_m = \frac{2 \cdot a_m}{z_3 + z_4} = \frac{2 \cdot 84,58}{20 + 40} = 2,82 \text{ мм};$$

здесь:

$m_3$  – модуль зачеплення ведучого колеса тихохідної зубчатої пари редуктора (шестерня);

$m_4$  – модуль зачеплення веденого колеса тихохідної зубчатої пари редуктора;

$m_m$  – модуль зачеплення тихохідної зубчатої пари редуктора;

$a_m$  – міжосьова відстань тихохідної зубчатої пари редуктора, була визначена раніше (попередньо) по допустимим контактним напруженням.

Округляємо значення модуля до найближчого стандартного значення  $m_m = 3$ .

г) Знаючи модуль числа зубців, розрахуємо подільні діаметри зубчатих коліс для тихохідної зубчатої пари редуктора:

для колеса:

$$d_3 = m_m \cdot z_3 = 3 \cdot 20 = 60 \text{ мм};$$

для шестерні:

$$d_4 = m_m \cdot z_4 = 3 \cdot 40 = 120 \text{ мм};$$

д) Уточнимо міжосьову відстань:

$$a_m = \frac{d_3 + d_4}{2} = \frac{60 + 120}{2} = 90 \text{ мм}.$$

е) Довжини зубців знайдемо з нової міжосьової відстані, з врахуванням обраних значень  $\varphi_a$  для колеса и шестерні тихохідної зубчатої пари:

для колеса:

$$b_4 = \varphi_a \cdot a_m = 0,4 \cdot 90 = 36 \text{ мм};$$

для шестерні:

$$b_3 = 1,1 \cdot b_4 = 1,1 \cdot 36 = 39,6 \approx 40 \text{ мм}.$$

### Відкрита зубчата пара

Раніше для відкритої передачі ми визначили такі параметри як:

число зубців шестерні  $z_5 = 20$  и венця  $z_6 = z_5 \cdot u_{on} = 20 \cdot 9 = 180$ , міжосьова відстань  $a_{on} = 700$  мм і модуль зачеплення  $m_{on} = 7$  мм, то перейдемо одразу до визначення ділільних діаметрів шестерні  $d_5$  и венця  $d_6$  відкритої передачі. Передаточне число  $u_{on} = 9$  залишається незмінним.

а) Подільні діаметри зубчатих коліс для відкритої зубчатої пари:

для колеса:

$$d_5 = m_{on} \cdot z_5 = 7 \cdot 20 = 140 \text{ мм};$$

для венця ділільний діаметр був визначений раніше  $d_6 = 1260$  мм.

б) Довжини зубців знайдемо з нової міжосьової відстані, з врахуванням обраних значень  $\varphi_a$  для венця і шестерні відкритої зубчатої пари:

для венця:

$$b_6 = \varphi_a \cdot a_{on} = 0,075 \cdot 700 = 52,5 \approx 53 \text{ мм};$$

для шестерні:

$$b_5 = 1,1 \cdot b_6 = 1,1 \cdot 53 = 58,3 \approx 59 \text{ мм.}$$

Результати розрахунків зручно представити у вигляді таблиці.

Табл. № 6

Уточнені геометричні і силові параметри привода

Зубчата пара	$i$	$z_i$	$m$ , мм	$d_i$	$u$	$a$ , мм	$P$ , Н	$Y_{f,i}$	$b_i$ , мм
Швидкохідна	1	20	2	40	2,6	72	1032,69	4,07	25
	2	52		104				3,692	23
Тихохідна	3	20	3	60	2	90	1700	4,07	40
	4	40		120				3,7	36
Відкрита передача	5	20	7	140	9	700	1379	4,07	59
	6	180		1260				3,62	53

*Перевірка міцності зубчастих коліс*

Після розрахунку геометричних параметрів передачі, які округлювалися в ту чи іншу сторону, необхідно провести перевірку міцності зубців за контактними напруженням  $G_H$  і напруженням згину  $G_f$ .

Діючі контактні напруги знайдемо за формулою:

$$G_H = \kappa \cdot \frac{u+1}{a \cdot u} \cdot \sqrt{\frac{u+1}{b_k}} \cdot M_{p,\kappa};$$

тут:

$k = 315$  – для прямозубих передач;

$u$  – передаточне число зубчатої пари;

$M_{p,\kappa}$  – розрахунковий крутний момент на колесі, Н×м:

$$M_p = M \cdot k_p;$$

тут:  $M$  – номінальний момент на тому же колесі;

$k_p$  - коефіцієнт  $k_p = 1,2 \div 1,3$ , який враховує нерівномірність розподілу навантаження по довжині зуба і додаткові динамічні навантаження, що виникають через неточності виготовлення;

$b_k$  – довжина зубів колеса відповідної зубчастої пари (у колеса довжина зуба менше ніж у шестерні, що обмежує довжину контактної поверхні пари).

Діючі напруження згину знайдемо за формулою:

$$G_f = \frac{P \cdot k_f \cdot Y_f}{b_i \cdot m}$$

тут:

$P$  – окружне зусилля для відповідної розрахункової пари зубчастих коліс,

$$P = \frac{2 \cdot M_k}{d_k};$$

$M_k$  – розрахунковий момент на відповідній парі зубчатих коліс;

$d_k$  – дільний діаметр колеса розрахункової пари зубчатого колеса.

$k_f = 1,3 \div 1,4$  – коефіцієнт враховуючий умови роботи передачі,  $k_f = 1,4$ ;

$Y_f$  – коефіцієнт форми зуба, обирається в залежності від зубців колеса;  $b_i$  – довжина зуба;  $m$  – модуль розраховуємої пари коліс.

Швидкохідна зубчата пара редуктора.

Діючі контактні напруження:

$$G_u = 315 \cdot \frac{u_{\bar{o}} + 1}{a_{\bar{o}} \cdot u_{\bar{o}}} \cdot \sqrt{\frac{u_{\bar{o}} + 1}{b_2}} \cdot M_2 = 315 \cdot \frac{2,6 + 1}{72 \cdot 2,6} \cdot \sqrt{\frac{2,6 + 1}{23}} \cdot 0,0537 \cdot 10^6 \cdot 1,2 = 608,37 \text{ МПа.}$$

Діючі напруження згину:

$$P_{\bar{o}} = \frac{2 \cdot M_2}{d_2} = \frac{2 \cdot 0,0537 \cdot 10^6}{104} = 1032,69 \text{ Н;}$$

$$G_{f,1} = \frac{P_{\bar{o}} \cdot k_f \cdot Y_{f,1}}{b_1 \cdot m_{\bar{o}}} = \frac{1032,69 \cdot 1,4 \cdot 4,07}{25 \cdot 2} = 117,68 \text{ МПа;}$$

$$G_{f,2} = \frac{P_{\bar{o}} \cdot k_f \cdot Y_{f,2}}{b_2 \cdot m_{\bar{o}}} = \frac{1032,69 \cdot 1,4 \cdot 3,692}{23 \cdot 2} = 116,04 \text{ МПа;}$$

Тихохідна зубчата пара редуктора.

Діючі контактні напруження:

$$G_u = 315 \cdot \frac{u_m + 1}{a_m \cdot u_m} \cdot \sqrt{\frac{u_m + 1}{b_4}} \cdot M_4 = 315 \cdot \frac{2 + 1}{90 \cdot 2} \cdot \sqrt{\frac{2 + 1}{36}} \cdot 0,102 \cdot 10^6 \cdot 1,2 = 530,22 \text{ МПа.}$$

Діючі напруження згину:

$$P_m = \frac{2 \cdot M_4}{d_4} = \frac{2 \cdot 0,102 \cdot 10^6}{120} = 1700 \text{ Н;}$$

$$G_{f,3} = \frac{P_m \cdot k_f \cdot Y_{f,3}}{b_3 \cdot m_m} = \frac{1700 \cdot 1,4 \cdot 4,07}{40 \cdot 3} = 80,72 \text{ МПа};$$

$$G_{f,4} = \frac{P_m \cdot k_f \cdot Y_{f,4}}{b_4 \cdot m_m} = \frac{1700 \cdot 1,4 \cdot 3,7}{36 \cdot 3} = 81,54 \text{ МПа};$$

Відкрита зубчата пара редуктора.

Діючі контактні напруження:

$$G_{on} = 315 \cdot \frac{u_{on} + 1}{a_{on} \cdot u_{on}} \cdot \sqrt{\frac{u_{on} + 1}{b_6}} \cdot M_6 = 315 \cdot \frac{9 + 1}{700 \cdot 9} \cdot \sqrt{\frac{9 + 1}{53}} \cdot 0,855 \cdot 10^6 \cdot 1,2 = 219,99 \text{ МПа}.$$

Діючі напруження згину:

$$P_{on} = \frac{2 \cdot M_6}{d_6} = \frac{2 \cdot 0,855 \cdot 10^6}{1240} = 1379 \text{ Н};$$

$$G_{f,5} = \frac{P_{on} \cdot k_f \cdot Y_{f,5}}{b_5 \cdot m_{on}} = \frac{1379 \cdot 1,4 \cdot 4,07}{59 \cdot 7} = 19,03 \text{ МПа};$$

$$G_{f,6} = \frac{P_{on} \cdot k_f \cdot Y_{f,6}}{b_6 \cdot m_{on}} = \frac{1379 \cdot 1,4 \cdot 3,62}{53 \cdot 7} = 18,84 \text{ МПа};$$

Результати розрахунків зручно привести у вигляді таблиці.

Табл. № 7

Допустимі і діючі напруження зубців коліс передачі

Номер колеса	Контактні напруження		Напруження згину	
	Допустимі	Діючі	Допустимі	Діючі
<i>i</i>	[ <i>G<sub>n</sub></i> ], МПа		[ <i>G<sub>f</sub></i> ], МПа	
1	582	608,37	350	117,68
2			295	116,04
3	582	530,22	350	80,72
4			295	81,54
5	513	219,99	295	19,03
6			255	18,84

Порівнюючи розрахункові і діючі напруги, можна зробити висновок, що відхилення в бік перевищення не більше 5%. Так само досить великий запас міцності по напруженням згину, але контактні напруження є визначальними.

### Розрахунок валу

На ведучому валу редуктора, діаметр під муфту:

$$d \geq 7,5 \cdot \sqrt[3]{M_{\sigma}} = 7,5 \cdot \sqrt[3]{22} = 21,015 \approx 21 \text{ мм};$$

тут:

$M_{\sigma}$  – момент на відповідному валу, в даному випадку це момент на швидкохідному валу редуктора.

Діаметр під підшипник:

$$d_n \geq d + 2 \cdot t = 21 + 2 \cdot 2 = 25 \text{ мм};$$

тут:

$t$  – висота буртика, обирається в залежності от діаметра посадочної поверхні вала.

Діаметр під шестерню:

$$d_{ш} = d_n + 3 \cdot r = 25 + 3 \cdot 1,6 = 29,8 \approx 30 \text{ мм};$$

тут:

$r$  – розмір фаски підшипника, обирається в залежності від діаметра посадочної поверхні вала.

На проміжному валу редуктора, діаметр під колесо.

$$d_k \geq 6,5 \cdot \sqrt[3]{M_n} = 6,5 \cdot \sqrt[3]{53,7} = 24,5 \approx 25 \text{ мм};$$

тут:

$M_n$  – момент на відповідному валу, в даному випадку це момент на проміжному валу редуктора.

Діаметр під шестерню:

$$d_{ш} \geq d_k + 3 \cdot f = 25 + 3 \cdot 2 = 30 \text{ мм};$$

тут:

$f$  – розмір фаски, обирається в залежності від діаметра посадочної поверхні вала.

Діаметр під підшипники:

$$d_n \geq d_k - 2 \cdot r = 25 - 2 \cdot 2 = 21 \approx 25 \text{ мм};$$

тут:

$r$  – розмір фаски підшипника, обирається в залежності від діаметра посадочної поверхні вала.

В останньому випадку діаметр підшипника округлено в більшу сторону з метою зменшення їх номенклатури, щоб діаметри підшипника на ведучому і проміжному валах були однаковими.

На тихохідному валу, діаметр під колесо.

$$d_k \geq 5,5 \cdot \sqrt[3]{M_m} = 5,5 \cdot \sqrt[3]{102} = 25,69 \approx 26 \text{ мм};$$

тут:

$M_m$  – момент на відповідному валу, в даному випадку це момент на тихохідному валу редуктора.

Діаметр під перший підшипник:

$$d_{n1} \geq d_k - 2 \cdot t = 26 - 2 \cdot 2,2 = 21,6 \approx 25 \text{ мм};$$

тут:

$t$  – висота буртика, обирається в залежності от діаметра посадочної поверхні вала.

Діаметр під другий підшипник:

$$d_{n2} \geq d_k + 3 \cdot r = 26 + 3 \cdot 2 = 32 \approx 35 \text{ мм};$$

тут:

$r$  – розмір фаски підшипника, обирається в залежності от діаметра посадочної поверхні вала.

Діаметр під шестерню:

$$d_{ш} = d_k = 26 \text{ мм};$$

Найбільша відстань між зовнішніми поверхнями обертаючихся деталей редуктора:

$$L = a_{\delta} + a_m + \frac{d_1}{2} + \frac{d_4}{2} = 72 + 90 + \frac{40}{2} + \frac{120}{2} = 242 \text{ мм}.$$

Знайдемо зазор між обертаючимися деталями і внутрішніми стінками корпуса редуктора:

$$\delta = \sqrt[3]{L} + 4 = \sqrt[3]{242} + 4 = 10,23 \approx 10 \text{ мм}.$$

Відстань між торцевими поверхнями коліс редуктора:

$$c = (0,3 \div 0,5) \cdot \delta = 0,4 \cdot 10 = 4 \text{ мм}.$$

## **7. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях**

Під час роботи машини, а саме барабанного змішувача для дослідження траєкторії руху сипкого матеріалу, необхідно розробити безпечні умови праці для персоналу згідно чинного законодавства України, а саме закону України “Про охорону праці”. Виконання цього закону вимагає чіткого виконання санітарних норм, дотримання правил, галузевих і державних стандартів при експлуатації експериментальної установки.

Безпечна експлуатація експериментальної установки вимагає знання конструкції і принципів роботи експериментальної установки, правил пожежної безпеки, правил безпеки для підприємств і правил техніки безпеки.

Під час експлуатації експериментальної установки для дослідження траєкторії руху сипкого матеріалу, необхідно враховувати наступні небезпечні і шкідливі виробничі фактори:

- Механічна небезпека;
- Пожежна небезпека;
- Електрична небезпека;
- Промислове освітлення.

### **Механічна небезпека**

Механічна небезпека полягає в можливих травмах при контакті з незахищеними рухливими елементами. Експериментальна установка містить обертовий барабан, що обертається з швидкістю до 100 об/хв. Щоб запобігти можливим травмам, варто вжити такі заходи безпеки:

- Встановити огорожу навколо всієї конструкції експериментальної установки;
- Зберігати дистанцію в 1 м з рухомими частинами експериментальної установки.
- Встановлювати таблички, що сповіщають про ремонт певного вузла чи деталі при ремонтних роботах.

Самозаймистість – властивість деяких сипких матеріалів спалахувати під дією тепла, що виділяється при протіканні в них хімічних процесів. До самозаймистих матеріалів відносяться вологі вугілля, тирса, стружки і тріски деревинні, карбід кальцію, сіра, промаслена металева тирса та інші.

Окрім власне вибухових матеріалів до вибухонебезпечних відносяться матеріали, що виділяють пил, здатний вибухати (крохмаль, мука, тирса деревинна, зерно, вугілля), а також матеріали, що створюють вибухові суміші з іншими матеріалами (селітра, бертолетова сіль).

Окрім отруйних матеріалів, до шкідливих для здоров'я робочих, обслуговуючих барабанні пристрої, відносяться матеріали, що порошать, здатні викликати захворювання очей, органів дихання і нервової системи.

### **Пожежна безпека**

Щоб не допустити небезпеки виникнення пожежі, необхідно дотримуватись наступних правил:

- Не використовувати легкозаймистих речовин при експерименті;
- Не допускати попадання легкозаймистих речовин поблизу експериментальної установки;
- Використовувати стабілізатор напруги.

До порушень правил пожежної безпеки, а як наслідок і загорання, відносяться:

- Паління на робочому місці;
- Недотримання правил експлуатації і технологічних норм;
- Недотримання норм і правил пожежогасіння;
- Нерегулярна технічна перевірка установки;
- Використання відкритого вогню;
- Недотримання обслуговуючим персоналом інструкцій та незадовільне пояснення інструкцій обслуговуючому персоналу;
- Відсутність наочної агітації з техніки безпеки;

- Порушення пожежної безпеки на території, де проходить робота;
- Відсутність пожежної сигналізації (датчик кі-1, приймальна станція руоп-1).

На відстані 30 м один від одного у приміщенні встановлені пожежні гідранти з рукавами по 10 м.

Застосовують порошкові вогнегасники з речовинами опс-10 і оппс-100 для гасіння ввімкнених електромереж.

Застосовують вуглекислотні вогнегасники оу-5 та пінні охп-10 для гасіння невеликих вогнищ запалень при вимкненому електроустаткуванні.

Кількість виходів – 3, відстані до пожежних евакуовиходів – 35 м. Ширина прорізу для дверей евакуовиходів – 2,5 м згідно із сніп 2.09.02-85.

#### Електрична безпека

З метою недопущення електричної небезпеки та збереження здоров'я і техніки, необхідно дотримуватись наступних правил:

- Не користуватись легкозаймистими матеріалами;
- Обмежити використання пальних речовин у приміщенні;
- Користуватись лише справними розетками;
- Проводити досліди у приміщенні, що відповідає її категорії вогнестійкості за сніп 2.01.02-85;

- Не перевантажувати кабелі живлення та не перевантажувати електромережу;

- Зберігати робоче місце в чистоті.

Для попередження електричної небезпеки, необхідно слідувати наступним правилам:

- Не палити на робочому місці;
- Дотримуватись засобів і вимог щодо пожежогасіння;
- Своєчасно перевіряти електричне та інше устаткування;
- Дотримуватись вимог пожежної безпеки на робочому місці;
- Слідувати правилам експлуатації і технологічним нормам;

- Не користуватись довгий час відкритим вогнем;
- Регулярно повторювати та оновлювати інструкції, доводити їх до колег;
- Регулярно проводити практичні заняття з техніки безпеки;
- Мати пожежну сигналізацію (приймальну станцію руоп-1, датчик кі-1).

В разі потреби гасіння ввімкнених електромереж, використовують порошкові вогнегасники з речовинами опс-10 і оппс-100.

У приміщенні на відстані 30 м один від одного встановлені пожежні гідранти з рукавами по 10 м. Відстані до пожежних евакуиходів – 35 м, кількість виходів – 3.

Ширина прорізу для дверей евакуиходів – 2,5 м згідно із сніп 2.09.02-85.

Дотримання всіх вищезазначених правил зменшить ризик виникнення електронебезпеки.

### **Промислове освітлення**

Освітлення, що відповідає встановленим стандартам, грає важливу роль для безпечної роботи та експлуатації експериментальної установки. Якщо робоче місце буде погано освітлене, то виникає великий ризик отримати виробничу травму.

В приміщенні фактичне освітлення складає 100 лк. Цього недостатньо для безпечної роботи. Тому згідно сніп іі-4-79 забезпечуємо освітленість не менше 160 лк. Реалізація цього вимагає розрахунку пристрою освітлення, який забезпечить виконання нормативної величини освітлення.

Розрахунок освітлення виконуємо методом коефіцієнта використання світлового потоку.

Вихідні дані:

- Кількість світильників у приміщенні  $n = 2$ ;
- Кількість ламп у світильнику  $n = 1$ ;
- Коефіцієнт запасу  $k_{\text{з}} = 1,3$ ;

- Коефіцієнт використання світлового потоку  $\eta = 0,18$ .

Коефіцієнт нерівномірності освітлення:  $z = 1,1$ ; світловий потік для ламп типу дрл 125: = 5600 лм.

Фактична перерахована освітленість визначається за формулою:

$$E = \frac{N \cdot \Phi_{\text{л}} \cdot \eta}{S \cdot k_{\text{з}} \cdot z} = \frac{2 \cdot 5600 \cdot 0,18}{6 \cdot 1,3 \cdot 1,1} = 234 \text{ лк,}$$

де  $s$  - площа приміщення,  $\text{м}^2$ .

оскільки фактична перерахована освітленість на об'єкті – 234 лк, то робимо висновок про те, що штучне освітлення відповідає сніп іі-4-79.

## ВИСНОВОК

Проаналізовано конструкції барабанних змішувачів;

Обрано систему для реалізації імітаційного моделювання процесу руху сипкого матеріалу за допомогою програмного комплексу edem;

Проведене імітаційне моделювання засобами програми edem дає можливість визначати траєкторію руху сипких матеріалів в обертових барабанних апаратах;

За результатами моделювання отримано: кут обвалення матеріалу; розподіл дистанції пройденої частками; кількість контактів між частками; розподіл кількості часточок за швидкістю; проекції швидкості часток на вісі  $x$ ,  $y$  та  $z$  у часі; абсолютна швидкість часток у середині барабана; кутова швидкість часток; сила що діє на частки. Серед механічних параметрів барабанного змішувача також визначено крутний момент що виникає на його корпусі та тиск на його внутрішній поверхні;

Отримані результати дають можливість аналізувати режими руху сипкої сировини та встановлювати залежність між параметрами установки та матеріалом. Дана інформація буде корисною для проектування змішувачів для приготування таблетмаси та котлів для нанесення покриттів на таблетки.

## Література

1. Баранов Д.А. Процессы и аппараты химической технологии. – СПб.: Лань, 2016. – 408 с.
2. Игнатович Э. Химическая техника. Процессы и аппараты. – М.: Техносфера, 2007. – 656 с.
3. Меньшутина Н.В. Инновационные технологии и оборудование фармацевтического производства. – Т.2. – М.: БИНОМ, 2013. – 480 с.
4. Мікульонок І.О. Механічні, гідромеханічні й масообмінні процеси та обладнання хімічної технології. – К.: ІВЦ «Політехніка», 2002. – 304 с.
5. Першин В.Ф., Однолько В.Г., Першина С.В. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа. – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с.
6. Селиванов Ю.Т. Исследование влияния осевого движения на процесс непрерывного смешивания сыпучего материала во вращающемся барабане /Ю.Т.Селиванов, В.Ф. Першин// Известия вузов. Химия и химическая технология. -2003. -Т. 46, вып. 7.- С. 42-45.
7. Yong Xu, Chunhui Xu, Zhe Zhou. 2D DEM simulation of particle mixing in rotating drum: A parametric study // Particuology. 2010. V.8. P. 141–149.
8. Xiao Yan Liua, Spechta E., Mellmann J. Experimental study of the lower and upper angles of repose of granular materials in rotating drums // Powder Technology. 2005. V. 154. P. 125–131.
9. Jian-Ping Pan, Ting-Jie Wang, Jun-Jie Yao, Yong Jin. Granule transport and mean residence time in horizontal drum with inclined flights // Powder Technology. 2006. V. 162. P. 50 — 58.
10. EDEM Help Manual // Электронное пособие для работы с программным продуктом *EDEM*.
11. Селиванов, Ю.Т. Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств / Ю.Т. Селиванов, В.Ф. Першин. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 120 с.

12. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, С.Ю. Арутюнов. – М.: Наука, 1985. – 440 с.
13. Bridgwater J. Mixing of particles and powders: Where next? / J. Bridgwater//Particuology. – 2010. – Vol. 8. – p. 563-567.
14. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. / А.Г. Касаткин - М.: Химия, 1971. - 784с.
15. Макаров Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. – М.: Машиностроение. – 1973. –216 с.
16. Богданов В.С. Разработка SCADA-системы для управления планетарным смесителем / Богданов В.С., Семернин А.Н., Анциферов С.И., Колесник В.А.//Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. - № 1. – 292 с.
17. Маликов, Р.Ф. Практикум по дискретно-событийному моделированию сложных систем / Р.Ф. Маликов. – Уфа: Изд-во БГПУ, 2017. – 273 с.