

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

В. В. Стаценко, О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла, В. І. Ліщук

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
РУХУ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ
В ЗМІШУВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ
МЕТОДОМ ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Монографія

Київ
2021

УДК 621-5:678.7.05

C78

Рецензенти:

Шевченко К. Л. – д-р техн. наук, проф., професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»;

Щербань Ю. Ю. – д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, заступник директора Київського фахового коледжу прикладних наук;

Кулік Т. І. – д-р техн. наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну.

Рекомендовано Вченою радою Київського національного університету технологій та дизайну
(протокол № 3 від 27 жовтня 2021)

C78 Математичне моделювання руху сипких матеріалів в змішувальних комплексах методом дискретних елементів : моногр. / Стаценко В. В., Бурмістенков О. П., Біла Т. Я., Ліщук В. І. Київ : КНУТД, 2021. 224 с.
ISBN 978-617-7506-90-3

Монографія присвячена дослідженню руху сипких матеріалів методом дискретних елементів в змішувальних комплексах безперервної дії. Викладені результати аналітичних та експериментальних досліджень, визначено характер руху сипких матеріалів в різних елементах змішувальних комплексів. Виконана оцінка якості процесу змішування.

Монографія розрахована на студентів та аспірантів ЗВО та може бути корисною науковцям та інженерно-технічним працівникам, які займаються конструюванням змішувального обладнання.

УДК 621-5:678.7.05

ISBN 978-617-7506-90-3

© В. В. Стаценко, О. П. Бурмістенков,
Т. Я. Біла, В. І. Ліщук, 2021
© КНУТД, 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
1. СТРУКТУРА ЗМІШУВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ ТА ВЛАСТИВОСТІ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ	7
1.1. Структура змішувальних комплексів безперервної дії.....	7
1.2. Фізико-механічні властивості сипких матеріалів.....	9
2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ОБЛАДНАННІ.....	16
3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА В ЕЛЕМЕНТАХ ЗМІШУВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	24
3.1. Основні положення.....	24
3.2. Математичне моделювання руху сипкого середовища в бункерних пристроях	31
3.3. Дослідження руху сипкого матеріалу у живильниках методом дискретних елементів	60
3.4. Дослідження руху частинок у системі «бункер – тарілчастий живильник» методом дискретних елементів	72
3.5. Дослідження руху матеріалу у відцентровому змішувачі безперервної дії	92
4. ПОРІВНЯННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА ЗА РІЗНИМИ МЕТОДАМИ ТА ОЦІНКА ОДНОРІДНОСТІ СУМІШІ....	118
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ СИПКИХ СЕРЕДОВИЩ У ЗМІШУВАЛЬНОМУ КОМПЛЕКСІ	128
5.1. Конструкція стенду для експериментальних досліджень та вимірювальні засоби	128
5.2. Дослідження точності системи вимірювання маси сипкого матеріалу	137
5.3. Дослідження процесу витікання сипких матеріалів з бункерів	141

5.4. Дослідження руху сипкого матеріалу у бункерах, що мають змінний кут нахилу бічної стінки.....	150
5.5. Дослідження системи керування положенням ножа тарілчастого живильника	154
6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ЧАСТИНКИ У КОНІЧНОМУ РОТОРІ.....	172
7. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЗМІШУВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ	179
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	187
ДОДАТКИ.....	205
Додаток А.....	206
Додаток Б	219
Додаток В.....	220
Додаток Г	221
Додаток Д.....	222
Додаток Ж	223

ПЕРЕДМОВА

Сипкі матеріали знаходять широке застосування в легкій, харчовій хімічній, фармацевтичній та інших галузях промисловості. Значна кількість виробів легкої промисловості виготовляється на основі полімерних матеріалів з додаванням барвників, наповнювачів, пластифікаторів, які постачаються у гранульованому або порошкоподібному стані [49, 74, 87, 93, 107, 111, 113, 120]. До таких виробів відносяться штучна шкіра, плівкові матеріали, підшві, каблучки, набійки, задники, геленки, рантьє, фурнітура, колодки, упаковки, тощо.

Для виробництва використовують багатостадійні технологічні процеси, що включають дозування складових компонентів [115, 122, 147], їх перемішування, плавлення та подання у формоутворюючі пристрої. Якість кінцевого виробу визначається точністю виконання кожної з технологічних операцій.

Використання багатокомпонентних сумішей дозволяє отримати вироби із заданими фізико-механічними та споживчими властивостями [118]. Їх виготовлення здійснюється у змішувальних комплексах, конструкції яких визначаються вимогами виробництва та фізико-механічними властивостями компонентів. Сипкі матеріали мають різний гранулометричний склад: від порошків до гранул діаметром до 8 мм. Процентний вміст компонентів в композиціях варіюється від десятих одиниць відсотка до десятка відсотків, але незалежно від їх співвідношення основною вимогою до композиції є її однорідність, тобто рівномірне розподілення компонентів в готовій суміші. Розроблення математичних моделей динаміки сипкого середовища дозволить оцінити характер руху частинок різних компонентів в залежності від гранулометричного складу, способу завантаження, конструкції змішувача та швидкостей руху робочих органів. Це створює умови для проектування

змішувачів з параметрами близькими до оптимальних, що визначає актуальність проведення подібних досліджень.

Складна природа руху сипких матеріалів, залежність їх властивостей від навколишнього середовища, схильність до утворення склепінь та грудок, зумовила створення сотень конструкцій відповідного технологічного обладнання, але задачі приготування високоякісних сумішей досі не вирішені в повному обсязі. Це зумовлює актуальність досліджень руху сипких матеріалів в елементах змішувального комплексу і на цій основі вдосконалення обладнання для приготування композицій з сипких матеріалів.

У монографії на основі методу дискретних елементів розроблено математичні моделі руху сипкого матеріалу в окремих ланках та у змішувальному комплексі безперервної дії в цілому, що дозволяє визначати швидкості та положення окремих частинок, вплив конструктивних і технологічних параметрів обладнання на траєкторії їх руху, визначати наявність розривів і застійних зон у потоках матеріалу.

Монографія містить результати аналітичних досліджень динаміки сипкого середовища методом дискретних елементів, що підтверджені експериментально. Дослідження дозволили оцінити та створити умови для прогнозування характеру руху сипкого середовища, передбачити можливе виникнення пульсацій і склепінь при проектуванні обладнання та керуванні процесом змішування.

Монографія призначена для інженерів-дослідників, аспірантів та здобувачів вищої освіти, а також може бути корисною науковцям, які спеціалізуються в галузях переробки полімерних матеріалів та механічної інженерії.

1. СТРУКТУРА ЗМІШУВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ ТА ВЛАСТИВОСТІ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Структура змішувальних комплексів безперервної дії

У монографії авторів [87] запропоновано ряд структурних схем змішувальних комплексів безперервної дії для приготування композицій з сипких матеріалів.

За своєю структурою всі змішувальні комплекси складаються з певної кількості ланцюжків пристроїв, за якими вхідні компоненти надходять в змішувач. Кожен ланцюжок складається з бункера для зберігання сипкого матеріалу, живильника та дозатора. Кількість ланцюжків визначається числом компонентів, що підлягають змішуванню за заданою рецептурою.

Під час дослідження змішувальних комплексів, як правило, розглядаються два ланцюжки з елементами певного типу, по яким рухаються потоки основного та ключового компонентів майбутньої суміші, та змішувач.

На рис. 1.1 представлена схема змішувального комплексу, до складу якого входять два бункера (основного та ключового компонентів), два живильника, два дозатора та відцентровий змішувач безперервної дії (ВЗБД).

Змішувач має корпус 2, кришку 5 з завантажувальним патрубком та вихідний патрубок 3. Всередині корпусу знаходяться турбулізатор 4, ротор 6, що виконаний у вигляді усіченого конуса, лопать 7 та вали приводу ротора та турбулізатора.

Сипкий матеріал через турбулізатор потрапляє у внутрішній простір ротора 6, де відбувається псевдозрідження матеріалу та його перемішування. Змішувальний ефект залежить від фізико-механічних параметрів частинок дисперсного матеріалу і швидкості їх руху. Подання компонентів суміші у змішувач з бункерів забезпечується за допомогою

живильників 10 і 14 та дозаторів 1. Режими роботи змішувача та дозаторів можна змінювати керуванням швидкістю обертання відповідних двигунів постійного струму 11, 12, 13.

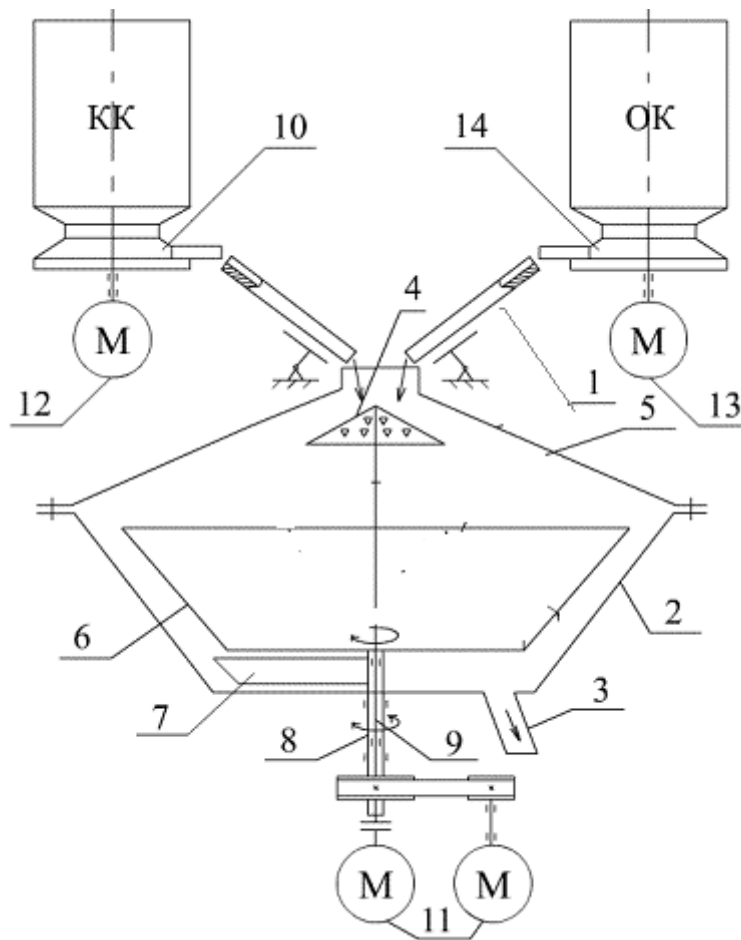


Рис. 1.1. Схема змішувального комплексу на основі ВЗБД

Змішувальний комплекс працює наступним чином. Живильники 10, 14 через завантажувальний патрубкок подають основний (ОК) та ключовий (КК) компоненти суміші через дозатор 1 у змішувач, де вони потрапляють у зону дії турбулізатора 4. Тут потік частинок розділяється на дві складові [63]. Частинок першої складової пролітають крізь отвори у турбулізаторі, що обертається із сталою швидкістю, і попадають всередину внутрішнього ротора 6. Частинок другої складової відбиваються від турбулізатора 4 на кришку корпусу, а від неї – у внутрішній ротор 6. Це призводить до

змінювання швидкості та напрямку руху окремих частинок і, відповідно, до турбулізації потоку суміші.

В зоні дії ротора 6, що обертається зі сталою швидкістю, частинки суміші під дією відцентрових сил починають підійматися вздовж його бічної стінки за спіральними траєкторіями. Напрямок та швидкість руху окремої частинки вздовж стінки ротора визначається її властивостями, швидкістю обертання ротора, а також взаємодією з сусідніми частинками. Напрямок руху потоків матеріалу, який безперервно поступає у ротор, відрізняється від напрямку руху частинок вздовж бічної стінки ротора, що призводить до виникнення додаткової турбулізації суміші та її розрідження. Частинки суміші, що попадають в ротор 6, за рахунок відцентрових сил підіймаються вздовж його бічної стінки, відбиваються від кришки корпусу 5 та під дією сили тяжіння падають на дно змішувача, звідки за допомогою лопаті 7 надходять у вихідний патрубок 3.

Схема на рис. 1.1 показує, що структурно агрегат для безперервного змішування сипких матеріалів складається з наступних елементів:

- накопичувального бункера;
- живильника;
- дозатора;
- змішувача.

Фізико-механічні властивості сипких матеріалів, конструктивні і технологічні параметри змішувального комплексу визначають характер їх руху, а отже і властивості отриманої суміші [81].

1.2. Фізико-механічні властивості сипких матеріалів

В залежності від розмірів і форми частинок сипкий матеріал може бути в пилоподібному, порошкоподібному, зернистому та кусковому станах. У промисловості широко застосовуються полівінілхлорид, полістирол, поліетилен високого та низького тиску, термоеластоласти, тощо [27, 92, 94,

95]. Усі ці матеріали постачаються на підприємства у вигляді гранул або порошку, тобто є сипкими матеріалами.

Під час вивчення процесу руху враховувались такі властивості сипкого матеріалу: насипна густина, вологість, плинність, кут природного укосу, абразивність, вибухонебезпечність, отруйність, змерзаємість, насипна густина тощо [48, 113, 149-152].

Гранулометричний склад

Гранулометричний склад сипкого матеріалу визначає кількісний розподіл частинок, що входять до його складу, за лінійними розмірами [36, 48, 110]. Оскільки більшість сипких матеріалів складається з частинок неправильної форми, для них визначають умовний діаметр d_i , який розраховується як середнє арифметичне або середнє геометричне значення розмірів частинок:

$$d_i = \frac{lbh}{3}; \quad d_i = \sqrt[3]{lbh}, \quad (1.1)$$

де l – довжина частинки;

b – ширина;

h – висота.

В залежності від розміру частинок сипкі матеріали поділяють на:

- кускові $d_{max} > 10$ мм;
- крупнозернисті $d_{max} = 2..10$ мм;
- дрібнозернисті $d_{max} = 0,5..2$ мм;
- порошкоподібні $d_{max} = 0,05..0,5$ мм;
- пиловидні $d_{max} < 0,05$ мм.

Визначення гранулометричного складу сипкого матеріалу здійснюють за допомогою методів прямого вимірювання, ситового аналізу, седиментаційного аналізу, фільтрації, розділення в полі відцентрових сил, електрокласифікації, фотоімпульсного, телевізійного та кондуктометричного.

Насипна густина

Насипною густиною або об'ємною масою сипкого матеріалу ρ_n називають масу матеріалу, що знаходиться в одиниці об'єму, який він займає. Насипна густина сипкого матеріалу залежить від розміру складових його частинок, їхньої середньої густини, вологості, щільності укладання частинок у шарі. Вона не залишається постійною навіть у стані спокою сипкого матеріалу.

Значення насипної густини використовують для визначення необхідного об'єму бункерів, змішувачів, при визначенні витрат енергії на перемішування сипкого матеріалу та інших розрахунках.

Насипна густина постійно змінюється, навіть якщо матеріал знаходиться у стані спокою. Під дією вібрації відбувається ущільнення матеріалу і насипна густина збільшується. Під час руху або змішування, навпаки, відбувається розпорошення і насипна густина зменшується.

Сипкі матеріали за величиною насипної густини поділяють на:

- дуже важкі $\rho_n > 2000 \text{ кг/м}^3$;
- важкі $\rho_n = 1100..2000 \text{ кг/м}^3$;
- середні $\rho_n = 600..1100 \text{ кг/м}^3$;
- легкі $\rho_n < 600 \text{ кг/м}^3$.

Вологість

Вологість сипких матеріалів впливає на багато їх властивостей: плинність, коефіцієнт внутрішнього тертя [116], скліпоутворення, густину тощо.

Зв'язок вологи з матеріалом може бути механічним, фізико-хімічним та хімічним. Волога, що знаходиться між частинками матеріалу та на їх поверхні, має механічний зв'язок з матеріалом. Фізико-хімічний зв'язок з матеріалом має та волога, що проникає в пори частинок за рахунок адсорбції або дифузії. Хімічно зв'язаною є волога гідратна або кристалізаційна.

Для характеристики кількості вологи, що міститься у твердих тілах, використовують два поняття: вологість та вологовміст. Під вологістю W_B

розуміють співвідношення маси вологи, що міститься у сипкому матеріалі, до маси вологого матеріалу:

$$W_B = \frac{G_B - G_C}{G_B} \quad (1.2)$$

де G_B та G_C – маса вологого та абсолютно сухого матеріалу, відповідно.

Під вологовмістом розуміють відношення маси вологи, що міститься у сипкому матеріалі, до маси абсолютно сухого матеріалу:

$$W_B = \frac{G_B - G_C}{G_C} \quad (1.3)$$

Методи визначення вологості можна поділити на прямі та непрямі. Прямі методи передбачають безпосереднє вимірювання маси вологи та маси сухого матеріалу. До таких методів відносяться: висушування, екстракційний, карбідний. Непрямі методи дозволяють визначати кількість вологи на основі вимірювання пов'язаних з нею величин. До цієї групи відносяться: електричні, механічні, оптичні, калориметричні та ультразвукові методи.

Плинність

Плинність сипких матеріалів характеризує їх здатність висипатися з тією чи іншою швидкістю з отворів. Вона залежить від гранулометричного складу матеріалу, форми і розміру частинок, коефіцієнта внутрішнього тертя, вологості тощо.

Чисельно плинність характеризується коефіцієнтом плинності K . Для експериментального визначення K використовують тарувальну воронку, в яку засипають заданий об'єм матеріалу та вимірюють час його витікання. Чим менше значення K , тим швидше рухається матеріал.

Кут природного укосу

Внаслідок сил тертя та зчеплення між частинками сипкий матеріал, на відміну від рідин, має різко обмежену рухливість і непропорційно передає тиск на дно та стінки ємності в залежності від висоти рівня завантаження.

Рухливість сипких матеріалів характеризується кутом природного укосу та коефіцієнтом внутрішнього тертя.

Кутом природного укосу називають кут α , утворений лінією природного нахилу (відвалу) сипкого матеріалу з горизонтальною площиною [117]. Величина кута природного укосу залежить від сил тертя, що виникають при переміщенні частинок сипкого матеріалу одна відносно одної, та сил зчеплення між ними. Кут α визначає рухливість сипкого матеріалу. Чим менше кут природного укосу та коефіцієнт внутрішнього тертя, тим рухливіший сипкий матеріал.

Поведінка сипкого матеріалу в технологічних процесах визначається його здатністю здійснювати опір змінюванню форми та об'єму. Характерною особливістю сипких матеріалів є рухомість частинок одна відносно одної та здатність пересуватись під дією зовнішньої сили.

Кут обвалення

Кут обвалення α_0 характеризує положення поверхні відкосу, що утворюється в результаті сповзання частини сипкого матеріалу. Кут обвалення завжди більше кута природного укосу.

Експериментально кути природного укосу та обвалення визначають наступними методами: насипанням із воронки на горизонтальну площину; висипанням з ємності при відкритті вікна; утворенням кратера при витіканні через отвір; перегортанням ємності, що частково засипана матеріалом; обертанням барабану [117].

При проведенні розрахунків сил тертя сипкого матеріалу о стінки бункера та робочі органи машин використовується коефіцієнт зовнішнього тертя сипкого матеріалу. Він характеризує опір сипкого матеріалу його руху по опорній поверхні.

Значення коефіцієнтів внутрішнього та зовнішнього тертя визначають за допомогою спеціальних зсувних пристроїв. Але динамічну поведінку сипкого матеріалу неможна оцінити за допомогою однієї характеристики. З цією метою використовують комплексні показники, що складаються із

сукупності фізико-механічних характеристик. У роботі [51] запропоновано комплексний показник зв'язаності, що характеризує здатність сипкого матеріалу утворювати стійки вертикальні відкоси:

$$h_c = \frac{4\tau_0 \cos \varphi}{g\rho_H (1 - \sin \varphi)} \quad (1.4)$$

В залежності від величини h_c всі сипкі матеріали поділяють на незв'язані, зв'язнотекучі та зв'язані.

Адгезія

Адгезією називають властивість частинок сипких матеріалів прилипати до твердих поверхонь. Величина адгезії зумовлена молекулярними, капілярними, кулонівськими та електричними силами.

В більшості випадків, адгезія створює негативний вплив на процеси дозування та змішування. Для зменшення її величини здійснюють певну обробку поверхні (шліфування, гідрофобізацію та інше) елементів обладнання, що контактують із сипким матеріалом.

Злежуваність (втрата сипкості)

При тривалому збереженні багато дрібнозернистих і порошкоподібних матеріалів здатні ущільнюватися, злежуватися, втрачаючи сипкість. Ущільнюється матеріал внаслідок перерозподілу частинок у шарі: дрібні частинки під впливом незначних вібрацій вклинюються в зазори між великими частинками. Це призводить до збільшення площі контакту між частинками і, як наслідок, до зростання сил адгезії частинок між собою.

Матеріал, що злежався, погано транспортується та висипається з отворів різних форм, а також може бути причиною поломки обертових частин обладнання.

Скліпоутворення

Скліпоутворення – формування стійкого затору над випускними отворами бункерних пристроїв.

У випадку руху крупнокускових матеріалів це явище виникає внаслідок випадкового розташування частинок у вигляді склепіння (арки) [108, 109, 131, 132].

Дрібнофракційні матеріали утворюють склепіння внаслідок зв'язаності частинок.

Поява склепінь негативно впливає на роботу дозувального обладнання, оскільки унеможлиблює рух матеріалу. Основними методами боротьби із склепіннями є збільшення розмірів випускних отворів та введення механічних пристроїв, що забезпечують руйнування склепінь.

Під час вибору змішувача і переробного обладнання найбільш важливе значення мають насипна густина сипких матеріалів та кут природного укосу [73, 133, 152].

2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ОБЛАДНАННІ

Рух сипких середовищ, таких як порошкоподібні та гранульовані матеріали, різноманітний і залежить від умов навантаження. Середовище може рухатись подібно рідини, залишатися в спокої за наявності напружень подібно твердому тілу, вести себе подібно газу при високій інтенсивності впливу. Таку різноманітність можна пояснити тим, що сипке середовище складається з частинок макроскопічного розміру, де мається на увазі нехтування тепловим рухом. В цьому випадку між частинками діють неконсервативні контактні сили, тому сипке середовище швидко дисипує енергію. Отже методами статистичної механіки [128], які передбачають збереження енергії, можна знехтувати. Фізичні стани сипких середовищ, які визначають їх динамічні властивості, створюють значний вплив на проектування і конструювання обладнання, визначають його продуктивність та якість кінцевої продукції.

Дослідження руху сипких матеріалів в середині технологічного обладнання є важливою складовою процесу його проектування. Створення математичних моделей руху частинок [51, 52, 101, 138], їх взаємодії із робочими органами обладнання, впливу на ці процеси параметрів зовнішнього середовища дозволяють суттєво спростити та прискорити розробку нового обладнання.

Водночас, фізико-механічні властивості сипких матеріалів змінюються у широких діапазонах і залежать від вологості та температури навколишнього середовища. Це значно ускладнює створення узагальнених математичних моделей динаміки сипких матеріалів як для окремих ланок, так і для змішувального комплексу в цілому.

В даний час для дослідження руху сипких матеріалів використовуються різноманітні методи, які були розроблені для

моделювання руху речовин у рідкому, квазірідкому та газоподібному станах [53, 76, 114].

Сучасні змішувальні комплекси складаються з декількох ланок (бункерів, дозаторів, змішувача) характер руху частинок в яких суттєво відрізняється. Тому при розробці математичних моделей комплекс та його окремі ланки розділюють на зони, рух матеріалу в яких можна описати з використанням відомих моделей. До них відносяться моделі, що використовуються під час дослідження механіки руху суцільних середовищ. Узагальнено їх називають моделями структури потоку [75, 114].

Модель ідеального витискання передбачає поршневе переміщення матеріалу вздовж апарату без перемішування частинок. У напрямках, що перпендикулярні до напрямку руху, компоненти вважаються розподіленими рівномірно. Диференціальне рівняння моделі ідеального витискання має вигляд:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -W \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (2.1)$$

де c – концентрація ключового компонента;

t – час;

W – лінійна швидкість потоку;

x – координата, вздовж якої рухається матеріал.

Модель ідеального змішування застосовується для процесів, за яких частинки рівномірно розповсюджуються у всьому об'ємі апарату, та описується наступним диференціальним рівнянням:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{Q}{V} (c_{вх} - c_{вих}), \quad (2.2)$$

де V – внутрішній об'єм апарата;

Q – об'ємна продуктивність на вході в апарат;

$c_{вх}$, $c_{вих}$ – концентрації ключового компонента на вході та виході з апарата, відповідно.

Дифузійна модель включає поршневий рух матеріалу із повздовжнім та поперечним перемішуванням компонентів. Диференціальне рівняння, що характеризує зміну концентрації компонентів суміші, для такої моделі має вигляд:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -W \frac{\partial c}{\partial x} - \bar{D}_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\bar{D}_R}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial c}{\partial R} \right), \quad (2.3)$$

де \bar{D}_L та \bar{D}_R – коефіцієнти повздовжнього та поперечного змішування, відповідно (аналогі коефіцієнтів дифузії);

R – радіус поперечного перерізу потоку.

Характерною особливістю змішувального обладнання є наявність робочих органів, які забезпечують розділення потоків сипких матеріалів та хаотизацію руху окремих частинок. Математичні моделі структури потоку для такого обладнання дозволяють лише наближено оцінити характер реального процесу, оскільки не враховують особливостей реального фізико-механічного процесу взаємодії частинок між собою та з елементами обладнання [77, 119, 123].

Це зумовило широке використання **регресійних моделей**. Розроблення таких моделей ґрунтується на результатах експериментальних досліджень змішувальних комплексів та їх окремих ланок і передбачає виконання наступних кроків:

1) Встановлення факторів, що впливають на процес руху матеріалу, та діапазонів їх варіювання. В якості факторів обирають конструктивні та технологічні параметри обладнання і фізико-механічні властивості частинок.

2) Визначення функції відгуку. В більшості випадків в якості цієї функції використовують один із критеріїв якості суміші.

3) Проведення експериментальних досліджень.

4) Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії та перевірка адекватності отриманої моделі.

Регресійні моделі забезпечують високу точність прогнозування якості суміші лише для обладнання, на якому проводились експериментальні дослідження, і в межах обраних діапазонів варіювання параметрів. Використати їх для інших конструкцій практично неможливо, оскільки вони не враховують природи фізико-механічних процесів, що відбуваються під час роботи пристроїв. Це значно ускладнює застосування таких моделей при конструюванні змішувальних комплексів, оскільки кожен варіант конструкції потребує виготовлення дослідного зразка.

До загальних недоліків розглянутих моделей слід віднести відсутність можливості аналізу явищ, що виникають під час руху сипких матеріалів та мають ймовірнісний характер [83], а саме: формування грудок матеріалу, утворення склепінь, виникнення розривів та пульсацій у потоках частинок [140]. Моделювання цих явищ є особливо важливим для дослідження роботи змішувальних комплексів безперервної дії. В таких випадках корисні чисельні методи, зокрема, **метод дискретних елементів** (МДЕ).

МДЕ ґрунтується на законах класичної механіки, які застосовуються для розрахунку руху великої кількості частинок [5, 7-9, 20, 28-34, 98, 137].

Побудова моделі МДЕ починається із створення 3D моделі обладнання, визначення початкових координат частинок, їх швидкості, розмірів та фізико-механічних властивостей. Далі для кожної з частинок складають рівняння сил та моментів, які в загальному випадку мають вигляд:

$$m \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{i=1, i \neq j}^N F_{ij} + m_i g, \quad (2.4)$$

$$I_i \frac{d^2 \theta_i}{dt^2} = \sum_{i=1, i \neq j}^N M_{ij}, \quad (2.5)$$

де t – час;

m_i – маса частинки;

I_i – момент інерції частинки;

θ_i – кут повороту частинки;

M_{ij} – моменти сил, що діють між частинками;

F_{ij} – сили, що діють на частинку збоку інших частинок та об'єктів.

Розрахунки переміщення частинок здійснюються через задані проміжки часу, при цьому враховуються взаємодія частинок між собою та з елементами конструкції обладнання.

Перевагами даного методу є наявність інформації про швидкість і положення окремих частинок та можливість моделювати розриви та пульсації у потоках матеріалу. Також перевагою є те, що МДЕ не потребує створення фізичної моделі обладнання. Водночас, метод потребує значних обчислювальних ресурсів [13, 14]. Дослідження кожної з конструкцій обладнання має здійснюватися окремо.

Чисельні методи також використовують для розв'язку математичних моделей, які описують рух окремих частинок сипкого середовища в полі дії механічних сил (відцентрових, сил тертя, гравітаційних, тощо), що виникають під час їх руху в робочому просторі технологічного обладнання, та представлені у вигляді *диференційних та інтегральних рівнянь*.

Наприклад, математична модель у вигляді системи диференційних рівнянь, що описує рух частинки вздовж поверхні диску, який обертається з постійною кутовою швидкістю навколо вертикальної осі, має вигляд [25, 64]:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V_x \\ \frac{dV_x}{dt} = x \cdot \omega^2 + 2V_y \omega - kV_x \\ \frac{dy}{dt} = V_y \\ \frac{dV_y}{dt} = y \cdot \omega^2 - 2V_x \omega - kV_y \end{cases}, \quad (2.6)$$

де x, y – координати частинки, м;

t – час, с;

V_x, V_y – складові швидкості руху частинки, м/с, вздовж осей x, y , відповідно;

ω – кутова швидкість обертання диску, рад/с;

$$k = \frac{k_m \cdot g}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}}; \quad (2.7)$$

k_m – коефіцієнт тертя частинки о поверхню диску;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Система диференціальних рівнянь (2.6) представлена у вигляді, придатному для розв'язку чисельними методами, та може використовуватись для дослідження руху частинки, наприклад, по поверхні основи конічного ротора змішувачів.

Ще одним прикладом може бути математична модель, яка описує рух частинки по бічній поверхні ротора відцентрових змішувачів безперервної дії. В даному випадку система диференціальних рівнянь має вигляд [143]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = V_x \\ \frac{dV_x}{dt} = x \cdot \omega^2 + 2V_y \omega - kV_x a_{Nx} + a_{Nx} \\ \frac{dy}{dt} = V_y \\ \frac{dV_y}{dt} = y \cdot \omega^2 - 2V_x \omega - kV_y a_{Ny} + a_{Ny} \\ \frac{dz}{dt} = V_z \\ \frac{dV_z}{dt} = -g + (|F| \cos \alpha + g \sin \alpha) \sin \alpha - (|F| \cos \alpha + g \sin \alpha) k \cos \alpha \end{array} \right. \quad (2.8)$$

де x, y, z – координати частинки, м;

V_x, V_y, V_z – складові швидкості руху частинки, м/с, вздовж осей x, y, z , відповідно;

ω – кутова швидкість обертання ротора, рад/с;

α – половина кута розтрубу ротора, рад;

a_{Nx}, a_{Ny} – складові прискорення, м/с², що створюється силою реакції поверхні ротора, вздовж осей x та y , відповідно;

F – векторна сума сил, що діють на частинку, Н.

Початкові умови для розв'язку системи рівнянь (2.8) чисельними методами можна визначити з розв'язку системи (2.6). Вона дозволяє врахувати швидкість та напрям руху частинки перед її потраплянням на бічну поверхню.

Моделі, розглянуті вище, досить добре відображають рух рідких і квазірідких середовищ, тому широко застосовуються в практиці проектування технологічних процесів, де використовуються сипкі матеріали.

Представлені в монографії результати досліджень динаміки сипких середовищ показали, що на їх рух створюють значний вплив наступні фактори:

- фізико-механічні властивості сипкого середовища;

- сили, що визначають взаємодію частинок між собою;
- сили, що визначають взаємодію частинок під час їх руху зі стінками елементів змішувального комплексу.

Перераховані фактори, що визначають рух сипкого середовища в елементах змішувального комплексу, досить повно враховуються в математичних моделях, що побудовані на основі методу дискретних елементів.

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА В ЕЛЕМЕНТАХ ЗМІШУВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1. Основні положення

Методом дискретних елементів (МДЕ) називається група чисельних методів, що призначені для дослідження та моделювання руху великої кількості частинок [7, 10, 12, 98], до яких відносяться гранули полімерних матеріалів, піщинки, галька, молекули, тощо.

Вперше метод був застосований П. Канделом у 1971 році для дослідження руху гірських порід. У 1985 році Д.Вільямс, Г. Гокін та Г. Мастоу показали, що МДЕ є узагальненням методу кінцевих елементів.

МДЕ іноді називають молекулярною динамікою, але сфера застосування МДЕ ширша ніж дослідження руху молекул, оскільки він може застосовуватись для дослідження руху частинок, що мають несферичну поверхню.

Існують модифікації МДЕ, до яких відносяться: метод окремих елементів, узагальнений метод дискретного елемента, дискретний деформаційний аналіз та метод кінцевих елементів [12, 17, 35, 43, 98].

На сьогоднішній час МДЕ застосовується для проведення досліджень у фармацевтичній, хімічній, сільськогосподарській, нафтогазовій, гірничодобувній та інших галузях промисловості [1, 3, 4, 42].

Оскільки метод передбачає велику кількість розрахунків, моделювання здійснюється із використанням обчислювальної техніки [13, 14, 38].

МДЕ ґрунтується на припущенні, що сипкий матеріал складається з дискретних частинок, які можуть мати різні властивості та форму

поверхні. З метою зменшення кількості обчислень частинки складної форми моделюються як сукупність сфер різного діаметру. На рис. 3.1, а, б, в показані моделі частинок, що складаються з трьох, чотирьох та п'яти сфер.

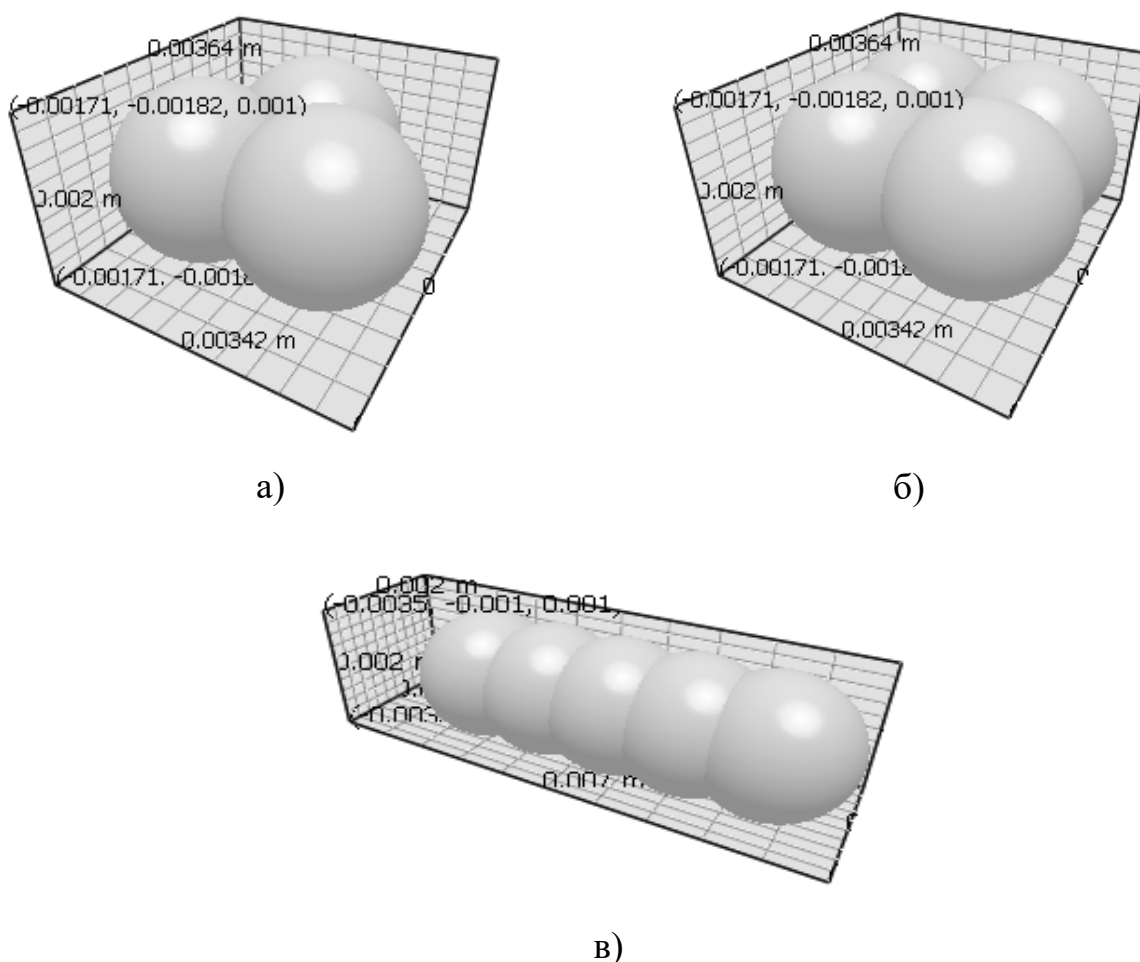


Рис. 3.1. Моделі форм частинок:

а – трикутної; б – квадратної; в - циліндричної

Підвищення точності моделювання форми реальних частинок досягається за рахунок введення сфер меншого радіусу, що дозволяє отримати форму близьку до плоских граней. Але це призводить до збільшення тривалості розрахунків, оскільки проміжок часу, через який

визначаються положення частинок, залежить від радіусу найменшої частинки [2, 15].

МДЕ дозволяє здійснити моделювання руху частинок матеріалу, який зумовлений впливом гравітаційних та Кулонівських сил, та сил, що виникають внаслідок дії робочих органів обладнання на матеріал.

Вхідними параметрами для процесу моделювання є початкові умови: положення $(x_i; y_i; z_i)$, лінійні $(v_{xi}; v_{yi}; v_{zi})$ та кутові $(\omega_{xi}; \omega_{yi}; \omega_{zi})$ швидкості всіх частинок. Також задаються положення та параметри руху робочих органів обладнання, що взаємодіє із матеріалом.

Процес моделювання є ітераційним. Перед його початком визначається крок моделювання Δt . Існує декілька критеріїв, за якими визначається величина Δt , але найчастіше застосовується критерій Релея [22, 23]:

$$\Delta t = \frac{\pi R}{0.163\nu + 0.87766} \sqrt{\frac{\rho}{G}}, \quad (3.1)$$

де R , ρ , G , ν – радіус, густина, модуль зсуву та коефіцієнт Пуассона частинки [125], відповідно.

На початку кожної ітерації на основі законів класичної механіки визначається сумарна величина сил, що діють на кожну з частинок, та їх моменти інерції за диференціальними рівняннями (2.4) та (2.5), відповідно.

Суму сил F_i , що діють на частинку, можна представити сукупністю сил, які діють збоку інших частинок F_{ij} , та сили тяжіння:

$$F_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{ij} + m_i g. \quad (3.2)$$

Аналогічне співвідношення можна записати для моменту:

$$M_i = \sum_{i=1, i \neq j}^N M_{ij} = \sum_{i=1, i \neq j}^N (x_i - x_j) F_{ij}. \quad (3.3)$$

Схематично кроки розрахунку МДЕ показані на рис. 3.2. Перші два кроки демонструють взаємодію частинок між собою, а третій – з поверхнею обладнання.

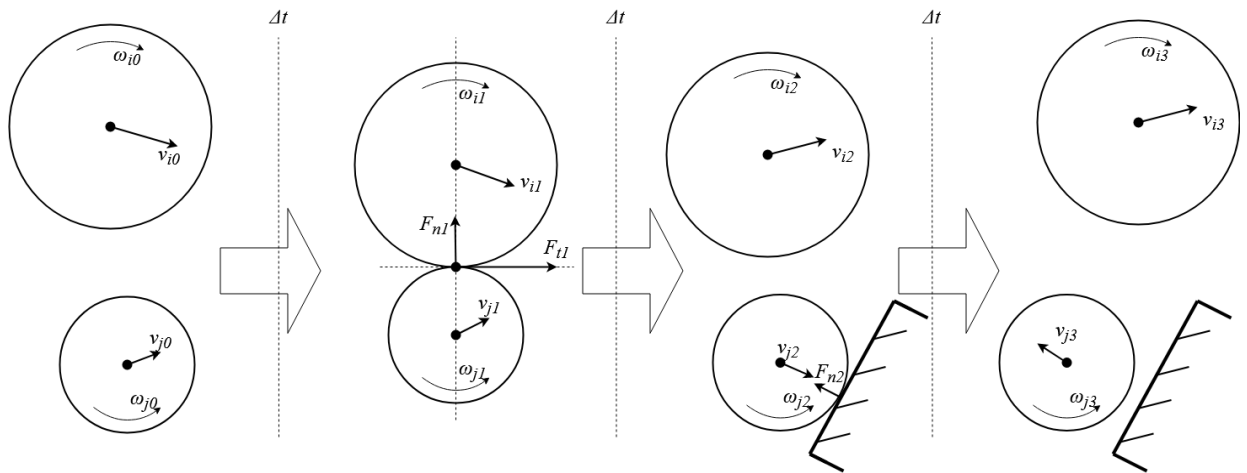


Рис. 3.2. Розрахунок переміщення частинок методом дискретних елементів

На кожному кроці здійснюється розрахунок положення частинок і перевіряється можливість взаємодій частинок з елементами обладнання та між собою. За наявності таких взаємодій розраховуються величини тангенціальних та нормальних сил, і обчислюються нові вектори швидкостей руху частинок. На їх основі розраховуються положення частинок на наступному кроці моделювання (через час Δt). Далі цикл розрахунку повторюється.

Розглянемо детальніше алгоритм визначення взаємодій частинок. Сили F_{ij} складаються із сил відштовхування та сил тертя, які можна розкласти на нормальні (діють вздовж радіуса частинки) та тангенціальні

(спрямовані перпендикулярно радіусу). Схематично дія цих сил показана на рис. 3.3.

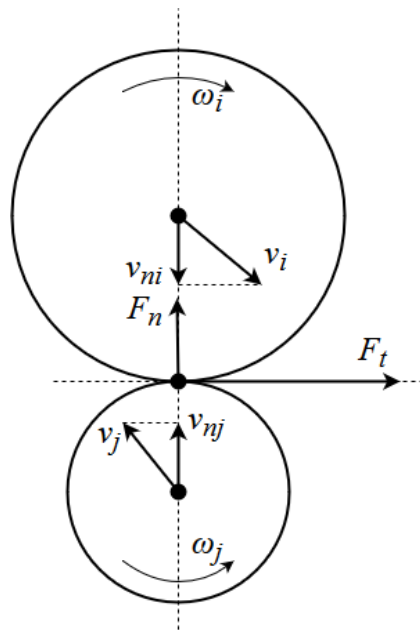


Рис. 3.3. Сили, що діють під час контакту частинок

За другим законом Ньютона на основі визначених сил та відомих початкових швидкостей розраховуються положення та швидкості всіх частинок через проміжок часу Δt :

$$x_i = x_{0i} + v_{xi}\Delta t + \frac{F_{xi}}{m_i} \cdot \frac{\Delta t^2}{2}, \quad (3.4)$$

$$y_i = y_{0i} + v_{yi}\Delta t + \frac{F_{yi}}{m_i} \cdot \frac{\Delta t^2}{2}, \quad (3.5)$$

$$z_i = z_{0i} + v_{zi}\Delta t + \frac{F_{zi}}{m_i} \cdot \frac{\Delta t^2}{2}, \quad (3.6)$$

де F_{xi} , F_{yi} , F_{zi} – складові суми сил, що діють на i -ту частинку вздовж осей x , y , z , відповідно.

Після визначення нового положення частинок розраховуються можливі перетини частинок між собою та з оточуючими об'єктами. Величини цих перетинів δ (рис. 3.4) використовуються в якості вхідних

параметрів для визначення нормальних складових сил, що діють на частинки. На кожній наступній ітерації всі кроки розрахунку повторюються.

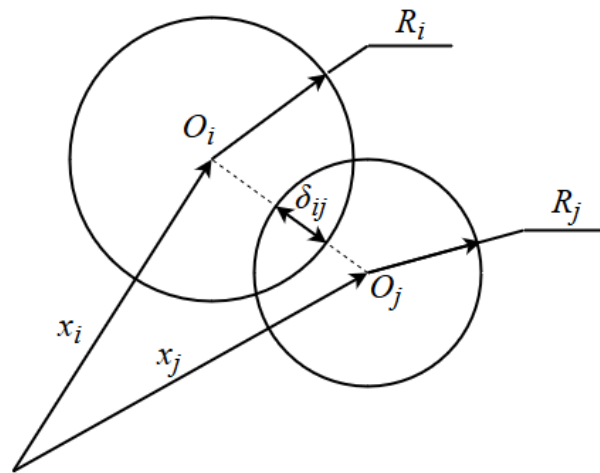


Рис. 3.4. Розташування частинок при їх взаємодії

Розрахунок нормальної складової сили авторами виконувався відповідно до контактної теорії Герца [8, 41]. Розрахунок тангенціальної складової сили – на основі роботи Мідліна-Дересієвіча [6, 8, 37]. Для обох складових сили розраховувались демпфуючі компоненти, що визначаються коефіцієнтами пружності [37, 39]. Тангенціальна сила тертя розраховувалась за законом Кулона, сила тертя кочення - виходячи з обертового моменту частинок.

Нормальна складова сили розраховувалась за формулою:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \delta_n^{\frac{2}{3}}, \quad (3.7)$$

де δ_n – «перекриття» частинок;

E^* – еквівалентне значення модуля Юнга:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_j^2)}{E_j}; \quad (3.8)$$

R^* – еквівалентне значення радіусу:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}; \quad (3.9)$$

$E_i, \nu_i, R_i, E_j, \nu_j, R_j$ – значення модулів Юнга, коефіцієнтів Пуассона та радіусів сфер (i – ої та j - ої частинок), між якими розраховується взаємодія.

Нормальна складова сили пружності визначалась за формулою:

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^*} v_n^{rel}, \quad (3.10)$$

де $m^* = \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j}\right)^{-1}$ – еквівалентна маса;

v_n^{rel} – нормальна складова відносної швидкості.

β та S_n (нормальна жорсткість) розраховуються за формулами:

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}, \quad (3.11)$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n}, \quad (3.12)$$

де e – коефіцієнт пружності.

Тангенціальна сила F_t розраховувалась виходячи з величин тангенціального перекриття δ_t та тангенціальної жорсткості S_t :

$$F_t = -S_t \delta_t, \quad (3.13)$$

де

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n}, \quad (3.14)$$

де G^* – еквівалентний модуль зсуву.

Тангенціальна складова сили пружності визначалась за формулою:

$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m^*} v_t^{rel}, \quad (3.15)$$

де $v_t^{\overline{rel}}$ – відносна тангенціальна швидкість.

Зазначимо, що тангенціальна сила обмежена величиною Кулонового тертя $\mu_s F_n$, де μ_s – коефіцієнт статичного тертя.

У випадках, коли необхідно враховувати силу тертя кочення, обчислення здійснювались з урахуванням величини крутного моменту поверхонь, що контактують:

$$t_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i, \quad (3.16)$$

де μ_r – коефіцієнт тертя кочення;

R_i – відстань від точки контакту до центру мас частинки;

ω_i – одиничний вектор кутової швидкості об'єкту в точці контакту.

Метод дискретних елементів використовується для моделювання руху широкого спектру сипких матеріалів із різними властивостями, формою та розмірами. Він дозволяє отримати координати, швидкості та сили, які діють на кожен з частинок (що в багатьох випадках неможливо визначити експериментально); розрахувати параметри руху окремо для кожної з частинок, тим самим моделює розриви у потоках матеріалу, утворення склепінь та інші явища, які неможливо математично описати за допомогою інших методів; дозволяє враховувати додаткові сили, що діють між частинками, наприклад, електростатичні.

3.2. Математичне моделювання руху сипкого середовища в бункерних пристроях

Бункерні пристрої являють собою жорсткі ємності, що призначені для зберігання сипких матеріалів та подання у наступні ланки змішувального комплексу. В більшості випадків наступною ланкою, яка встановлюється після бункера, є живильник або дозатор [121]. Як наслідок,

характер витікання сипкого матеріалу з бункера суттєво впливає на процес дозування [84, 85, 90, 91, 97].

В ідеальному випадку бункер має забезпечувати безперервний рух сипкого матеріалу з постійною швидкістю. Тобто масова та об'ємна продуктивності бункера мають бути сталими величинами. Але внаслідок дискретної природи матеріалу, особливостей взаємодії частинок між собою та їх фізико-механічних властивостей, під час руху сипкого матеріалу виникають такі проблеми як утворення склепінь та, як наслідок, появи розривів у потоці матеріалу, сегрегація матеріалу, неповне використання корисної ємності бункера.

Зазначені явища суттєво ускладнюють роботу дозувального обладнання та негативно впливають на якість кінцевого продукту.

Бункерні пристрої мають забезпечити певні вимоги до потоку сипкого матеріалу на виході:

- безперервність потоку та рівномірність його витікання;
- постійне значення масової та об'ємної продуктивності за умови сталого розміру вихідного отвору;
- постійну густину матеріалу на виході бункера;
- відсутність «мертвих зон»;
- заданий час роботи без додаткового завантаження.

Для виконання цих вимог необхідно закласти в математичні моделі динаміки сипких матеріалів їх фізико-механічні властивості та характер взаємодії зі стінками бункера.

Етапи проектування бункерного обладнання та побудови математичних моделей руху сипких матеріалів в ньому можна сформулювати у наступній послідовності:

- визначення необхідної ємності бункера, що залежить від заданого часу роботи без додаткового завантаження $T_{\bar{o}}$ та продуктивності Q :

$$V_{\bar{o}} = f(Q, T_{\bar{o}}) \quad (3.17)$$

- вибір форми бункера з урахуванням фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу;
- розрахунок геометричних параметрів бункера з урахуванням злежуваності сипкого матеріалу та ймовірності виникнення склепінь;
- виконання перевірочних розрахунків і моделювання витікання сипкого матеріалу з випускної воронки бункера.

В даний час в промисловості використовуються бункери різноманітних геометричних форм (табл. 3.1).

Найбільше розповсюдження у різноманітних галузях промисловості отримали бункери, що складаються з двох частин: верхньої, що являє собою призму або циліндр, та нижньої – воронки у вигляді конуса, призми або напівсфери.

Прямокутні бункери з одним випускним отвором являють собою вертикальну призму, нижня частина (воронка) якої виконана у вигляді усіченої піраміди. виготовлення такого бункера є відносно простим і виконується з плоских та лінійних елементів. Такі бункери раціонально використовують простір всередині промислових об'єктів. До недоліків цієї конструкції відносяться:

- виникнення застійних зон у місцях перетину суміжних стінок, особливо в пірамідальній частині;
- різний характер руху матеріалу вздовж бічної стінки внаслідок зміни відстані від бічної стінки до випускного отвору.

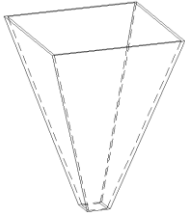
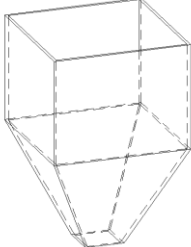
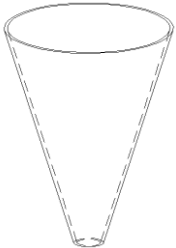
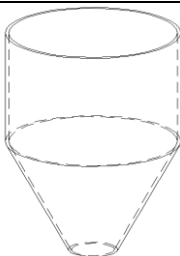
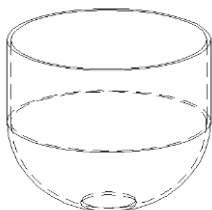
Для підвищення ефективності пірамідальних бункерів необхідні розрахунки оптимальних значень розміру випускного отвору та кута нахилу стінок воронки.

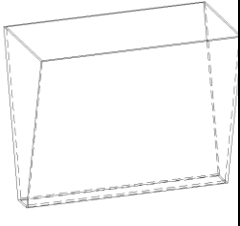
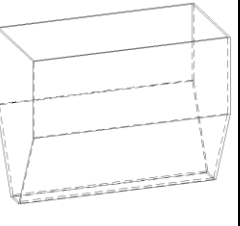
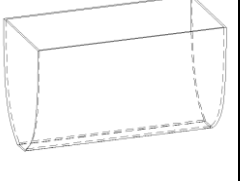
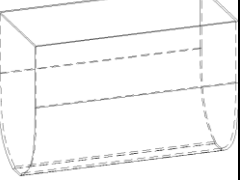
Круглі бункери з конічною воронкою мають ряд переваг порівняно з прямокутними, тому що їх форма сприяє кращому вивантаженню дрібних матеріалів та матеріалів, що схильні до злежуваності. Відсутність двограних кутів та вертикальних ребер створює кращі умови для витікання сипких матеріалів. До недоліків круглих бункерів можна

віднести більшу складність їх виготовлення та менш ефективно використання простору всередині промислових об'єктів.

Таблиця 3.1

Конструкції бункерних пристроїв

Різновиди бункерів		Геометрична форма		Схематичне зображення
Тип	Група	Корпус	Випускна воронка	
1	2	3	4	5
Прямокутні	Пірамідальні	–	Піраміда	
	Комбіновані	Призма	Піраміда	
Круглі	Конічні	–	Конус	
	Циліндро-конічні	Циліндр	Конус	
	Циліндро-сферичні	Циліндр	Сфера	

1	2	3	4	5
Лоткові	Трапецеїдальні	–	Трапеція	
	Комбіновані трапецеїдальні	Призма	Трапеція	
	Параболічні	–	Парабола	
	Комбіновані параболічні	Призма	Парабола	

Лоткові бункери із щільним отвором використовуються для матеріалів із низькою сипкістю. Витікання матеріалу у таких бункерах відбувається по всій їх довжині. На практиці використовуються бункери із трапецеїдальною та параболічною формою випускної воронки. Бункери із параболічною формою випускної воронки мають більшу ємність, але умови витікання у них гірші ніж у бункерах із трапецеїдальною формою, оскільки на нижніх ділянках випускної воронки кут нахилу бічної стінки зменшується, що створює умови для зависання матеріалу.

Утворення склепінь

Зависання сипкого матеріалу – це один з різновидів припинення руху сипкого матеріалу, що зумовлений особливостями його переміщення та взаємодії частинок між собою та зі стінками бункера. Зависання матеріалу, що має низьку сипкість та високу в'язкість може відбуватись на похилих

та навіть вертикальних стінках бункерів, що свідчить про наявність значних сил зчеплення між частинками сипкого матеріалу та стінками бункера. Частинки налипають на стінки та спресовуються у нерухомий шар. В процесі експлуатації бункера товщина цього шару поступово збільшується внаслідок налипання на нього нових частинок.

На практиці зустрічаються випадки зависання матеріалів, що мають високу сипкість. Але це відбувається тільки на пологих або майже горизонтальних поверхнях бункерів, коли зовнішнє та внутрішнє тертя перешкоджає виходу частини матеріалу з бункера.

Утворення склепінь – це різновид зависання сипкого матеріалу в зоні випускного отвору бункера, коли при витіканні його над воронкою бункера виникають зависання, що тимчасово або постійно перешкоджають витіканню матеріалу.

Деякі сипкі матеріали мають схильність до утворення над випускним отвором стійких статичних склепінь, які мають таку міцність, що робить подальше витікання неможливим без додаткового фізичного впливу на матеріал. Ймовірність утворення таких склепінь залежить від вологості матеріалу, в'язкості, гранулометричного складу та інших фізико-механічних властивостей. Стійкі склепіння також можуть виникати внаслідок неправильного вибору бункера та випускного отвору (його розміру, форми або розташування). Утворення склепінь можливе навіть під час плину матеріалів з ідеальною сипкістю.

Статичні склепіння можуть виникати в процесі витікання сипкого матеріалу, якщо напруження, що виникають в матеріалі, не перевищують його міцності. Якщо тиск маси матеріалу перевищує силу зчеплення частинок, склепіння руйнується та починається рух частинок. Руйнування статичного склепіння пов'язане з переходом потенціальної енергії частинок в кінетичну.

Явище утворення склепінь ще не вивчено повністю. Відомо, що частота виникнення стабільного склепіння залежить від параметрів

ємності, властивостей та стану матеріалу (дисперсності, густини, сил зчеплення, форми, гранулометричного складу частинок, тощо), а також від технологічних причин. Вплив цих факторів складно теоретично передбачити. Утворення склепінь визначається випадковим просторовим розташуванням частинок, що опинились в певний момент часу безпосередньо над випускним отвором. Тривалість існування склепіння зумовлена положенням частинок в масиві склепіння та над ним, а також навантаженням на склепіння.

Можуть виникати два типи перешкод під час витікання сипкого матеріалу [96]: утворення склепінь (припинення витікання) та утворення перемичок, тобто обмеження витання частинок, внаслідок якого виникають імпульси у потоці матеріалу. Схематично ці перешкоди показано на рис. 3.5.

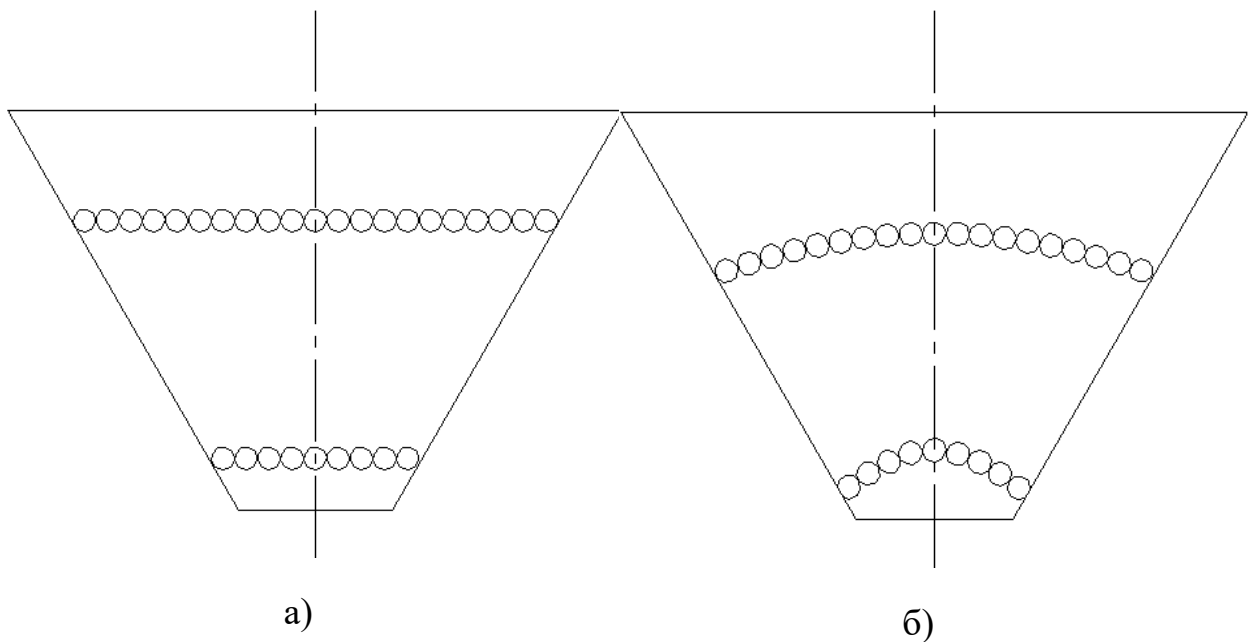


Рис. 3.5. Перешкоди руху сипкого матеріалу:

а – перемички; б – склепіння.

Під час руху сипкого матеріалу із бункера у випускну воронку з меншою площиною перерізу відбувається ущільнення потоку матеріалу та стискання частинок проміжного шару. В цих умовах частинки проміжного

шару, що розташовані за діаметром отвору, зчіплюються одна з одною та утворюють перемичку (рис. 3.5, а). Виникає додатковий опір руху, що перешкоджає звуженню потоку. Зі зменшенням перерізу бункера виникнення та руйнування перемичок стає безперервним фактором, підвищується їх міцність та стійкість.

Склепіння (рис. 3.5, б) природної рівноваги утворюють опір руху по всьому перерізу бункера, сприймаючи зусилля в його осьовому напрямку, та звуженню потоку практично не перешкоджають. Дослідниками, які займались проблемами утворення склепінь, встановлені деякі залежності, що характеризують цей процес.

Передусім на процес утворення склепінь впливають фізико-механічні властивості сипкого матеріалу, що можуть змінюватись під час його завантаження та зберігання в бункері, а також при витіканні з нього. Крім того, процес утворення склепінь залежить від геометричних параметрів бункера. Встановлено, що мінімальний розмір скліпоутворюючого отвору воронки бункера в першу чергу залежить від початкового опору зсуву сипкого матеріалу, причому ця величина залежить від ущільнюючого тиску. Вплив стискання сипкого матеріалу на характер витікання практично не враховується внаслідок відсутності залежності фізико-механічних властивостей матеріалу від його напруженого стану. Зміна хоча б однієї з фізико-механічних властивостей матеріалу призводить до зміни інших властивостей, які у свою чергу також впливають на процес утворення склепінь. Наявність великої кількості взаємопов'язаних факторів призвело до необхідності вивчення сумарного впливу фізико-механічних властивостей на процес утворення склепінь.

Відомі дослідження показали, що утворення склепінь залежить від зв'язаності матеріалу, яке характеризується початковим опором зсуву [96, 134]. Цей висновок має велике практичне значення, оскільки значення початкового опору зсуву відносно просто визначити дослідним шляхом. Вплив інших факторів на процес утворення склепінь матиме значення

лише в тих випадках, коли під їх впливом змінюється початковий опір зсуву.

Види стійких статичних склепінь

Розрізняють два види стійких статичних склепінь, що утворюються в бункерах.

Перший вид виникає в крупнокускових матеріалах в результаті заклинювання частинок, що мають випадкове розташування. Частинки матеріалу застрягають у зоні випускного отвору. Таке склепіння утримується внаслідок дії сил тертя між окремими частинками та стінками бункера. В цьому випадку стійкість склепіння практично не залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу; на неї впливають тільки геометричні параметри бункера.

Другий вид утворення склепінь виникає в дрібнофракційному матеріалі внаслідок зв'язаності частинок. В цьому випадку на процес утворення склепінь впливають не тільки перелічені фактори, але й фізико-механічні властивості сипкого матеріалу (густина, вологість та ін.).

Необхідно враховувати, що незалежно від природи статичного склепіння його утворення можна уникнути, за рахунок правильного вибору розміру випускного отвору. Для забезпечення безперервного витікання сипкого матеріалу з бункера, його випускаючий отвір має бути більшим за скліпоутворюючий.

Важливим показником, що характеризує рух сипкого матеріалу в бункерних пристроях, є продуктивність - кількість матеріалу, що витікає з бункера в одиницю часу.

За умови нормального плину легкосипкого матеріалу швидкість витікання дорівнюватиме:

$$v = \lambda \sqrt{3,2gR}, \quad (3.18)$$

де v – швидкість витікання, м/с:

R – гідравлічний радіус випускного отвору, м;

λ – коефіцієнт витікання.

Для легкосипких матеріалів значення λ знаходиться у межах 0,55...0,65; для крупнозернистих та кускових матеріалів з кусками неправильної форми у сухому стані – 0,3...0,5; для пиловидних та порошкоподібних матеріалів – 0,2...0,25.

Гідравлічний радіус отвору розраховується за формулою [96]:

$$R = \frac{S}{L}, \quad (3.19)$$

де S – площа випускного отвору, м²;

L – периметр випускного отвору (визначається з урахуванням розмірів типових частинок сипкого матеріалу), м.

Наприклад, для квадратного отвору гідравлічний радіус дорівнює:

$$R = \frac{A - a'}{4}, \quad (3.20)$$

де A – довжина сторони отвору;

a' – розмір частинки.

Найменший припустимий розмір квадратного отвору A (мм) для легкосипких матеріалів [96] визначається за формулою:

$$A = K(a' + 80) \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.21)$$

де K – дослідний коефіцієнт – 2,4...2,6;

a' – найбільший розмір типової частинки;

φ – кут внутрішнього тертя (для легкосипких матеріалів можна замінити на кут природного укосу).

Для уникнення утворення склепінь для легкосипких матеріалів розрахунковий розмір випускного отвору повинен задовольняти умову $A \geq (3...6)a'$.

Таким чином, регулювання за рахунок зміни перерізу отвору є недоцільним, оскільки за малих розмірах отвору виникатиме явище скліпоутворення, що визначає нижню межу продуктивності. Для

легкосипкого матеріалу з розміром частинки 3 мм вона дорівнює $1,76 \text{ м}^3/\text{год}$ [96].

Якщо розмір отвору бункера є незмінним, то його потрібно обирати так, щоб він забезпечував необхідну продуктивність.

Параметри та процеси, що визначають продуктивність бункеру

Витікання частинок сипкого матеріалу з бункерного обладнання є складним явищем, що носить характер складної структурної деформації. Дослідженню цього явища присвячено значну кількість наукових праць, у яких запропоновано декілька підходів до створення математичних моделей витікання сипкого матеріалу із бункерів. Ряд дослідників [48, 142, 144] розвивають гіпотезу саморуйнуючогося склепіння. Сутність цієї гіпотези полягає в тому, що при витіканні сипких матеріалів з ємностей над отвором, що розташований на її дні, утворюється своєрідна структура – динамічне склепіння, що миттєво руйнується.

Проходячи через динамічне склепіння, частинки матеріалу падають у вихідний отвір під дією сил тяжіння. Відповідно до цієї теорії швидкість витікання залежить від висоти склепіння, що є пропорційною діаметру отвору) та не залежить від висоти стовпа сипкого матеріалу в ємності. Таким чином, основними параметрами, які визначають продуктивність, є розмір та форма випускного отвору.

Водночас, інші дослідники [50, 145] не підтримують дану теорію і вважають, що вона носить штучний характер і нічого не дає для з'ясування справжніх закономірностей руху матеріалу.

У дослідженнях [144] процес витікання сипкого матеріалу пояснюється утворенням над випускним отвором еліпсоїдів руху та висувається гіпотеза витікання сипких матеріалів із об'ємів, що є рівновеликими еліпсоїдам руху.

Деякі дослідники [40, 102] визнають, що витрата сипкого матеріалу залежить від висоти шару в ємності, та не враховують розміру отвору, а у

роботі [96] зроблено висновок, що швидкість витікання не залежить від висоти стовпа за умови, що форма ємності не є конусоподібною.

Деякі дослідники вважають, що витрата суттєво залежить від форми руху потоку сипкого матеріалу. Інші автори у своїх працях визнають вплив розмірів частинок сипкого матеріалу на швидкість витікання.

Таким чином, підтверджується, що характер гравітаційного витікання сипкого матеріалу із бункерів залежить від багатьох факторів. Суттєвий вплив на характер руху здійснюють фізико-механічні властивості матеріалу, конфігурація та параметри бункера, а також технологічні фактори – переривання потоку та інші.

Однією з найважливіших властивостей сипкого матеріалу є здатність зберігати рівновагу у межах, що зумовлені силами внутрішнього тертя. При відкриванні випускного отвору рівновага частинок порушується внаслідок зникнення частини опори всередині бункера та впливу сил тяжіння і внутрішнього тертя. Частинки починають рухатись та починається витікання матеріалу з бункера, змінюється тиск всередині деформованої маси. Рух нижніх шарів передається верхнім шарам, що спираються на них, порушуючи їх рівновагу. Таким чином, відбувається безперервний рух потоку до випускного отвору.

Зміна напруженого стану матеріалу за висотою бункера під впливом безперервної деформації та тиску призводить до зміни і фізико-механічних властивостей та, у першу чергу, початкового опору зсуву, що у свою чергу здійснює вирішальний вплив на характер витікання. Відповідно, витікання сипких матеріалів можна розглядати як процес безперервних пластичних деформацій, важливим параметром якого є зусилля зсуву. Із виникненням зсувів зменшується кількість контактних зв'язків матеріалу, що призводить до утворення зон зі зниженими напруженнями.

Спостереження свідчать, що під час витікання виникають пульсації, які свідчать про переривчастий характер потоку. Для руху частинок

характерні зіткнення, тертя, співударяння з іншими частинками. Структура сипкого матеріалу в процесі руху безперервно змінюється.

Різновиди потоків руху сипких матеріалів з отворів

Відомі дві основні форми потоку:

- гідравлічна (зв'язана), за якої зв'язки частинок сипкого матеріалу не порушуються;
- нормальна (незв'язана), коли зв'язки частинок порушуються і вони здатні пересуватись відносно одна одної у потоці.

Для більшості сипких матеріалів типовою є незв'язана форма руху.

Гідравлічний радіус отвору

Гідравлічний радіус будь-якого перерізу визначається відношенням площі до периметра (3.19).

Для отвору у вигляді прямокутника зі сторонами a та b радіус дорівнює:

$$R_{IP} = \frac{1}{2} \cdot \frac{ab}{a+b}, \quad (3.22)$$

Для круглого отвору діаметром a :

$$R_K = \frac{a}{4}, \quad (3.23)$$

Для квадратного отвору зі стороною a :

$$R_{KB} = \frac{a}{4}. \quad (3.24)$$

Таким чином квадратний та вписаний в нього круглий отвір мають один й той самий гідравлічний радіус за різної площі. Площа вписаного кола складає приблизно 85% площі квадрата. Але пропускна здатність квадратного та круглого отворів приблизно однакова. Як свідчить практика, в ряді випадків круглі отвори мають навіть більшу

продуктивність. Тому за рівноцінних гідравлічних радіусів круглі отвори забезпечують краще проходження сипкого матеріалу.

При збільшенні діаметру випускного отвору зменшується відношення периметру до площі отвору. В результаті зменшується протидіюча сила і швидкість витікання збільшується. Таким чином із збільшенням гідравлічного радіусу збільшується пропускна здатність отвору.

Продуктивність бункера

Раніше було запропоновано ряд залежностей, що визначають взаємозв'язок між продуктивністю бункерного обладнання, його геометричними параметрами та властивостями сипкого матеріалу. В результаті цих досліджень встановлено, що найбільшою мірою на продуктивність впливають розмір і форма вихідного отвору та фізико-механічні властивості матеріалу. У табл. 3.2 наведено співвідношення для визначення продуктивності бункера, що запропоновані різними авторами [26, 152].

Таблиця 3.2

Визначення об'ємної продуктивності бункера

Автор	Формула для визначення об'ємної продуктивності бункера Q , м ³ /с
<i>1</i>	<i>2</i>
Покровський Г. І., Ареф'єв А. І.	$Q = 0,94\pi R^3 \frac{\sqrt{g}}{\sqrt{2R_0}}$
Линчевський І. П.	$Q = \mu F \sqrt{2gR}$
Платонов П. Н.	$Q = 3600\mu\gamma F R_{\Gamma}$
Фасман В. Б.	$Q = \mu K F \sqrt{2gR_{\Gamma P}}$

1	2
Зенков Р. Л.	$Q = \lambda F \sqrt{\chi^2 g R_{\Gamma}}$ $Q = \lambda F \sqrt{2gh}$
Кенеман Ф. Е. та ін.	$Q = 21(D - 2,5d_{\text{ч}})^{2,5}$

У табл. 3.2 використані наступні позначення:

R – радіус вихідного отвору, м;

R_0 – радіус кривизни параболоїда склепіння у вершині вихідного отвору, м;

R_{Γ} – гідравлічний радіус отвору, м;

$R_{\text{ДР}}$ – приведений радіус отвору, що дорівнює $2R_{\Gamma}$;

η – стала, що визначається дослідним шляхом;

F – площа випускного отвору, м²;

γ – насипна густина сипкого матеріалу, г/м³;

K – коефіцієнт, що враховує розмір та форму отвору;

λ – коефіцієнт витікання;

χ – коефіцієнт, що залежить від величини сили тертя;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

h – висота шару матеріалу над вихідним отвором, м;

D – діаметр отвору, м;

$d_{\text{ч}}$ – діаметр частинки сипкого матеріалу, м.

Характер течії сипких матеріалів, багато в чому визначається формою і конструктивними параметрами бункера.

Бункери є першою ланкою технологічних комплексів для змішування сипких матеріалів. Вони забезпечують зберігання та надходження частинок сипкого матеріалу на вхід живильників та пристроїв дозування. В переважній кількості випадків бункер являє собою ємкість з випускним отвором (рис. 3.6), що забезпечує переміщення

частинок під дією сил гравітації на вхід наступних пристроїв у технологічному комплексі.



Рис. 3.6. Розташування матеріалу в бункері

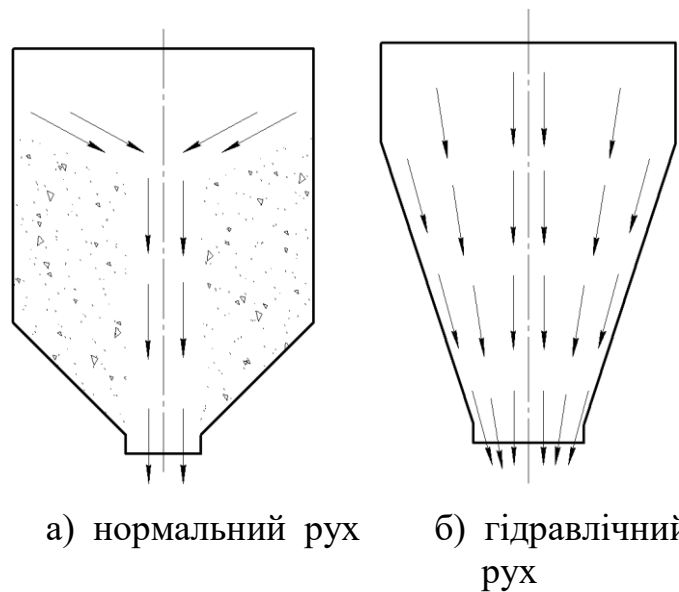


Рис. 3.7. Види руху сипкого матеріалу в бункері

Основним параметром, що характеризує процес витікання сипкого матеріалу з бункера є його продуктивність. Як зазначено вище, розрізняють [96] два основні режими руху (витікання) частинок із бункерів (рис. 3.7): нормальний та гідравлічний.

Найчастіше використовують перший режим (нормальний), що має місце в бункерах, з кутом нахилу стінок у рекомендованих межах. Гідравлічний рух виникає у випадках, коли кут нахилу бічних стінок перевищує деяке граничне значення, або коли сипкий матеріал має високу вологість і за властивостями наближається до рідини

Водночас, процес руху частинок залежить від їх фізико-механічних властивостей, геометричних розмірів, форми, зв'язаності частинок та вологості навколишнього середовища. Характерною особливістю руху сипкого матеріалу є можливість виникнення склепінь, що призводить до переривання потоку матеріалу і, як наслідок, необхідності корегування роботи іншого обладнання технологічного комплексу. Ймовірність

виникнення склепінь визначається мінімальною кількістю частинок, що необхідна для їх утворення, чим менша ця кількість, тим вища ймовірність. Для бункерів найбільш ймовірним утворення склепінь є в зоні випускного отвору. Значно зменшити ймовірність виникнення цього явища можна двома способами: правильним вибором розмірів випускного отвору, використанням спеціальних механічних пристроїв (активаторів). Водночас, збільшення розміру випускного отвору призводить до відповідного збільшення об'ємної продуктивності на виході бункера, а використання активаторів – до виникнення пульсацій у потоці матеріалу та додаткових витрат енергії.

Таким чином, основні вимоги до роботи бункерних пристроїв можна записати у вигляді:

- забезпечення заданої продуктивності;
- забезпечення мінімальної величини пульсацій потоку матеріалу;
- максимальне зменшення вірогідності утворення зводів (уникнення ситуації розриву у потоці матеріалу).

Практична реалізація зазначених вимог потребує створення математичної моделі руху частинок на виході бункера, яка б враховувала конструктивні параметри обладнання та властивості частинок сипкого матеріалу.

Відомо декілька підходів [2], [6], що дозволяють визначити швидкість частинок на виході бункера.

У випадку гідравлічного витікання характер руху частинок наближається до характеру руху рідини, що дозволяє з певним наближенням застосовувати закони Торрічеллі та Пуазейля.

Відповідно до закону Торрічеллі швидкість потоку матеріалу визначається за формулою:

$$v = \lambda \sqrt{2gh}, \quad (3.25)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

h – висота шару матеріалу в бункері, м;

λ – коефіцієнт витікання.

Закон Пуазейля дозволяє визначити витрату течії рідини $Q(t)$ під дією різниці перепаду тиску у трубці

$$Q(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l} (P_2(t) - P_1(t)), \quad (3.26)$$

де $P_1(t)$ – тиск в нижній точці трубки, $P_1(t) = 0$, Па;

$P_2(t)$ – тиск в верхній точці трубки, визначається рівнем рідини, що знаходиться у ємності (h), Па;

l – довжина трубки, м;

η – коефіцієнт динамічної в'язкості;

r – радіус трубки, м.

Аналіз досліджень, проведених на основі рівнянь (3.25) та (3.26), показав:

- процес витікання матеріалу з бункера носить нормальний характер, що узгоджується з проведеними раніше дослідженнями (кут нахилу бічних стінок практично не впливає на процес);
- при зменшенні кількості матеріалу в бункері до вихідного патрубку надходить матеріал, який був розташований біля бічних стінок, і в цьому випадку великі значення кута їх нахилу призводять до зменшення швидкості потоку.

Результати досліджень свідчать, що для сипких матеріалів, що володіють низьким коефіцієнтом внутрішнього тертя між частинками, а отже мають добру плинність, отримані математичні вирази можуть бути використані для розрахунку процесу витікання матеріалу з бункера. Водночас рух частинок сипкого матеріалу є більш складним фізико-механічним процесом, що визначається як впливом зовнішніх факторів (форма та геометричні розміри бункера), так і властивостями самого матеріалу (коефіцієнт внутрішнього тертя, насипна густина, тощо), які

можуть змінюватись, наприклад, внаслідок зміни вологості навколишнього середовища.

Вище було зазначено, що існують два крайні випадки: нормальний та гідравлічний рух частинок. В останньому випадку характер руху сипкого матеріалу наближається до характеру руху рідини. На основі вище викладеного можна зробити припущення, що існує взаємозв'язок між фізико-механічними параметрами сипкого матеріалу, характером його руху та продуктивністю бункера [18, 19].

В обох випадках продуктивність бункера залежить від рівня рідини h . Для циліндричного бункера продуктивність є величиною, що змінюється за експоненціальною залежністю.

Також із попередніх досліджень відомо [2], що за умови нормальної течії продуктивність бункера визначається радіусом вихідного отвору та деяким коефіцієнтом, що враховує властивості матеріалу (3.17).

В цьому випадку вплив параметрів сипкого матеріалу враховується коефіцієнтом λ , а гідравлічний радіус отвору бункера враховує діаметр отвору та розмір частинок матеріалу. Для отвору у вигляді кола його можна визначити за формулою:

$$R = \frac{D - a}{4}, \quad (3.27)$$

де a – розмір частинки;

D – діаметр отвору бункера.

Оскільки геометричні розміри бункера є незмінними, швидкість потоку матеріалу та, відповідно, продуктивність є сталою величиною, але за гідравлічного або нормального руху матеріалу змінюється характер взаємодії частинок між собою.

Найбільше розповсюдження у різноманітних галузях промисловості отримали бункери, що складаються з двох частин: верхньої, що являє

собою призму або циліндр, та нижньої – воронки у вигляді конуса, призми або напівсфери.

Прямокутні бункери з одним випускним отвором являють собою вертикальну призму, нижня частина якої – воронка виконана у вигляді усіченої піраміди. Виготовлення такого бункера є відносно простим і виконується з плоских та лінійних елементів. Також такі бункери раціонально використовують простір всередині промислових об'єктів. До недоліків цієї конструкції відносяться:

- виникнення застійних зон у місцях перетину суміжних стінок, особливо в пірамідальній частині;
- різний характер руху матеріалу вздовж бічної стінки внаслідок зміни відстані від бічної стінки до випускного отвору.

У промисловості найбільш широко використовуються бункери конічно-циліндричні форми, тому для них проведено вивчення руху сипучих матеріалів за допомогою МДЕ.

Бункери такої форми можна умовно розділити на три частини: циліндричну, конічну та зону вихідного патрубку. Схематично структура бункера зображена на рис. 3.8.

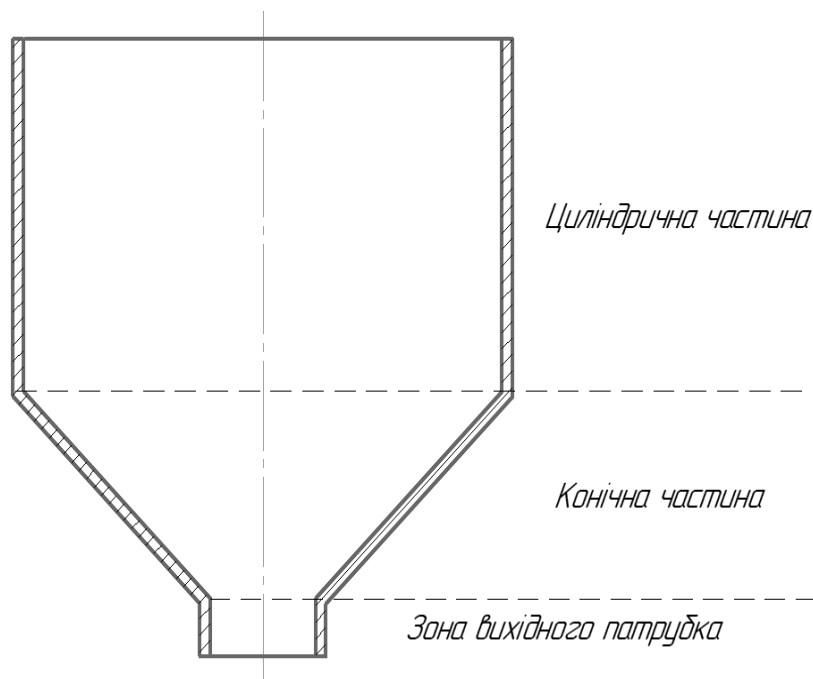


Рис. 3.8. Структура бункера конічно-циліндричної форми

Тривимірна модель бункера створювалась у САПР SolidWorks та конвертувалась у stl-формат, який використовувався для перенесення моделі в середовище для проведення обчислень МДЕ EDEM 2017. В stl-форматі інформація про тривимірний об'єкт зберігається у вигляді списку трикутних граней, що описують його поверхню, та нормалей до них.

Процес моделювання МДЕ вимагає визначення геометричних параметрів об'єктів, що включені у модель, та параметрів їх взаємодії. В даному випадку бункер є нерухомим об'єктом, тому для його моделювання достатньо інформації про геометричні розміри, яка передається у stl-файлі, та фізико-механічні властивості матеріалу, з якого він виготовлений (табл. 3.3).

Частинки моделювались сферами постійного радіусу з фізико-механічними властивостями, що характерні для гранул полімерних матеріалів (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Параметри матеріалів

	Частинки сипкого матеріалу	Матеріал корпусу бункера
Коефіцієнт Пуассона	0,3	0,3
Густина, кг/м ³	950	7800
Модуль зсуву, Па	$1,7 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^{10}$
Модуль Юнга, Па	$3,042 \cdot 10^8$	$1,82 \cdot 10^{11}$
Радіус, мм	2	
Маса, кг	$3,18348 \cdot 10^{-5}$	
Об'єм, м ³	$3,35103 \cdot 10^{-8}$	
Момент інерції, кг·м ²	$5,09357 \cdot 10^{-11}$	

Також для проведення моделювання МДЕ необхідно задати параметри для двох моделей взаємодії: «частинка – частинка» та «частинка – матеріал корпусу бункера». Авторами для обох взаємодій використовувалась теорія пружного контакту Герца-Міндліна (без урахування ковзання), що описана вище. Параметри моделей взаємодії наведені у табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Параметри взаємодії об'єктів

Назва параметру	«частинка – частинка»	«частинка – матеріал корпусу бункера»
Коефіцієнт пружності	0,1	0,2
Коефіцієнт статичного тертя	0,9	0,9
Коефіцієнт тертя кочення	0,05	0,01

Процес моделювання складався з двох етапів. На першому етапі задана кількість частинок надходила у бункер із закритим вихідним патрубком. На другому етапі відкривався вихідний патрубок і частинки починали висипатись під дією сили тяжіння у ємність, розташовану під бункером. Маса матеріалу у ємності визначалась через задані проміжки часу. Таким чином, відношення зміни маси до тривалості проміжку часу визначає масову продуктивність бункера.

Розрахунки проводились для трьох сипких матеріалів з різними коефіцієнтами тертя кочення та ковзання (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

Параметри сипких матеріалів

№ матеріалу	Коефіцієнт тертя ковзання	Коефіцієнт тертя кочення	Час витікання матеріалу, с	Маса матеріалу, кг	Масова продуктивність, кг/с
1	0,9	0,05	9,75	0,22284	0,0229
2	0,2	0,05	7,4	0,22284	0,0301
3	0,545	0,01	7,9	0,22284	0,0282

Форма та розміри частинок залишались незмінними. Кут нахилу бічних стінок бункера становив 45° .

Залежність між кількістю матеріалу, що витік з бункера, та часом, тобто продуктивність бункера, наведена на рис. 3.9.

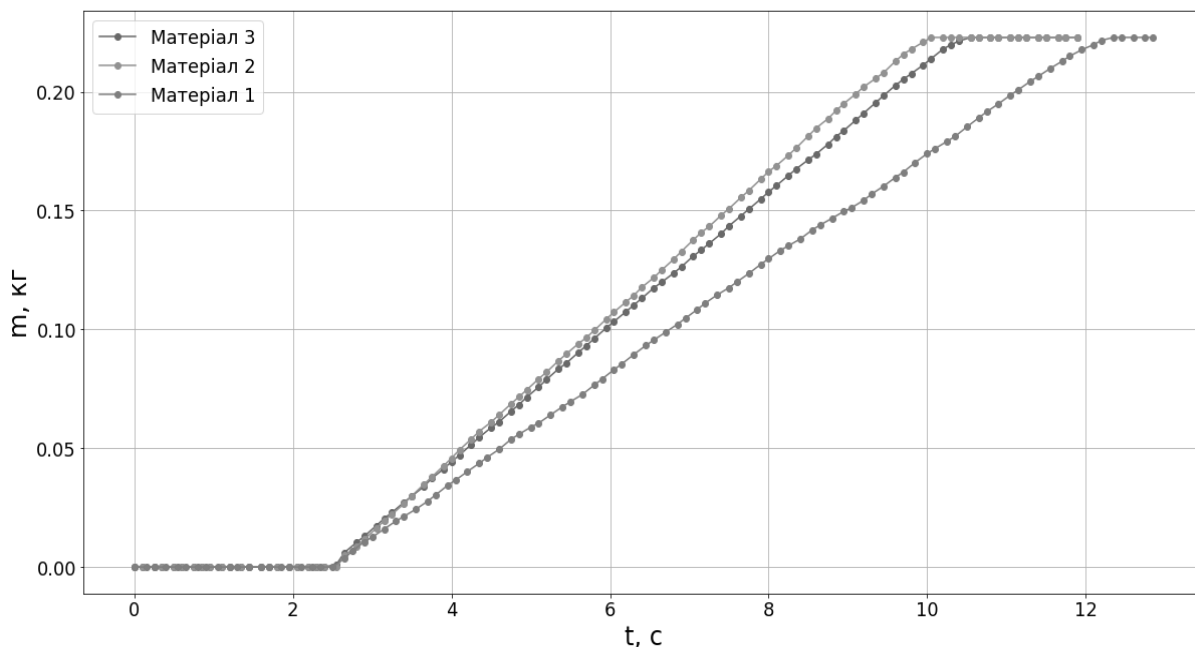


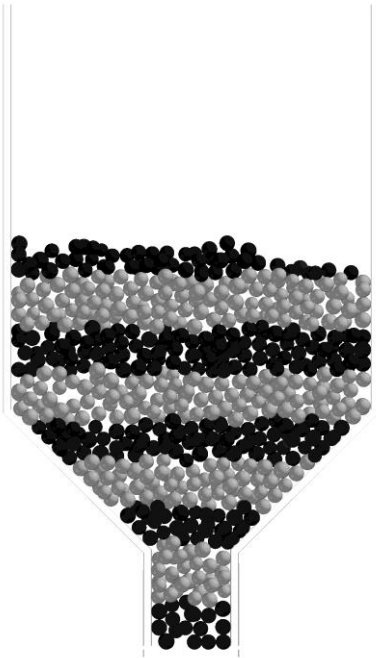
Рис. 3.9. Залежність продуктивності бункера від часу та параметрів матеріалу

Також під час проведення розрахунків визначалось положення частинок в центральному перерізі бункера. На рис. 3.10, а...з показані кількість та положення частинок при витіканні матеріалу 1 з кроком 1 с. З метою визначення характеру руху частинок, шари сипкого матеріалу виділені кольором.

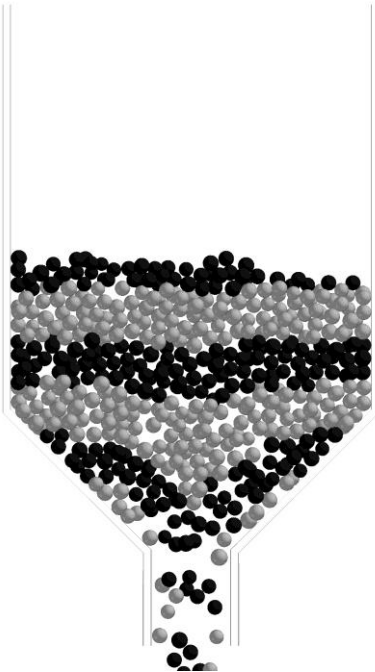
В результаті проведених досліджень встановлено:

- характер витікання частинок матеріалу є нормальним, тобто матеріал, розташований вздовж центральної вісі бункера, витікає з нього швидше, ніж матеріал, розташований вздовж бічних стінок;
- продуктивність бункера за умови нормального характеру витікання є сталою величиною та не залежить від кількості матеріалу в бункері;
- величина продуктивності залежить від фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу;

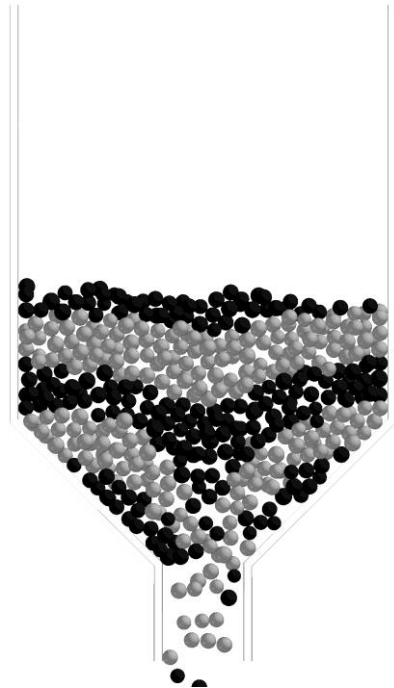
– моделювання за допомогою МДЕ дозволяє проаналізувати рух окремих частинок матеріалу та визначити наявність потоків частинок з різними швидкостями всередині бункера, що відповідає нормальному режиму витікання матеріалу.



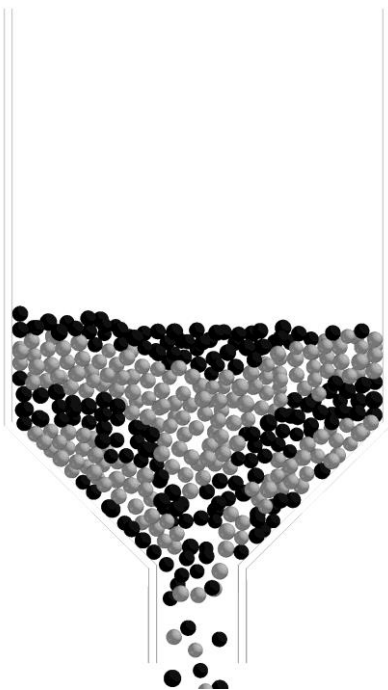
а) $t = 2,5 \text{ c}$



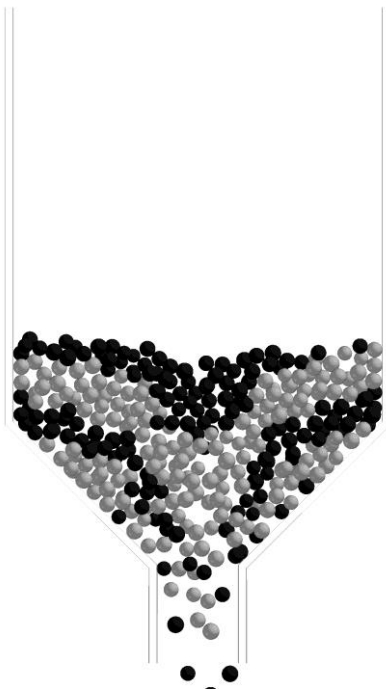
б) $t = 3,5 \text{ c}$



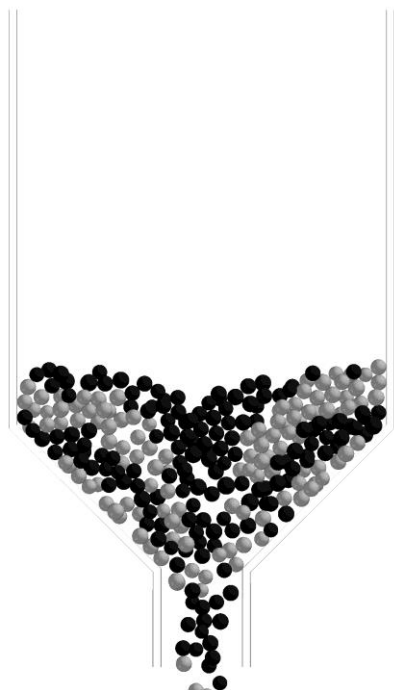
в) $t = 4,5 \text{ c}$



г) $t = 5,5 \text{ c}$



д) $t = 6,5 \text{ c}$



е) $t = 7,5 \text{ c}$

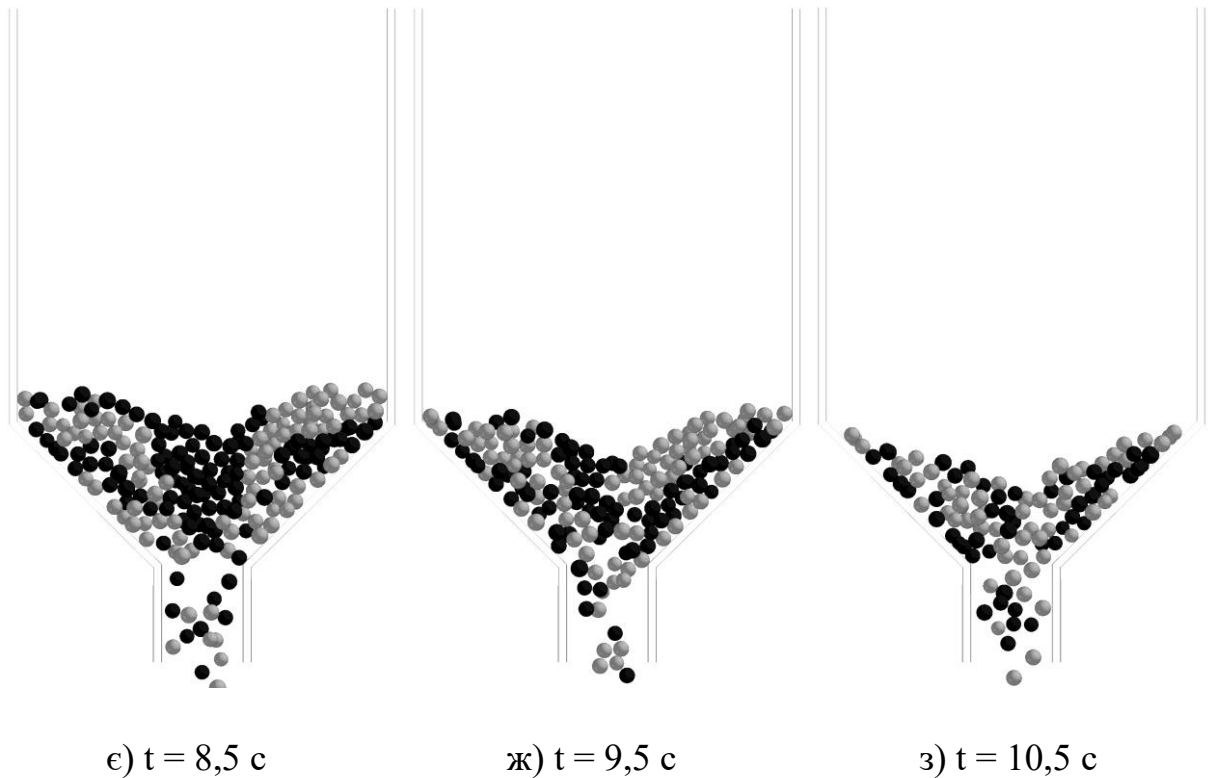


Рис. 3.10. Положення частинок сипкого матеріалу під час витікання із бункера

При використанні МДЕ для визначення продуктивності бункера враховуються наступні параметри частинок сипкого матеріалу: геометричні розміри, коефіцієнти тертя кочення та ковзання, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона.

В реальних умовах для сипких полімерних матеріалів зміна розмірів, модулю пружності та коефіцієнту Пуассона є малоймовірною, водночас, зміна коефіцієнтів тертя може виникнути, наприклад, внаслідок зміни вологості навколишнього середовища, яке технічно складно контролювати.

Тому авторами проведено повний факторний експеримент (ПФЕ) типу 2^2 . Вхідними параметрами (факторами) є коефіцієнти ковзання $k_{\text{ков}}$ та кочення $k_{\text{коч}}$ із наступними діапазонами змінювання значень:

$$k_{\text{ков}} = 0,3..0,7;$$

$$k_{\text{коч}} = 0,05..0,2.$$

Вихідною величиною (функцією відгуку) є продуктивність бункера.

Результати дослідження показані на графіках (рис. 3.11).

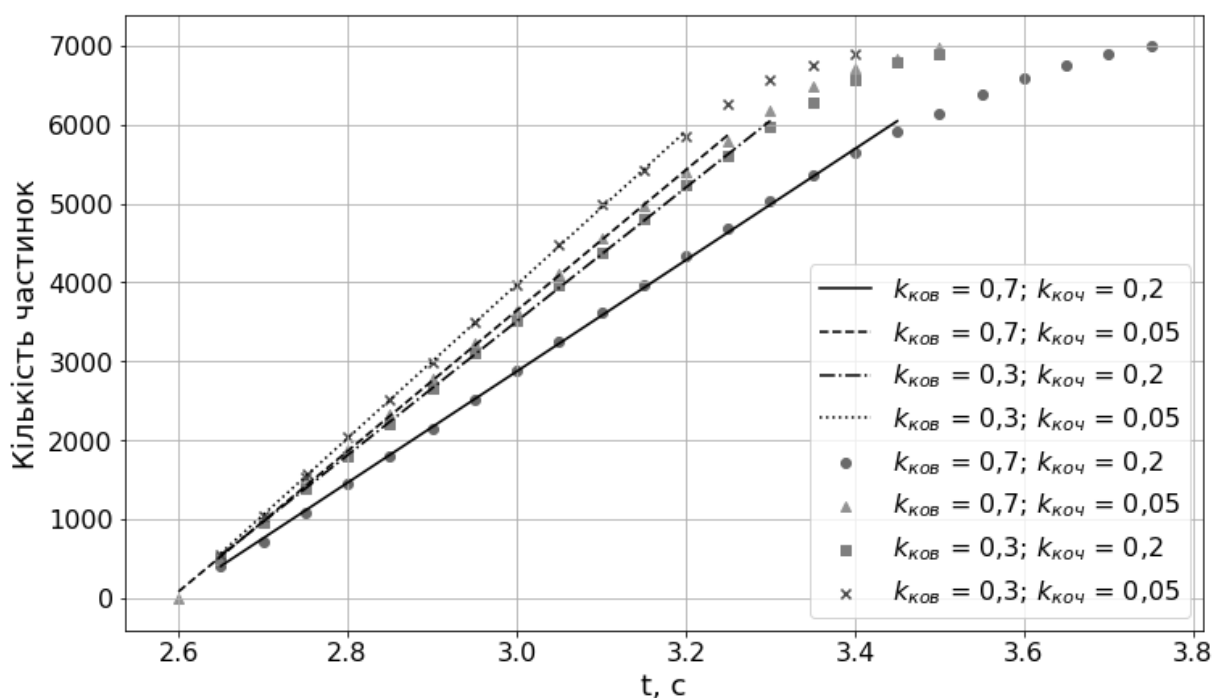


Рис. 3.11. Залежність продуктивності бункера від значень коефіцієнтів тертя

На рис. 3.11 точками показана кількість частинок, що вийшла з бункера у відповідний момент часу. Враховуючи, що розміри та густина частинок є сталими величинами, значення кількості частинок, що виходить із бункера за заданий проміжок часу, однозначно визначає як масову, так і об'ємну продуктивність.

Процес виходу частинок можна умовно розділити на дві частини:

1) Вихідний отвір бункера повністю заповнений. В цьому випадку продуктивність є сталою величиною.

2) Кількість матеріалу в бункері є недостатньою для повного заповнення вихідного отвору, залишки матеріалу рухаються вздовж країв отвору. В цьому випадку продуктивність зменшується.

Другу частину процесу розглядати немає сенсу, оскільки вона відповідає режиму, за яким в бункері відсутній достатній запас матеріалу для того, щоб забезпечити задану продуктивність. Тому для визначення

продуктивності використовувались перші 75% отриманих значень, тобто лінійна частина залежності. Для цих значень розраховані коефіцієнти лінійних залежностей (показані суцільними лініями на графіку рис. 3.11).

Нормування факторів здійснювалось за наступною формулою:

$$\bar{k}_i = \frac{2(k_i - k_{i\text{сер}})}{k_{i\text{max}} - k_{i\text{min}}}, \quad (3.28)$$

де $k_{i\text{сер}}$ – середнє значення відповідного коефіцієнту ковзання;

$k_{i\text{max}}$, $k_{i\text{min}}$ – максимальне та мінімальне значення відповідного коефіцієнту ковзання;

k_i – поточне значення відповідного коефіцієнту ковзання.

Таким чином, максимальні значення коефіцієнтів у нормованому вигляді дорівнюватимуть «+1», а мінімальні – «-1». Середні значення дорівнюватимуть «0».

Матриця планування та результати експериментальних досліджень представлені в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Матриця планування ПФЕ типу 2^2 та результати досліджень

№ з/п	k_0	$k_{\text{ков}}$	$k_{\text{коч}}$	$k_{\text{ков}} k_{\text{коч}}$	Q , кг/с
1	+1	+1	+1	+1	0,0679
2	+1	+1	-1	-1	0,0857
3	+1	-1	+1	-1	0,0817
4	+1	-1	-1	+1	0,0937

Відповідно, математична модель, що описує вплив коефіцієнтів тертя на продуктивність дозатора, має вигляд:

$$Q = b_0 + b_1 k_{\text{ков}} + b_2 k_{\text{коч}} + b_3 k_{\text{ков}} k_{\text{коч}}. \quad (3.29)$$

Коефіцієнти b полінома визначались за формулою:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N k_{ij} Q_i, \quad (3.30)$$

де N – кількість дослідів.

В результаті проведених розрахунків отримані наступні значення коефіцієнтів:

$$Q = 0,0823 - 0,00541k_{ков} - 0,00748k_{коч} - 0,00146k_{ков}k_{коч} \quad (3.31)$$

Графічно залежність продуктивності від коефіцієнтів тертя показана на рис. 3.12.

Отримані результати підтверджують, що найбільше значення продуктивності бункера відповідає найменшим значенням коефіцієнтів тертя ковзання та кочення.

Аналогічна залежність отримана для коефіцієнтів тертя та кутів природнього укосу матеріалу.

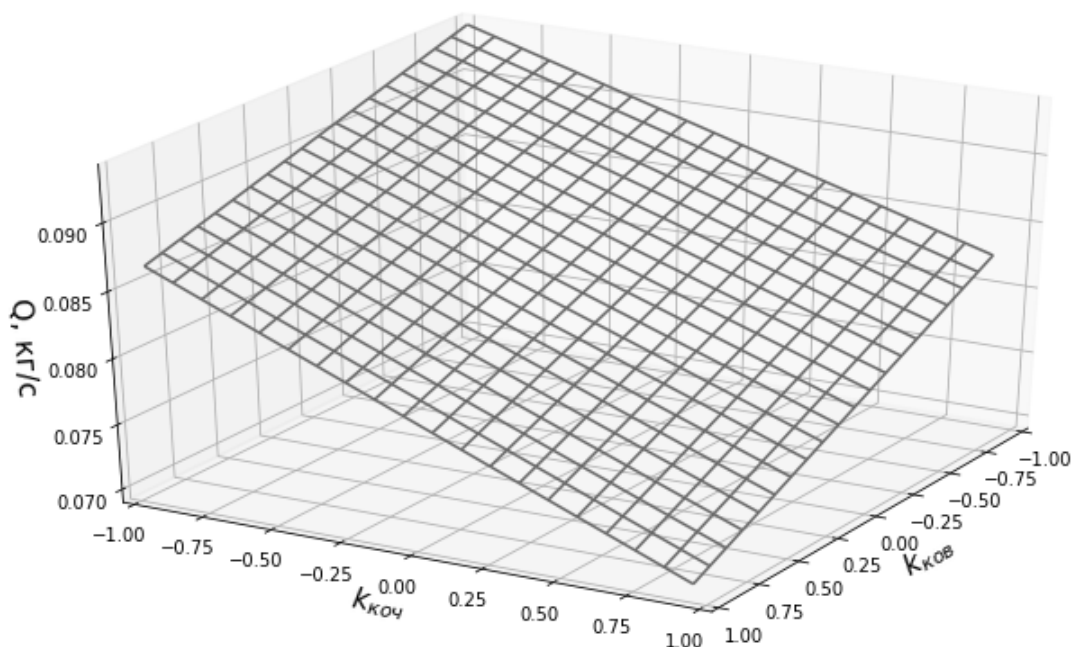
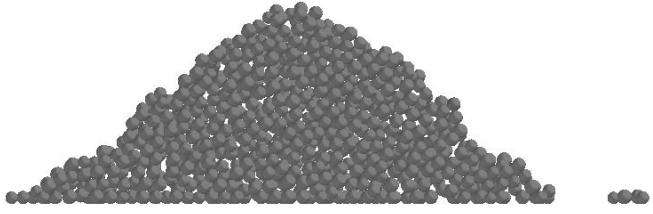
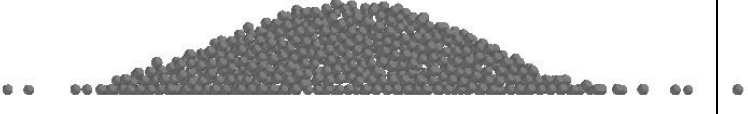
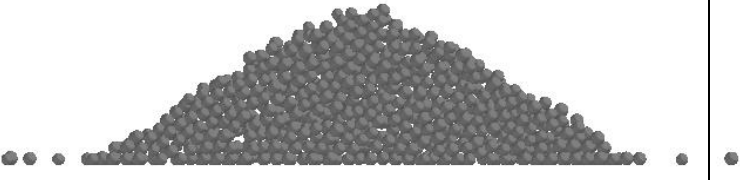
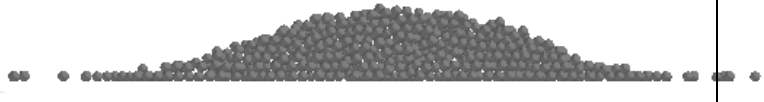


Рис. 3.12. Залежність продуктивності бункера від коефіцієнтів тертя ковзання та кочення

В табл. 3.7 для всіх проведених дослідів показано розташування частинок після витікання із бункера та наведені значення кутів природнього укосу.

Таблиця 3.7

Залежність кута природнього укосу від коефіцієнтів тертя

№ з/п	$k_{ков}$	$k_{коч}$	Кут природнього укосу, град	Розташування частинок
1	0,7	0,2	36,13	
2	0,7	0,05	19,32	
3	0,3	0,2	29,18	
4	0,3	0,05	15,00	

Проведені дослідження показали:

- за умови незмінних геометричних параметрів бункера та частинок сипкого матеріалу параметрами, що визначають рух сипкого матеріалу, є коефіцієнти тертя ковзання та кочення;
- коефіцієнти тертя ковзання та кочення визначають кут природнього укосу матеріалу і можуть змінюватись в залежності від параметрів навколишнього середовища, наприклад, вологості;

- зменшення значень коефіцієнтів тертя збільшує продуктивність бункера та одночасно зменшує кут природного укосу матеріалу, відповідно характер руху сипкого матеріалу наближається до рідини;
- отримані залежності дозволяють прогнозувати продуктивність бункера на основі значень кута природнього укосу матеріалу.

3.3. Дослідження руху сипкого матеріалу у живильниках методом дискретних елементів

Дозування сипкого матеріалу забезпечується за рахунок механічної дії на нього робочих органів живильників [21, 24]. Не зважаючи на десятки конструкцій з власними технічними особливостями, всі типи обладнання можна умовно розділити за характером руху робочого органу, який визначає наявність та величину пульсацій у потоці сипкого матеріалу. Класифікація відомих живильників для сипких матеріалів представлена в табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Класифікація живильників сипких матеріалів

Тип живильника	Тип руху робочих органів	Тип матеріалу	Наявність пульсацій у потоці матеріалу, зумовлена рухом робочого органу
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Гравітаційний	Відсутній	Порошкові	Ні
Стрічковий	Поступальний	Порошкові, кускові	Ні
Барабанний	Обертальний	Пиловидні, порошкові, зернисті та дрібно кускові	Так

1	2	3	4
Лопатевий	Обертальний	Пиловидні, порошкові, зернисті	Так
Шнековий	Гвинтовий	Порошкові, дрібнозернисті	Ні
Спіральний	Гвинтовий	Порошкові, дрібнозернисті	Ні
Тарілчастий	Обертальний	Порошкові, дрібнозернисті	Ні
Маятниковий	Коливальний	Зернисті, дрібнокускові	Так
Лотковий	Коливальний	Крупнозернисті, кускові	Так
Плунжерний	Зворотньо-поступальний	Порошкові, зернисті	Так
Вібраційний	Коливальний	Порошкові, зернисті, кускові	Так
Аераційний	Відсутній	Пиловидні, порошкові	Ні

Оскільки для комплексів безперервної дії важливою є низька величина пульсацій потоків сипких матеріалів, що надходять у змішувач, розглянемо широко розповсюджені конструкції живильників, в яких характер руху робочого органу не зумовлює появу додаткових пульсацій. До таких живильників відносяться: гравітаційні, стрічкові, шнекові, спіральні, тарілчасті та аераційні (див. табл. 3.8). Слід зазначити, що у гравітаційних живильниках регулювання потоку матеріалу здійснюється за допомогою шиберної заслінки. Це зумовлює суттєве обмеження діапазону регулювання потоку матеріалу, оскільки при зменшенні величини випускного отвору збільшується ймовірність утворення склепінь, що у

свою чергу зумовлює появу додаткових пульсацій у потоці та необхідність використання спеціальних пристроїв для руйнування склепінь. Аераційні живильники застосовуються переважно для дозування пилоподібних та порошкових матеріалів. Якщо частинки матеріалу мають значні розміри та масу, використання аераційних живильників потребує значних енерговитрат.

Таким чином, основними типами живильників, що забезпечують можливість дозування порошкових, дрібнозернистих та зернистих матеріалів і не мають робочих органів, які зумовлюють появу додаткових пульсацій, є стрічкові, шнекові, спіральні та тарілчасті. Авторами створено моделі всіх зазначених конструкцій живильників та проведено дослідження пульсацій потоків матеріалу за допомогою МДЕ. Параметри конструкцій живильників та сипкого матеріалу наведені у табл. 3.9 ... 3.14.

Таблиця 3.9

Параметри частинок

Назва параметра	Значення
Радіус, м	0,002
Коефіцієнт Пуассона	0,25
Густина, кг/м ³	2300
Модуль Юнга, Па	2,5e+8

Таблиця 3.10

***Параметри матеріалу корпусу
та робочих органів живильника (сталь)***

Назва параметра	Значення
Коефіцієнт Пуассона	0,3
Густина, кг/м ³	7800
Модуль Юнга, Па	2,6e+9

Таблиця 3.11

Параметри матеріалу стрічки (для стрічкового живильника)

Назва параметра	Значення
Коефіцієнт Пуассона	0,5
Густина, кг/м ³	1100
Модуль Юнга, Па	5e+6

Таблиця 3.12

Параметри взаємодії між частинками

Назва параметра	Значення
Коефіцієнт пружності	0,3
Коефіцієнт тертя ковзання	0,3
Коефіцієнт тертя кочення	0,05

Таблиця 3.13

Параметри взаємодії між частинками та матеріалом корпусу

Назва параметра	Значення
Коефіцієнт пружності	0,3
Коефіцієнт тертя ковзання	0,5
Коефіцієнт тертя кочення	0,05

Таблиця 3.14

Параметри взаємодії між частинками та стрічкою

Назва параметра	Значення
Коефіцієнт пружності	0,4
Коефіцієнт тертя ковзання	0,5
Коефіцієнт тертя кочення	0,1

Для всіх конструкцій живильників здійснювалось моделювання руху 5000 частинок сипкого матеріалу.

Стрічковий живильник

Схематичне зображення стрічкового живильника показано на рис. 3.13.

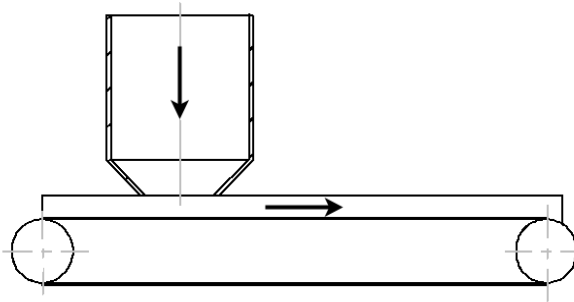


Рис. 3.13. Схема стрічкового живильника безперервної дії

Під час моделювання сипкий матеріал надходив у бункер та під дією сили тяжіння висипався через вихідний патрубок на стрічку [16, 100]. Швидкість руху стрічки була постійною та дорівнювала 0,1 м/с.

На рис. 3.14 показана зміна продуктивності живильника за часом в усталеному режимі роботи.

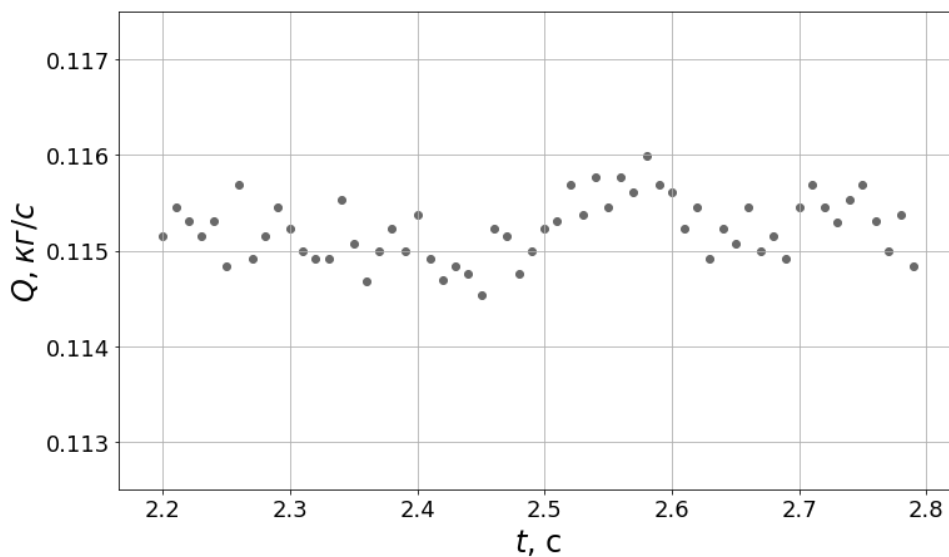


Рис. 3.14. Зміна масової продуктивності стрічкового живильника за часом

Шнековий живильник

Під час роботи живильника (рис. 3.15) [54, 146], сипкий матеріал, який витікає з бункера, захоплюється шнеком та пересувається у зону вихідного патрубку. Швидкість переміщення матеріалу визначається швидкістю обертання шнека навколо власної осі та під час моделювання становила 6 рад/с.

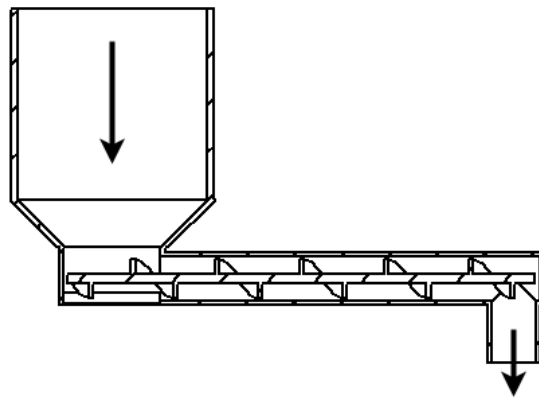


Рис. 3.15. Схема шнекового живильника безперервної дії

На рис. 3.16 показана зміна продуктивності живильника за часом в усталеному режимі роботи.

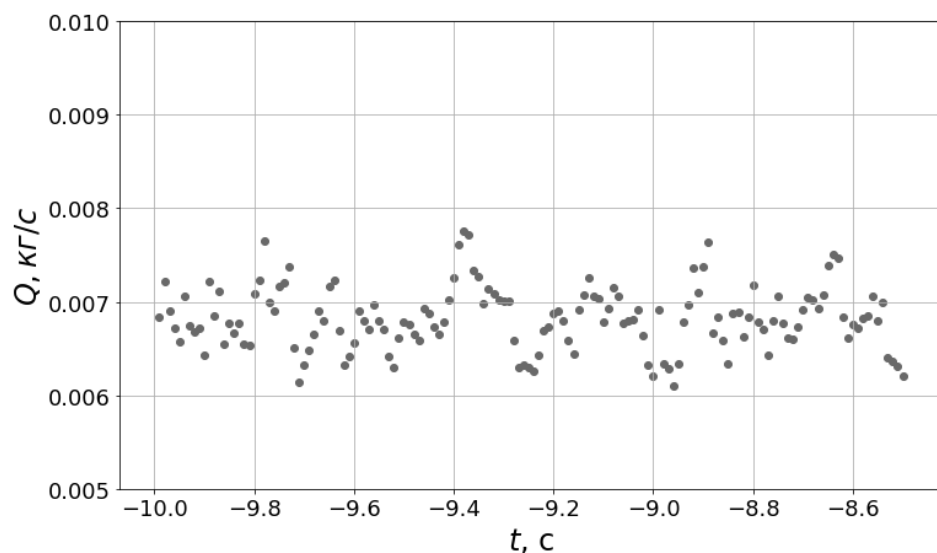


Рис. 3.16. Зміна масової продуктивності шнекового живильника за часом

Спіральний живильник

Робота живильника цього типу (рис. 3.17) аналогічна шнековому. Частинки матеріалу захоплюються та переміщуються за рахунок механічної дії на них витків спіралі, яка обертається із постійною кутовою швидкістю навколо власної вісі. Під час моделювання ця швидкість становила 6 рад/с.

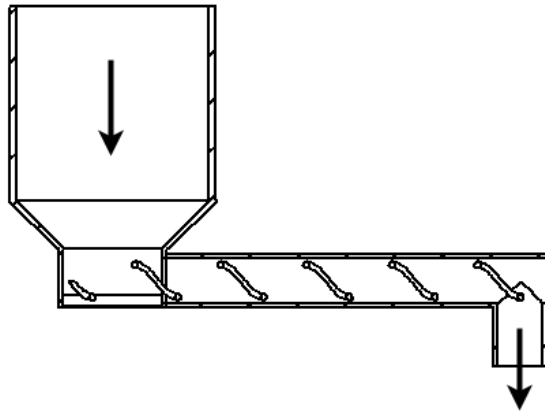


Рис. 3.18. Схема спірального живильника безперервної дії

На рис. 3.19 показана зміна продуктивності живильника за часом в усталеному режимі роботи.

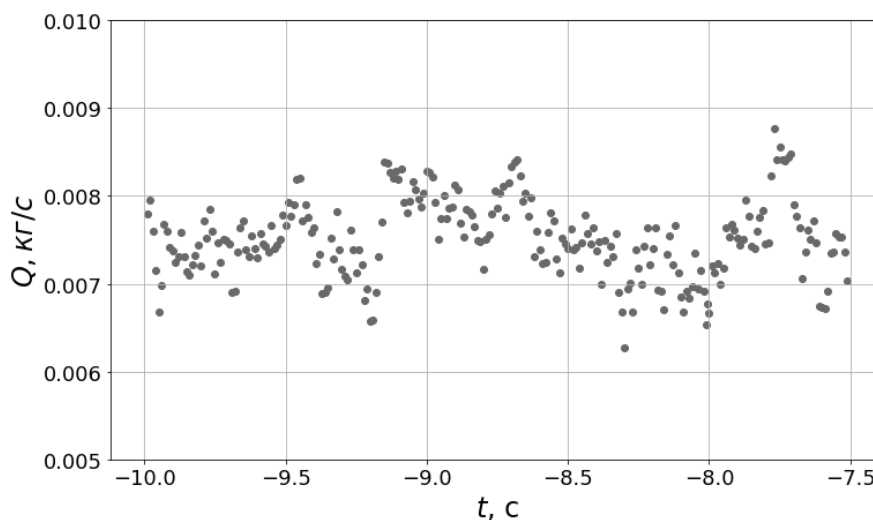


Рис. 3.19. Зміна масової продуктивності спірального живильника за часом

Трубчастий живильник

У змішувачі цієї конструкції (рис. 3.20) нижня частина бункера має отвір у бічній стінці до якого під'єднана горизонтальна труба, що обертається із постійною кутовою швидкістю навколо власної вісі.

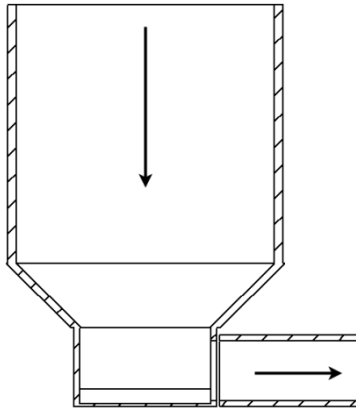


Рис. 3.20. Схема трубчастого живильника безперервної дії

Частинки матеріалу під дією сили тяжіння висипаються із бункера на край труби. Кількість цього матеріалу визначається розмірами отвору та кутом природнього укосу. Під час обертання труби частинки, що знаходяться в ній, починають переміщуватись та взаємодіяти з частинкам, що знаходяться у бункері. В результаті спостерігається поступове переміщення частинок до виходу живильника. Під час моделювання швидкість обертання труби становила 6 рад/с.

На рис. 3.21 показана зміна продуктивності живильника за часом в усталеному режимі роботи.

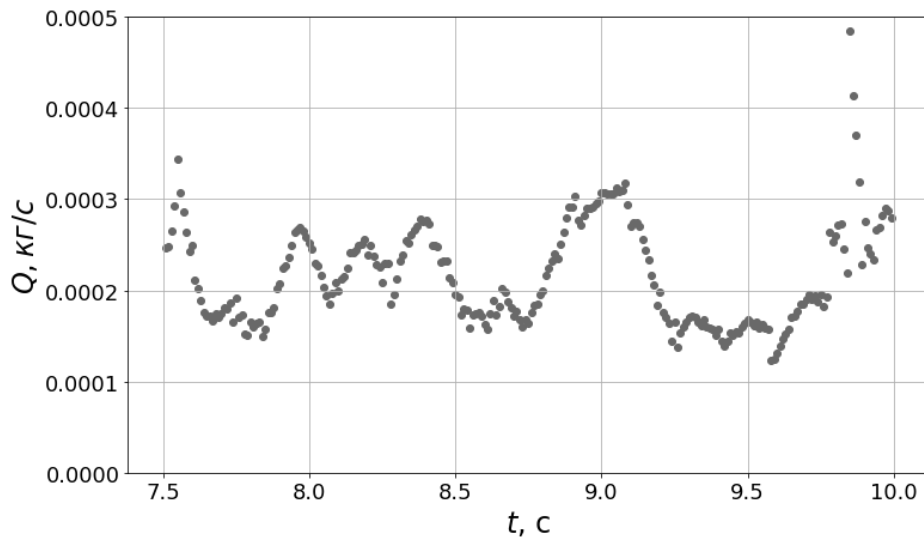


Рис. 3.21. Зміна масової продуктивності трубчастого живильника за часом

Тарілчастий живильник

Продуктивність такого живильника (рис. 3.22) визначається швидкістю обертання тарелі, відстанню від вихідного патрубку до тарелі та положенням ножа. Під час моделювання швидкість обертання тарелі становила 1,5 рад/с, відстань від вісі обертання до кромки ножа - 20,6 мм.

На рис. 3.23 показана зміна продуктивності живильника за часом в усталеному режимі роботи.

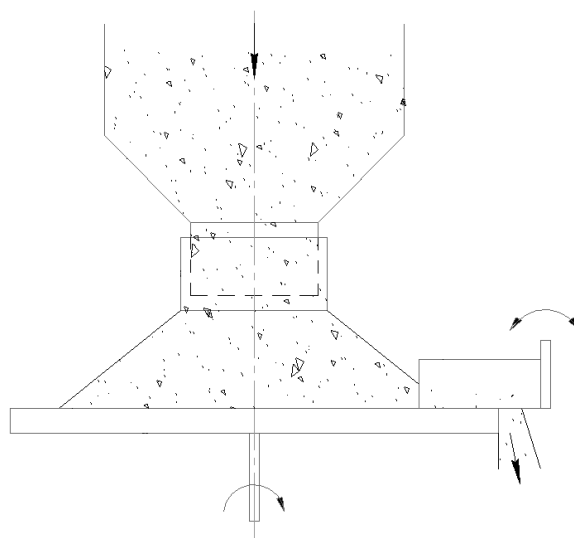


Рис. 3.22. Схема тарілчастого живильника

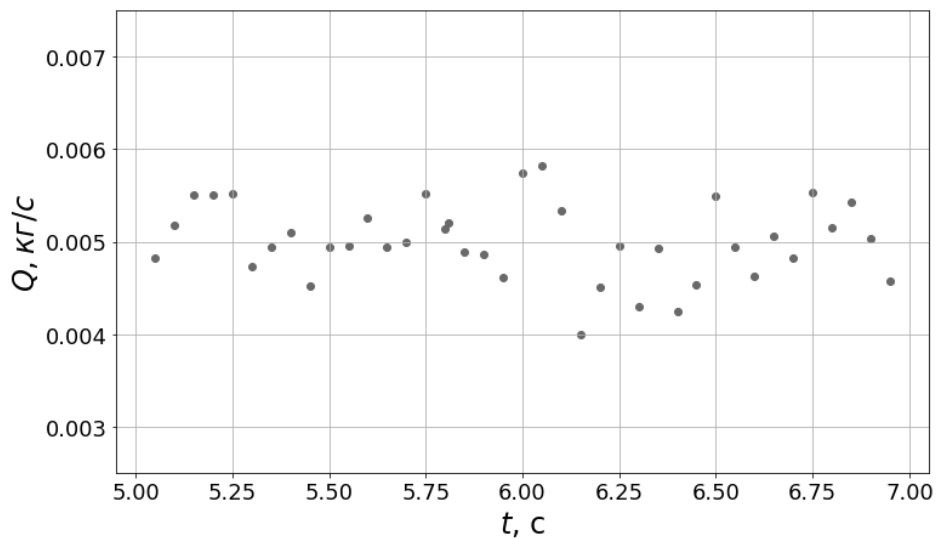


Рис. 3.23. Зміна масової продуктивності тарілчастого живильника за часом

Результати моделювання руху матеріалу у живильниках безперервної дії представлені у табл. 3.15.

Дисперсія продуктивності та максимальна сила стискання частинок у всіх типах живильників визначалась для усталеного режиму роботи.

Таблиця 3.15

Результати моделювання руху матеріалу у живильниках безперервної дії

Тип живильника	Назва параметра	Значення
1	2	3
Стрічковий	Дисперсія продуктивності (пульсацій у потоці матеріалу)	1,037e-7
	Наявність «мертвих зон»	Ні
	Можливість швидкої зміни продуктивності	Ні
	Можливість роботи з низькою продуктивністю	Ні
	Максимальна сила стискання частинок, Н	0,236

Закінчення табл. 3.15

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Шнековий	Дисперсія продуктивності (пульсацій у потоці матеріалу)	1,142e-7
	Наявність «мертвих зон»	Ні
	Можливість швидкої зміни продуктивності	Так
	Можливість роботи з низькою продуктивністю	Так
	Максимальна сила стискання частинок, Н	2,1653
Спіральний	Дисперсія продуктивності (пульсацій у потоці матеріалу)	1,979e-7
	Наявність «мертвих зон»	Ні
	Можливість швидкої зміни продуктивності	Так
	Можливість роботи з низькою продуктивністю	Так
	Максимальна сила стискання частинок, Н	1,0198
Трубчастий	Дисперсія продуктивності (пульсацій у потоці матеріалу)	2,998e-9
	Наявність «мертвих зон»	Так
	Можливість швидкої зміни продуктивності	Так
	Можливість роботи з низькою продуктивністю	Так
	Максимальна сила стискання частинок, Н	0,2134
Тарілчастий	Дисперсія продуктивності (пульсацій у потоці матеріалу)	1,729e-7
	Наявність «мертвих зон»	Ні
	Можливість швидкої зміни продуктивності	Так
	Можливість роботи з низькою продуктивністю	Так
	Максимальна сила стискання частинок, Н	0,0898

Аналіз результатів моделювання роботи існуючих живильників, що використовуються промисловістю, дозволив зробити наступні висновки.

- Стрічкові живильники забезпечують низьку величину пульсацій продуктивності. Під час дозування практично не спостерігається стискання частинок сипкого матеріалу, що безумовно є перевагою живильників даного типу. Водночас, регулювання потоку матеріалу здійснюється переважно за допомогою шиберної заслінки. При цьому швидкість руху стрічки залишається постійною. Внаслідок цього зміна положення шибера не призводить до миттєвої зміни продуктивності, оскільки на стрічці знаходиться певна кількість матеріалу. Окрім того, існує обмеження на мінімальну продуктивність такого живильника. Відстань між шиберами та поверхнею стрічки завжди повинна значно перевищувати діаметр частинки, інакше виникає ймовірність утворення склепінь в цій зоні.

- Шнекові та спіральні живильники характеризуються високою величиною пульсацій вихідного потоку сипкого матеріалу. Обертання робочого органу утворюють значний механічний вплив на частинки (в рази більший за інші типи живильників), що може призводити до їх нагрівання та деформування. З іншого боку, живильники цих конструкцій здатні здійснювати дозування матеріалу схильного до утворення склепінь. Продуктивність живильника визначається швидкістю обертання робочого органу, що дозволяє змінювати її у широкому діапазоні.

- Трубчасті живильники практично не створюють механічного впливу на сипкий матеріал. Забезпечують мінімальну величину пульсацій продуктивності в усталеному режимі роботи. Характеризуються наявністю «мертвої зони» в нижній частині бункера, оскільки матеріал рухається переважно в зоні, яка знаходиться безпосередньо біля труби.

- Перевагами тарілчастих живильників є найменший механічний вплив на частинки матеріалу, можливість зміни продуктивності у широкому діапазоні. Величина пульсацій є однією з найбільших, але меншою ніж у спірального живильника. Це пояснюється наявністю

механічної взаємодії між кромкою вихідного патрубку бункера та верхньою частиною конуса матеріалу. В результаті відбувається деформація форми конуса та нерівномірне розташування частинок на поверхні тарелі, що призводить до зміни кількості частинок, яку «захоплює» ніж.

- Тарілчасті живильники за сукупністю параметрів можна вважати одними з найбільш перспективних. Дослідження цього типу живильників доцільно спрямувати на зменшення пульсацій його продуктивності.

3.4. Дослідження руху частинок у системі «бункер – тарілчастий живильник» методом дискретних елементів

Для вивчення руху сипких матеріалів у системі «бункер-живильник» методом МДЕ побудована 3D-модель, що показана на рис. 3.24.

До складу моделі входять: циліндрично-конічний бункер, живильник, що складається з корпусу, тарелі та ножа, і формувач потоку частинок.

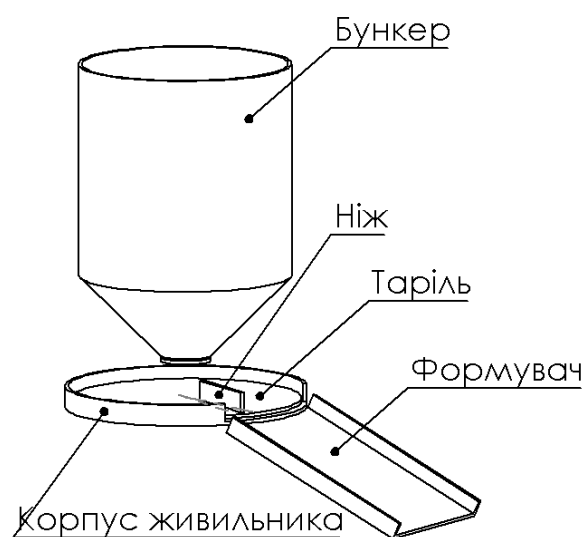


Рис. 3.24. 3D-модель системи «бункер-живильник»

Під час роботи тарілчастого живильника конус сипкого матеріалу, який знаходиться на тарелі, має неправильну форму. Радіус його основи збільшується у зоні перед ножом (за рахунок накопичення вздовж поверхні ножа) та різко зменшується в зоні після ножа. Зменшення радіусу основи конусу означає зменшення кута нахилу його бічної стінки, відповідно, сипкий матеріал починає рухатись і заповнювати простір який звільнився. Інтенсивність цього руху буде залежати від радіусу основи конуса, тобто буде нерівномірною. Як наслідок, рух частинок у зоні вихідного патрубку також буде нерівномірним [141].

Враховуючи, що ймовірність утворення склепінь у зоні вихідного патрубку є найбільшою, доцільно дослідити швидкості руху частинок у цій зоні за різних режимів роботи тарілчастого живильника.

Основним технологічним параметром роботи тарілчастого живильника є його продуктивність, що визначається швидкістю обертання тарелі, положенням ножа, кутом природнього укусу матеріалу та відстанню від тарелі до вихідного патрубку бункера.

При проектуванні системи «бункер – тарілчастий живильник» до заданих параметрів відносять:

- продуктивність;
- властивості матеріалу (кут природнього укусу);
- час роботи без додаткового завантаження (визначає об'єм бункера).

Відстань між поверхнею тарелі та вихідним патрубком бункера бажано залишати постійною, оскільки зміна положення бункера є енергетично затратною операцією та, крім того, у випадку переміщення бункера в напрямку тарелі, збільшується час реагування системи керування, оскільки необхідно зняти зовнішній шар матеріалу з конусу.

Швидкість обертання тарелі має обмежений діапазон варіювання, оскільки її високі значення призводять до збільшення відцентрової сили, що діє на частинки.

Найбільш зручним способом зміни продуктивності живильника є зміна положення ножа. Але при цьому необхідно враховувати, що положення ножа впливає на характер руху сипкого матеріалу як на поверхні живильника, так і у бункері.

Під час проектування системи існує можливість забезпечити задану продуктивність за різних співвідношень положень ножа та швидкості обертання тарелі. Це робить актуальним завдання визначення характеру руху матеріалу у зоні вихідного патрубку за різних положень ножа та швидкості обертання тарелі живильника.

В ідеальному випадку сипкий матеріал має рухатись суцільним потоком без пульсацій. Забезпечити такий режим руху неможливо внаслідок природи сипкого матеріалу та конструкції обладнання. Водночас, можливо порівняти доступні режими роботи та обрати той, що забезпечує максимально наближений до ідеального характер руху матеріалу.

Для вирішення цієї задачі проведено дослідження руху сипкого матеріалу при одночасній зміні швидкості обертання тарелі та положення ножа методом дискретних елементів.

Метою дослідження є порівняння характеру руху матеріалу в режимі роботи із меншим «захопленням» матеріалу ножом та більшою швидкістю обертання та режиму, за якого більше «захоплення» ножом відповідає меншій швидкості обертання.

Параметри системи «бункер – тарілчастий живильник» та сипкого матеріалу, що використовувались під час моделювання, приведені у табл. 3.16 ... 3.18.

Таблиця 3.16

Параметри системи бункер – тарілчастий живильник

Параметр	Значення
Діаметр випускного отвору бункера, мм	14
Діаметр циліндричної частини бункера, мм	60
Кут нахилу бічних стінок бункера, град	45
Відстань між бункером та тарелю, мм	12
Діаметр тарелі, мм	65
Швидкість обертання тарелі, с ⁻¹	1,5

Таблиця 3.17

Параметри сипкого матеріалу та взаємодії між частинками

Параметр	Частинки сипкого матеріалу	Матеріал корпусу бункера та живильника
Коефіцієнт Пуассона	0,3	0,3
Щільність	2300 кг/м ³	7800
Модуль зсуву, Па	1,48e+08	7e+10
Модуль Юнга, Па	3,848e+08	1,82e+11
Радіус, мм	1	
Маса, кг	9,63422e-06	
Об'єм, м ³	4,18879e-09	
Момент інерції, кг*м ²	3,85369e-12	

Таблиця 3.18

Параметри взаємодії об'єктів

Параметр	«Частинка – частинка»	«Частинка – матеріал корпусу»
Коефіцієнт пружності	0,3	0,3
Коефіцієнт статичного тертя	0,3	0,4
Коефіцієнт тертя кочення	0,05	0,1

На першому етапі в бункер випадковим чином завантажувались 15 000 частинок. При цьому вихідний отвір був зачинений і частинки заповнювали нижню частину бункера.

Другий етап розпочинався у момент часу $t = 1$ с. Вихідний отвір бункера відкривався і частинки починали під дією сили тяжіння падати на таріль, що оберталась з постійною кутовою швидкістю $\omega = 1,5 \text{ с}^{-1}$ за годинниковою стрілкою. Величина швидкість обертання обрана таким чином, щоб відцентрові сили, які діють на частинки, були менше сил тертя. Вісь обертання тарелі співпадала з центральною віссю бункера. Таким чином, частинки падали у центр тарелі та формували на ній усічений конус, верхня частина якого обмежена випускним отвором бункера, а кут нахилу бічних стінок визначався кутом природнього укосу матеріалу.

Моделювання роботи системи здійснювалось в чотири етапи.

На першому етапі в бункер випадковим чином завантажувались 15 000 частинок. При цьому вихідний отвір був зачинений і частинки заповнювали нижню частину бункера.

Другий етап розпочинався у момент часу $t = 1$ с. Вихідний отвір бункера відкривався і частинки починали під дією сили тяжіння падати на таріль, що оберталась з постійною кутовою швидкістю $\omega = 1,5 \text{ с}^{-1}$ за годинниковою стрілкою. Величина швидкість обертання обрана таким чином, щоб відцентрові сили, які діють на частинки, були менше сил тертя. Вісь обертання тарелі співпадала з центральною віссю бункера. Таким чином, частинки падали у центр тарелі та формували на ній усічений конус, верхня частина якого обмежена випускним отвором бункера, а кут нахилу бічних стінок визначався кутом природнього укосу матеріалу.

Ніж, що знімає матеріал з тарелі, розташовувався вздовж її радіусу на відстані 8,6 мм від центру.

На третьому та четвертому етапах збільшувалась відстань від вісі обертання до кромки ножа на 6 мм. Третій етап починався у момент часу

$t = 8$ с, відстань становила 14,6 мм. Четвертий етап починався у момент $t = 16$ с, відстань становила 20,6 мм.

Для визначення продуктивності живильника розраховувалась кількість частинок на поверхні формувача через кожні 0,05 с.

Результати моделювання продуктивності системи показані на рис. 3.25.

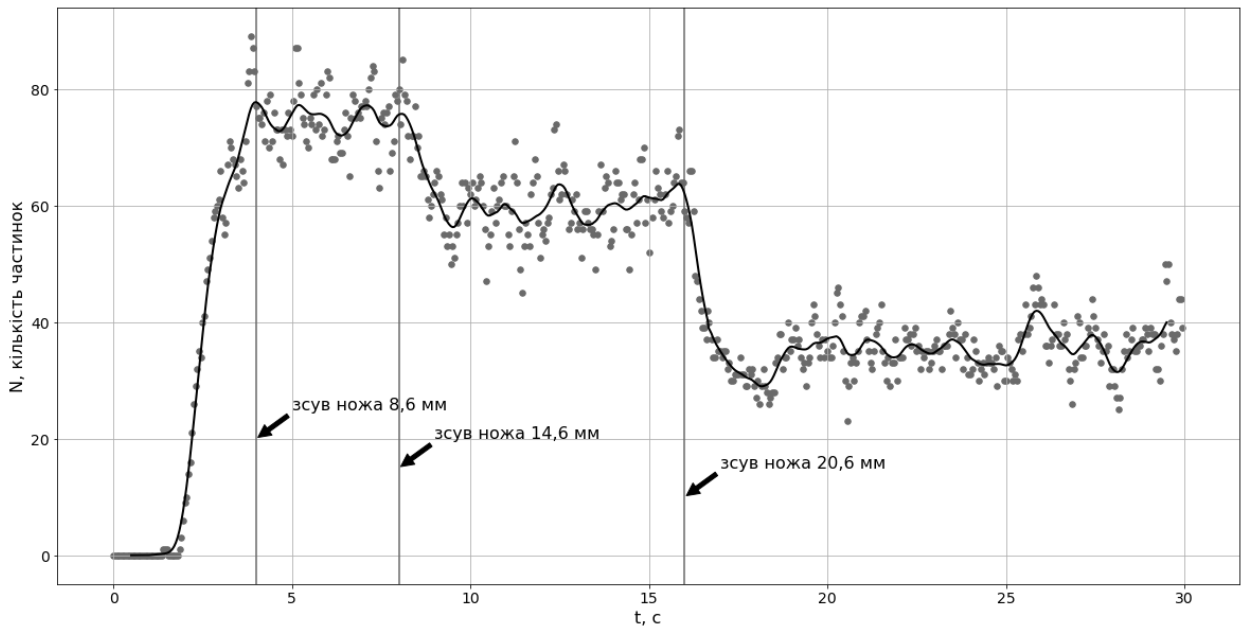


Рис. 3.25. Залежність продуктивності системи бункер-живильник від положення ножа

Точками на рис. 3.25 показана кількість частинок на поверхні формувача. Суцільною лінією показані значення, що отримані методом рухомого середнього. Для їх обчислення обирався розмір «вікна», що дорівнював 20 вимірюванням. Починаючи від моменту часу $t = 0$ с визначалось середнє значення всіх точок, що потрапляли у «вікно», тобто 20-ти послідовно розташованих результатів вимірювань. Отримана середня кількість частинок відповідає моменту часу в середині «вікна». Далі «вікно» зсувалось на один крок, тобто на 0,05 секунди, і розрахунки повторювались.

Таким чином, отримано залежність, що згладжує пульсації продуктивності живильника.

Аналіз залежності свідчить, що продуктивність системи визначається положенням ножа, але при цьому спостерігаються помітні пульсації. З метою оцінки їх величини розраховані основні статистичні параметри для кожного з трьох встановлених режимів. Результати розрахунків статистичних параметрів представлені в табл. 3.19.

Таблиця 3.19

Результати статистичної обробки продуктивності системи у встановлених режимах

Зсув ножа, мм	Середнє значення	Медіана	Середньоквадратичне відхилення	Дисперсія
8,6	74,7	75,0	4,9	24,04
14,6	60,03	60,0	5,52	30,5
20,6	35,96	36,0	4,47	19,95

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що за результатами одного вимірювання практично неможливо зробити висновок про продуктивність системи. Необхідно визначити середнє значення між декількома послідовними вимірюваннями.

Рух частинок всередині системи «бункер – тарілчастий живильник»

Розглянемо характер руху частинок всередині системи бункер-живильник. Для цього визначимо положення та швидкості частинок в трьох перерізах (рис. 3.26, а, б, в) для кожного з положень ножа.

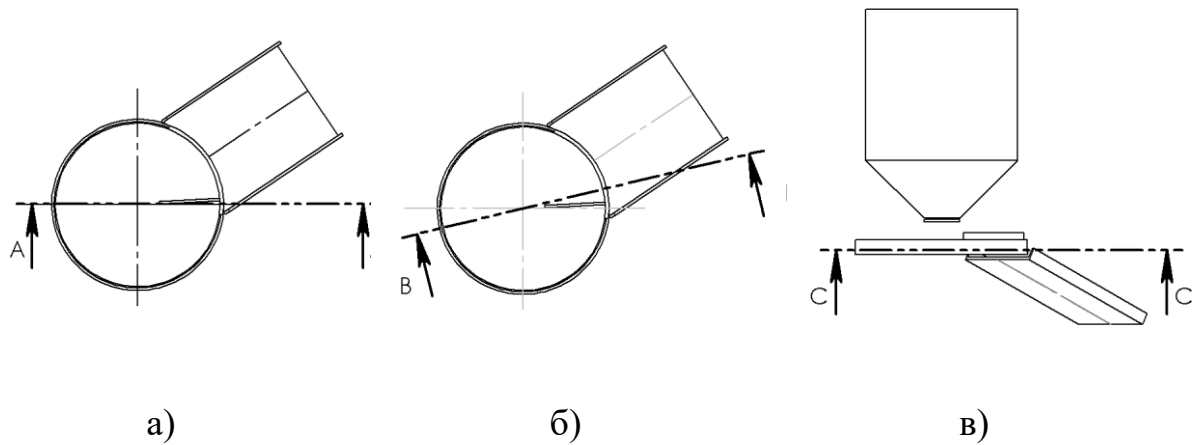


Рис. 3.26. Перерізи в яких визначалось положення частинок:
 а – після ножа; б – перед ножом; в – на поверхні тарелі

Результатом розрахунку МДЕ є координати та швидкості частинок у кожний момент часу. Для аналізу характеру їх руху необхідно обрати момент часу та групу частинок, що досліджуються. В даному випадку найбільш характерними зонами є вертикальні перерізи, що проходять перед ножом та після нього (рис. 3.26, а, б), та горизонтальний переріз, що проходить безпосередньо над поверхнею тарелі. Для побудови обирались частинки, координати яких співпадали з площиною плюс-мінус крок, що дорівнює діаметру частинки. Вибір частинок здійснюється достатньо просто, якщо площина перерізу співпадає або є паралельною одній з осей (x, y, z) . В цьому випадку потрібно просто виключити із розрахунку всі частинки, координати яких не відповідають одній з умов:

$$x_0 - \Delta x \leq x \leq x_0 + \Delta x, \quad (3.32)$$

$$y_0 - \Delta y \leq y \leq y_0 + \Delta y, \quad (3.33)$$

$$z_0 - \Delta z \leq z \leq z_0 + \Delta z, \quad (3.34)$$

де x, y, z – координати частинки;

x_0, y_0, z_0 – координати відповідної площини перерізу;

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – ширина зони навколо площини перерізу.

Для спрощення вибору частинок, що відповідають перерізу, який не співпадає з осями координат (рис. 3.26, б), система «бункер – тарілчастий живильник» була розгорнута у просторі на кут -12° , таким чином, щоб переріз співпав з віссю x .

Розгортання здійснювалось за допомогою афінних перетворень [86, 103]. Такі перетворення дозволяють переносити точки на задані відстані у вказаному напрямку, отримувати дзеркальне відображення об'єктів, масштабувати, повертати та зсувати об'єкти. В лінійній алгебрі афінні перетворення здійснюються за допомогою матриць.

Якщо відомі вихідні координати точки (x, y, z) , то для визначення нових координат (x', y', z') точки, що розгорнута на кут θ навколо осі z , необхідно виконати наступне перетворення:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 & \Delta x \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.35)$$

де θ_z – кут повороту навколо осі z ;

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – зсув відносно осей x, y, z , відповідно.

Моменти часу, для яких побудовані графіки відповідають встановленим режимам для трьох положень ножа, тобто для трьох величин продуктивності, а саме:

- 1) $t = 7$ с, для положення ножа 8,6 мм;
- 2) $t = 15$ с, для положення ножа 14,6 мм;
- 3) $t = 25$ с, для положення ножа 20,6 мм.

Результати показані на рис. 3.27 ... 3.35.

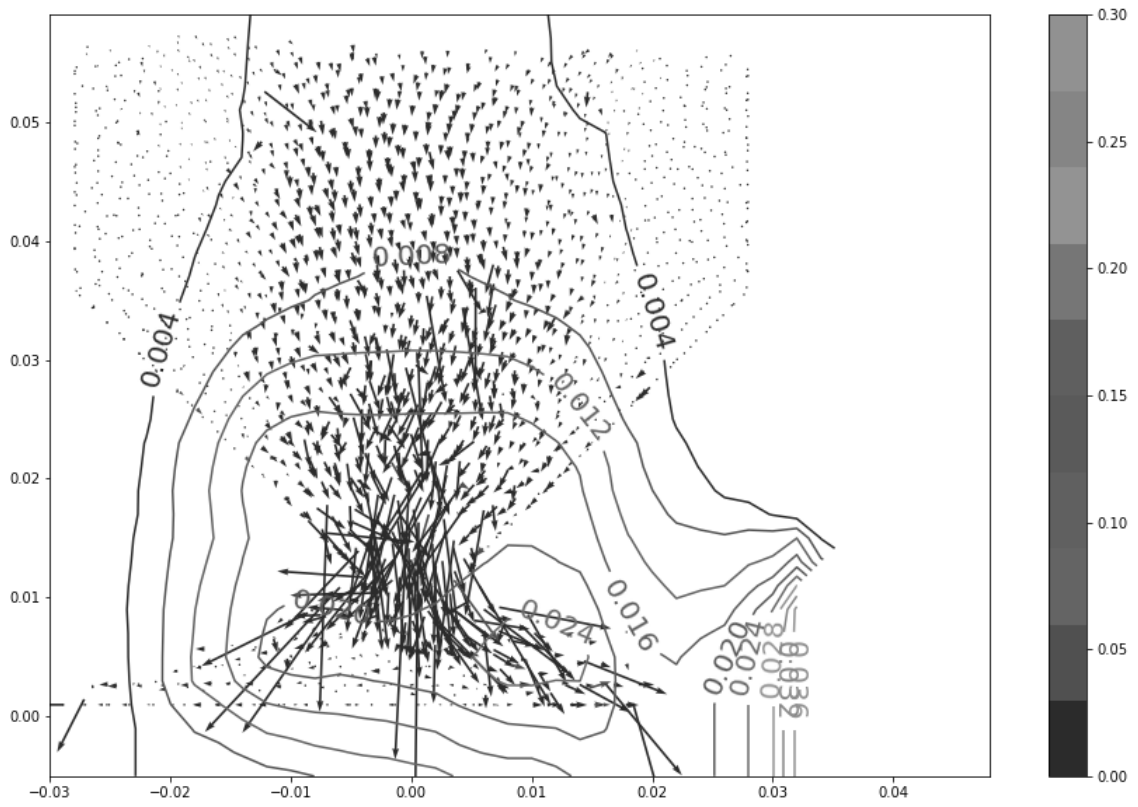


Рис. 3.27. Положення та швидкість частинок після ножа, $t = 7$ с

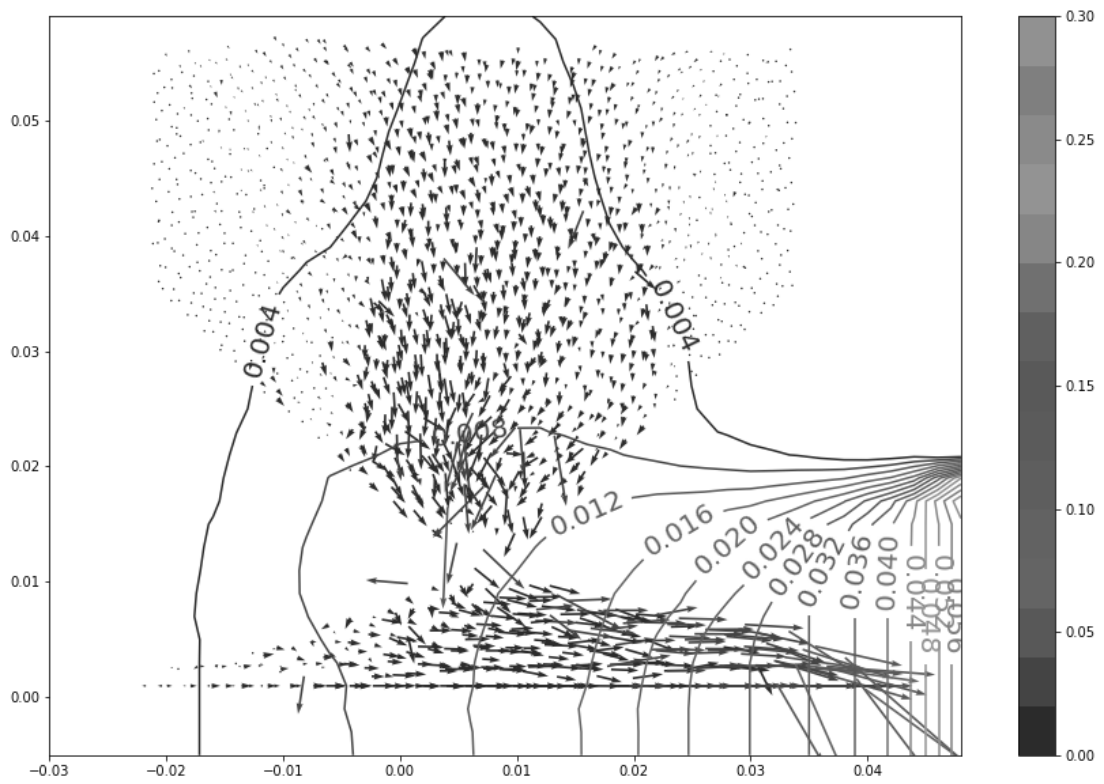


Рис. 3.28. Положення та швидкість частинок перед ножем, $t = 7$ с

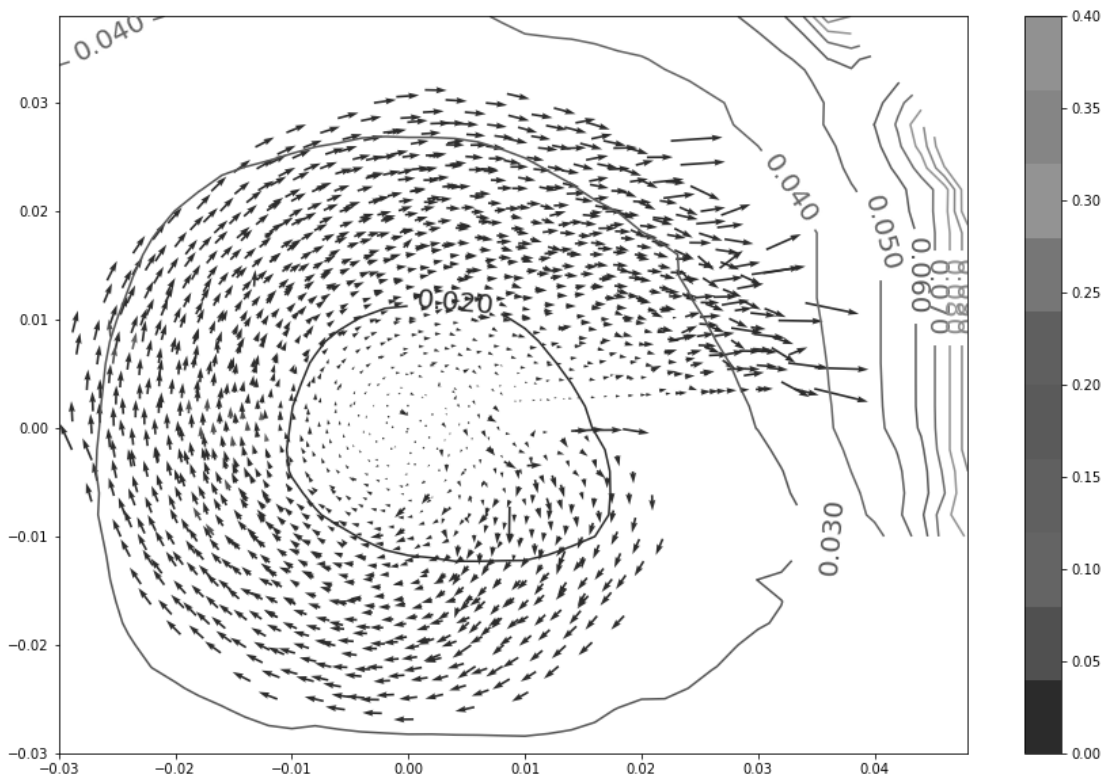


Рис. 3.29. Положення та швидкість частинок на поверхні тарелі, $t = 7$ с

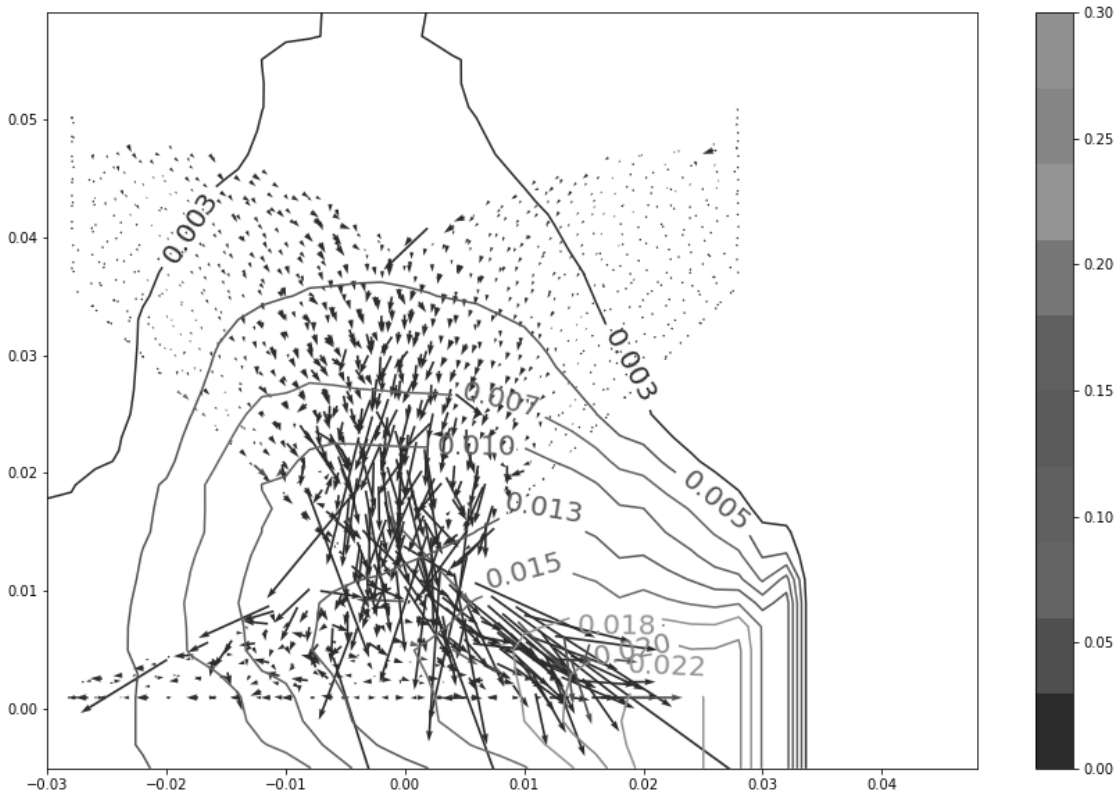


Рис. 3.30. Положення та швидкість частинок після ножа, $t = 15$ с

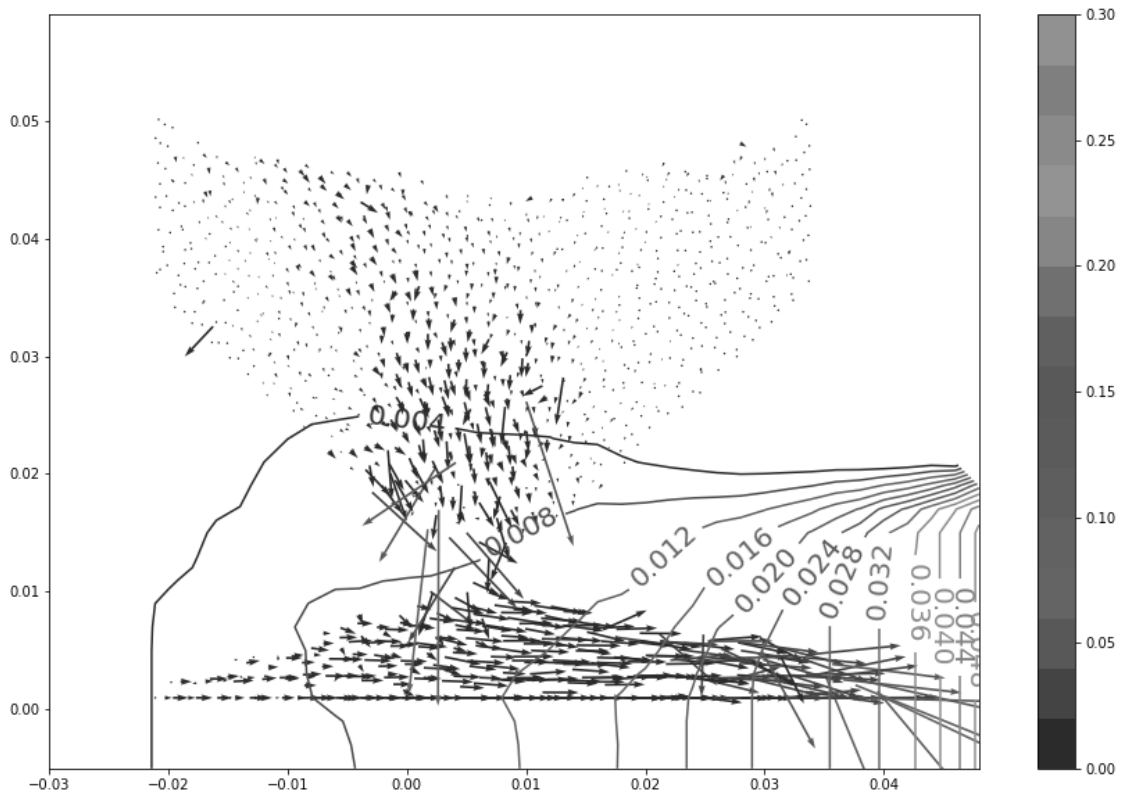


Рис. 3.31. Положення та швидкість частинок перед ножем, $t = 15$ с

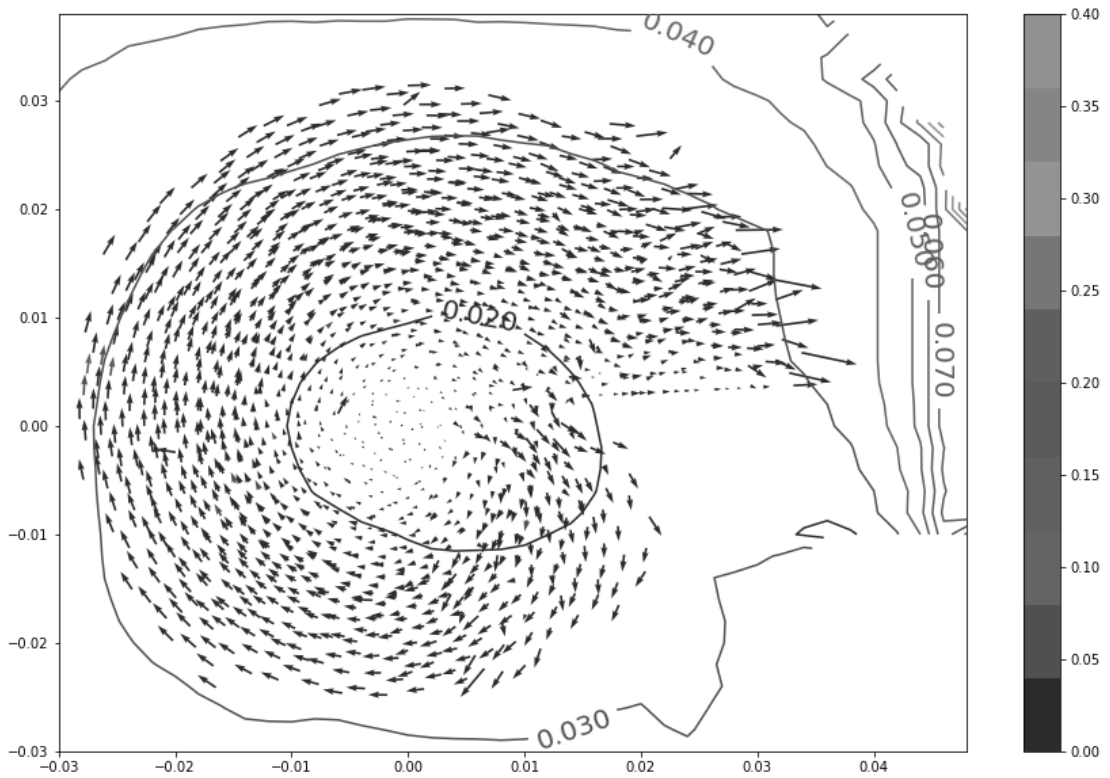


Рис. 3.32. Положення та швидкість частинок на поверхні тарелі, $t = 15$ с

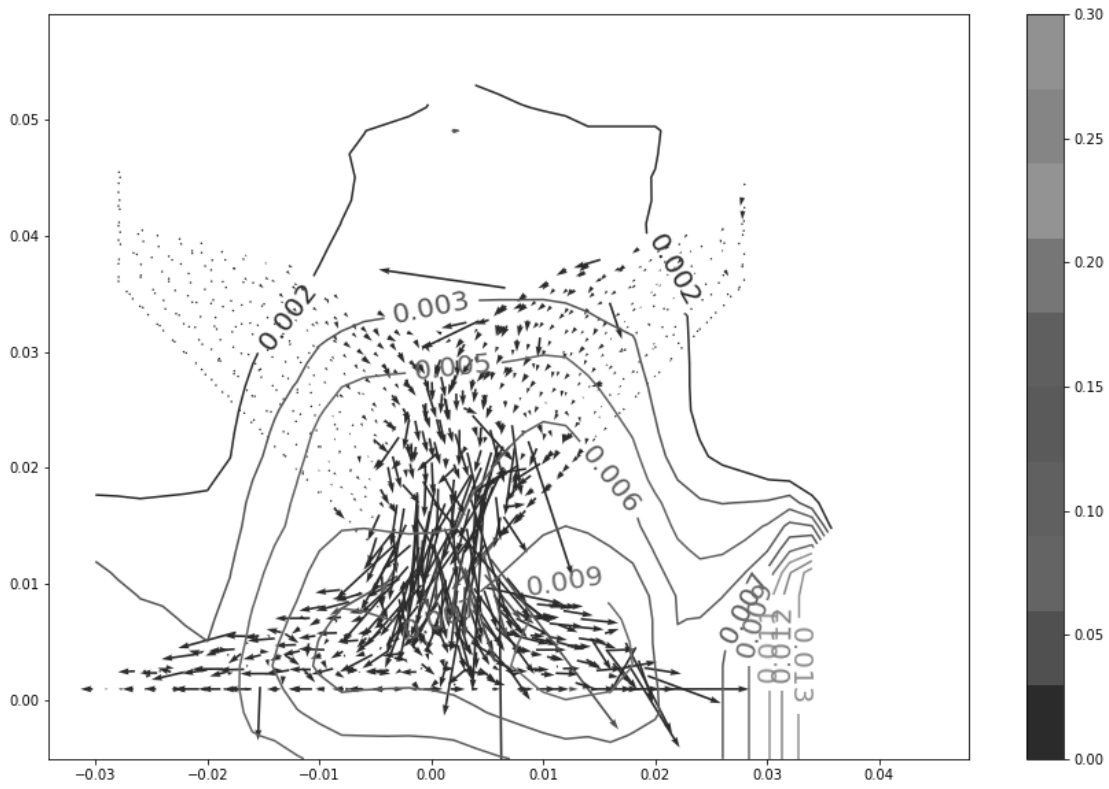


Рис. 3.33. Положення та швидкість частинок після ножа, $t = 25$ с

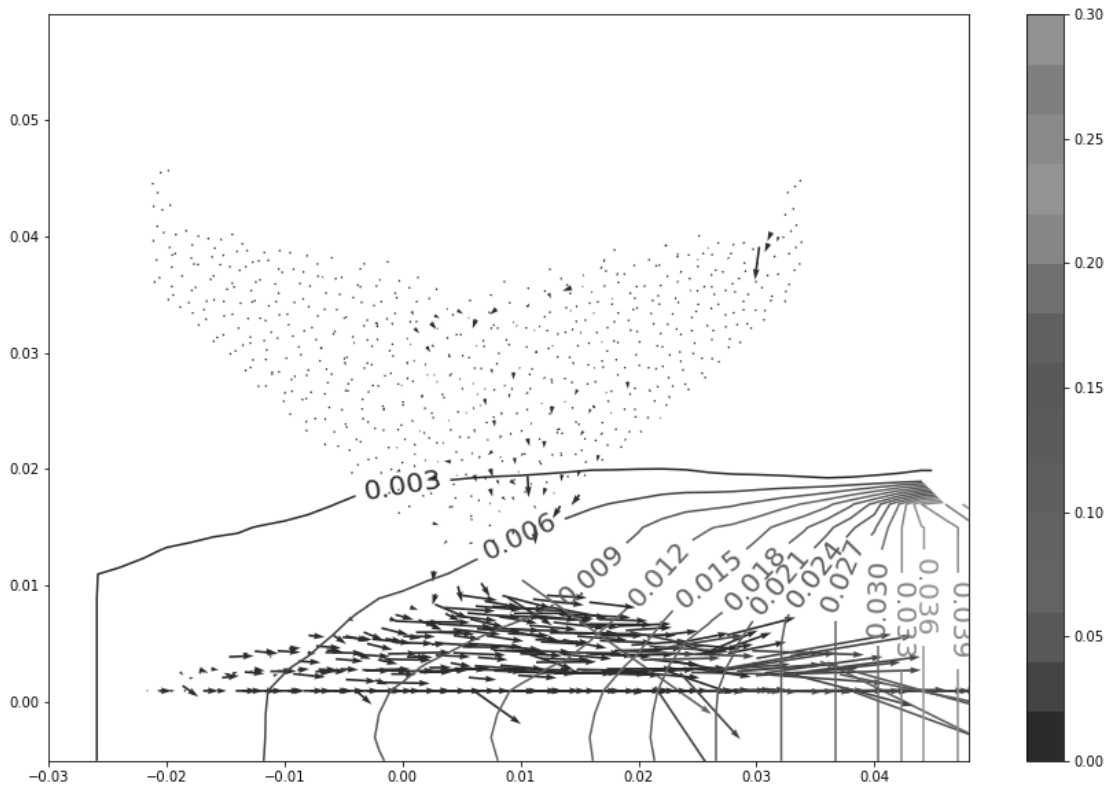


Рис. 3.34. Положення та швидкість частинок перед ножем, $t = 25$ с

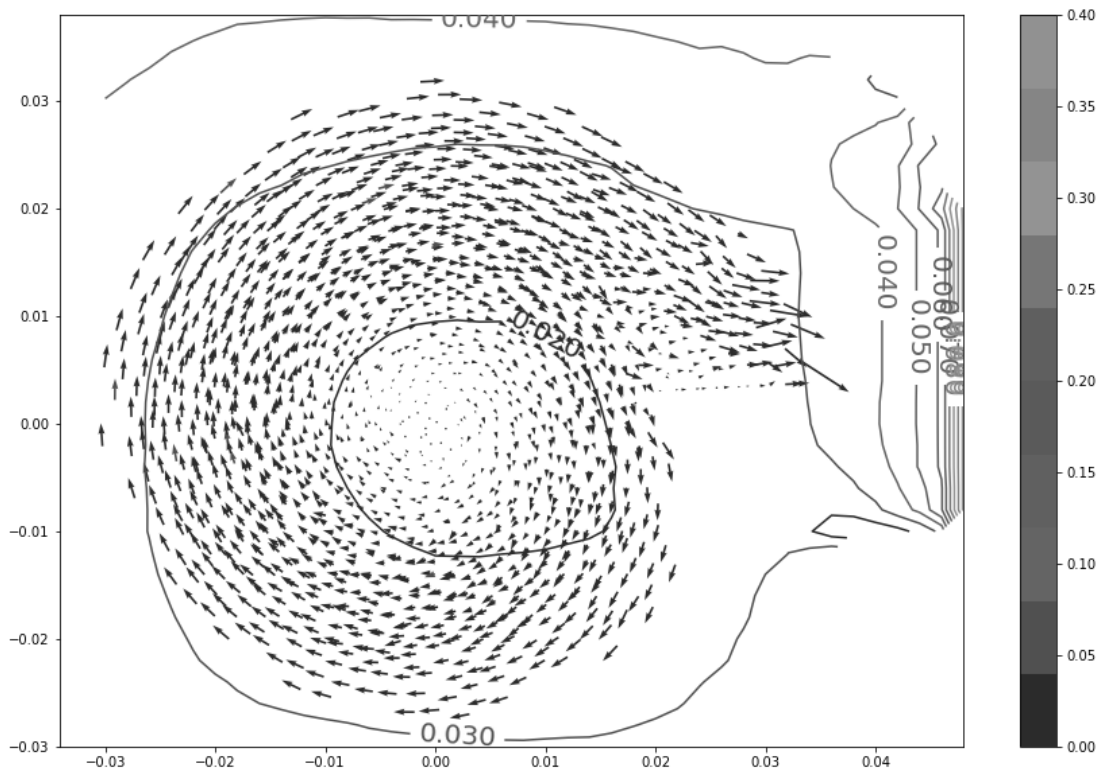


Рис. 3.35. Положення та швидкість частинок на поверхні тарелі, $t = 25$ с

Розглянемо детальніше розподіл швидкостей частинок у горизонтальному перерізі вихідного патрубку для кожного з інтервалів. На рис. 3.36, 3.38 та 3.40 суцільними лініями показані зони, в яких частинки рухаються із відповідними швидкостями.

Для кожного інтервалу визначені мінімальні, максимальні та середні значення швидкостей частинок.

Побудовані гістограми розподілу швидкостей частинок (рис. 3.37, 3.39, 3.41), розраховані їх середньоквадратичне відхилення та дисперсія (табл. 3.20).

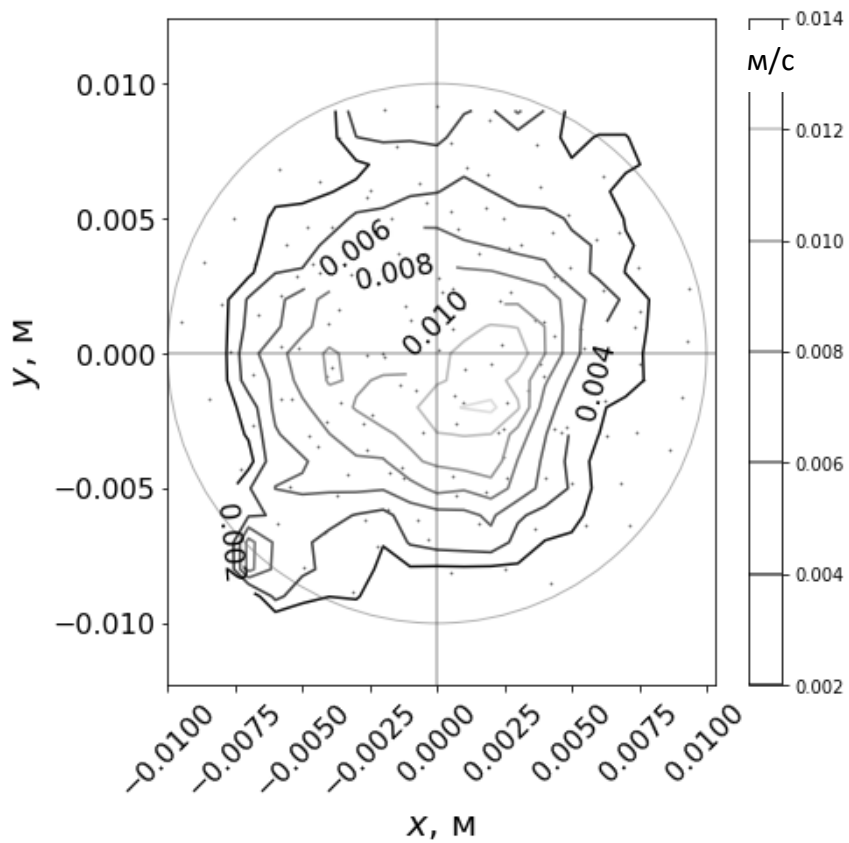


Рис. 3.36. Зони з характерними швидкостями частинок у горизонтальному перерізі вихідного патрубка бункера у момент часу $t = 7$ с

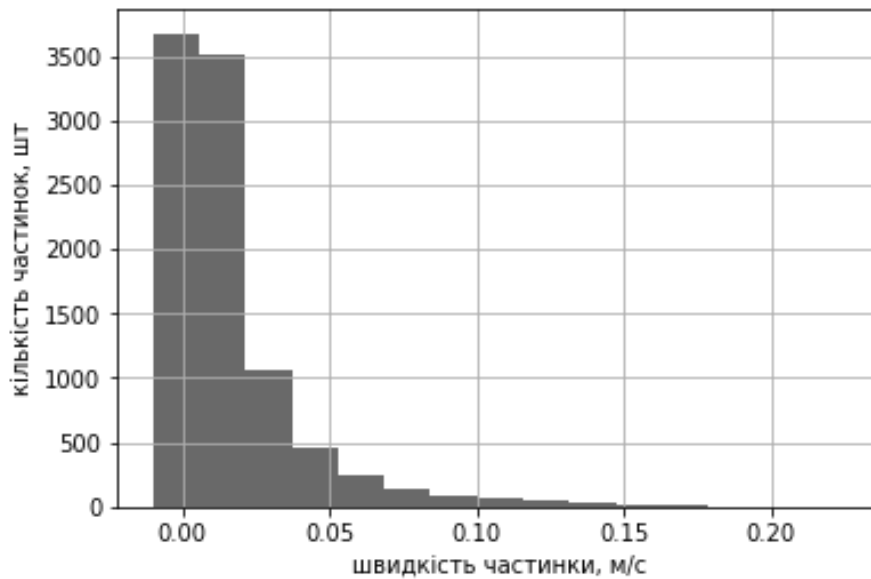


Рис. 3.37. Гістограма розподілу швидкостей частинок у горизонтальному перерізі вихідного патрубка бункера у момент часу $t = 7$ с

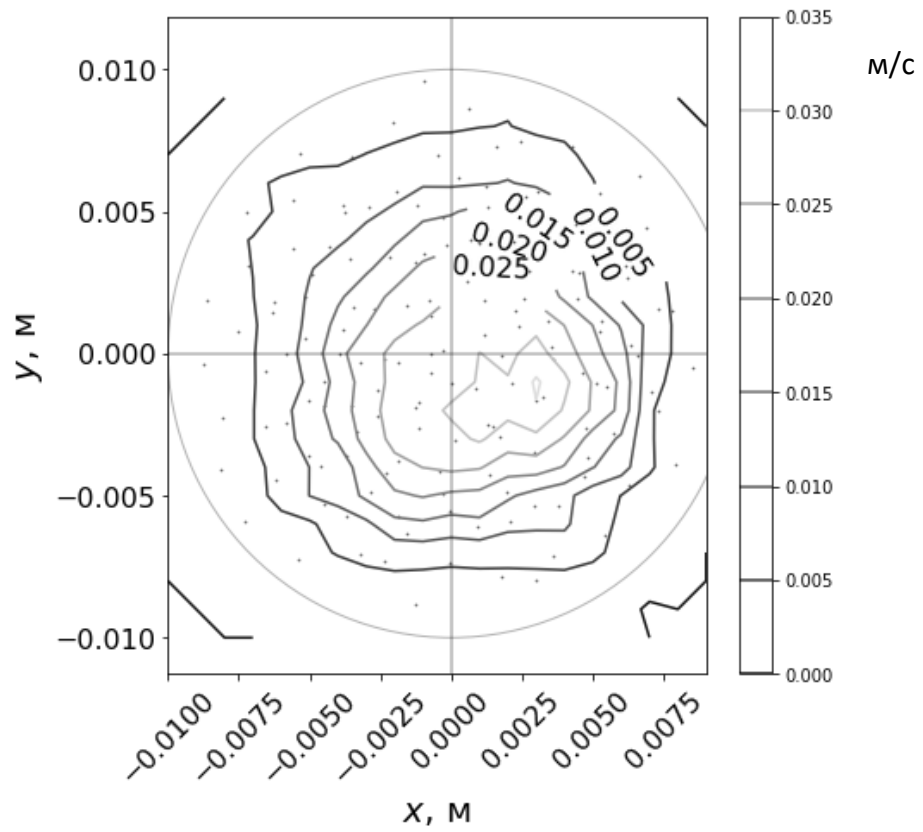


Рис. 3.38. Зони з характерними швидкостями частинок у горизонтальному перерізі вихідного патрубка бункера у момент часу $t = 15$ с

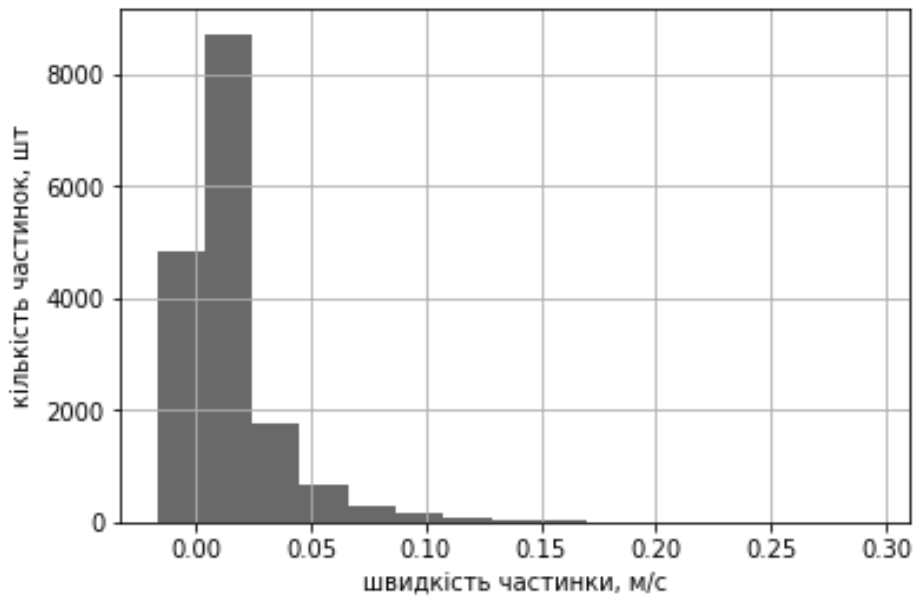


Рис. 3.39. Гістограма розподілу швидкостей частинок у горизонтальному перерізі вихідного патрубка бункера у момент часу $t = 15$ с

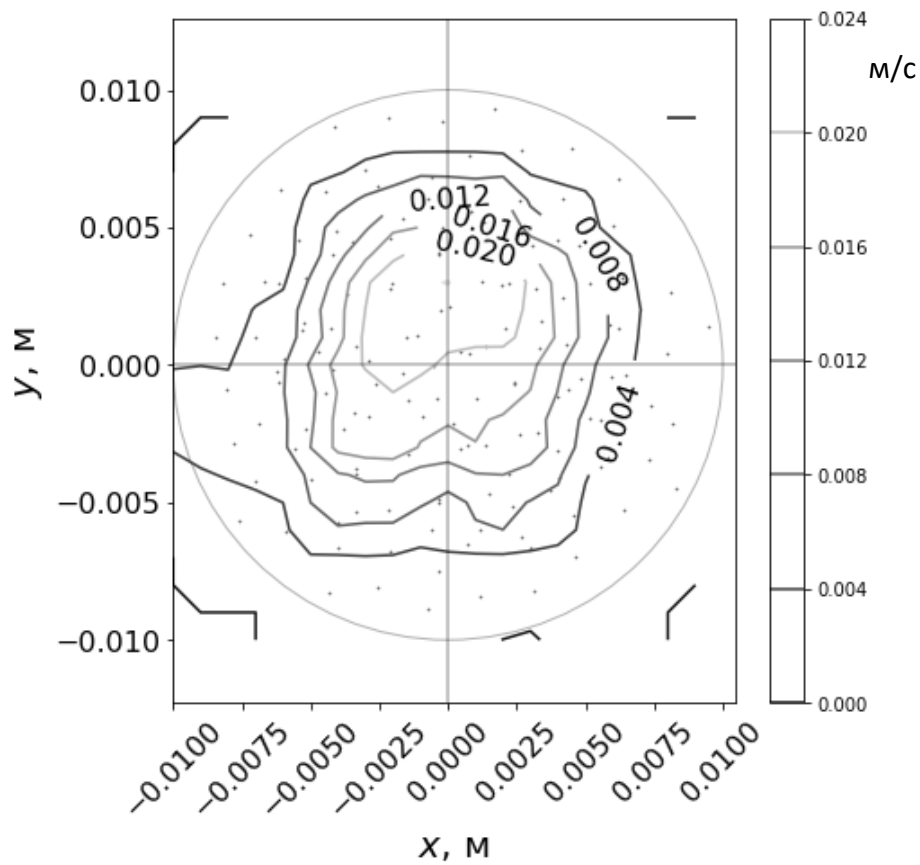


Рис. 3.40. Зони з характерними швидкостями частинок у горизонтальному перерізі вихідного патрубка бункера у момент часу $t = 25$ с

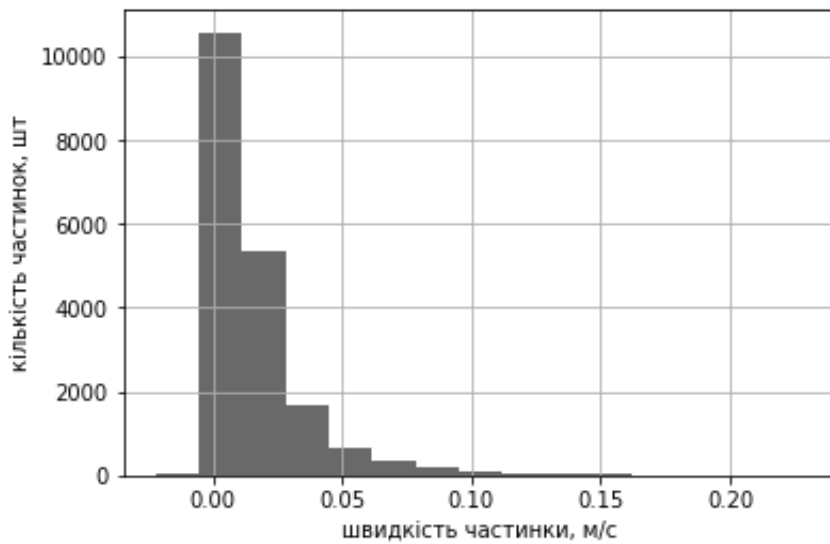


Рис. 3.41. Гістограма розподілу швидкостей частинок у горизонтальному перерізі вихідного патрубка бункера у момент часу $t = 25$ с

Параметри руху частинок у зоні вихідного патрубка бункера

Назва параметра	$t = 7$ с	$t = 15$ с	$t = 25$ с
Максимальне значення швидкості	0,225886	0,2947	0,2289
Мінімальне значення швидкості	0,0102195	-0,0172	-0,0221
Середнє значення швидкості	0,0162	0,01539	0,0159
Середньоквадратичне відхилення швидкості	0,0229	0,0212	0,01997
Дисперсія швидкості	0,00053	0,00045	0,0003989
0,25 - квантиль	0,002839	0,002898	0,003602
0,50 - квантиль	0,008031	0,008094	0,009548
0,75 - квантиль	0,019650	0,018706	0,020062

На рис. 3.42 у графічному вигляді показано залежність дисперсії швидкості частинок від положення ножа. Її аналіз свідчить, що зі збільшенням відстані від осі обертання тарелі до ножа дисперсія зменшується, тобто зменшується величина пульсацій у потоці сипкого матеріалу.

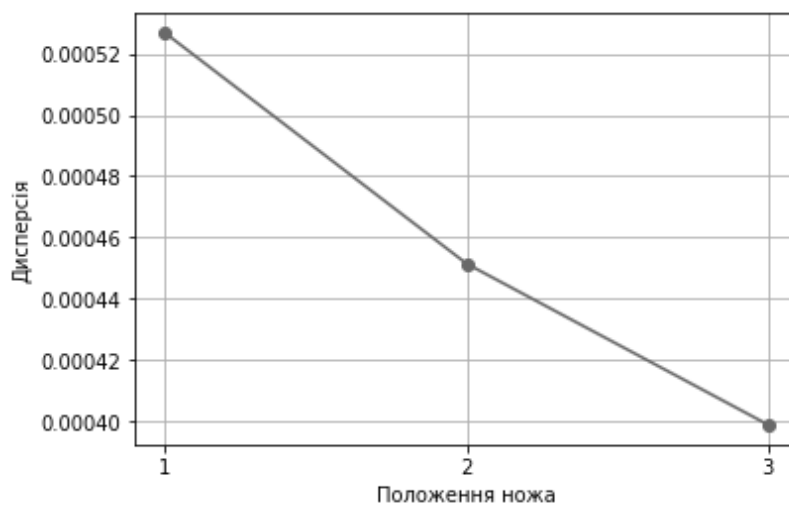


Рис. 3.42. Залежність величини дисперсії швидкостей частинок від положення ножа

Аналіз отриманих залежностей дозволяє зробити наступні висновки:

- рух частинок всередині бункера має нормальний характер, але порівняно із випадком вільного витікання, абсолютні значення швидкостей частинок менші, що пояснюється наявністю конусу матеріалу під вихідним отвором бункера;
- процес витікання з бункеру є несиметричним, найбільш інтенсивне витікання спостерігається в зоні після ножа;
- на тарелі перед ножом формується скупчення матеріалу, що призводить до збільшення радіусу конусу матеріалу в цій зоні;
- величина пульсацій потоку матеріалу зменшується зі збільшенням відстані від осі обертання тарелі до ножа.

Дослідження впливу параметрів системи «бункер-живильник» на її продуктивність

З метою визначення залежності між положенням ножа та продуктивністю системи проведено моделювання її роботи методом дискретних елементів. Під час моделювання ніж переміщувався 6 разів на відстань 0,003 м.

На першому етапі моделювання сипкий матеріал надходив у бункер при закритому вихідному патрубку. У момент часу 2,4 с вихідний патрубок відкривався і сипкий матеріал починав висипатись на поверхню тарелі.

Параметри живильника мали такі самі значення як і при проведенні аналітичного дослідження: $L = 0,012$ м; $R_v = 0,007$ м; $\varphi = 25,2^\circ$; $\omega = 0,7$ рад/с.

Таріль оберталась з постійною швидкістю, а положення ножа змінювалось через задані проміжки часу, що показані у табл. 3.21.

З поверхні тарелі частинки знімались ножом та надходили на поверхню формувача. Маса частинок на поверхні формувача визначалась із кроком 0,02 с, результати вимірювань представлені на рис. 3.43.

**Положення ножа під час дослідження продуктивності системи
«бункер – тарілчастий живильник»**

№ з/п	Інтервал часу, с	Відстань від вісі обертання до ножа, м
1	4..6	0,00863
2	6..10	0,01163
3	10..14	0,01463
4	14..18	0,01763
5	18..22	0,02063
6	22..26	0,02363
7	26..30	0,02663

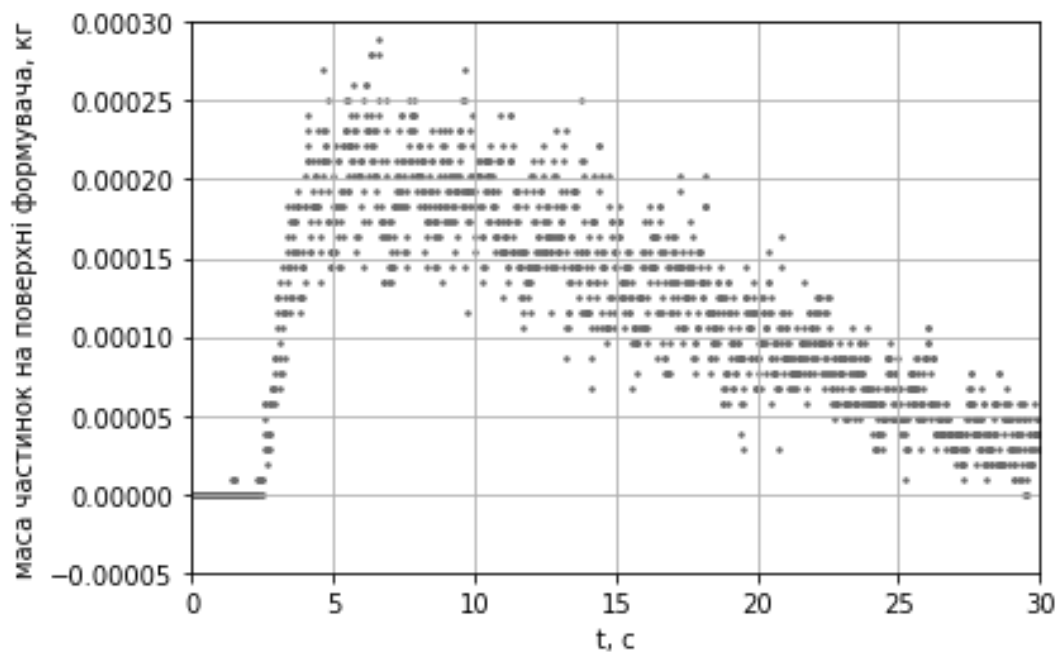


Рис. 3.43. Залежність продуктивності системи «бункер – тарілчастий живильник» від часу

Для визначення залежності продуктивності живильника від положення ножа для кожного інтервалу часу розраховувалось середнє

значення маси частинок на поверхні формувача. Результати апроксимовані лінійною функцією (рис. 3.44).

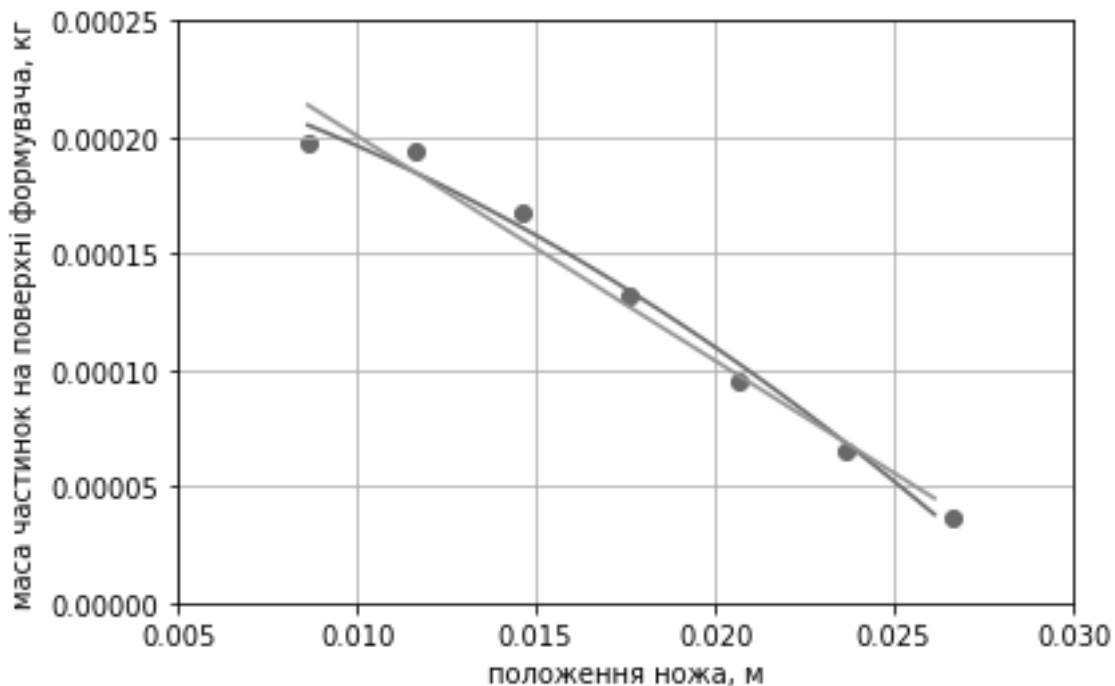


Рис. 3.44. Залежність продуктивності системи «бункер – тарілчастий живильник» від положення ножа

Для перевірки отриманої моделі розраховано значення критерію Фішера, яке дорівнює $F = 1,024$.

Табличне значення більше за розраховане і дорівнює $F(0.05, 1, 5) = 6,6079$, що дозволяє зробити висновок про адекватність лінійної моделі

3.5. Дослідження руху матеріалу у відцентровому змішувачі безперервної дії

У більшості відомих конструкцій змішувачів безперервної дії процес змішування забезпечується за рахунок створення потоків частинок, що взаємно перетинаються [11, 44-47, 55, 70-72, 89, 148]. Для цього потоки вихідних компонентів, які надходять з живильників, розділюються за допомогою робочих органів. Конструкцію робочих органів обирають

таким чином, щоб траєкторії руху частинок після взаємодії з ними змінювались в залежності від початкових умов цієї взаємодії. Наприклад, в залежності від напрямку руху та початкової швидкості частинки змінюється форма траєкторії її руху у кінчному роторі. Також для інтенсифікації процесу змішування широко застосовуються турбулізатори різноманітних конструкцій. Ці пристрої рухаються за власними траєкторіями, які періодично перетинають траєкторії частинок. В результаті потоки компонентів суміші розділюються на складові частини.

З метою порівняння впливу конструктивних особливостей на параметри суміші, авторами проведено дослідження руху частинок у змішувачах п'яти конструкцій:

- змішувач з кінчним ротором;
- змішувач з кінчним ротором та турбулізатором;
- змішувач з параболічним ротором;
- змішувач з параболічним ротором та турбулізатором;
- змішувач конструкції Ластовцева.

Розрахунки проводились із використанням методу дискретних елементів. Під час дослідження у вхідний патрубок змішувача подавались два компоненти суміші: основний та ключовий, параметри яких наведені у табл. 3.22 ... 3.29.

Таблиця 3.22

Параметри частинок основного компонента

Назва параметра	Значення
Радіус, м	0,002
Коефіцієнт Пуассона	0,3
Густина, кг/м ³	2300
Модуль Юнга, Па	1,48e+8

Таблиця 3.23

Параметри частинок ключового компонента

Назва параметра	Значення
Радіус, м	0,003
Коефіцієнт Пуассона	0,3
Густина, кг/м ³	2300
Модуль Юнга, Па	1,48e+8

Таблиця 3.24

Параметри матеріалу корпусу та робочих органів живильника (сталь)

Назва параметра	Значення
Коефіцієнт Пуассона	0,23
Густина, кг/м ³	7800
Модуль Юнга, Па	1,72e+11

Таблиця 3.25

Параметри взаємодії між частинками основного компонента

Назва параметра	Значення
Коефіцієнт пружності	0,3
Коефіцієнт тертя ковзання	0,3
Коефіцієнт тертя кочення	0,01

Таблиця 3.26

Параметри взаємодії між частинками ключового компонента

Назва параметра	Значення
Коефіцієнт пружності	0,5
Коефіцієнт тертя ковзання	0,4
Коефіцієнт тертя кочення	0,02

Таблиця 3.27

Параметри взаємодії між частинками ключового та основного компонентів

Назва параметра	Значення
Коефіцієнт пружності	0,3
Коефіцієнт тертя ковзання	0,3
Коефіцієнт тертя кочення	0,01

Таблиця 3.28

Параметри взаємодії між частинками основного компонента та матеріалом корпусу

Назва параметра	Значення
Коефіцієнт пружності	0,3
Коефіцієнт тертя ковзання	0,3
Коефіцієнт тертя кочення	0,02

Параметри взаємодії між частинками ключового компонента та матеріалом корпусу

Назва параметра	Значення
Коефіцієнт пружності	0,3
Коефіцієнт тертя ковзання	0,3
Коефіцієнт тертя кочення	0,02

Швидкість обертання роторів в усіх випадках становила 126 рад/с. Швидкість обертання турбулізаторів – 126 рад/с. Частинки всередину змішувача надходили із зони вхідного патрубку з нульовою початковою швидкістю.

Частинки основного компонента надходили впродовж 2 секунд від початку моделювання зі швидкістю 2000 частинок/с. Частинки ключового компонента надходили у період часу 0..0,5 с із швидкістю 500 частинок/с, а у період 0,5..2 с їх швидкість збільшувалась до 750 частинок/с. Таким чином, в момент часу 0,5 с відбувалась стрибкоподібна зміна продуктивності живильника ключового компонента на 50%.

Математичне моделювання процесу руху сипких матеріалів в робочому просторі відцентрового змішувача дозволило визначити:

- залежність зміни концентрації ключового компоненту ($C_{КК}$) від часу на виході змішувача. Для отриманих результатів методом найменших квадратів розраховувались коефіцієнти експоненціальної залежності, початок якої співпадає із стрибкоподібною зміною продуктивності живильника ключового компонента;
- час перебування частинок у змішувачі. Визначався різницею часу між появою першої частинки на вході та виході змішувача;

- індекс сегрегації (однорідності) суміші на виході змішувача.

Значення індексу визначалось за формулою:

$$S = \frac{C_{KK}}{C_{KK} + C_{OK}} + \frac{C_{OO}}{C_{OO} + C_{OK}}, \quad (3.36)$$

де C – кількість контактів між частинками ключового та основного компонентів.

Значення індексу $S = 2$ відповідає абсолютно не змішаному матеріалу, $S = 0$ – відповідає ідеально змішаному матеріалу.

Змішувач з конічним ротором

У змішувачі цієї конструкції (рис. 3.45) частинки сипкого матеріалу після виходу з живильника через вхідний патрубок 3 падають на дно конічного ротора 2, який обертається із постійною частотою. За рахунок відцентрових сил вони відкидаються до бічної стінки ротора та починають рухатись вздовж неї за спіральними траєкторіями. Форма траєкторій визначається швидкістю обертання ротора, початковими швидкостями частинок, коефіцієнтами тертя між частинками та ротором.

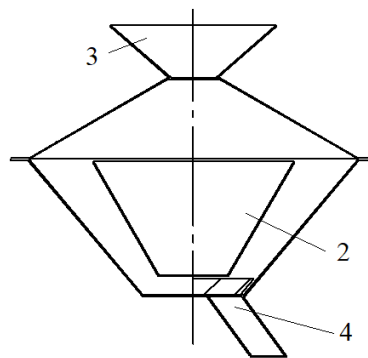


Рис. 3.45. Схема відцентрового змішувача з конічним ротором:

2 – конічний ротор; 3 – вхідний патрубок; 4 – вихідний патрубок

Графічне зображення інтенсивності надходження частинок основного (ОК) та ключового компонентів (КК) у змішувач представлено на рис. 3.46. Під час проведення дослідження у зоні вихідного патрубку 4

визначалась кількість частинок основного і ключового компонентів, та розраховувалась концентрація КК (рис. 3.47).

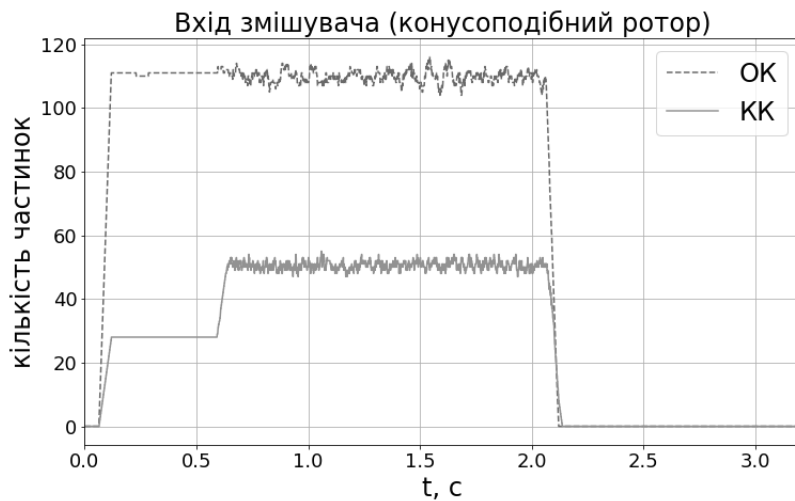


Рис. 3.46. Інтенсивність надходження частинок основного та ключового компонентів у змішувач

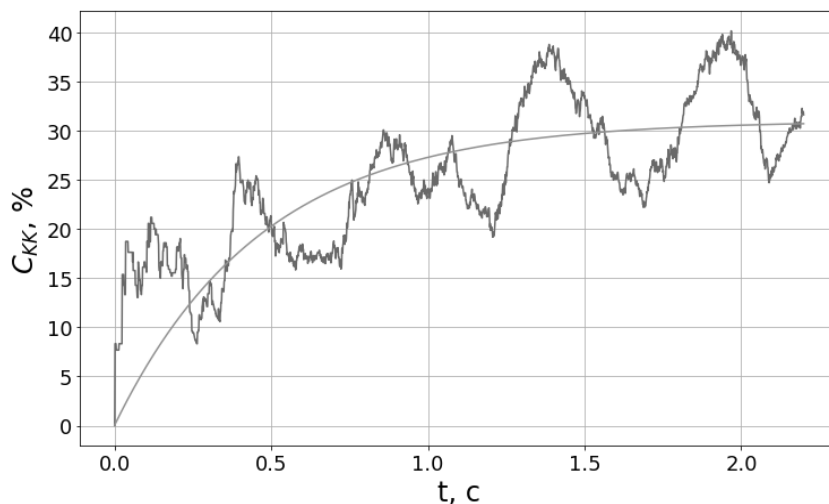


Рис. 3.47. Зміна концентрації КК на виході змішувача з конічним ротором

Змішувач з конічним ротором та турбулізатором

У змішувачі з турбулізатором 1, що обертається, одна частина потоку сипкого матеріалу проходить крізь отвори турбулізатора та потрапляє на дно ротора 2, а інша – відбивається турбулізатором на кришку змішувача 5 та після цього потрапляє в ротор зі зміненими швидкостями та напрямком руху (рис. 3.48). Таким чином, турбулізатор суттєво змінює початкові умови руху частинок у роторі.

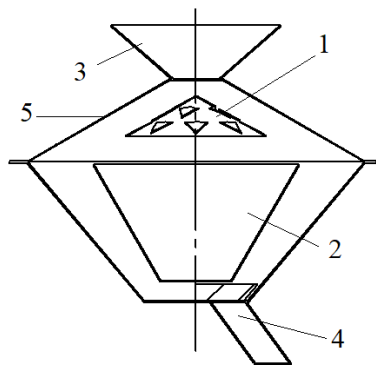


Рис. 3.48. Схема відцентрового змішувача з конічним ротором та турбулізатором

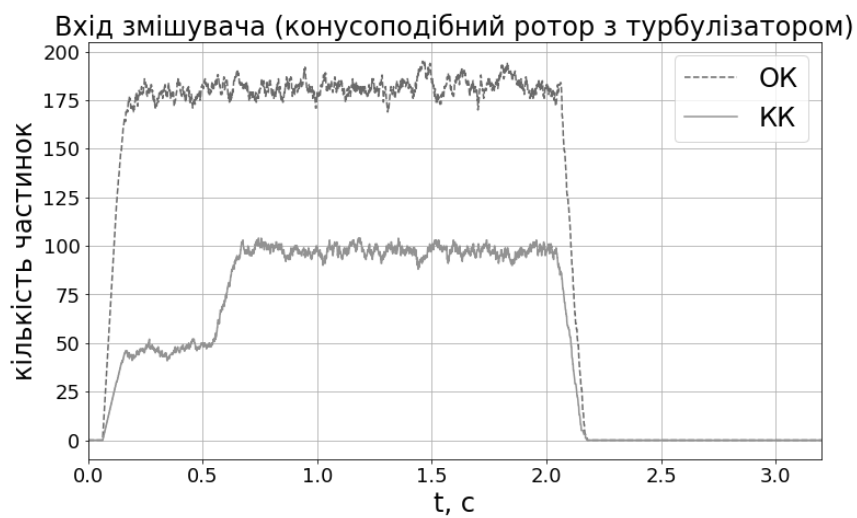


Рис. 3.49. Інтенсивність надходження частинок основного (ОК) та ключового компонентів (КК) у змішувач

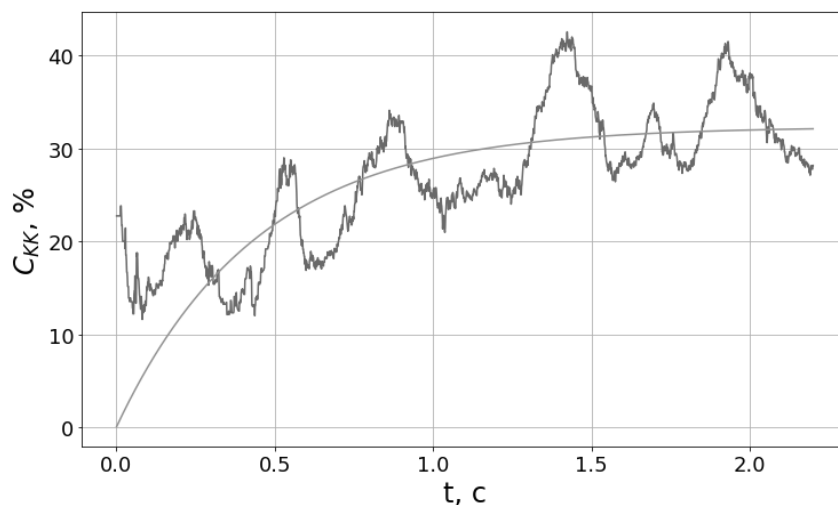


Рис. 3.50. Зміна концентрації КК на виході змішувача з конічним ротором та турбулізатором

Змішувач з параболічним ротором

Змішувач цієї конструкції (рис. 3.51) відрізняється від конічного тільки формою ротора 2, бічна стінка якого має змінний кут нахилу, що призводить до зміни форми траєкторії руху частинок.

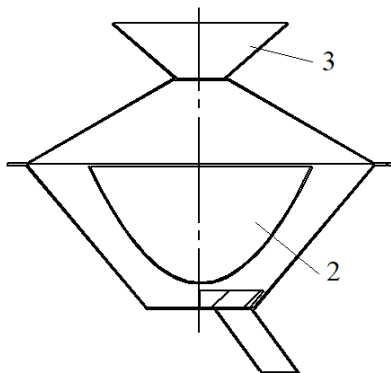


Рис. 3.51. Схема відцентрового змішувача з параболічним ротором

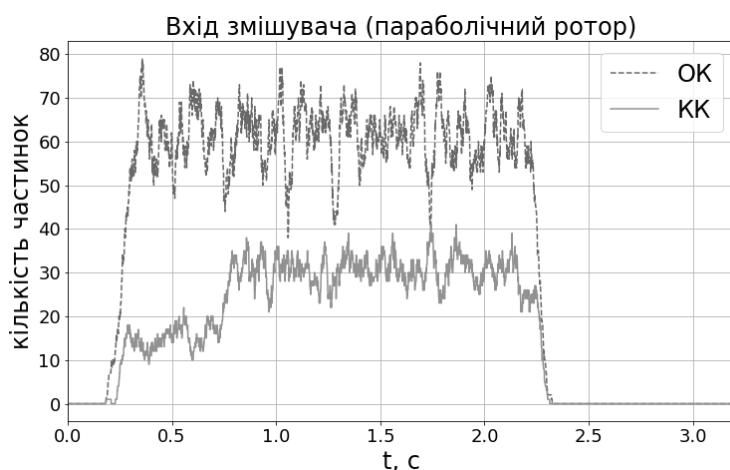


Рис. 3.52. Інтенсивність надходження частинок у змішувач

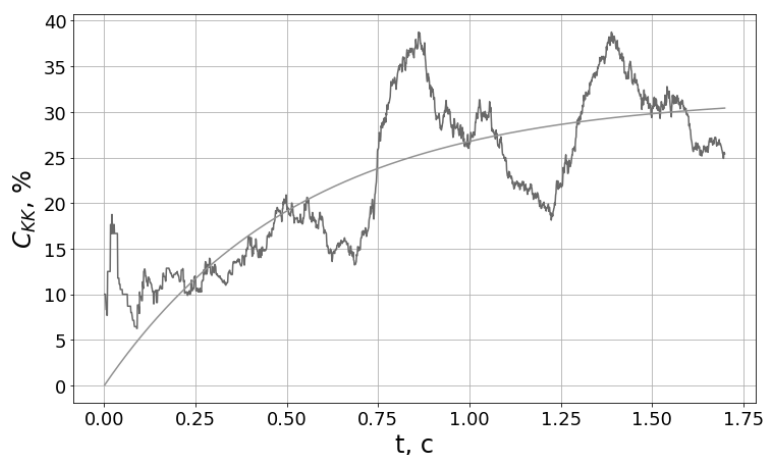


Рис. 3.53. Зміна концентрації KK на виході змішувача з параболічним ротором

Змішувач з параболічним ротором та турбулізатором (рис. 3.54)

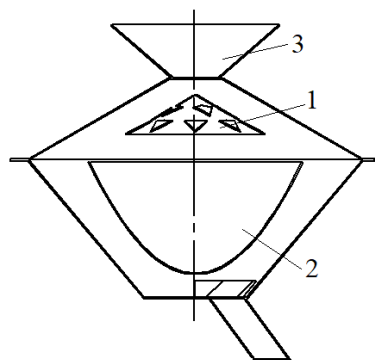


Рис. 3.54. Схема відцентрового змішувача з параболічним ротором та турбулізатором

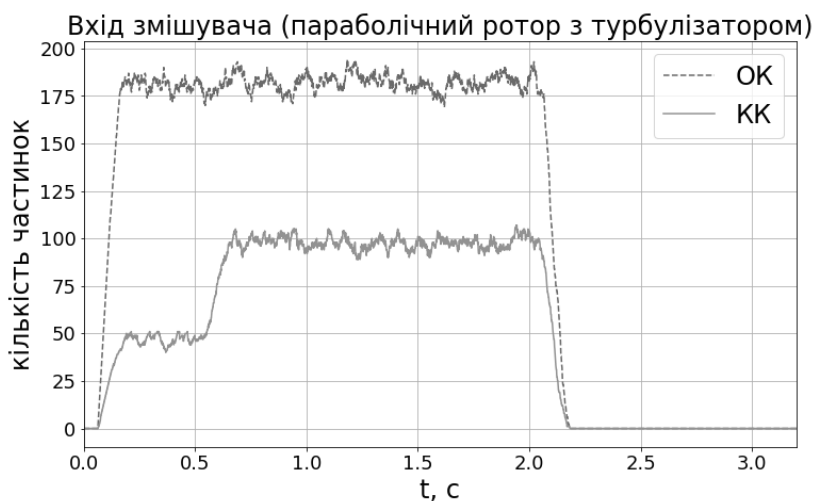


Рис. 3.55. Інтенсивність надходження частинок у змішувач

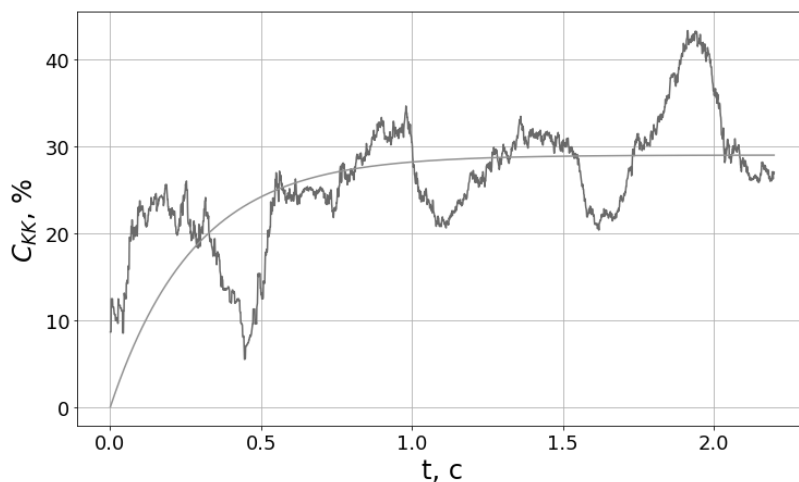


Рис. 3.56. Зміна концентрації КК на виході змішувача з параболічним ротором та турбулізатором

Змішувач конструкції Ластовцева

Змішувач Ластовцева складається з трьох конічних роторів 2, що обертаються з однаковою швидкістю (рис. 3.57). Частинки послідовно проходять крізь всі три ротора, що збільшує час змішування та ймовірність утворення хаотичних потоків сипкого матеріалу.

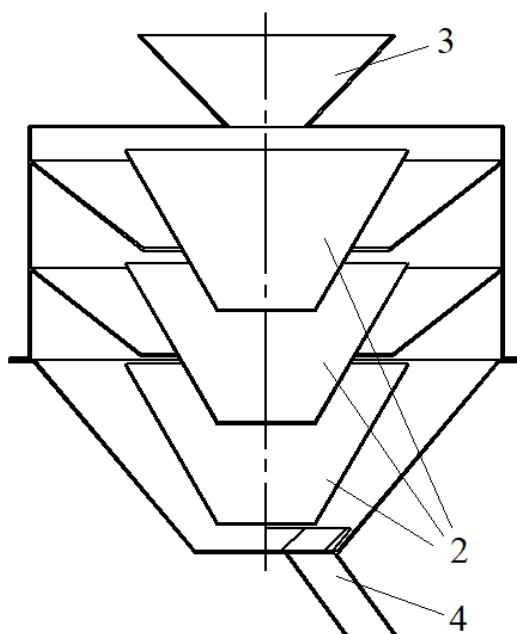


Рис. 3.57. Схема змішувача конструкції Ластовцева

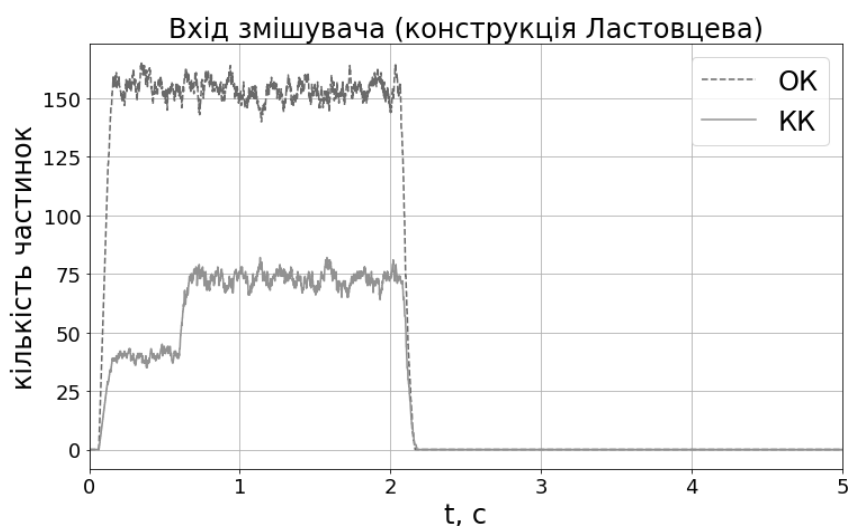


Рис. 3.58. Інтенсивність надходження частинок основного (ОК) та ключового компонентів (КК) у змішувач

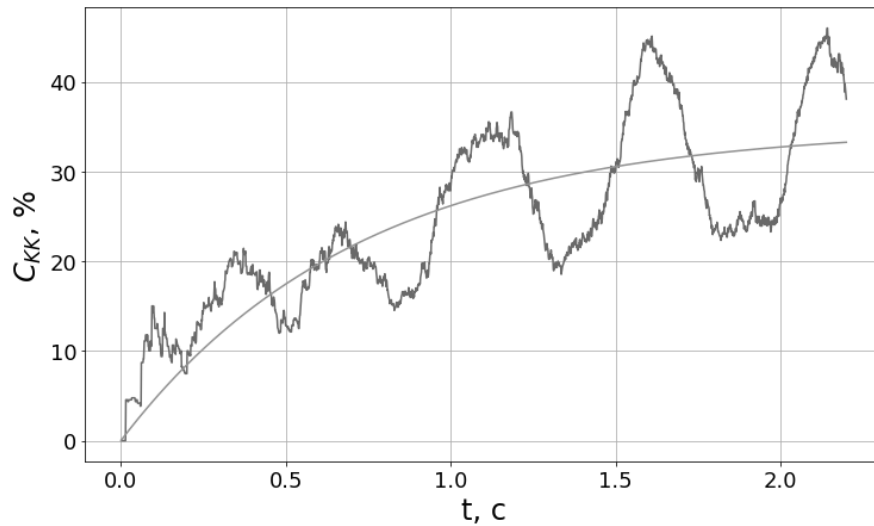


Рис. 3.59. Зміна концентрації КК на виході змішувача конструкції Ластовцева

За отриманими даними методом найменших квадратів розраховано коефіцієнти експоненціальних залежностей, визначено середній час перебування частинок у змішувачі, індекс сегрегації та згладжувальну здатність (постійну часу перехідного процесу) [136].

Результати представлені на рис. 3.60 та у табл. 3.30 та 3.31.

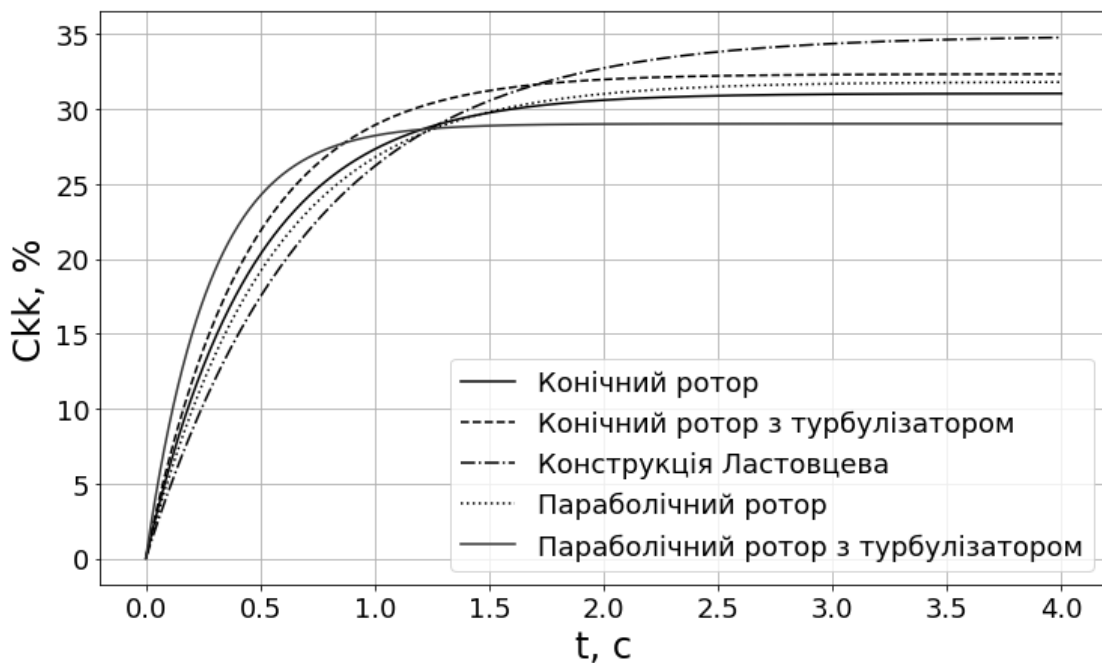


Рис. 3.60. Зміна концентрації КК на виході змішувачів різних типів

Таблиця 3.30

Параметри перехідних процесів у змішувачах різних типів

№ з/п	Тип змішувача	Параметри перехідного процесу	Середній час перебування частинок у змішувачі, с
1	Змішувач з конічним ротором	$C_{KK} = 31,037 \left(1 - e^{-\frac{1}{0,472}t} \right)$	0,9
2	Змішувач з конічним ротором та турбулізатором	$C_{KK} = 32,326 \left(1 - e^{-\frac{1}{0,444}t} \right)$	0,85
3	Змішувач конструкції Ластовцева	$C_{KK} = 34,906 \left(1 - e^{-\frac{1}{0,721}t} \right)$	2,7
4	Змішувач з параболічним ротором	$C_{KK} = 31,811 \left(1 - e^{-\frac{1}{0,543}t} \right)$	1,4
5	Змішувач з параболічним ротором та турбулізатором	$C_{KK} = 29,013 \left(1 - e^{-\frac{1}{0,278}t} \right)$	0,9

Таблиця 3.31

Параметри змішувачів

Тип змішувача	Індекс сегрегації	Постійна часу (згладжувальна здатність), с
Конічний ротор	0,828	0,472
Конічний ротор з турбулізатором	0,778	0,444
Параболічний ротор	1,146	0,543
Параболічний ротор з турбулізатором	0,777	0,278
Змішувач Ластовцева	0,799	0,721

Аналіз отриманих результати дозволяє зробити наступні висновки.

– Введення турбулізаторів у конструкцію змішувача підвищує якість змішування (зменшити індекс сегрегації).

– Введення додаткових роторів (змішувач Ластовцева) підвищує якість змішування (зменшити індекс сегрегації).

– Найбільшу якість змішування (найменше значення індексу сегрегації) забезпечують змішувачі з турбулізаторами та конструкція Ластовцева. Враховуючи, що конструкції з турбулізаторами мають менші масогабаритні показники, їх доцільно використовувати замість змішувачів з декількома роторами.

– Введення турбулізаторів знижує час перебування частинок всередині змішувача.

– Введення додаткових роторів збільшує час перебування частинок всередині змішувача.

– Введення турбулізатора практично не змінює згладжувальну здатність змішувача з конічним ротором. У випадку використання параболічного ротора при введенні турбулізатора, згладжувальна здатність зменшується практично в 2 рази.

– Найбільшу згладжувальну здатність має змішувач з декількома роторами.

– Враховуючи, що технологічно змішувачі з параболічними роторами та декількома роторами складніше виготовити ніж змішувач з одним конічним ротором, в більшості випадків доцільно застосовувати змішувач з конічним ротором та турбулізатором.

Траєкторія руху матеріалу у змішувачі

Результати розрахунку методом дискретних елементів траєкторії руху частинки у роторі конічної форми, що обертається зі швидкістю 120 рад/с, показано на рис. 3.61.

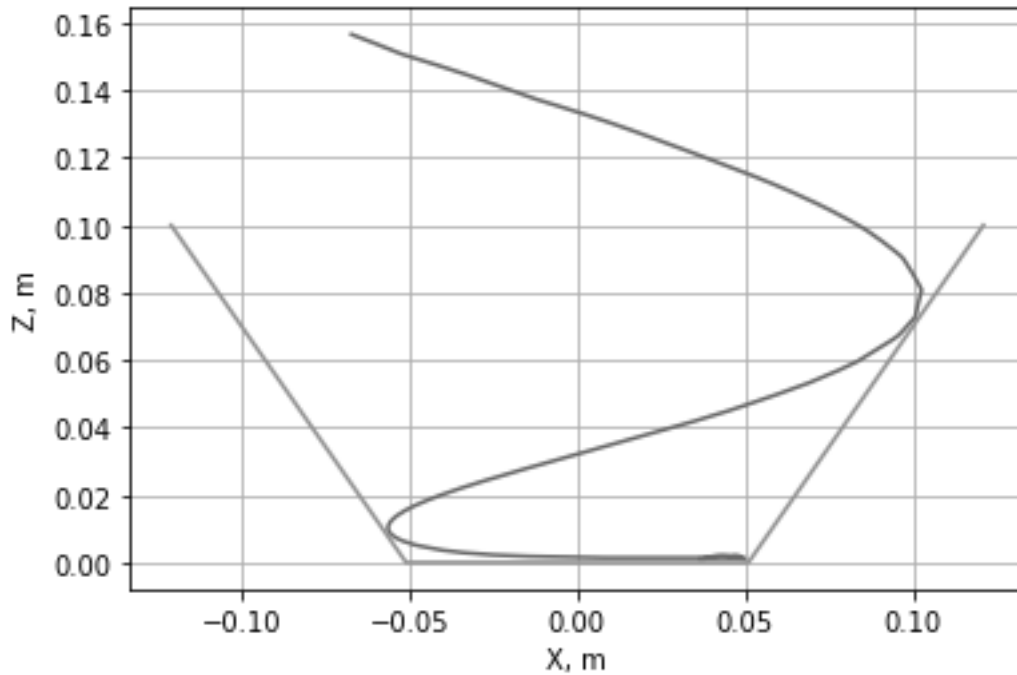


Рис. 3.61. Траєкторія руху частинки у конічному роторі

Траєкторія являє собою спіральну лінію, що збігається із результатами аналітичних розрахунків.

Визначення розподілення частинок під час процесу змішування у роторі

Під час роботи відцентрового змішувача безперервної дії компоненти сипких матеріалів потрапляють всередину його ротора. Початкові параметри руху частинок (координати та швидкість) визначають подальшу траєкторію руху частинок та час їх перебування всередині змішувача [135].

У випадку використання змішувача з конічним ротором без турбулізатора частинки падають безпосередньо на дно ротора. Розглянемо випадок, за якого в ротор надходить тільки один потік частинок (працює тільки один живильник).

Потік, який формується на виході живильника, проходить по поверхні формувача, після чого потрапляє всередину змішувача.

Відповідно частинки мають не нульові горизонтальну та вертикальну складові швидкості. Тобто забезпечити їх надходження точно в центр ротора практично неможливо. На рис. 3.62 показано потоки частинок з двох живильників, які надходять у змішувач.

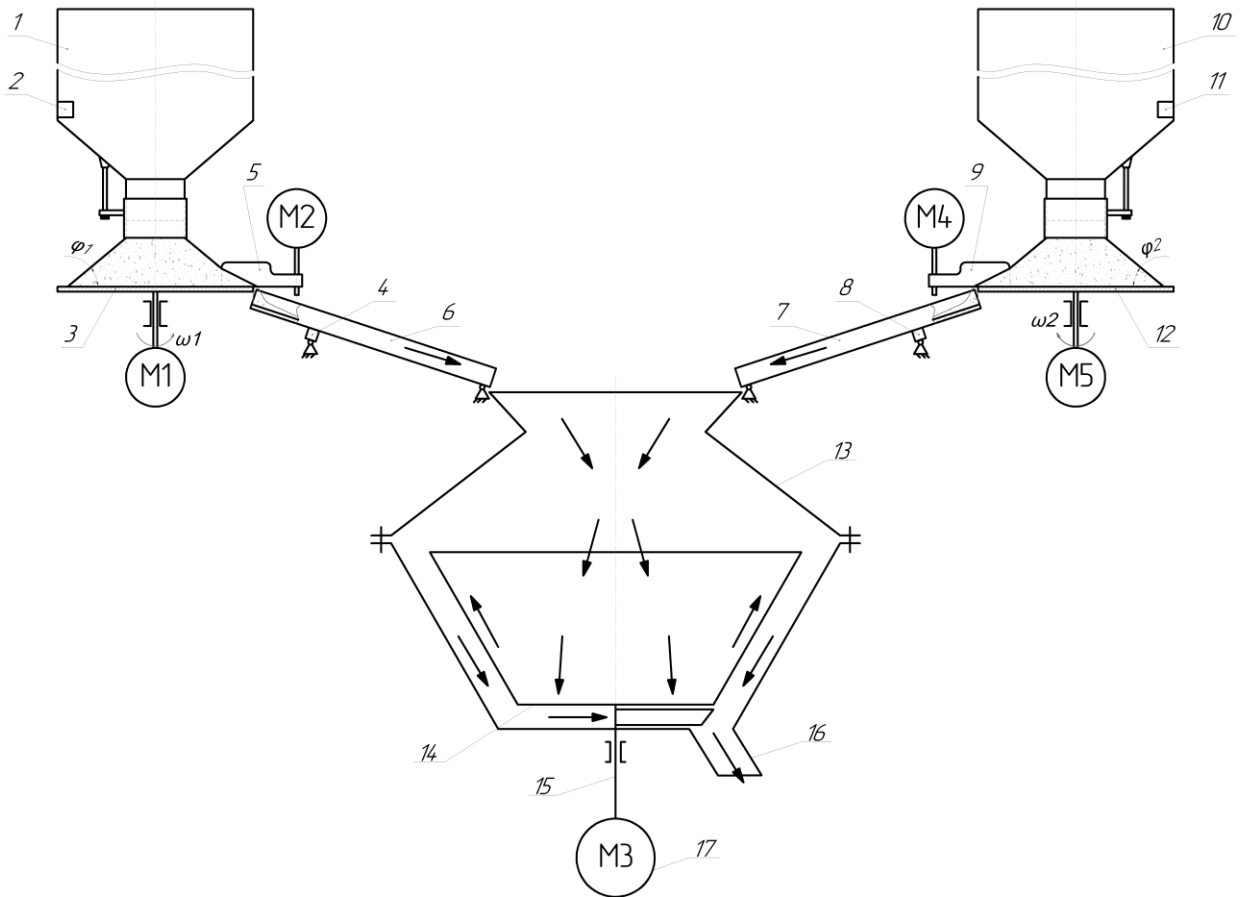


Рис. 3.62. Рух частинок на вході у змішувач

Припустимо, що координати частинок на дні ротора є випадковими величинами з нормальним розподілом та відомими середнім значенням та дисперсією:

$$A(x_A, y_A) = \text{rand}(O(x_o, y_o), \sigma), \quad (3.37)$$

де x_A, y_A – координати частинки A ;

x_o, y_o – координати центральної точки потоку;

σ – дисперсія розподілу.

Випадкове розташування 100 частинок на дні ротора з центральною точкою з координатами (0,017; 0,017) та дисперсією 0,0085 показане на

рис. 3.63. Точками на цьому рисунку показане початкове розташування частинок на дні ротора, суцільною лінією – границя дна ротора.

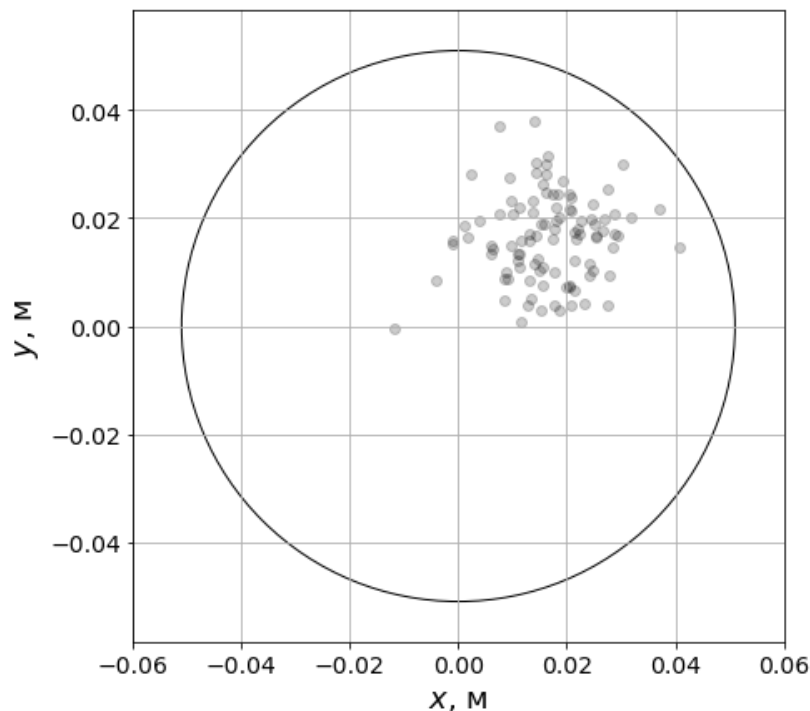


Рис. 3.63. Розташування частинок на дні ротора

Під час руху частинок по поверхні ротора, що обертається, на них діють сили тяжіння, тертя та коріолісова сили. Траєкторію руху частинок по поверхні дна ротора можна описати за допомогою системи рівнянь (2.6).

Рух частинки по бічній поверхні конуса відбувається під дією тих самих сил, але система рівнянь змінюється враховуючи переміщення частинки (2.8). Програма для визначення розподілу частинок всередині кінчного ротора наведена у додатку А.

На рис. 3.64 показані результати моделювання руху частинок у роторі, що має наступні параметри:

- радіус дна $R_0 = 0,051$ м;
- висота $H = 0,17$ м;
- половина кута розтрубу $\alpha = 35^\circ$;

- частота обертання $\omega = 125,6$ рад/с.

Коефіцієнт тертя між частинками та матеріалом ротора дорівнював 0,3.

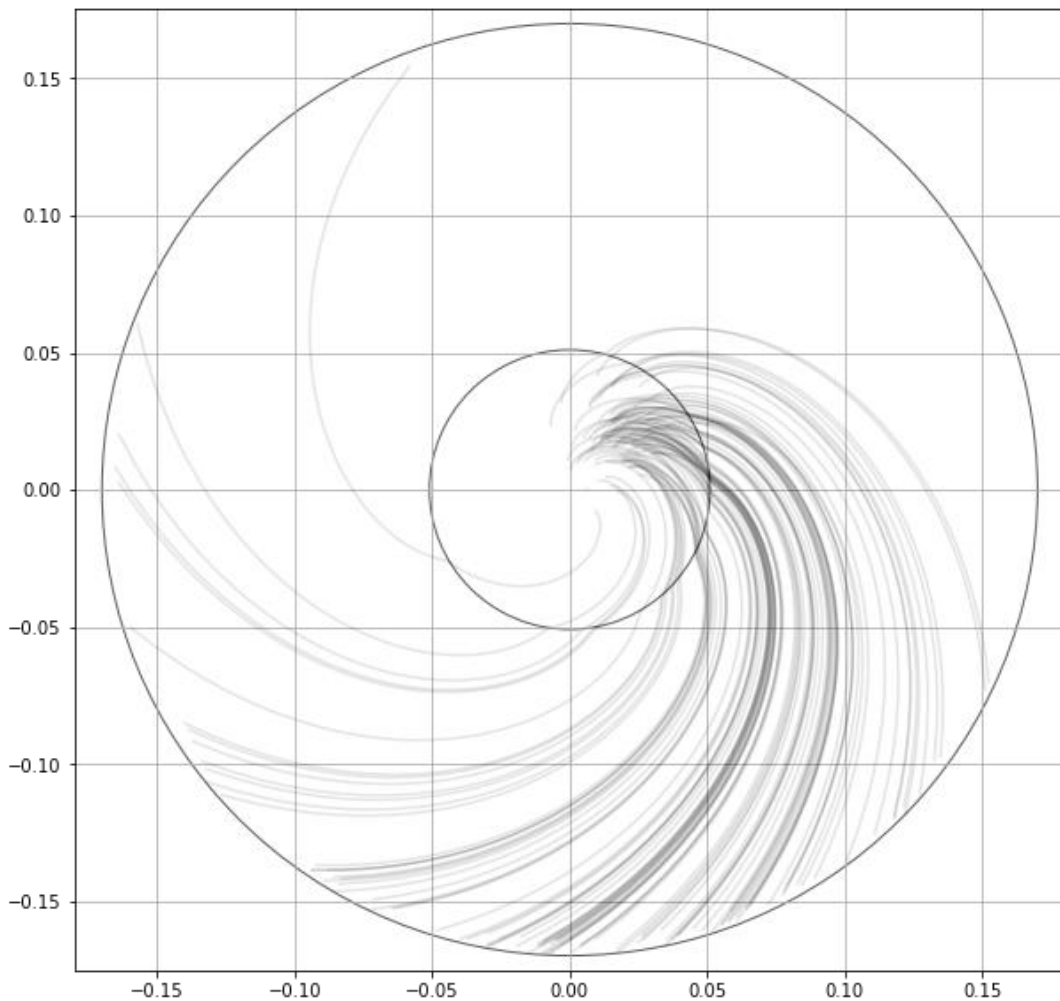


Рис. 3.64. Траєкторії руху частинок у кінчному роторі

Внутрішнє коло на рис. 3.64 – границя дна ротора, зовнішнє коло – границя зовнішньої кромки ротора.

На рис. 3.65 та 3.66 показано положення частинок перед початком їх руху вздовж бічної стінки ротора та у момент виходу з ротора, відповідно.

Розподіл частинок вздовж зовнішньої кромки ротора можна представити у вигляді гістограми (рис. 3.67). Для цього розділимо коло на

зони із кроком 15° та визначимо кількість частинок, що знаходяться у кожній із зон.

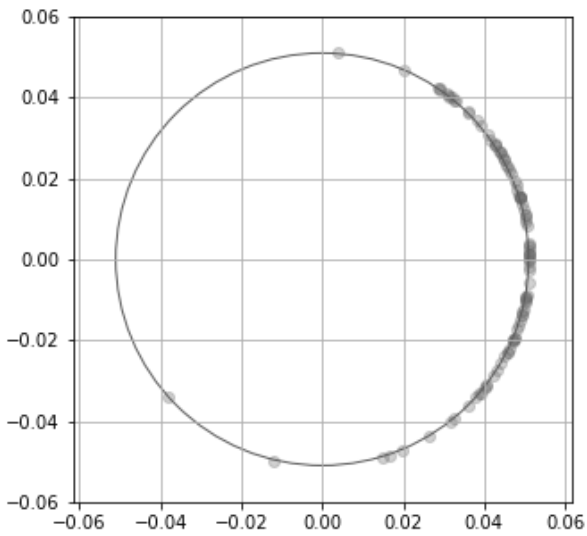


Рис. 3.65. Положення частинок перед початком руху вздовж бічної стінки ротора

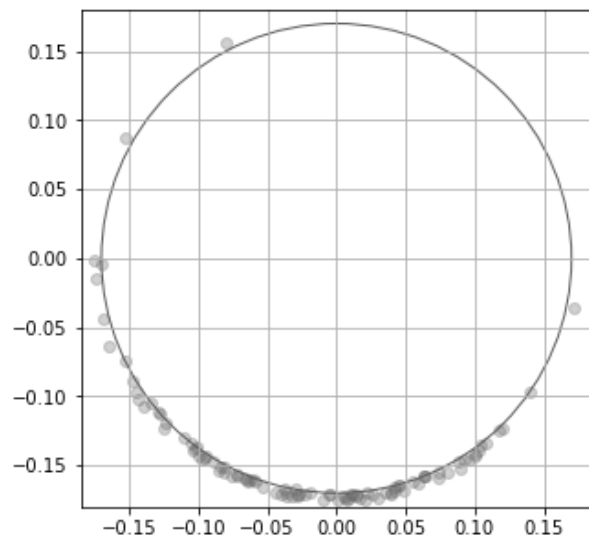


Рис. 3.66. Положення частинок у момент їх виходу із ротора

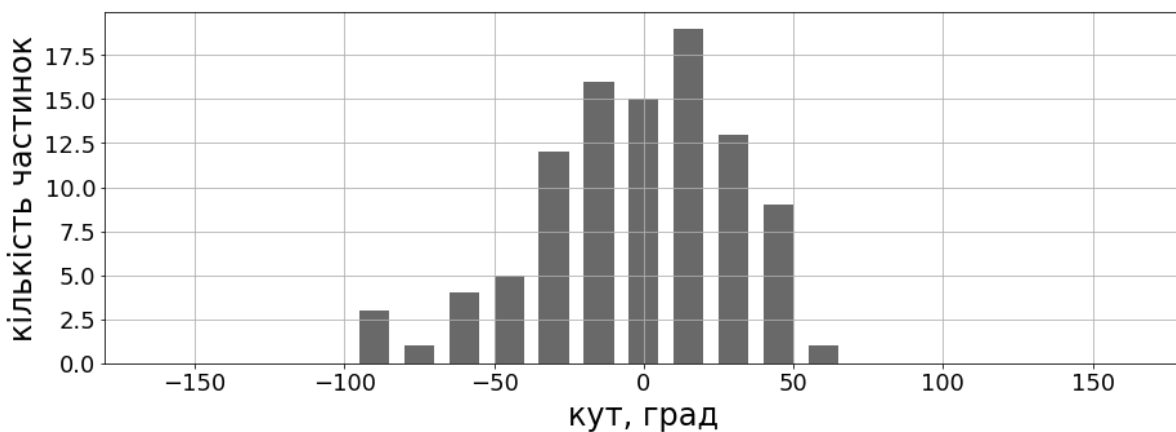


Рис. 3.67. Гістограма розподілу частинок на виході ротора

Отримані результати свідчать, що частинки згруповані у секторі з кутовим розміром приблизно 150° (від -100° до 50°). Це означає, що після виходу з ротора частинки потрапляють на дно корпусу також у цьому секторі, оскільки змішування після виходу з ротора практично не відбувається.

Якщо потік частинок іншого компоненту виходитиме через інший сектор, який не перетинається з сектором першого компоненту, тоді змішування компонентів буде мінімальним.

В ідеальному випадку частинки всіх компонентів мають бути розподілені рівномірно вздовж зовнішньої кромки ротора. В цьому випадку відсотковий склад у кожному з секторів відповідатиме заданому, а однорідність суміші буде максимальною.

Дослідження початкових умов руху частинок та їх розподіл у роторі

Як зазначено раніше, у випадку рівномірного розподілу частинок вздовж зовнішньої кромки ротора, їх кількість у кожному з секторів буде однаковою та визначатиметься за формулою:

$$N_c = \frac{N}{n}, \quad (3.38)$$

де N – загальна кількість частинок;

N_c – кількість частинок у секторі;

n – кількість секторів.

З метою кількісної оцінки різниці між фактичним розподілом частинок та ідеальним визначимо середньоквадратичне відхилення фактичної кількості частинок у кожному з секторів від середнього:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_i - N_c)^2}, \quad (3.39)$$

де N_i – кількість частинок у i -ому секторі.

Припустимо, що у змішувачі встановлено пристрій, наприклад, турбулізатор, який дозволяє розділити вхідний потік частинок на два або чотири потоки. Також вважатимемо, що всі частинки потрапляють на дно ротора, але в різні його частини. Дисперсію розподілу частинок у потоці вважатимемо сталою $\delta = 0,005$.

Розглянемо наступні випадки:

1) Частинки рухаються єдиним потоком, центр потоку знаходиться у точці з координатами $(0,01; 0,01)$. Кількість частинок – 400 шт.

2) Частинки розділені на два однакові потоки по 200 частинок в кожному. Координати центрів потоків: $(0,01; 0,01)$ та $(-0,01; 0,01)$, відповідно (перший та другий квадранти).

3) Частинки розділені на два однакові потоки по 200 частинок в кожному. Координати центрів потоків: $(0,01; 0,01)$ та $(-0,01; -0,01)$, відповідно (перший та третій квадранти).

4) Частинки розділені на чотири однакові потоки по 100 частинок в кожному. Координати центрів потоків: $(0,01; 0,01)$, $(-0,01; 0,01)$, $(-0,01; -0,01)$, $(0,01; -0,01)$ відповідно (перший, другий, третій та четвертий квадранти).

Параметри ротора: радіус основи $R_0 = 0,051$ м; висота $H = 0,18$ м; половина кута розтрубу ротора $\alpha = 30^\circ$. Ротор обертається навколо вертикальної вісі, що має координати $(0; 0)$, із швидкістю $\omega = 120$ рад/с. Коефіцієнт тертя між частинками та поверхнею ротора $f = 0,1$.

Результати дослідження руху частинок для першого випадку показані на рис. 3.68 та 3.69 (один потік, 400 частинок).

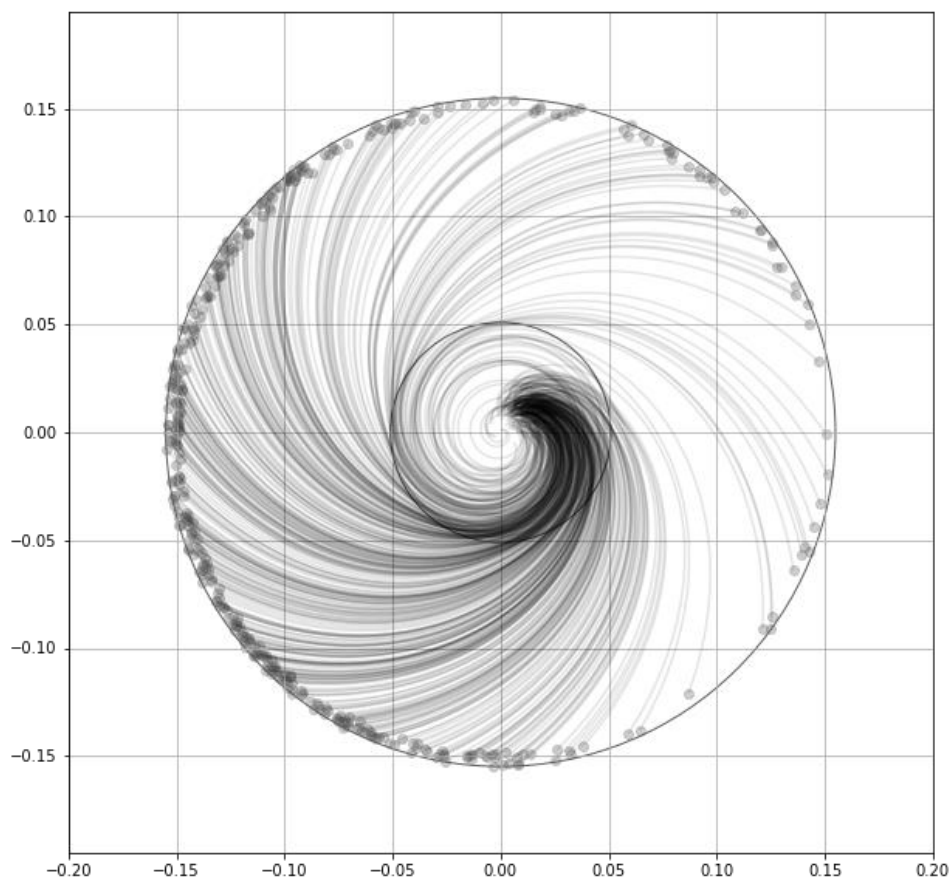


Рис. 3.68. Траєкторії руху частинок за умовами першого випадку

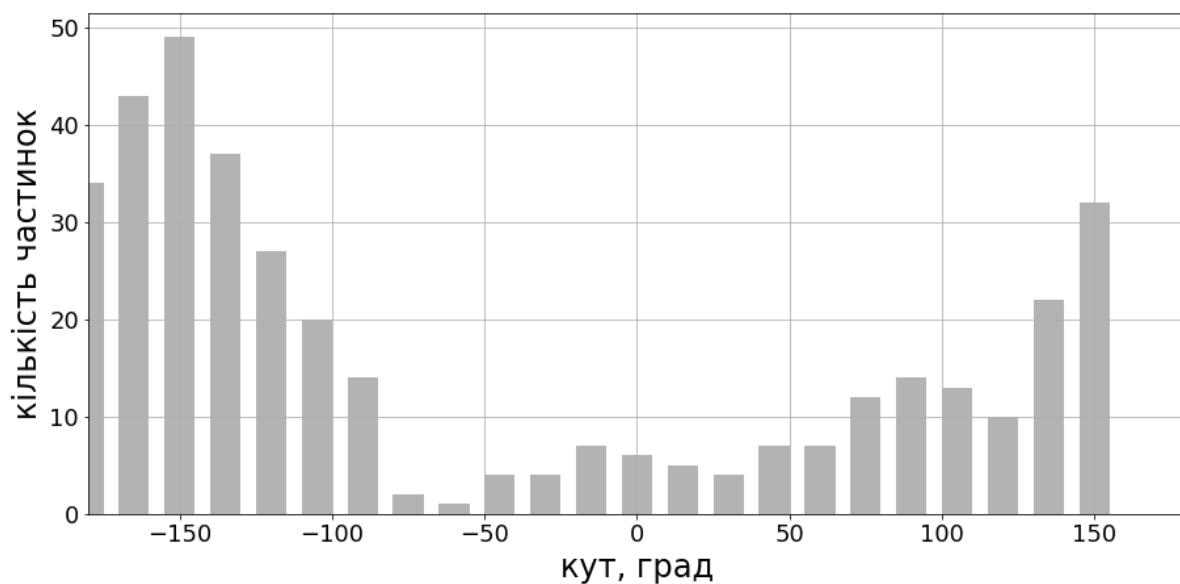


Рис. 3.69. Гістограма розподілу частинок на виході ротора

Середньоквадратичне відхилення фактичного розподілу від ідеального за умовами першого випадку становить $S = 2,625$.

Результати дослідження руху частинок для другого випадку - на рис. 3.70 та 3.71 (два потоки, по 200 частинок, перший та другий квадранти).

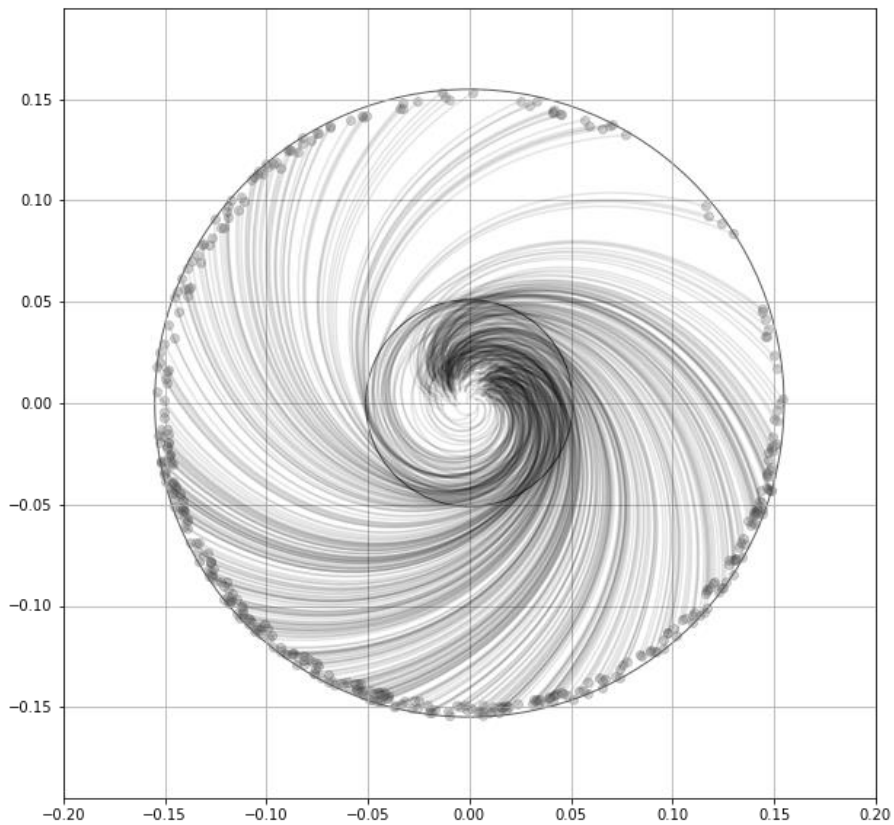


Рис. 3.70. Траєкторії руху частинок за умовами другого випадку

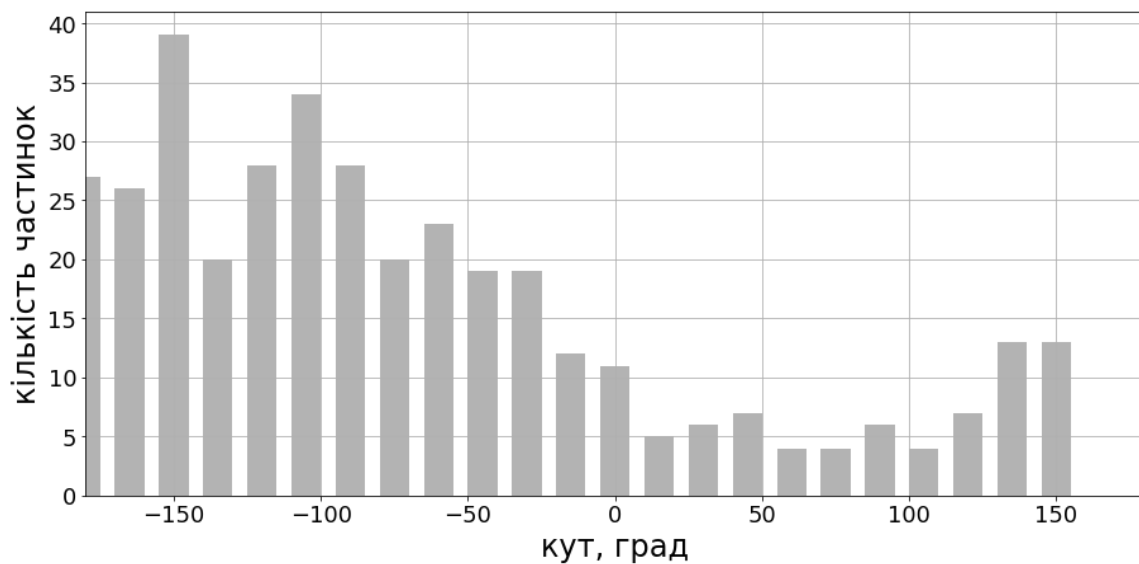


Рис. 3.71. Гістограма розподілу частинок на виході ротора

Середньоквадратичне відхилення фактичного розподілу від ідеального за умовами другого випадку становить $S = 2,128$.

Результати дослідження руху частинок для третього випадку – на рис. 3.72 та 3.73 (два потоки, по 200 частинок, перший та третій квадранти).

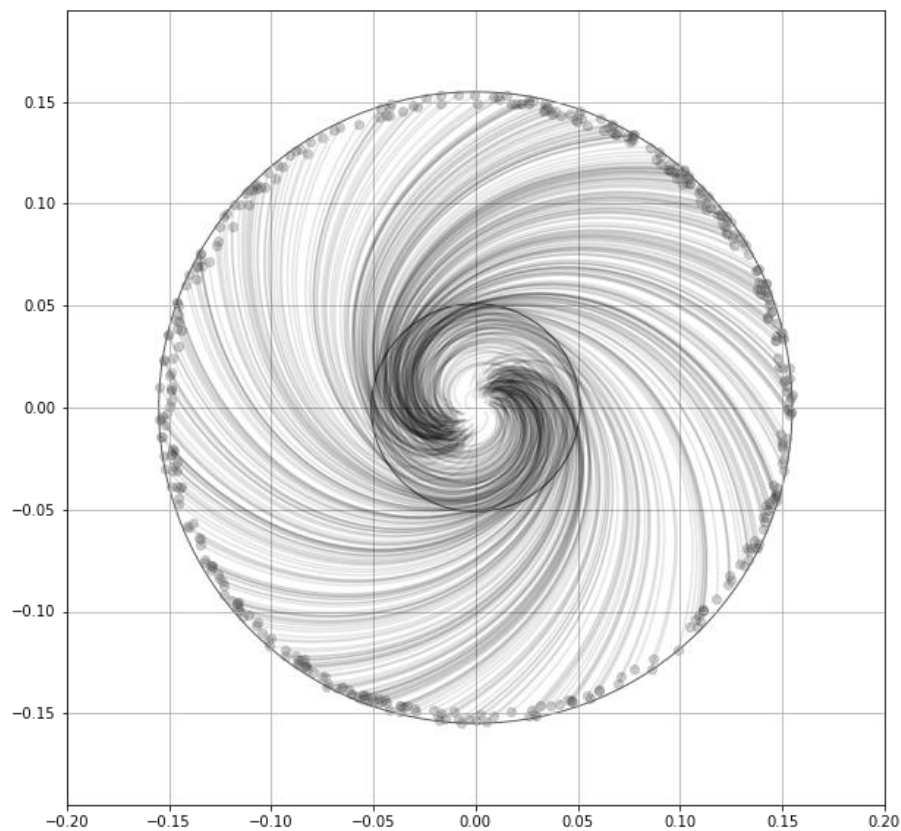


Рис. 3.72. Траєкторії руху частинок за умовами третього випадку

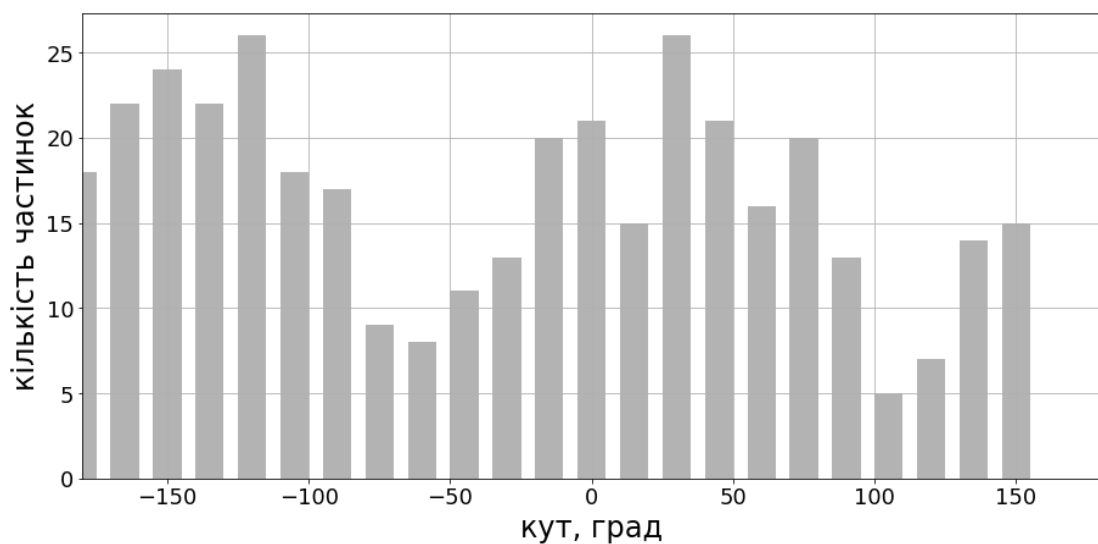


Рис. 3.73. Гістограма розподілу частинок на виході ротора

Середньоквадратичне відхилення фактичного розподілу від ідеального за умовами третього випадку становить $S = 1,223$.

Результати дослідження руху частинок для четвертого випадку – на рис. 3.74 та 3.75 (чотири потоки по 100 частинок, перший, другий, третій та четвертий квадранти).

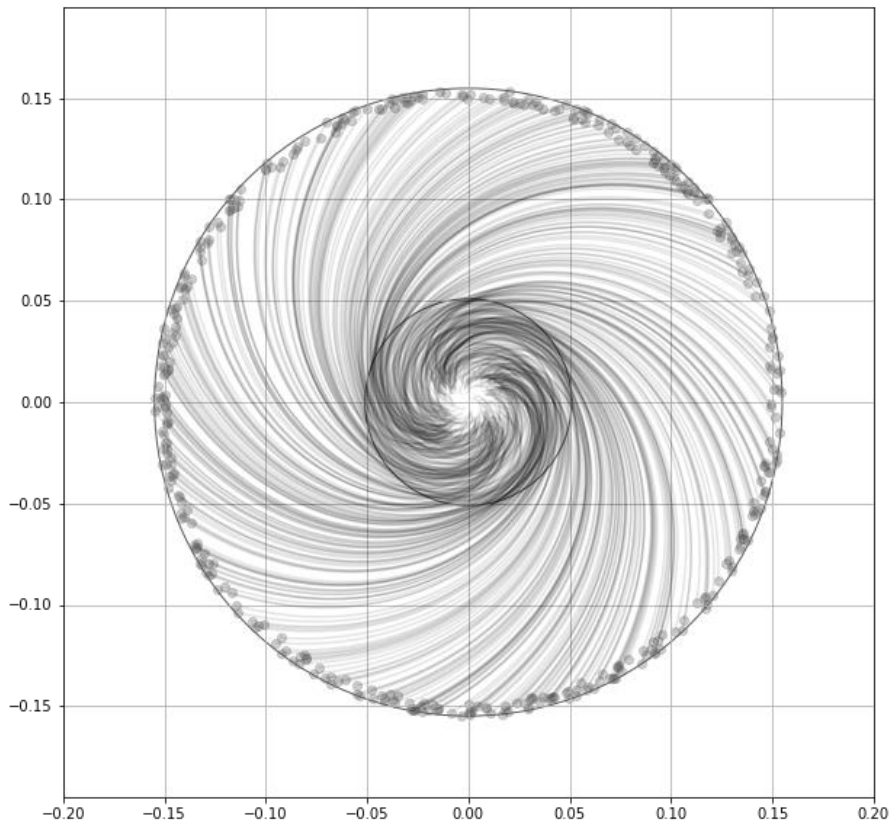


Рис. 3.74. Траєкторії руху частинок за умовами четвертого випадку

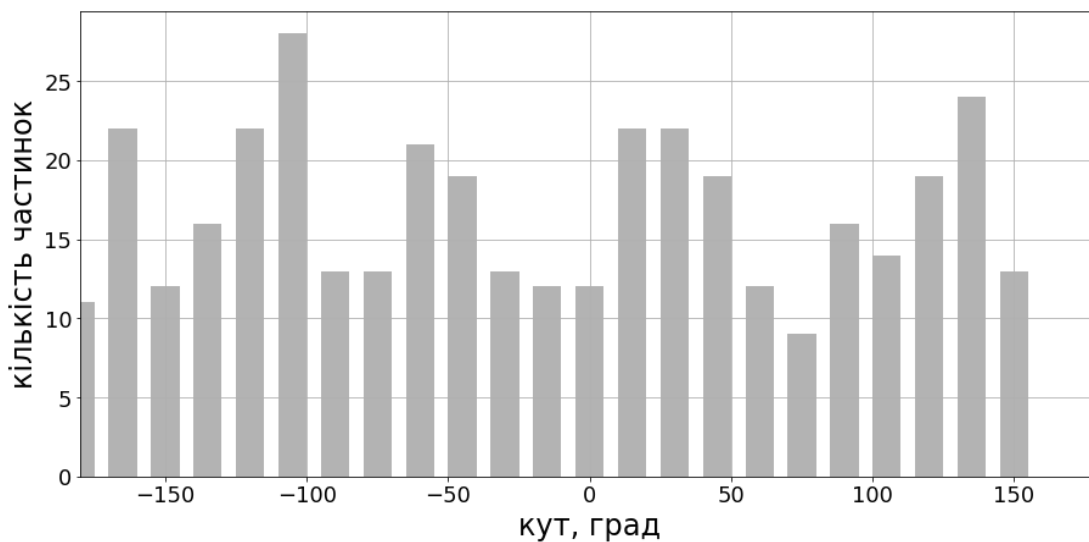


Рис. 3.75. Гістограма розподілу частинок на виході ротора

Середньоквадратичне відхилення фактичного розподілу від ідеального за умовами четвертого випадку становить $S = 0,822$.

З метою аналізу результати розрахунків СКВ для всіх випадків зібрано в табл. 3.32.

Таблиця 3.32

Залежність середньоквадратичного відхилення від кількості потоків частинок та їх розташування

№	Дослід	СКВ
1	Один потік, 400 частинок (перший квадрант)	2,625
2	Два потоки по 200 частинок, перший та другий квадранти	2,128
3	Два потоки по 200 частинок, перший та третій квадранти	1,223
4	Чотири потоки по 100 частинок, перший, другий, третій та четвертий квадранти	0,822

Результати дослідження свідчать, що розподіл частинок стає більш рівномірним при збільшенні кількості потоків та їх розподіленні симетрично відносно осі обертання (випадок, коли частинки потрапляють у 1 та 3 квадранти, має краще розподілення, ніж у випадку потрапляння частинок у 1 та 2 квадранти).

4. ПОРІВНЯННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА ЗА РІЗНИМИ МЕТОДАМИ ТА ОЦІНКА ОДНОРІДНОСТІ СУМІШІ

Порівняльні аналітичні дослідження динаміки сипкого середовища авторами здійснювалось на основі двох математичних моделей, що описують рух частинок всередині ротора змішувача [57]. Перша модель побудована за методом дискретних елементів, друга – на основі законів класичної механіки та являє собою систему диференціальних рівнянь (СДР). Основною відмінністю використаних математичних моделей є кількість геометричних, фізико-механічних та технологічних параметрів, що задавались для частинок та обладнання. Конструктивні та технологічні параметри конічного ротора представлені у табл. 4.1. Вибір ротора саме конічної форми здійснено на основі результатів досліджень [135], в яких доведено, що у такому обладнанні досягається кращій змішувальний ефект.

Таблиця 4.1

Параметри конічного ротора змішувача

Назва параметра	Величина
Радіус основи, м	0,051
Висота, м	0,18
Половина кута розтрубу, град	30
Радіус, м	0,155
Кутова швидкість обертання, рад/с	120

Як зазначалось вище, під час роботи змішувача компоненти сипкого середовища надходять до ротора і падають на його дно (основу). Потім під дією відцентрової сили піднімаються вздовж бічної стінки ротора. Авторами проведено розрахунок та порівняння процесів руху частинок

двох компонентів суміші за допомогою отриманих математичних моделей з врахуванням наступних припущень.

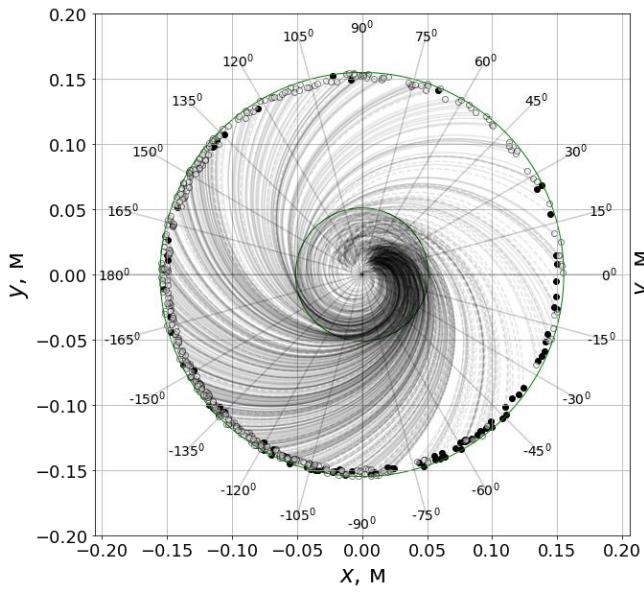
- 1) Кількість частинок основного (ОК) та ключового (КК) компонентів у потоках та час їх надходження у змішувач є фіксованими.
- 2) Вхідні потоки ОК та КК компонентів потрапляють на основу ротора.
- 3) Положення частинок у потоках є випадковими величинами з заданими математичним очікуванням та величиною дисперсії.
- 4) Центри потоків знаходяться в одній з четвертей основи ротора.

Слід зазначити, що в ідеальному випадку потік частинок має надходити безпосередньо в центр ротора, що забезпечило б їх рівномірне розподілення всередині об'єму ротора. Але в реальному обладнанні, в наслідок дії ряду зовнішніх впливів, зокрема вібрації, забезпечити точне потрапляння частинок в центр ротора практично неможливо. Внаслідок цього, розподілення частинок в різних зонах ротора стає не рівномірним, і величина цих відхилень досліджується у даному розділі.

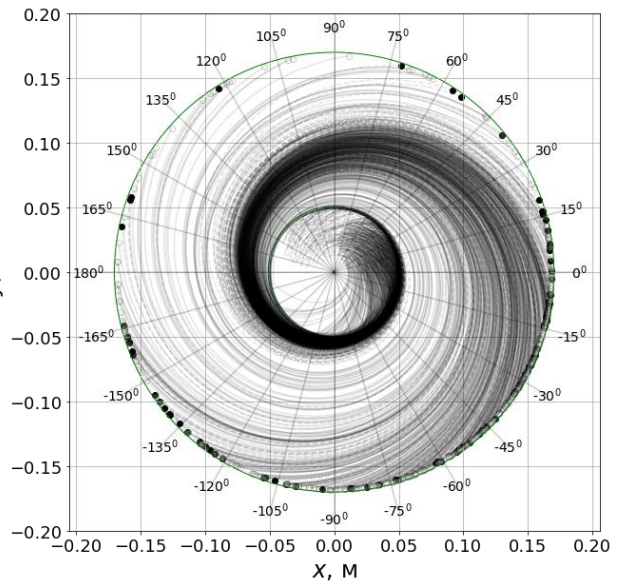
При проведенні моделювання задавались чотири варіанти початкових положень частинок, а саме:

- 1) Потік ОК (400 частинок) надходив у перший квадрант основи ротора, потік КК (100 частинок) – у другий квадрант.
- 2) Потік ОК (400 частинок) надходив у перший квадрант, потік КК (100 частинок) – у третій квадрант.
- 3) ОК надходив двома потоками, що склались з 200 частинок кожний та потрапляли у перший та другий квадранти, КК надходили двома потоками по 50 частинок, що потрапляли у третій та четвертий квадранти.
- 4) ОК надходив двома потоками, що склались з 200 частинок кожний та потрапляли у перший та третій квадранти, КК надходив двома потоками по 50 частинок, що потрапляли у другий та четвертий квадранти.

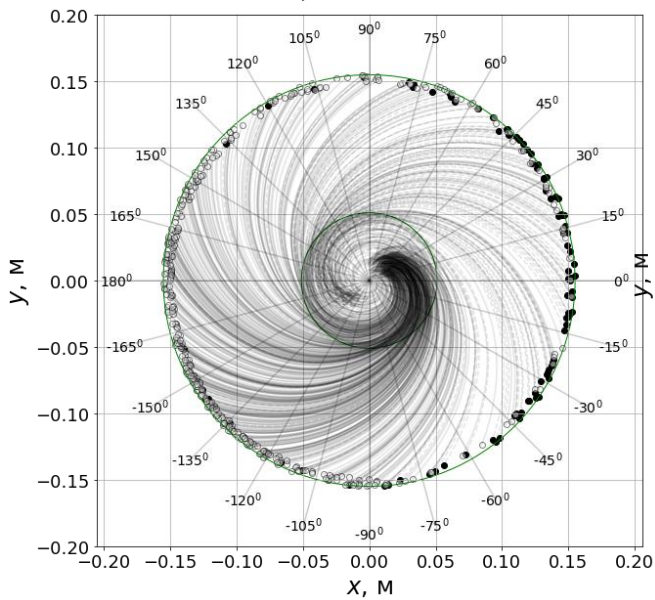
Результати моделювання траєкторій руху частинок показані на рис. 4.1.



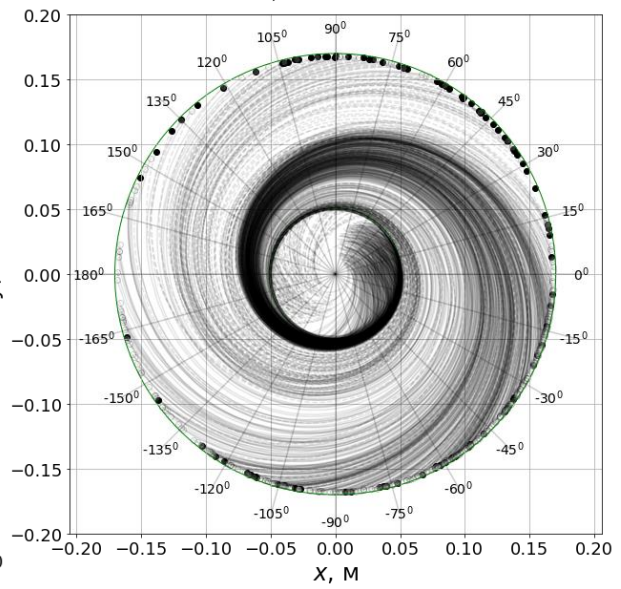
а)



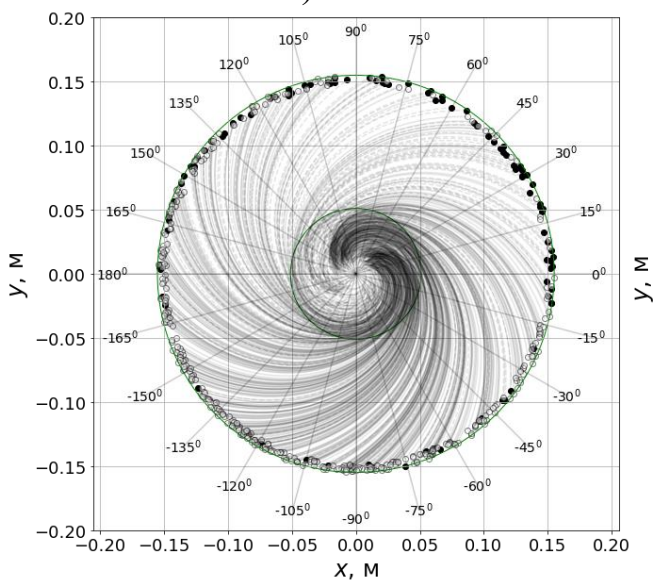
б)



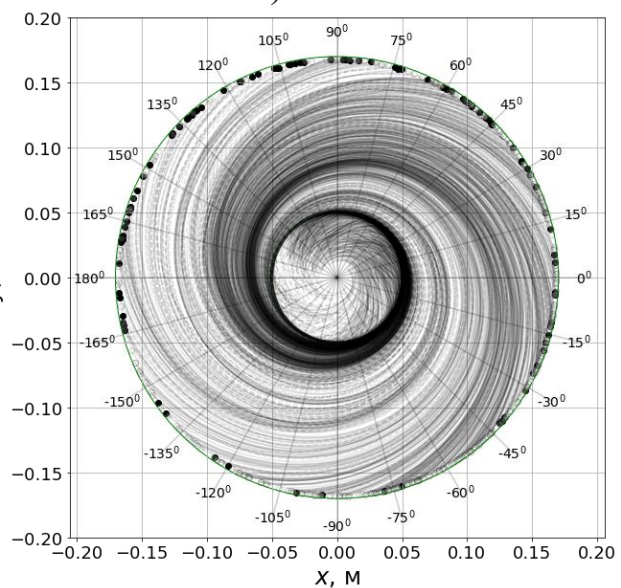
в)



г)



д)



е)

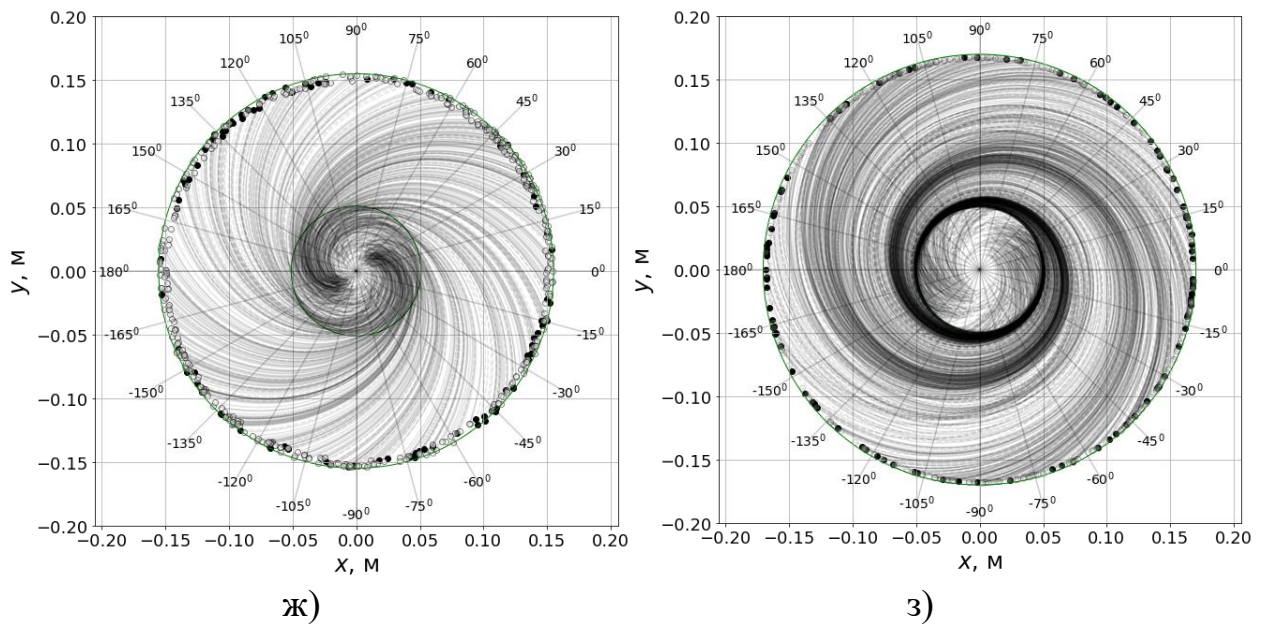


Рис. 4.1. Траєкторії руху частинок сипкого матеріалу, що розраховані: а, в, д, ж – за СДР для випадків 1, 2, 3, 4, відповідно; б, г, є, з – МДЕ для випадків 1, 2, 3, 4, відповідно.

На рис. 4.1 траєкторії показані суцільними лініями, положення частинок у момент виходу з ротора – точками (чорні точки – частинки КК, сірі – частинки ОК).

В усіх випадках траєкторія частинок є спіральною лінією, але при розрахунках на основі МДЕ ця спіраль має більшу кількість витків та, відповідно, більшу довжину траєкторії, що на рис. 4.1, б, г, є, з відображається більш густим розташуванням витків. Крім того, при розрахунках МДЕ в зоні переходу між основою та бічною стінкою ротора форма траєкторії частинок на деякий час стає круговою, а пізніше знову змінюється на спіральну. В результаті частинки рухаються вздовж бічної стінки з меншими початковими швидкостями, що призводить до збільшення довжини траєкторії. Це можна пояснити ударом частинки о бічну поверхню конуса, що зменшує складову швидкості, яка спрямована вздовж радіусу. В розрахунках за системою диференціальних рівнянь цей ефект не враховується.

За допомогою отриманих моделей розраховані довжина траєкторій і час руху частинок по основі та бічній поверхні конуса. Для порівняння розрахунки зведені в табл. 4.2, в якій представлені середні значення параметрів руху частинок сипкого матеріалу у внутрішньому просторі конічного конуса.

Таблиця 4.2

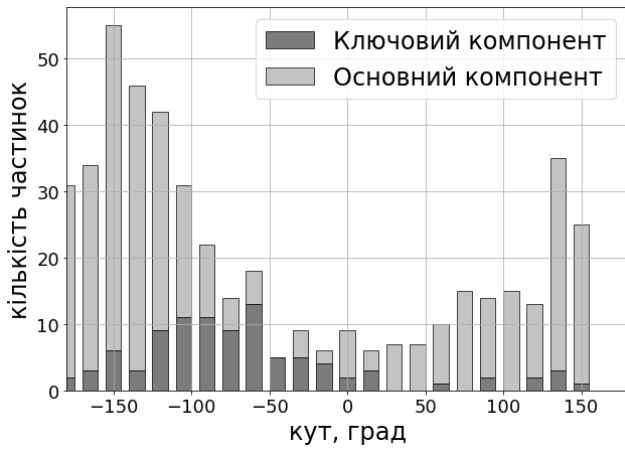
Середні значення параметрів руху частинок у конічному роторі

Параметри		МДЕ	СДР
Довжина траєкторії вздовж основи ротора, м	Середнє значення, м	0,110	0,031
	Дисперсія	1,38E-03	5,04E-04
	СКВ	2,97E-02	1,75E-02
Довжина траєкторії вздовж бічної стінки, м	Середнє значення, м	0,675	0,239
	Дисперсія	6,71E-03	3,15E-05
	СКВ	6,61E-02	4,73E-03
Час руху частинки вздовж основи, с	Середнє значення, м	0,293	0,029
	Дисперсія	3,40E-03	2,65E-04
	СКВ	4,85E-02	1,25E-02
Час руху частинки вздовж бічної стінки, с	Середнє значення, м	0,373	0,045
	Дисперсія	2,26E-03	5,66E-06
	СКВ	3,64E-02	1,54E-03

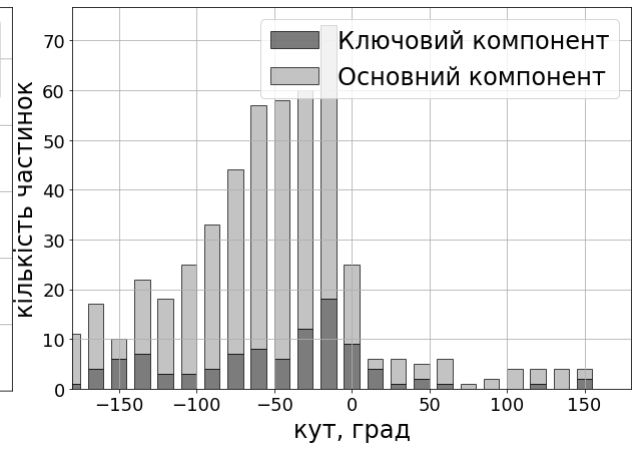
Аналіз форми траєкторій частинок, які показані на рис. 4.1, свідчить, що частинки розподіляються не рівномірно вздовж зовнішньої кромки ротора. З метою оцінки цієї нерівномірності, ротор розділений на сегменти з кроком 15° (рис. 4.1), в кожному з яких визначена кількість частинок основного та ключового компонентів.

У випадку ідеального розподілу кількість частинок в усіх секторах має бути однаковою, але на практиці частинки розташовуються нерівномірно. На рис. 4.2 показані гістограми розподілення основного та

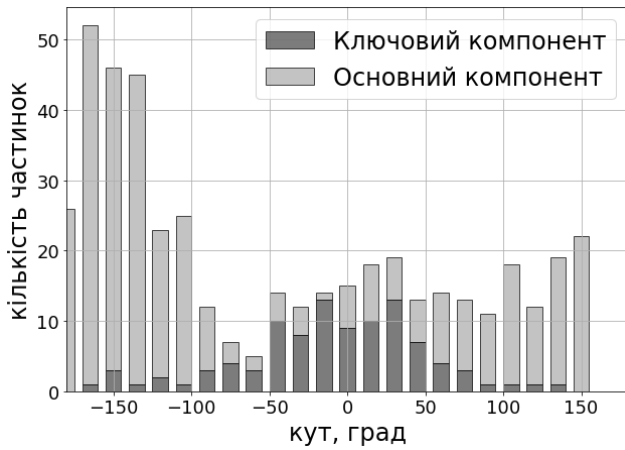
ключового компонентів для чотирьох випадків надходження компонентів в ротор, що розглядаються.



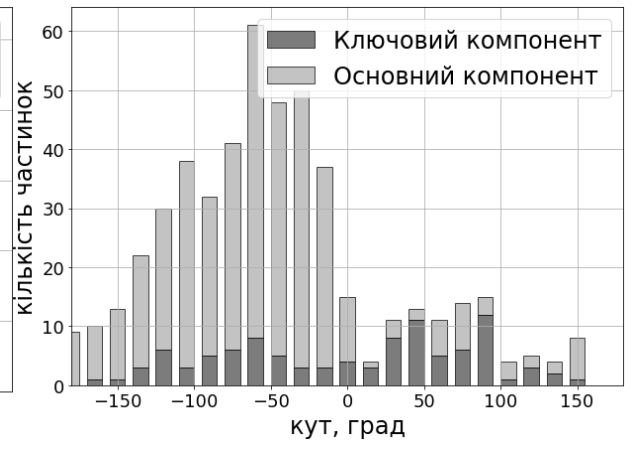
а)



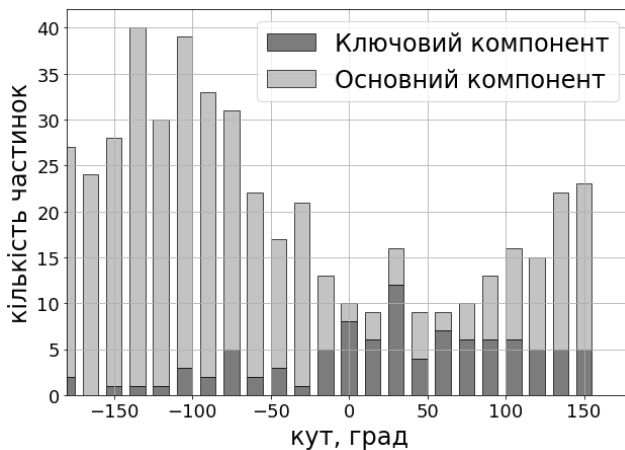
б)



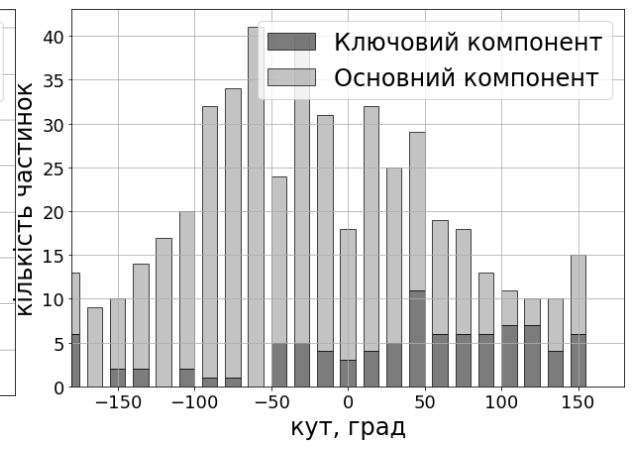
в)



г)



д)



е)

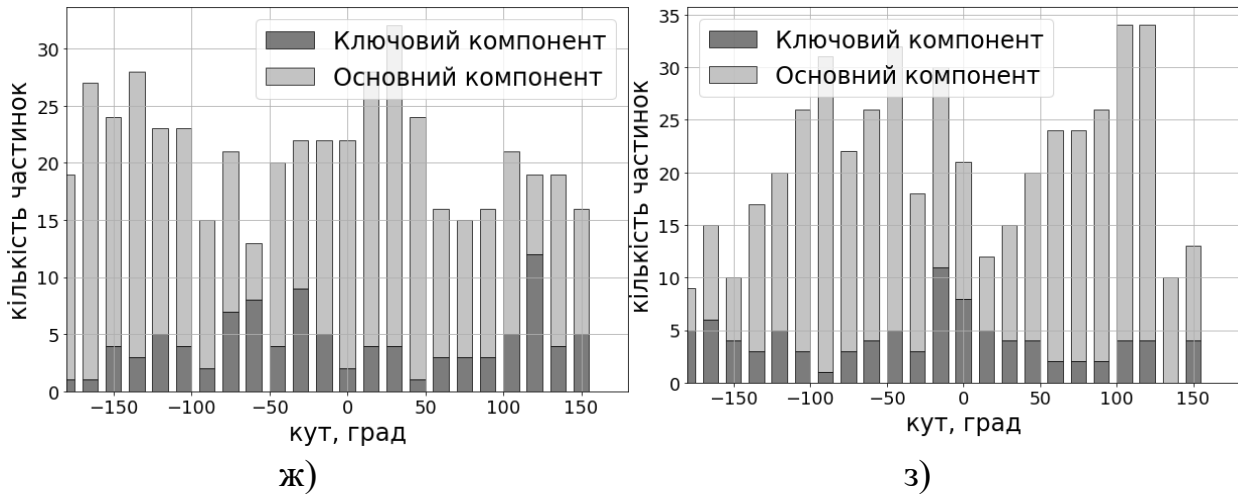


Рис. 4.2. Гістограми розподілення частинок на виході з кінчного ротора:
 а, в, д, ж – розрахунки за СДР для випадків 1, 2, 3, 4, відповідно;
 б, г, є, з – розрахунки МДЕ для випадків 1, 2, 3, 4, відповідно.

Найбільш розповсюдженим методом визначення однорідності суміші є порівняння відсоткового складу окремих об'ємів (проб) готової суміші. Кількісну оцінку однорідності суміші здійснюють за допомогою коефіцієнту варіації V_c , %:

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (c_i - \bar{c})^2}, \quad (4.1)$$

де n – кількість проб;

\bar{c} – середнє арифметичне значення концентрації ключового компонента в усіх пробах суміші, %;

c_i – концентрація ключового компонента i -ої пробі суміші, %.

У випадку дослідження руху частинок у роторі окремими пробами можна вважати сукупність частинок, що знаходяться у певному секторі. Співвідношення кількості частинок ключового та основного компонентів у певному секторі визначатиме концентрацію ключового компонента даної проби:

$$c = \frac{N_{KK}}{N_{KK} + N_{OK}}, \quad (4.2)$$

де N_{KK} , N_{OK} – кількості частинок ключового та основного компонентів, відповідно

Результати розрахунків коефіцієнтів варіації для всіх чотирьох випадків наведені у табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Залежність величини коефіцієнтів варіації від початкового положення потоків компонентів суміші у роторі

№	Дослід	V_c СДР	V_c МДЕ
1	Потік основного компонента (400 частинок) надходить у перший квадрант, потік ключового компонента (100 частинок) – у другий квадрант.	140,7%	92,7%
2	Потік основного компонента (400 частинок) надходить у перший квадрант, потік ключового компонента (100 частинок) – у третій квадрант.	152,1%	144,1%
3	Основний компонент надходить двома потоками, що складаються з 200 частинок кожний та надходять у перший та другий квадранти, ключовий компонент надходить двома потоками по 50 частинок, що надходять у третій та четвертий квадранти.	118,7%	108,1%
4	Основний компонент надходить двома потоками, що складаються з 200 частинок кожний та надходять у перший та третій квадранти, ключовий компонент надходить двома потоками по 50 частинок, що надходять у другий та четвертий квадранти.	80,4%	78,9%

Аналіз табл. 4.3 свідчить, що найнижчі значення коефіцієнтів варіації, які розраховані за даними досліджень обома методами, отримані

за умов розділення ОК та КК на два потоки та надходження їх у протилежні квадранти ротора змішувача, що добре видно на рис. 4.1 ж, з та рис. 4.2 ж, з. Тобто зменшення відстані між початковими положеннями частинок ОК та КК підвищує їх однорідність. В ідеальному випадку центри вхідних потоків обох компонентів мають співпадати.

В цілому, проведене порівняння результатів розрахунків, отриманих МДЕ і за допомогою диференціальних рівнянь, які описують динаміку сипкого середовища, показують, що використання методу дискретних елементів дозволяє отримати найбільш точне уявлення про рух сипких середовищ у внутрішньому просторі ротора змішувача та пояснює більш тривалий час перебування середовища в зоні змішування, а значить, і якість процесу.

В результаті проведених досліджень роботи ВЗБД (і обидві математичні моделі це підтверджують) встановлено, що найкращій розподіл компонентів суміші виникає за умови розподілу компонентів суміші на складові потоки та зменшення відстані між їх центрами. Розділення потоків компонентів на вході у змішувач дозволяє підвищити однорідність суміші на 42,9 %.

Математичне моделювання за допомогою методу дискретних елементів дозволило вивчити рух сипких матеріалів у всіх елементах змішувального комплексу безперервної дії. Основними результатами є наступні:

- визначена залежність між продуктивністю бункера та параметрами сипкого матеріалу (коефіцієнтами тертя ковзання та кочення); встановлено, що вплив коефіцієнту тертя кочення на продуктивність у 1,38 разів більший ніж коефіцієнту тертя ковзання;
- визначено розподілення частинок за швидкостями у зоні вихідного патрубка бункера, що дозволяє прогнозувати можливе утворення склепінь;

- моделювання МДЕ дозволяє визначити швидкості частинок всередині бункера та живильника; досліджено характер їх руху та виявлено зони з найбільшими швидкостями частинок;
- визначено, що механічний вплив робочих органів тарілчастих живильників на частинки матеріалу у 2,63 менший ніж у стрічкових, у 2,38 рази менший ніж трубчастих, у 11,36 рази менший ніж спіральних та у 24,11 рази менший ніж шнекових;
- за допомогою МДЕ проведено дослідження згладжувальної здатності ряду конструкцій відцентрових змішувачів безперервної дії з конічними та параболічними роторами та турбулізаторами;
- визначено середній час перебування частинок всередині змішувача; встановлено, що введення додаткових роторів (змішувач конструкції Ластовцева) є найбільш ефективним способом підвищення згладжувальної здатності, але у цьому випадку в 1,31...2,56 рази збільшується час перебування частинок всередині змішувача;
- розраховано розподіл частинок на зовнішній кромці ротора змішувача в залежності від їх початкового положення у роторі; визначено, що зі збільшення відстані між центром ротора та початковим положенням потоку на дні ротора знижує розподілення частинок по його поверхні;
- досліджено характер розподілу частинок двокомпонентної суміші всередині ротора в залежності від їх початкового положення; встановлено, що однорідність суміші збільшується зі зменшенням відстані між центральними точками потоків вхідних компонентів на дні ротора; найкраще розподілення ключового компонента в основному відбувається у випадку розділення потоків на складові частини та максимального їх розподілення у роторі;
- проаналізовано вплив розділення потоків компонентів суміші на їх розподілення всередині ротора; встановлено, що розділення потоків дозволяє підвищити однорідність суміші.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ СИПКИХ СЕРЕДОВИЩ У ЗМІШУВАЛЬНОМУ КОМПЛЕКСІ

5.1. Конструкція стенду для експериментальних досліджень та вимірювальні засоби

Експериментальні дослідження роботи змішувального комплексу безперервної дії здійснювались з використанням дослідного стенду, призначеного для виготовлення двокомпонентних сумішей сипких матеріалів з максимальною продуктивністю 1500 кг/год. Загальний вигляд стенду показаний на рис. 5.1.

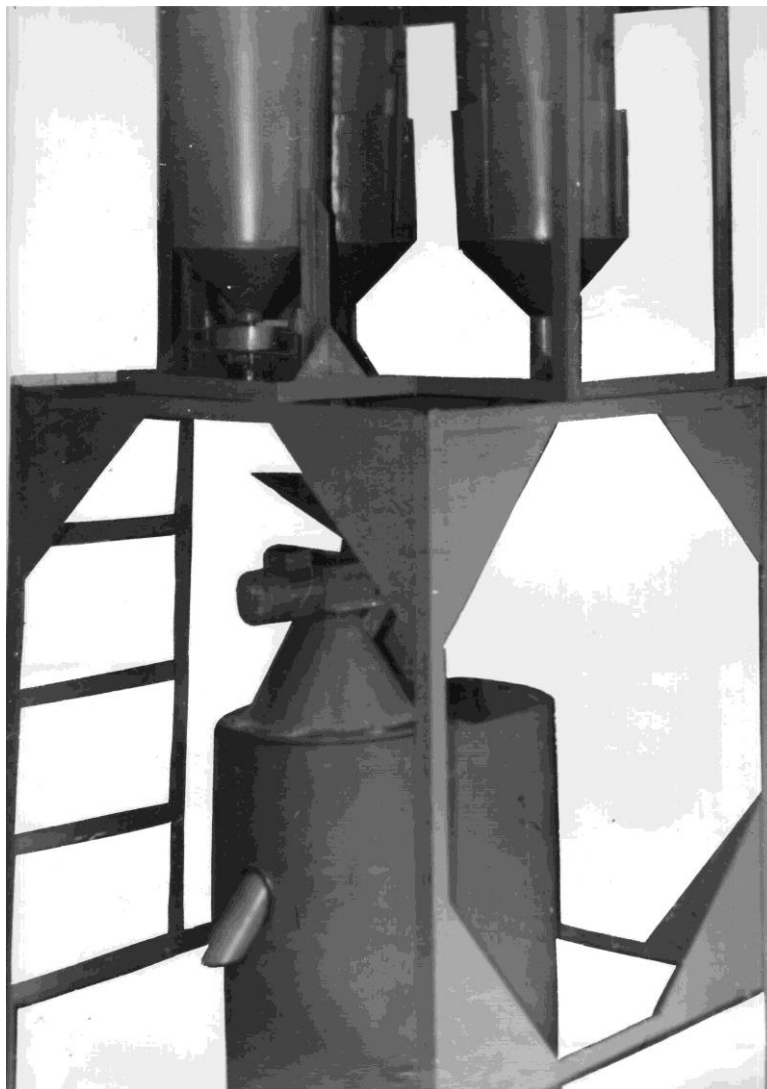


Рис. 5.1. Загальний вигляд стенду для дослідження ЗКБД

Дослідний стенд складається з наступних пристроїв:

- 1) відцентрового змішувача безперервної дії;
- 2) двох тарілчастих живильників безперервної дії з формувачами потоків;
- 3) двох конічно-циліндричних бункерів;
- 4) системи керування.

Процес змішування відбувається у відцентровому змішувачі безперервної дії, схема якого показана на рис. 5.2.

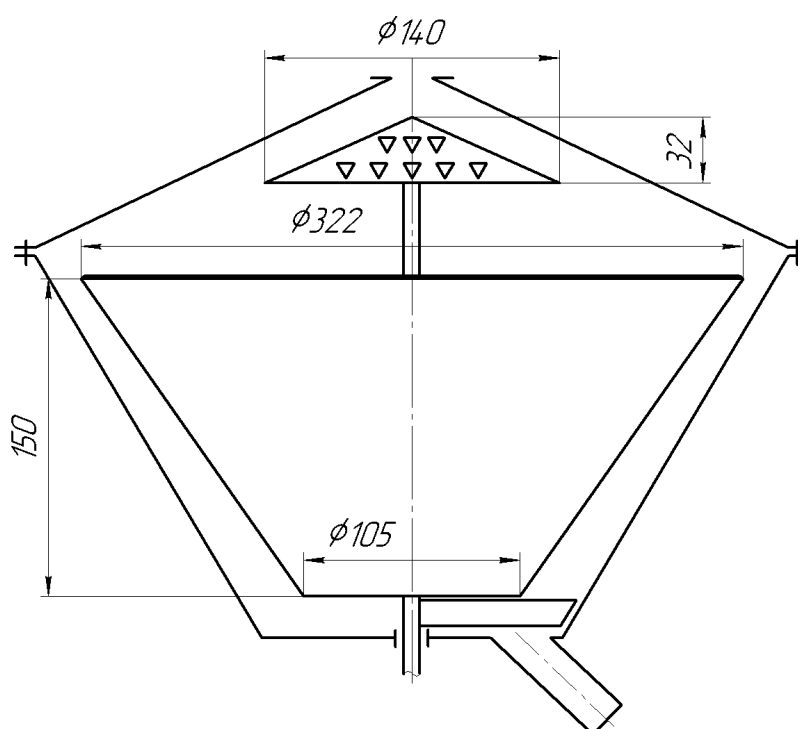


Рис. 5.2. Схема конструкції відцентрового змішувача безперервної дії

Конструкція ВЗБД містить ротор та турбулізатор, які можна зняти при проведенні досліджень. Їх розміри показані на рис. 5.2. Вал ротора через клинопасову передачу з'єднаний з двигуном постійного струму (ДПС) потужністю 600 Вт [65].

До складу стенду також входить пристрій керування швидкістю обертання ротора та турбулізатора, що побудований на базі регулятора постійного струму [112]. Лінійна механічна характеристика ДПС значно

спрощує структуру такої системи керування, оскільки швидкість обертання валу двигуна є прямо пропорційною напрузі на його якорі. До валу ротора підключено датчик швидкості, який дозволяє контролювати поточний режим роботи змішувача.

На рис. 6.3 показано ВЗБД з ДПС та пристроєм керування швидкістю на базі імпульсного регулятора постійної напруги.



Рис. 5.3. Вигляд ВЗБД з системою керування швидкістю

На рис. 5.4 показано ВЗБД зі знятою кришкою та конічним ротором з трикутними отворами.

Конічно-циліндричні бункери з тарілчастими живильниками, що входять до складу стенду, мають однакові розміри та конструкцію, яка схематично зображена на рис. 5.5. Бункер розташований таким чином, що його вісь симетрії співпадає з віссю обертання тарелі живильника [69, 78]. Відстань від вихідного патрубку бункера до поверхні тарелі можна змінювати.



Рис. 5.4. Вигляд ВЗБД зі знятою кришкою та конічним ротором

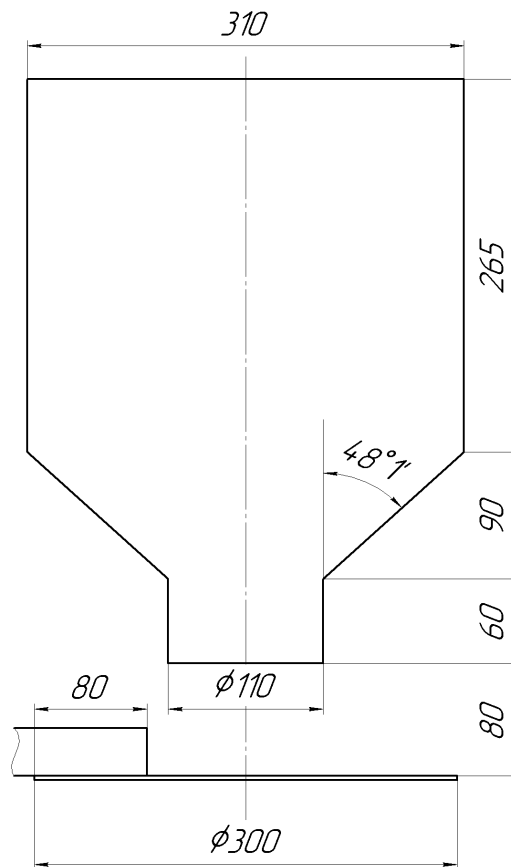


Рис. 5.5. Геометричні розміри конічно-циліндричного бункера, тарелі та
ножа живильника тарілкового типу

Зміна продуктивності бункера забезпечується за рахунок спеціальних вставок, які розміщуються у його конічній частині. Приклад конструкції такої вставки наведено на рис. 5.6. Її форма повторює конічну частину бункера, але вихідний патрубок має менший діаметр та розташований ближче до поверхні тарелі живильника, що забезпечує зниження продуктивності бункера.

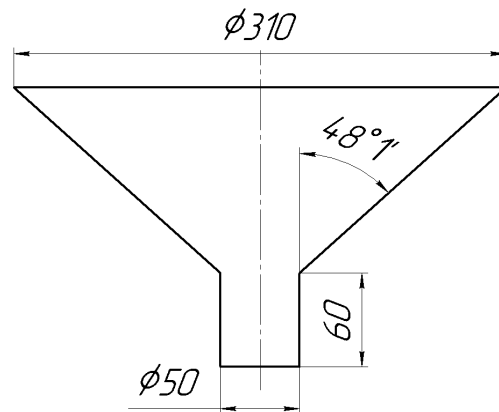


Рис. 5.6. Схема конструкції вставки для зниження продуктивності бункера

Ніж зафіксований на валу сервоприводу та розташований перпендикулярно до поверхні тарелі живильника. Його розміри показані на рис. 5.7.

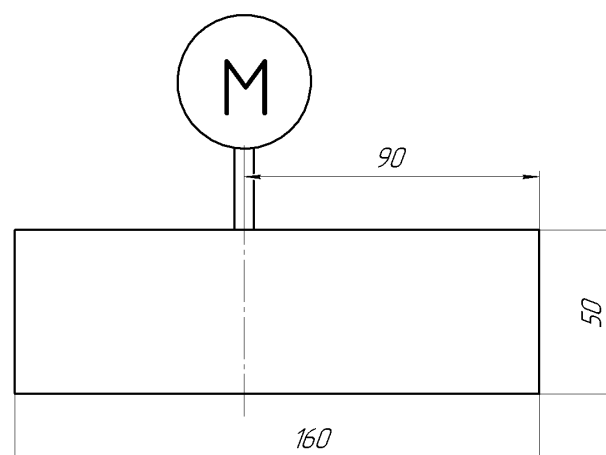


Рис. 5.7. Схема конструкції ножа тарілкового живильника

Під час проведення досліджень використовувався сервопривод MG995 Tower Pro (Додаток В), що дозволяє забезпечити діапазон зміни положення ножа у межах від 0 до 90 мм від кромки тарелі.

Привод тарелі живильника побудовано на базі ДПС з черв'ячним редуктором ASLONG A58SW-555B (Додаток Г). Двигун містить вбудований енкодер, що дозволяє контролювати його швидкість обертання.

Таким чином, стенд забезпечує можливість керування двома основними технологічними параметрами живильника: швидкістю обертання тарелі та положенням ножа.

Визначення продуктивності роботи системи «бункер – тарілчастий живильник» здійснюється за рахунок визначення маси сипкого матеріалу на виході живильника через фіксовані проміжки часу. На рис. 5.8 показано структурну схему системи керування тарілчастим живильником, що використовується у складі стенду.

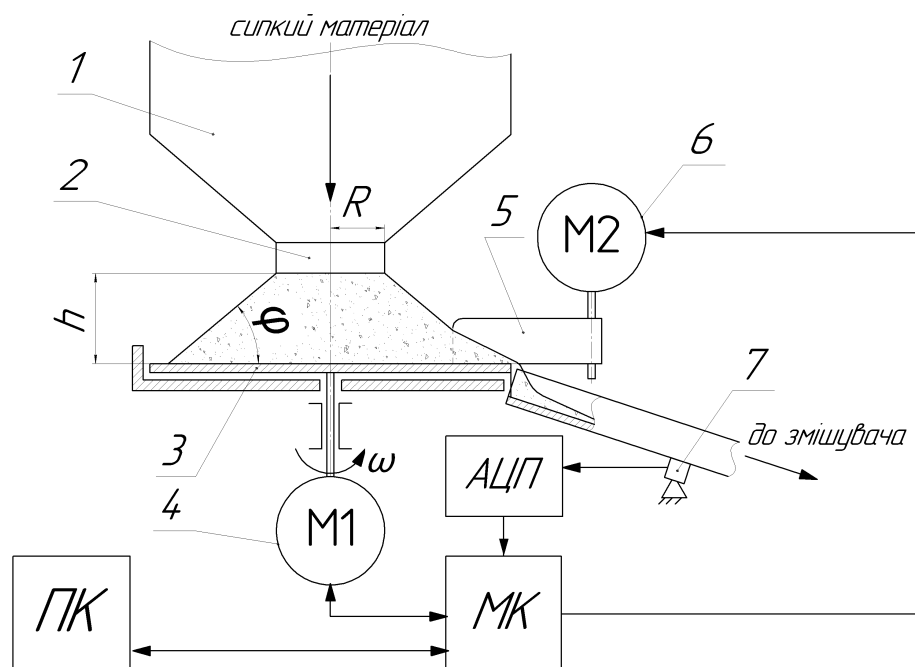


Рис. 5.8. Структурна схема системи керування живильником

До її складу входять бункер (1), тарілчастий живильник (3), ДПС приводу тарелі з енкодером (4), ніж (5) з'єднаний із сервоприводом (6), датчик маси (7), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), мікроконтролер (МК) та персональний комп'ютер (ПК).

Під час руху по поверхні формувача потік сипкого матеріалу створює навантаження на датчик маси та, відповідно, змінює його сигнал. Через задані проміжки часу (в більшості досліджень використовувався інтервал 0,09 с) МК зчитує через АЦП сигнали датчика маси. МК розраховує різницю між цими сигналами та заданим значенням, і на основі отриманого результату формує сигнали керування сервоприводом, який змінює положення ножа.

Енкодер приводу тарелі живильника формує сигнали в цифровій формі, тому вони передаються безпосередньо до МК. Керування швидкістю обертання двигуна 4 здійснюється за рахунок зміни напруги на його якорі. Живлення двигуна 4 формується за допомогою перетворювача змінного струму у постійний, який забезпечує можливість зміни величини постійної напруги на якорі.

ПК не є обов'язковим елементом системи керування. Він використовується виключно для збирання та подальшого аналізу сигналів датчиків [139]. До МК персональний комп'ютер підключається через USB інтерфейс, що забезпечує достатню швидкість для передачі інформації у реальному часі.

Під час розробки системи було встановлено, що оптимальним з точки зору співвідношення точності вимірювання до вартості, є використання тензометричних датчиків маси. Також перевагою датчиків цього типу є практично лінійна характеристика. У складі стенду використано тензометричні датчики YZC131 (Додаток Д). АЦП реалізовано на основі мікросхеми HX711 (Додаток Ж).

Пристрій керування створений на базі платформи Arduino Uno з мікроконтролером ATmega328 (Додаток Б) [62]. За останні роки ця

платформа набула широкого розповсюдження завдяки великій кількості сумісних периферійних пристроїв. Практично всі електронні складові дослідного стенду можна підключити або безпосередньо до цієї плати, або з використанням перехідників, що серійно випускаються промисловістю.

Використання широко розповсюджених компонентів також суттєво спростило розробку програмного забезпечення для мікроконтролера.

На рис. 5.9 показана електрична схема системи керування одним з тарілчастих живильників. До її складу входять тензодатчик (показний у вигляді діодного мосту), мікроконтролер U1, АЦП U2, кварцовий резонатор Y1 та допоміжні елементи (C1..C8, R1..R4, VT1), що забезпечують роботу мікросхем.

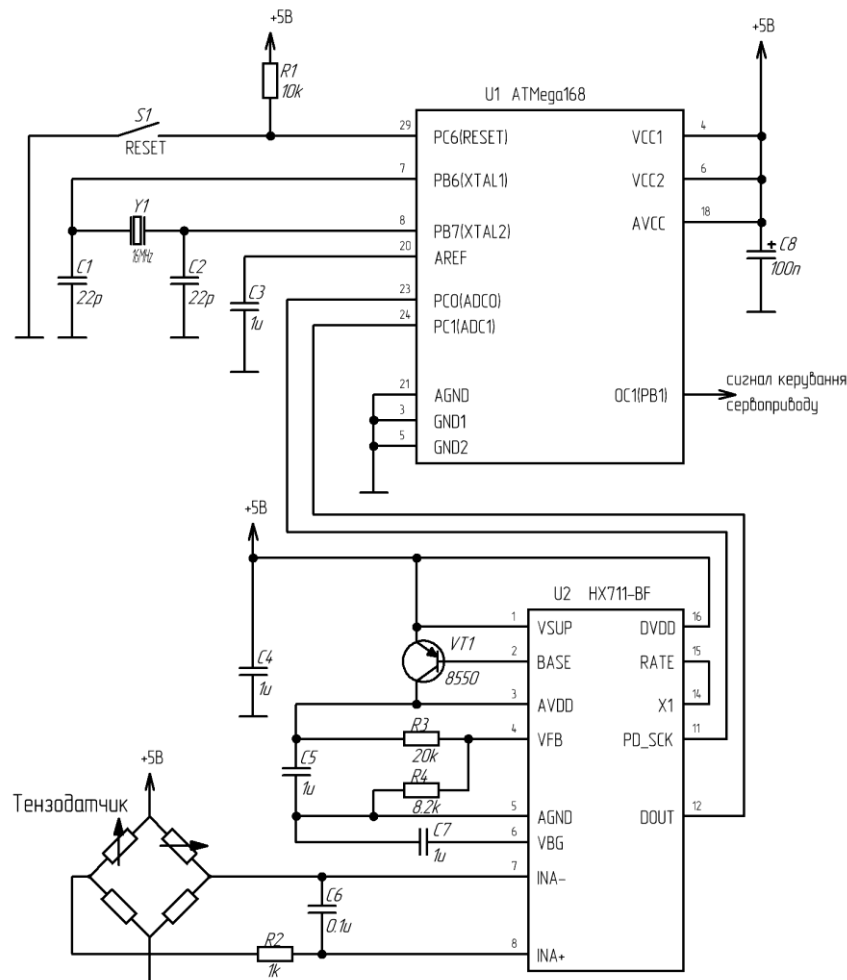


Рис. 5.9. Електрична схема системи керування тарілчастим живильником безперервної дії

Система дозволяє через програмно задані інтервали часу визначати сигнали тензодатчика, порівнювати їх з заданими та формувати сигнали керування сервоприводом. Живлення системи забезпечується від джерела постійної напруги +5В. Струм, що протікає через вивід керування сервоприводу, який використаний у складі дослідного стенду, не перевищує 40 мА. Це дозволяє подавати сигнал керування від мікроконтролера без використання гальванічної розв'язки.

Електрична схема блоку живлення для двигуна тарелі показана на рис. 5.10. Вона забезпечує перетворення змінної напруги мережі 220 В у постійну стабілізовану напругу величиною 24 В.

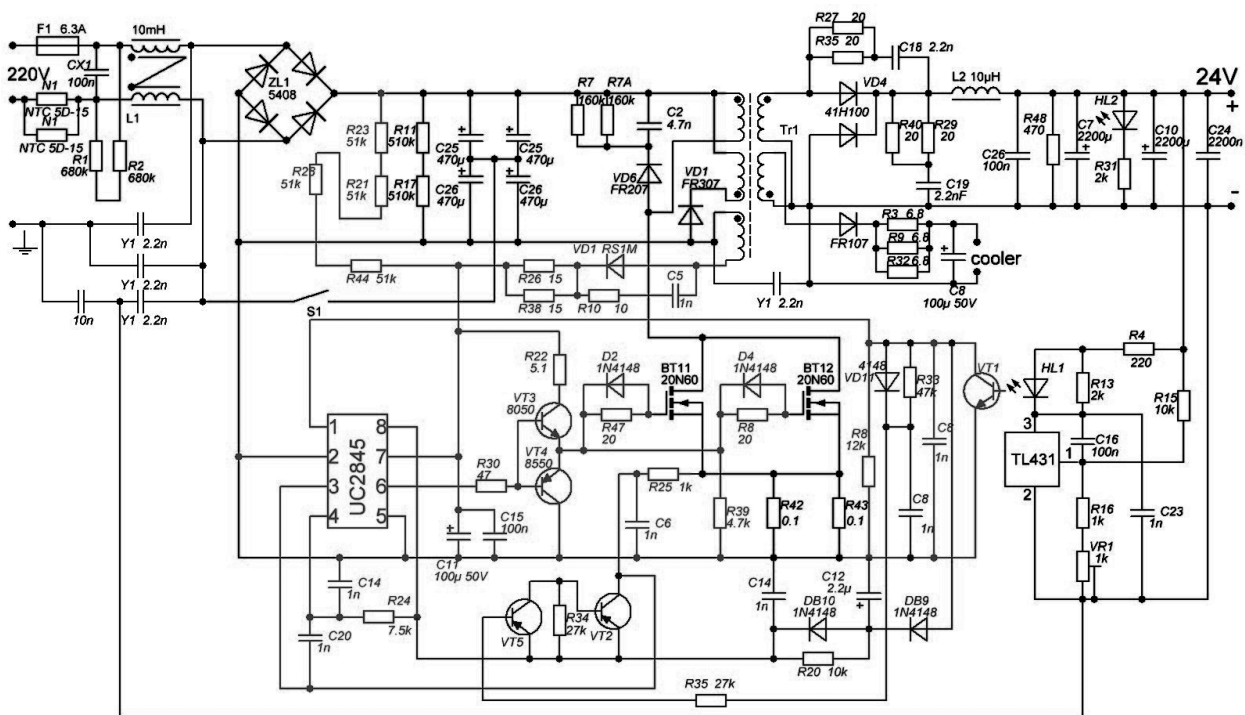


Рис. 5.10. Електрична схема блоку живлення

Перетворення напруги здійснюється у декілька кроків. Спочатку змінна напруга мережі перетворюється у постійну за допомогою діодного мосту та пропускається через згладжувальний фільтр для зменшення величини пульсацій. Далі постійна напруга за допомогою ШІМ контролера перетворюється у змінну з частотою 10 кГц. Амплітуда цієї напруги

знижується за допомогою трансформатора. Вихідна напруга трансформатора випрямляється та пропускається через згладжувальний фільтр на виході схеми. Подвійне перетворення напруги дозволяє використати високочастотний трансформатор з феритовим осердям, що значно зменшує розміри та масу пристрою.

Додатково до складу схеми входять коло живлення вентилятора, який забезпечує охолодження силових елементів, і схеми захисту від насичення трансформатора та короткого замикання на його виході. Вихідна потужність блоку живлення становить 360 Вт, вихідний струм – 15 А, ККД – 86,6 %.

Загальний вид системи керування тарілчастим живильником з підключеним ПК показаний на рис. 5.11.

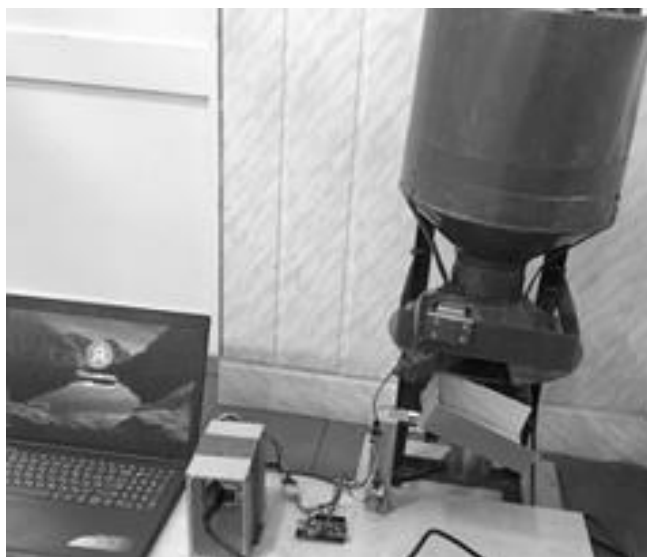


Рис. 5.11. Вигляд системи керування тарілчастим живильником

5.2. Дослідження точності системи вимірювання маси сипкого матеріалу

Основним параметром, який характеризує рух потоку сипкого матеріалу через складові елементи змішувального комплексу, є масова продуктивність. Аналіз її змін за часом дозволяє визначати величину

пульсацій, об'єм суміші, що матиме некоректний відсотковий склад, робити висновки про утворення склепінь та застійних зон, прогнозувати однорідність суміші [104]. Визначення продуктивності здійснюється на основі сигналів тензодатчиків, які обробляє та аналізує система керування [58-61, 67, 68, 82, 88, 127, 129, 130]. Точність виконання цих операцій значною мірою визначає точність роботи системи в цілому.

З метою оцінки точності цих вимірювань проведені експериментальні дослідження, що дозволили отримати статичну характеристику для діапазонів навантажень, які є характерними для сипких матеріалів.

Експеримент проводився у наступній послідовності.

1) Визначався сигнал системи за відсутності матеріалу на поверхні формувача. Цей сигнал вважався «нульовим» рівнем та віднімався від результатів всіх подальших вимірювань.

2) На поверхні формувача фіксувався зразок відомої маси.

3) З кроком 0,09 с сигнал тензодатчика зчитувався з АЦП та передавався на персональний комп'ютер.

4) Кроки 2, 3 повторювались для зразків різної маси.

Досліди повторювались для 20 зразків відомої маси. Результати наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Результати дослідження системи визначення маси сипкого матеріалу

№ досліду	Маса зразка, г	Сигнал тензодатчика, г
<i>1</i>	2	3
1	2	2,38
2	3	2,92
3	8	7,89
4	10	9,61

Закінчення табл. 5.1

1	2	3
5	18	18,77
6	19	19
7	27	26,21
8	45	45,63
9	81	82,85
10	108	117,91
11	126	137,4
12	154	157,16
13	163	162,7
14	253	261,48
15	317	332,24
16	416	430,81
17	456	456
18	570	584,73
19	709	717,54
20	1026	1063,91

Графічно результати дослідження показані точками на рис. 5.12.

Взаємне розташування результатів вимірювання дозволило зробити припущення, що залежність між масою матеріалу, який розташований на поверхні формувача, та результатами вимірювання близька до лінійної у діапазоні від 0 до 1000 г. Тобто її можна представити у вигляді:

$$m_D = am_M + b, \quad (5.1)$$

де m_D – сигнал тензодатчика;

m_M – маса матеріалу;

a, b – коефіцієнти рівняння регресії.

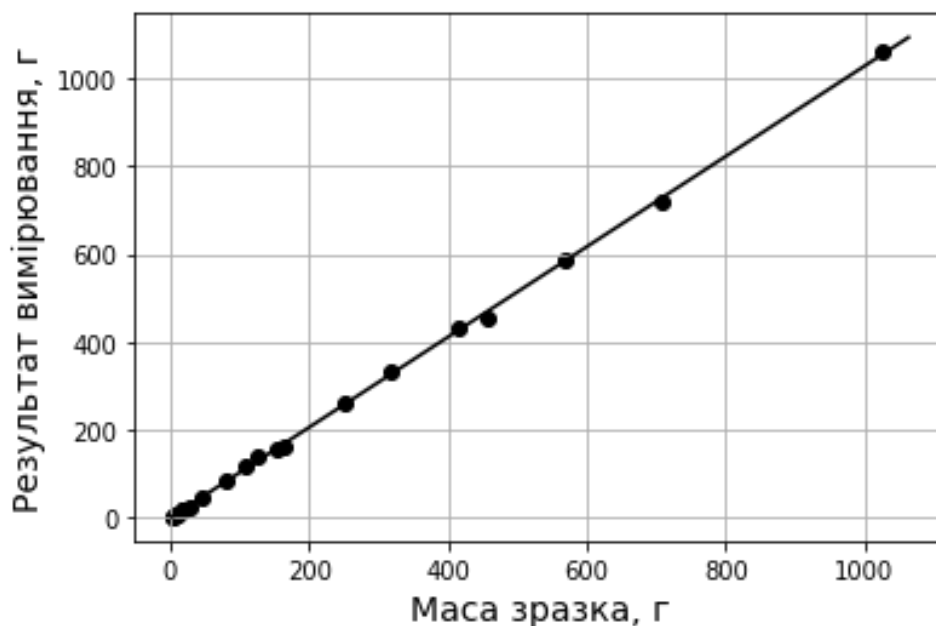


Рис. 5.12. Статична характеристика системи визначення маси сипкого матеріалу

Коефіцієнти рівняння регресії визначені методом найменших квадратів. В результаті проведених розрахунків отримані наступні значення коефіцієнтів:

$$a = 1,0275,$$

$$b = 0,105.$$

Таким чином, статична характеристика системи визначення маси сипкого матеріалу має вигляд:

$$m_D = 1,0275 \cdot m_M + 0,105. \quad (5.2)$$

На рис. 5.12 суцільною лінією показані значення, що розраховані за рівнянням регресії (5.2).

Перевірку адекватності отриманої моделі (5.2) виконано за методом Фішера. Для цього, за отриманим рівнянням регресії визначені розрахункові значення сигналів датчика маси для всіх точок, в яких проведені дослідження. Далі визначені дисперсії для розрахованих та вимірянних сигналів датчика.

Значення критерію Фішера розраховано за формулою:

$$F_P = \frac{\sigma_{P_d}^2}{\sigma_{\hat{P}_d}^2}, \quad (5.3)$$

де $\sigma_{P_d}^2$ та $\sigma_{\hat{P}_d}^2$ – дисперсії розрахованих за рівнянням (5.2) та вимірних (див. табл. 5.1) сигналів датчика, відповідно.

В результаті отримано значення $F_P = 1,00036$. Табличне значення критерію Фішера за умов проведення даного експерименту становить $F_{T(0,05; 18; 19)} = 2,1906$.

Таким чином, виконується умова $F_P < F_T$, що свідчить про адекватність отриманого рівняння регресії.

5.3. Дослідження процесу витікання сипких матеріалів з бункерів

Метою експериментального дослідження витікання матеріалів з бункерів є встановлення характеру їх руху та визначення взаємозв'язків між параметрами бункера та його продуктивністю.

Відомі два режими руху матеріалу [96]: нормальний та гідравлічний. Нормальний характеризується постійною швидкістю руху частинок на виході бункера, тобто продуктивність не залежить від кількості матеріалу в бункері. За гідравлічного режиму характер руху частинок наближається до руху рідини, і швидкість витікання стає функцією рівня матеріалу у бункері. Таким чином, для визначення характеру руху необхідно дослідити залежність продуктивності бункера від часу.

Також результати аналітичних досліджень свідчать, що процес витікання сипких матеріалів залежить як від їх фізико-механічних властивостей, так і від геометричних параметрів бункера. Ці залежності можна визначити на основі інформації про величину продуктивності бункера та її змінювання за часом.

Для проведення зазначених досліджень авторами використаний експериментальний стенд, структурна схема якого показана на рис. 5.13.

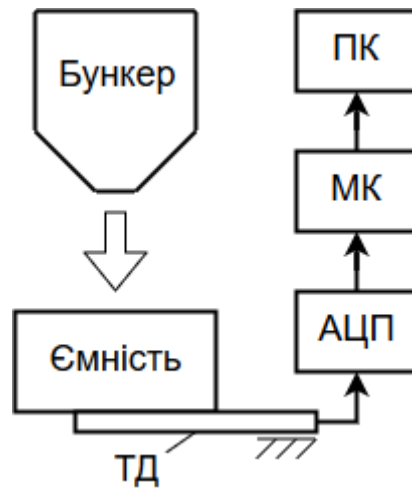


Рис. 5.13. Структурна схема стенду для визначення продуктивності бункера

Стенд складається з бункера, ємності для сипкого матеріалу, тензометричного датчика (ТД), аналого-цифрового перетворювача (АЦП), мікроконтролера (МК) та персонального комп'ютера (ПК). Ємність для сипкого матеріалу закріплена безпосередньо на ТД таким чином, що її маса визначає величину сигналу ТД. Бункер розміщено безпосередньо над ємністю. Якщо вихідний патрубок бункера відкритий, сипкий матеріал під дією сили тяжіння висипається у ємність та змінює її масу. МК через АЦП зчитує сигнал датчика маси та передає його для збереження і подальшого аналізу до ПК.

Конструкція стенду практично не накладає обмежень на форму та розміри бункерів, які використовуються під час дослідження. Закріпити над ємністю можна практично будь-який бункер. Основною умовою, яку необхідно враховувати, є відповідність маси сипкого матеріалу та допустимих навантажень на тензодатчик.

При проведенні досліджень використовувались бункери двох конструкцій, форма та геометричні розміри яких представлені на рис. 5.14.

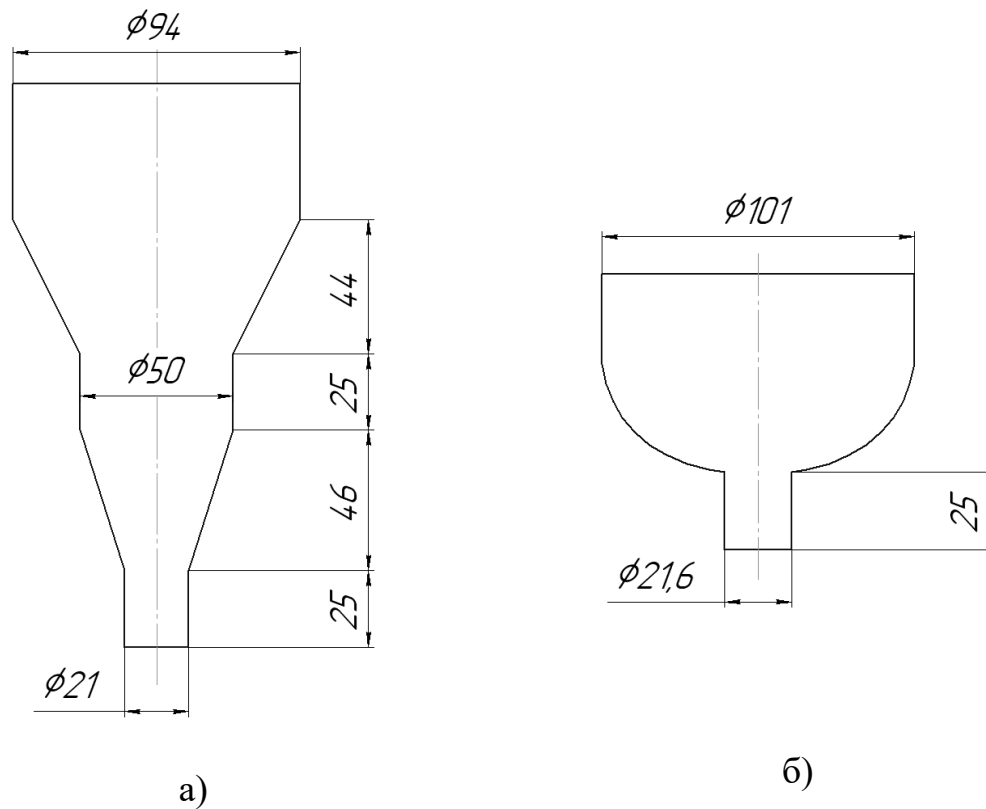


Рис. 5.14. Схеми конструкцій бункерів:

а – конічний; б – параболічний

Конічний бункер (рис. 5.14, а) складається з двох циліндричних і двох конічних зон з різними радіусами та кутами нахилу бічних стінок. Параболічний бункер (рис. 5.14, б) має одну циліндричну зону та зону зі змінним кутом нахилу бічної стінки (зміна відбувається за законом параболи). Для проведення досліджень кожен з бункерів повністю завантажувалася сипким матеріалом, що гарантувало роботу бункера з наповненням всіх можливих комбінацій зон під час витікання матеріалу.

Експерименти проводились за наступним алгоритмом.

- 1) Здійснювалось калібрування системи. Для цього визначався сигнал ТД, що відповідав порожній ємності.
- 2) Завантажувався сипкий матеріал у бункер.
- 3) Запускався процес вимірювання. МК через задані інтервали часу (0,09 с) через АЦП зчитував сигнали тензодатчика.

4) Відкривався вихідний патрубок бункера.

5) Процес вимірювання завершувався після витікання всього матеріалу у ємність.

б) Досліди повторювались десять разів для трьох різних матеріалів і двох бункерів різної форми (рис. 5.14, а та б).

Параметри сипких матеріалів, що використовувались при проведенні експериментальних досліджень, наведені у табл. 5.2. До них відносяться розміри частинок, насипна густина та кут природнього укусу.

Таблиця 5.2

Параметри сипких матеріалів

Назва параметра	Матеріал 1	Матеріал 2	Матеріал 3
Розмір частинки, мм	2,9 ... 3,8	~1,7	~2,2
Кут природнього укусу, град	35	41,9	30,7
Насипна густина, кг/м ³	815	770	850

Слід зазначити, що при проведенні аналітичних досліджень, в тому числі з використанням МДЕ, параметрами, що характеризують взаємодію частинок між собою та з поверхнею бункера, є коефіцієнти тертя ковзання та кочення. Також, як зазначено в підрозділі 3.2, вони значною мірою впливають на продуктивність бункера. Визначення значень цих коефіцієнтів при проведенні експериментальних досліджень є технічно складним завданням, оскільки вони залежать від зовнішніх умов. З іншого боку, результати аналітичних розрахунків свідчать, що кут природнього укусу матеріалу визначається сукупною дією всіх його властивостей. Таким чином, взаємозв'язок між продуктивністю бункера та кутом природнього укусу дозволяє оцінити вплив властивостей матеріалу на продуктивність.

Результати експерименту складались зі значень моментів часу та відповідних їм сигналів датчика маси. Після завантаження даних у ПК

здійснювалась їх попередня обробка, яка полягала у виконанні трьох операцій.

1) Визначався момент початку надходження сипкого матеріалу у ємність. Всі попередні дані, які були зняті для порожньої ємності, з подальших розрахунків виключались.

2) Визначався момент завершення надходження матеріалу в ємність. Всі подальші дані також виключались з розрахунків.

3) Для кожного інтервалу часу, в які знімалися сигнали датчика маси, визначалось середнє значення результатів всіх десяти вимірювань.

Результати досліджень для конічного бункера (рис. 5.14, а) та всіх трьох матеріалів показані на рис. 5.15...5.17. Аналіз результатів свідчить, що залежність між масою матеріалу, який витік з бункера, та часом є лінійною. Тому для її апроксимації методом найменших квадратів були розраховані коефіцієнти лінійного рівняння регресії.

На графіках точками показані експериментальні дані, суцільними лініями – результати розрахунків за отриманим рівнянням регресії.

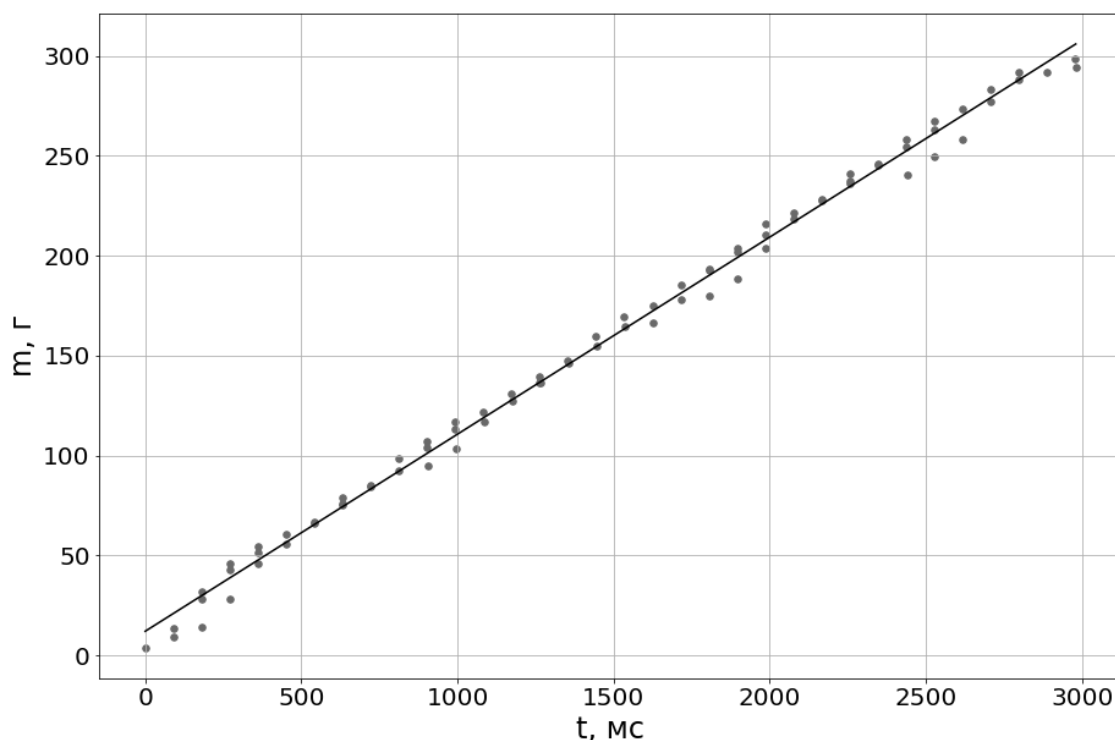


Рис. 5.15. Залежність між масою матеріалу 1 у ємності та часом для конічного бункера

Рівняння регресії для матеріалу 1: $m = 0,0986 t + 12,037$

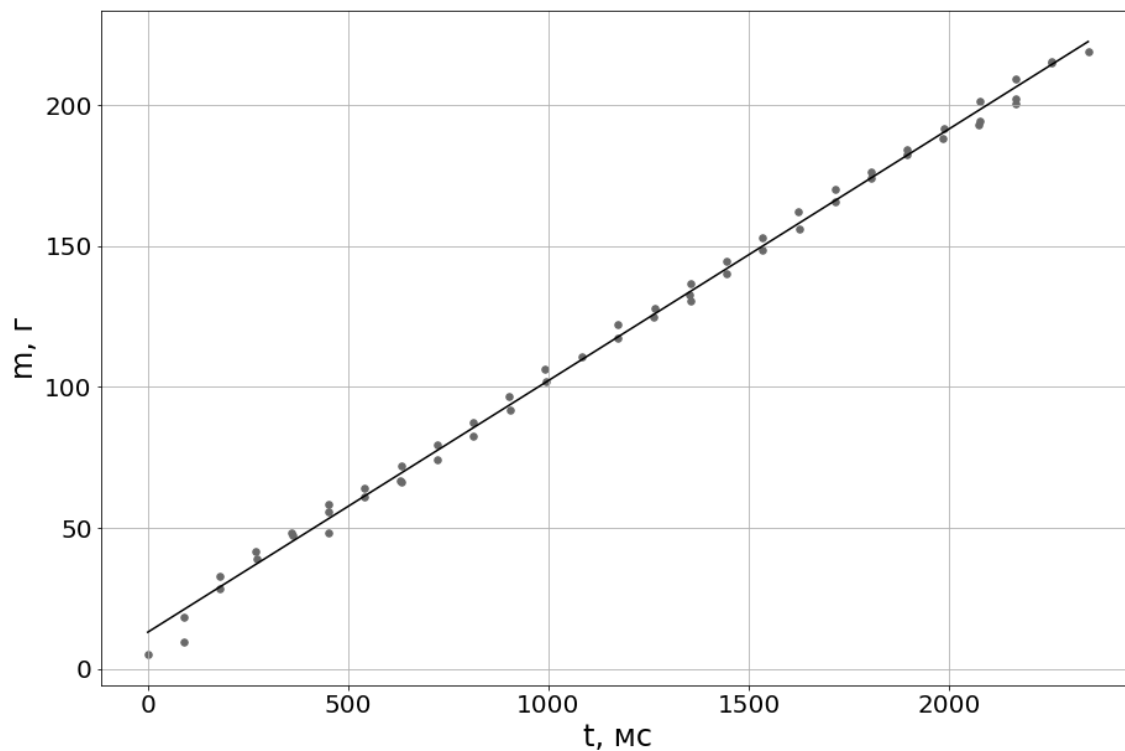


Рис. 5.16. Залежність між масою матеріалу 2 у ємності та часом для
конічного бункера

Рівняння регресії для матеріалу 2: $m = 0,0894 t + 12,954$

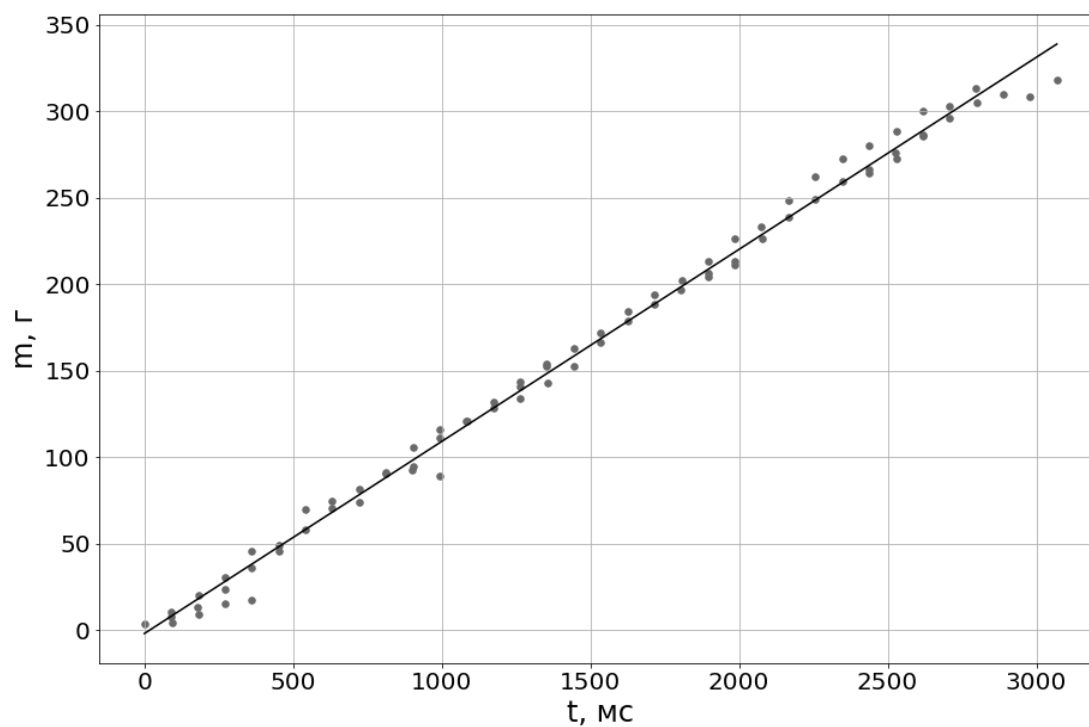


Рис. 5.17. Залежність між масою матеріалу 3 у ємності та часом для
конічного бункера

Рівняння регресії для матеріалу 3:

$$m = 0,111t - 1,841$$

Коефіцієнти рівнянь регресії при змінній t характеризують швидкість змінювання маси ємності з матеріалом, тобто продуктивність бункера. У табл. 5.3 наведені значення продуктивності бункера для всіх трьох типів матеріалу.

Таблиця 5.3

Продуктивність конічного бункера для різних матеріалів

Назва параметра	Матеріал 1	Матеріал 2	Матеріал 3
Продуктивність, кг/с	0,0986	0,0894	0,111

З метою визначення взаємозв'язків між отриманими значеннями продуктивності та параметрами сипкого матеріалу побудовані залежності, які показані рис. 5.18...5.20.

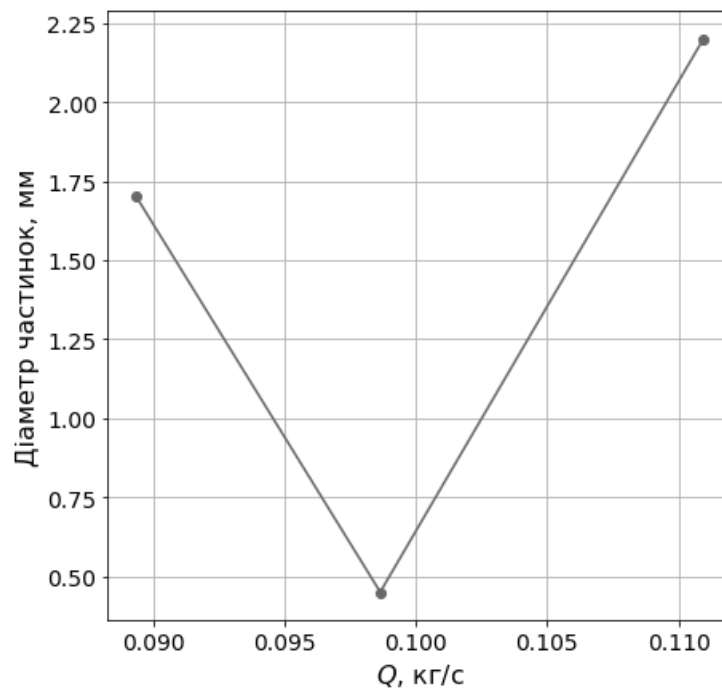


Рис. 5.18. Залежність між діаметром частинок сипкого матеріалу та продуктивністю конічного бункера

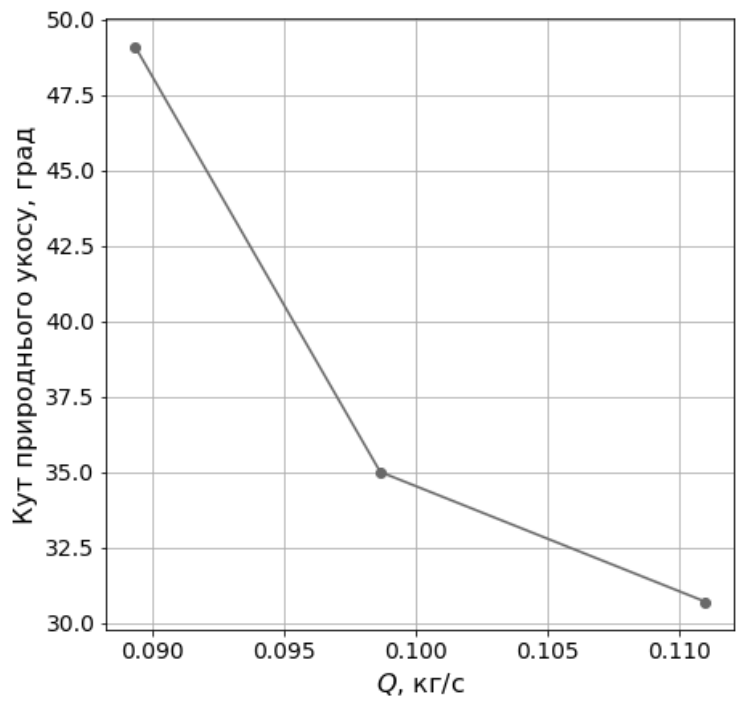


Рис. 5.19. Залежність між кутом природнього укосу сипкого матеріалу та продуктивністю конічного бункера

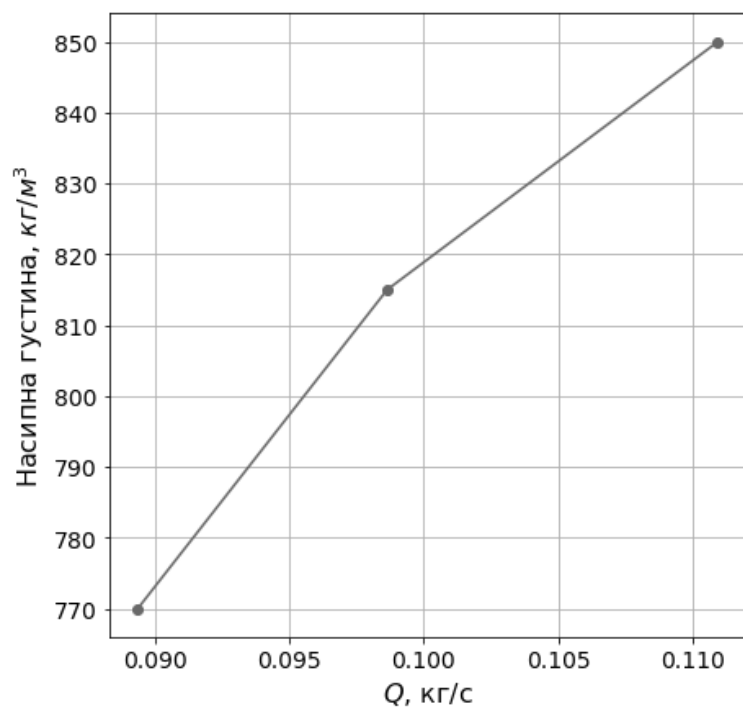


Рис. 5.20. Залежність між насипною густиною сипкого матеріалу та продуктивністю конічного бункера

За допомогою коефіцієнтів кореляції (Пірсона) здійснювалась чисельна оцінка взаємозв'язку між:

- продуктивністю та кутом природнього укоосу;
- продуктивністю та розміром частинок;
- продуктивністю та насипною густиною.

Коефіцієнт кореляції Пірсона r_{xy} характеризує існування лінійної залежності між двома величинами (x, y) та визначається за формулою:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5.4)$$

де \bar{x}, \bar{y} – вибіркові середні.

Результати розрахунків:

- 1) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та насипною густиною ρ становить $r_\rho = 0,988$.
- 2) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та кутом природнього укоосу φ - $r_\varphi = -0,976$.
- 3) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та розміром частинок α - $r_\alpha = 0,212$.

Результати дослідження процесу витікання сипкого матеріалу з конічного бункера дозволяють зробити наступні висновки.

- 1) Характер руху матеріалу є нормальним. Продуктивність бункера є сталою та не залежить від кількості матеріалу в ньому.
- 2) Існують практично лінійні залежності між продуктивністю бункера та насипною густиною матеріалу ($r_\rho = 0,988$).
- 3) Існує лінійна залежність між продуктивністю бункера та кутом природнього укоосу матеріалу ($r_\varphi = -0,976$).
- 4) Продуктивність бункера практично не залежить від розмірів частинок ($r_\alpha = 0,212$).

5.4. Дослідження руху сипкого матеріалу у бункерах, що мають змінний кут нахилу бічної стінки

Алгоритм проведення експериментальних досліджень руху сипких матеріалів у бункері зі змінним кутом нахилу бічних стінок повністю співпадає з послідовністю досліджень конічного бункера.

Параметри сипких матеріалів наведені у табл. 5.2, форма та розміри бункера – на рис. 5.14, б. Слід зауважити, що характерною особливістю даного бункера є низькі значення кутів нахилу бічної стінки біля вихідного патрубку. Оскільки їх значення менше величини кутів природнього укосу матеріалу, рух в цій зоні може суттєво відрізнятись.

Результати проведених експериментальних досліджень показані точками на рис. 5.21...5.23. Взаємне розташування точок на графіках свідчить, що характер процесу нагадує експоненціальний. З метою перевірки цієї гіпотези оброблення даних здійснювалось у наступному порядку.

1) Визначався момент початку надходження сипкого матеріалу у ємність. Всі попередні дані, які були зняті для порожньої ємності, з подальших розрахунків виключались.

2) Визначався момент завершення надходження матеріалу в ємність. Всі подальші дані також виключались з розрахунків.

3) Для кожного інтервалу часу, в які знімалися сигнали датчика маси, визначалось середнє значення результатів всіх десяти вимірювань.

4) Методом найменших квадратів розраховувались коефіцієнти експоненціальної залежності виду $m = A \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$. Результати розрахунків приведені в табл. 5.4.

Графіки експоненціальних залежностей показані на рис. 5.21...5.23 пунктирними лініями. Оцінка відповідності цих залежностей реальному процесу здійснювалась за критерієм Фішера. В результаті встановлено, що

отримані експоненціальні залежності не відповідають експериментальним даним.

Візуальна перевірка взаємного розташування графіків та експериментальних точок дозволила зробити припущення, що процес руху частинок змінює характер в залежності від кількості матеріалу в бункері. Коли бункер наповнений сипким матеріалом, характер руху є практично лінійним. При зменшенні кількості матеріалу в ньому, спостерігається зменшення продуктивності. Ця зміна пояснюється тим, що останніми з бункера витікають шари матеріалу, які знаходяться вздовж його бічної стінки. При цьому кількість матеріалу є недостатньою для заповнення вихідного патрубку, що і призводить до зменшення продуктивності.

Таблиця 5.4

Експоненціальні залежності, що описують рух сипкого матеріалу у параболічному бункері

Матеріал	Рівняння експоненціальної залежності
Матеріал 1	$m = 527,304 \left(1 - e^{-\frac{t}{4359,08}} \right)$
Матеріал 2	$m = 254,703 \left(1 - e^{-\frac{t}{1636,77}} \right)$
Матеріал 3	$m = 481,552 \left(1 - e^{-\frac{t}{3099,302}} \right)$

Наступний етап обробки експериментальних даних складався з двох операцій:

- визначення часу, протягом якого продуктивність бункера є лінійною.
- розрахунку методом найменших квадратів коефіцієнтів лінійної регресії для цих періодів часу.

Отримані залежності показані суцільними лініями на рис. 5.21...5.23, а їх рівняння наведені в табл. 5.5.

**Лінійні залежності, що описують рух сипкого матеріалу у
параболічному бункері**

Матеріал	Рівняння лінійної залежності
Матеріал 1	$m = 0,097t - 3,745$
Матеріал 2	$m = 0,102t + 5,283$
Матеріал 3	$m = 0,114t + 8,485$

Для параболічного бункера визначені коефіцієнти кореляції (5.2).

1) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та насипною густиною становить $r_\rho = 0,954$.

2) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та кутом природнього укосу - $r_\varphi = -0,933$.

3) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та розміром частинок - $r_\alpha = 0,066$.

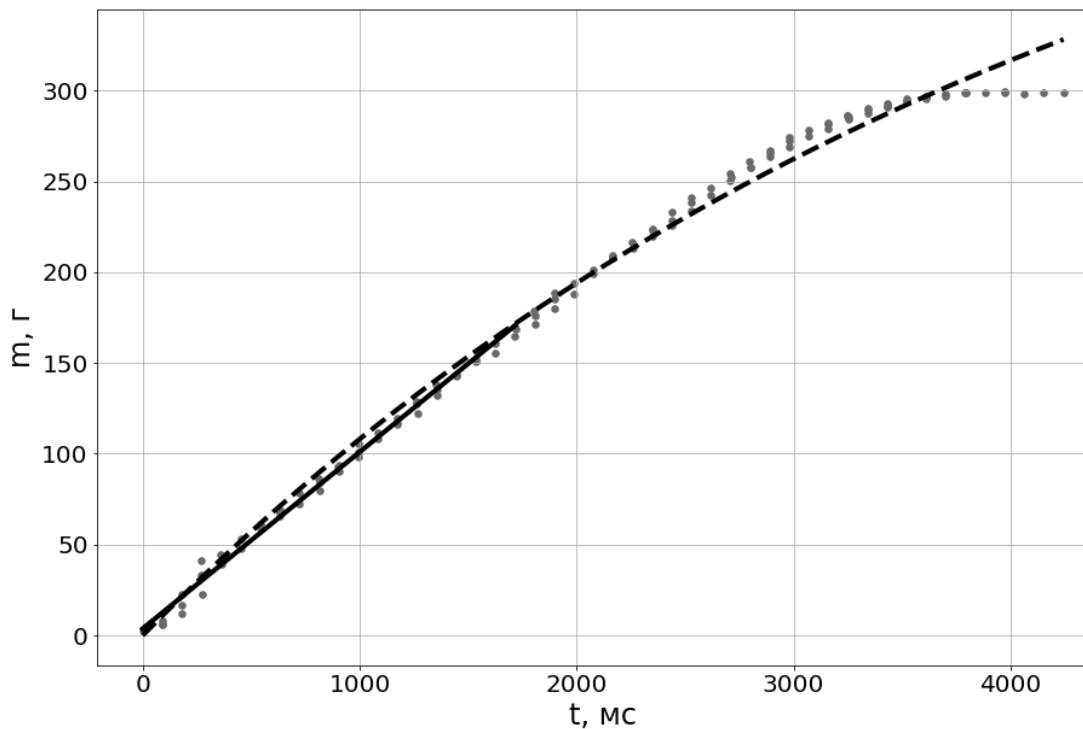


Рис. 5.21. Залежність між масою матеріалу 1 у ємності та часом для параболічного бункера

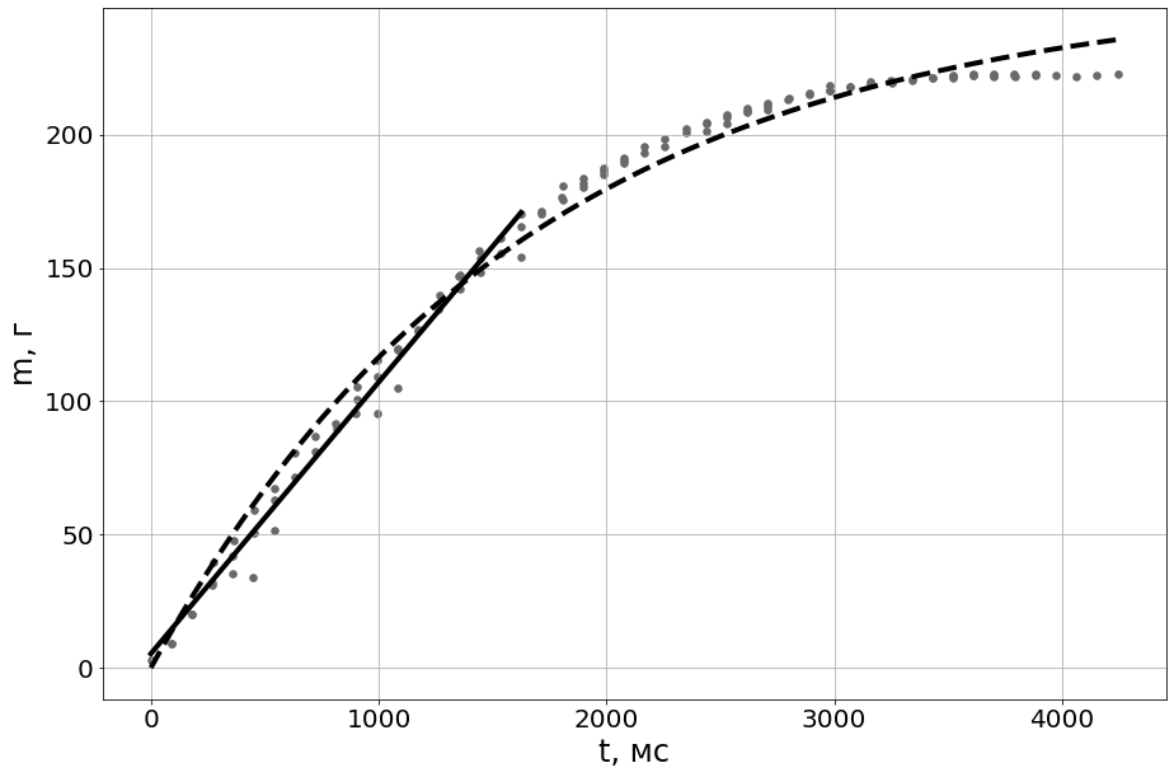


Рис. 5.22. Залежність між масою матеріалу 2 у ємності та часом для параболічного бункера

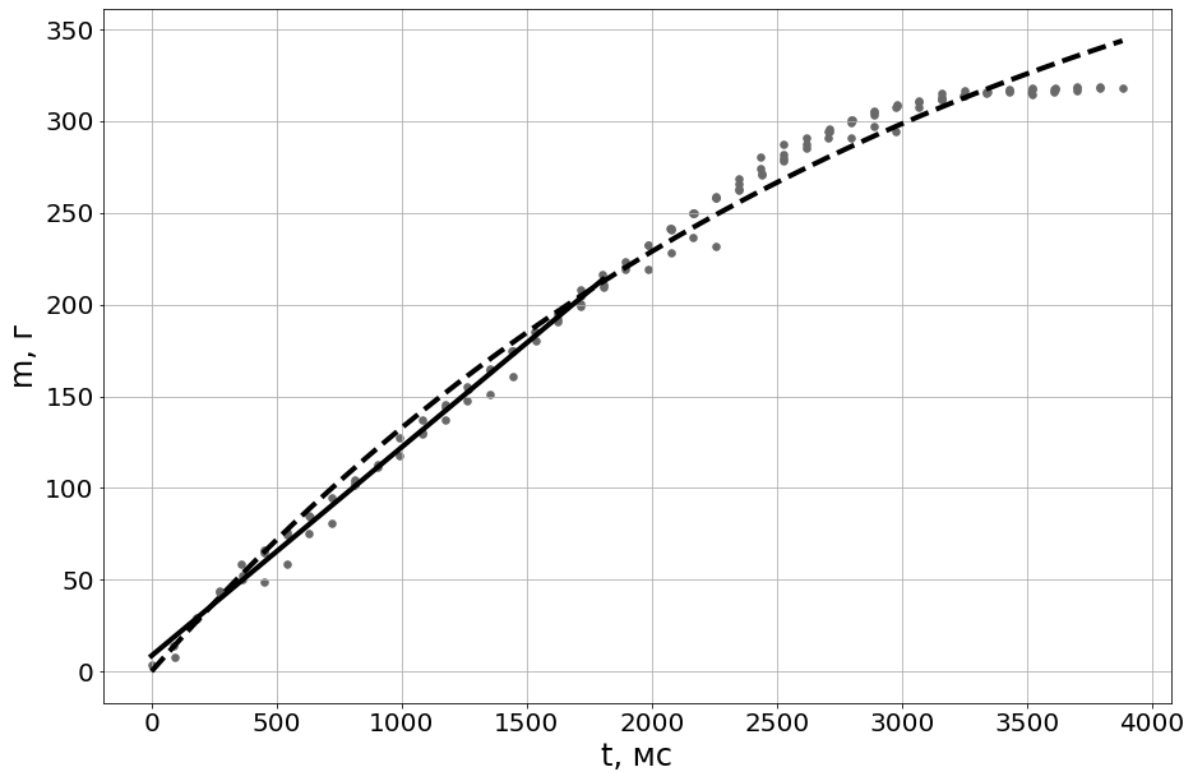


Рис. 5.23. Залежність між масою матеріалу 3 у ємності та часом для параболічного бункера

Результати експериментальних досліджень свідчать, що:

- отримані математичні моделі можна використовувати при дослідженні процесу витікання матеріалу з бункерів, які мають різну геометричну форму;
- процес руху матеріалу з бункерів носить нормальний характер, продуктивність залишається сталою;
- продуктивність бункерів визначається насипною густиною та кутом природнього укосу матеріалу і практично не залежить від розмірів частинок.

5.5. Дослідження системи керування положенням ножа тарілчастого живильника

Конструкція стенду для дослідження роботи тарілчастого живильника представлена на рис. 5.8 та 5.11. Оскільки тарілчастий живильник безперервної дії не може працювати без неперервного надходження сипкого матеріалу, при проведенні всіх досліджень використовувалась система, що складалась з конічно-циліндричного бункера та живильника. Запас матеріалу в бункері підтримувався на достатньому рівні для забезпечення безперервної роботи обладнання.

До основних завдань досліджень системи «бункер – тарілчастий живильник» відносились:

- Визначення характеру руху сипкого матеріалу у тарілчастому живильнику.
- Перевірка відповідності між результатами досліджень МДЕ та реальним процесом.
- Дослідження можливостей керуванням продуктивністю живильника за рахунок зміни положення ножа.

Дослідження точності керування положенням ножа

Практично всі дослідження роботи тарілчастого живильника передбачають фіксацію ножа у заданих положеннях та їх зміну у процесі роботи. Точність позиціонування впливає на кількість матеріалу, що знімається з тарелі за один оберт, а отже і на продуктивність живильника. З метою оцінки залежності між сигналами керування сервоприводом та фактичним положенням ножа проведено експериментальні дослідження.

Керування сервоприводом здійснюється за допомогою імпульсних сигналів керування, що мають постійно надходити на його сигнальний вхід. Частота сигналів залишається постійною, а зміна кута повороту валу забезпечується за рахунок змінювання тривалості імпульсів. Особливістю дослідного стенду є обмежений діапазон повороту валу сервоприводу, що зумовлено діапазоном можливих положень ножа, за яких зберігається коректна робота живильника. В даному випадку можливий діапазон відстаней від кромки ножа до осі обертання тарелі становив від 0,114 м до 0,065 м. Відповідні положення валу сервоприводу та тривалість імпульсів керування визначалась дослідним шляхом та у відносних одиницях склала від 0 до 30. Цей діапазон відповідає приблизно 30% можливого діапазону положень валу сервоприводу.

При проведенні експериментальних досліджень живильник запускався без сипкого матеріалу. Програма для мікроконтролера послідовно змінювала сигнали керування з кроком у 5 відносних одиниць. Тривалість між зміною сигналів керування становила 10 с. Протягом цього часу здійснювалось визначення відстані між кромкою ножа та віссю обертання тарелі. Дослід повторювався 10 разів. Для всіх значень сигналів керування визначались середні значення відстаней від кромки ножа до осі обертання тарелі, які показані точками на рис. 5.24.

Оскільки характер залежності близький до лінійного, методом найменших квадратів визначені коефіцієнти лінійного рівняння регресії:

$$a = 0,00155s + 0,06589, \quad (5.5)$$

де a – відстань від кромки ножа до осі обертання тарелі;
 s – сигнал керування.

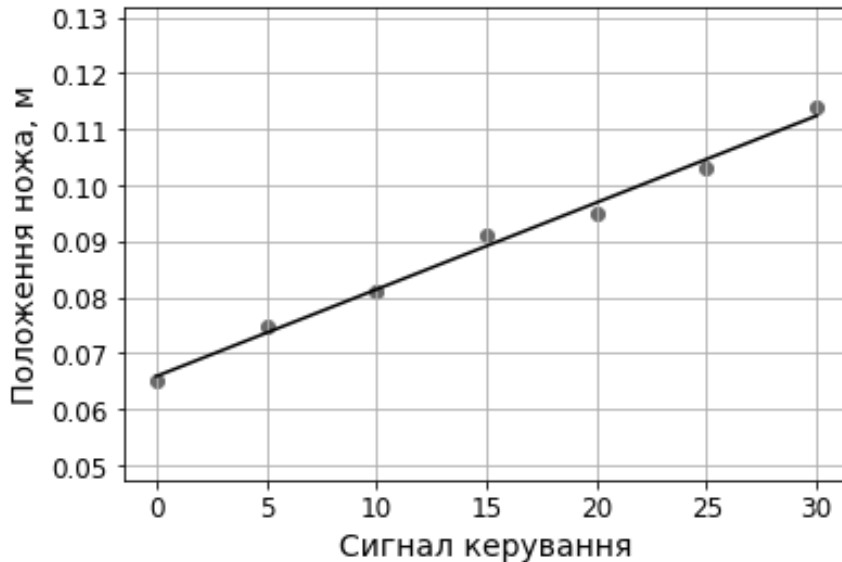


Рис. 5.24. Залежність між положеннями ножа та сигналом керування сервоприводом

Точками на рис. 5.24 показані експериментальні значення, суцільною лінією – результати розрахунків за рівнянням (5.5).

Адекватність отриманої математичної моделі (5.5) підтверджена на основі критерію Фішера.

Дослідження продуктивності живильника при фіксованому положенні ножа

Аналітичні дослідження продуктивності живильника [79, 80] дозволяють зробити висновок, що за фіксованих технологічних параметрах продуктивність має залишатись сталою величиною. Водночас, при роботі будь-якого реального технологічного обладнання виникають відхилення від заданих режимів роботи, що пов'язані з недоліками конструкції, вібрацією, коливаннями напруги у мережі живлення та іншими причинами.

В даному випадку до цих причин додаються особливості руху сипкого матеріалу внаслідок його дискретної природи. Продуктивність живильника сипких матеріалів безперервної дії в принципі не може бути константою, оскільки кількість частинок матеріалу, що знімаються ножом у кожен конкретний момент часу, буде змінюватись, відповідно, фактична продуктивність буде коливатись навколо певного середнього значення. Крім того, в основі аналітичних моделей лежить припущення, що форма конусу сипкого матеріалу на поверхні тарелі залишається незмінною. Це припущення є коректним, оскільки кут природнього укусу матеріалу залишається незмінним, а швидкість обертання тарелі обирається таким чином, щоб величина відцентрової сили була недостатньою для переміщення частинок. Водночас, слід враховувати, що форма конусу матеріалу може змінитись внаслідок дії вібрації та через наявність сил механічного тертя між вихідним патрубком бункера і частинками матеріалу.

З метою визначення величини впливу цих факторів, авторами проведено дослідження продуктивності живильника за фіксованим положенням ножа. При проведенні дослідження фіксувались положення ножа та швидкість обертання тарелі. Після того, як живильник виходив на усталений режим роботи, протягом 80 с за допомогою датчика маси визначалась кількість матеріалу на поверхні формувача з кроком 0,09 с.

Результати вимірювань показані точками на рис. 5.25. Їх аналіз підтверджує наявність поступового зростання продуктивності живильника з часом, що може виникати внаслідок розпорошення конусу сипкого матеріалу на поверхні тарелі. Водночас спостерігаються короткочасні сплески продуктивності, які пояснюються змінною формою основи конусу. Внаслідок локального зсипання частинок матеріалу в окремих зонах тарелі кількість частинок стає більшою ніж в інших, що призводить до короткочасного збільшення продуктивності, коли ніж захоплює частинки з цих зон.

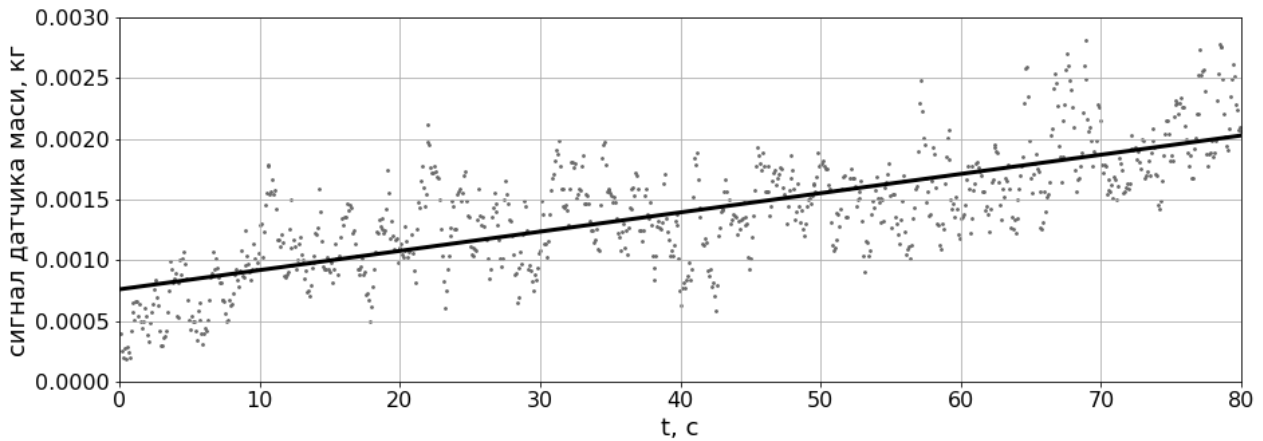


Рис. 5.25. Результати дослідження продуктивності живильника при фіксованому положенні ножа

З метою чисельної оцінки інтенсивності зростання продуктивності методом найменших квадратів розраховано коефіцієнти лінійного рівняння регресії, що має вигляд:

$$m_D = a \cdot t + b, \quad (5.6)$$

де m_D – сигнал тензодатчика маси;

t – час;

a, b – коефіцієнти рівняння регресії.

В результаті проведених розрахунків отримані наступні значення коефіцієнтів:

$$a = 0,016;$$

$$b = 0,6.$$

Остаточне рівняння регресії матиме вигляд:

$$m_D = 0,016 \cdot t + 0,6. \quad (5.7)$$

Розраховані за рівнянням (5.7) значення сигналу датчика маси показані на рис. 5.25 суцільною лінією.

Поступова зміна форми конусу матеріалу на поверхні тарелі зумовлює необхідність створення слідкуючої системи керування для забезпечення постійної продуктивності живильника.

Дослідження системи стабілізації швидкості обертання тарелі живильника

Запропонована раніше система керування тарілчастим живильником безперервної дії (рис. 5.8) дозволяє визначати швидкість обертання тарелі та у разі необхідності змінювати її. Ця можливість забезпечується за рахунок використання двигуна постійного струму з вбудованим енкодером (датчиком швидкості) та живленням, яке надходить через імпульсний регулятор постійної напруги. Пристрій керування через задані інтервали часу визначає сигнали енкодера та, якщо вони відрізняються від заданих, формує відповідні сигнали керування регулятором напруги, що призводить до зміни напруги на якорі двигуна та, відповідно, його швидкості обертання.

Водночас, використання такої системи підвищує її складність та вартість порівняно з варіантом, що має некерований привод. Тому авторами проведено експериментальні дослідження із запропонованою системою стабілізації швидкості обертання тарелі та без неї.

Послідовність проведення дослідження:

- 1) Фіксувалось положення ножа.
- 2) Задавалась швидкість обертання тарелі. Визначалась напруга двигуна, яка відповідає заданій швидкості.
- 3) При проведенні дослідження без використання системи стабілізації швидкості обертання тарелі значення напруги на якорі двигуна залишалось незмінним.
- 4) При використанні системи стабілізації значення напруги на двигуні визначав пристрій керування.

5) Дослід проводився для двох фіксованих положень ножа, за яких відстань від кромки ножа до осі обертання тарелі R_H дорівнювала 73 мм та 80 мм.

Результати дослідження роботи живильника без системи стабілізації показані на рис. 5.26 та 5.27.

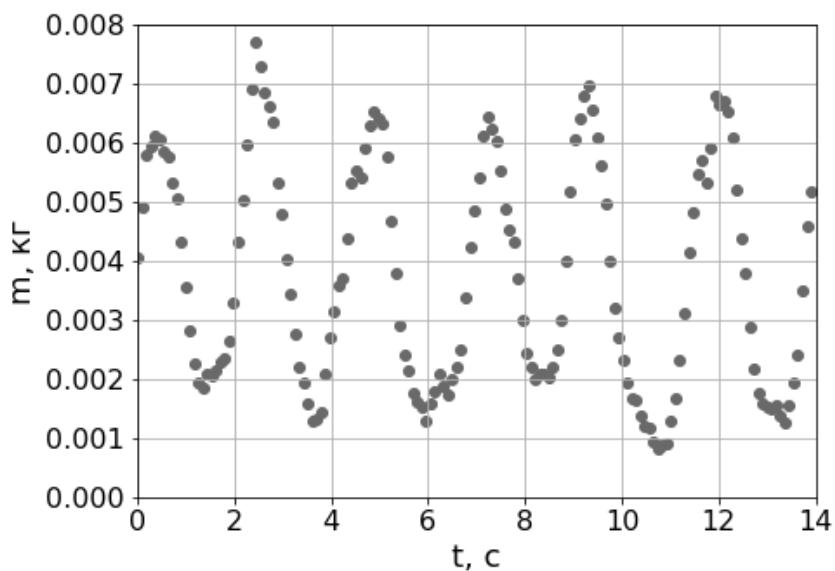


Рис. 5.26. Зміна маси сипкого матеріалу за часом на виході живильника без використання системи стабілізації швидкості тарелі при $R_H = 73$ мм

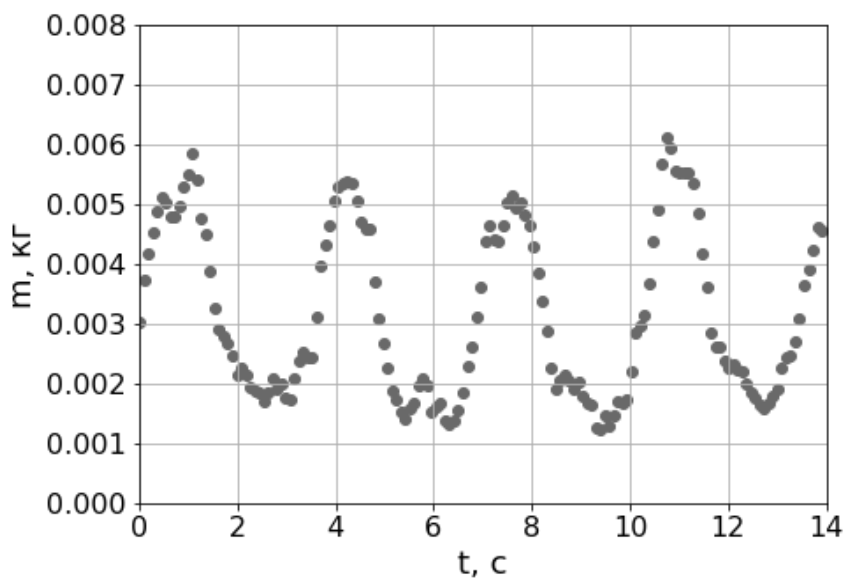


Рис. 5.27. Зміна маси сипкого матеріалу за часом на виході живильника без використання системи стабілізації швидкості тарелі при $R_H = 80$ мм

Результати дослідження системи зі стабілізацією швидкості обертання тарелі показані на рис. 5.28 та 5.29.

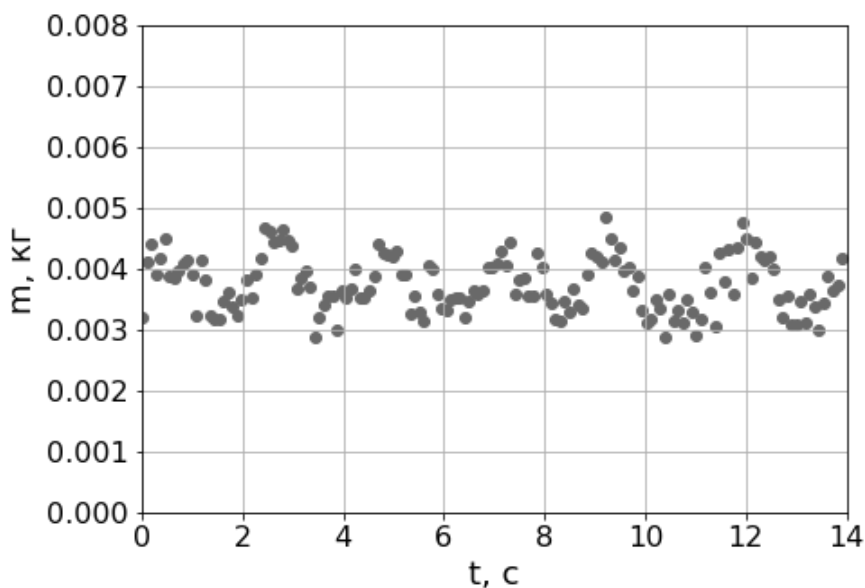


Рис. 5.28. Зміна маси сипкого матеріалу за часом на виході живильника при використанні системи стабілізації швидкості тарелі при $R_H = 73$ мм

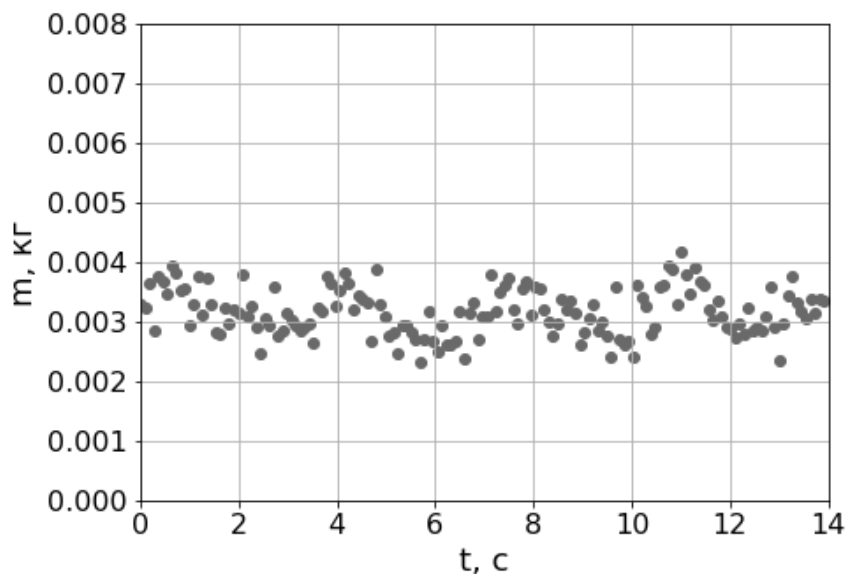


Рис. 5.29. Зміна маси сипкого матеріалу за часом на виході живильника при використанні системи стабілізації швидкості тарелі при $R_H = 80$ мм

З метою порівняння отриманих даних для всіх отриманих залежностей розраховані основні статистичні характеристики, які наведено у табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Результати дослідження впливу системи стабілізації швидкості обертання тарелі на величину пульсацій

Наявність системи стабілізації	Положення ножа, мм	Середнє значення маси матеріалу, кг	СКВ маси матеріалу	Дисперсія маси матеріалу
Ні	73	0,0037	0,0019	$3,615 \cdot 10^{-6}$
Ні	80	0,0032	0,0014	$2,005 \cdot 10^{-6}$
Так	73	0,0038	0,0005	$2,488 \cdot 10^{-7}$
Так	80	0,0031	0,0004	$1,675 \cdot 10^{-7}$

Суттєве зменшення дисперсії сигналів датчика маси сипкого матеріалу дозволяє зробити висновок про ефективність використання запропонованої системи стабілізації швидкості обертання тарелі.

Дослідження впливу положення ножа на продуктивність тарілчастого живильника

Для визначення залежності між положенням ножа та продуктивністю живильника проведено ряд дослідів, під час яких ніж встановлювався на заданій відстані від вісі обертання, після чого протягом заданого часу визначались сигнали датчика маси. Положення ножа змінювались через заданий інтервал часу, що дозволило отримати залежності, які визначають зв'язок між сигналами керування сервоприводом та продуктивністю живильника.

Послідовність проведення дослідів:

- 1) Завантажувався сипких матеріал у бункер та задавалась швидкість обертання тарелі живильника.
- 2) Ніж переміщувався через задані інтервали часу на фіксовану відстань, яка становила 0,01 м.
- 3) Під час роботи живильника фіксувались сигнали датчика маси із кроком 0,09 с.
- 4) Дослід повторювався для різних значень швидкості обертання тарелі.

На рис. 5.30 та 5.31 показані результати двох експериментальних досліджень, під час яких змінювалась швидкість обертання тарелі та положення ножа. На верхніх графіках показані експериментальні дані, на нижніх – відстань від кромки ножа до осі обертання тарелі.

Отримані значення групувались відповідно до положення ножа та швидкості обертання тарелі. На рис. 5.30 та 5.31 ці групи показані за допомогою вертикальних ліній. Для кожної з груп визначались середнє значення, середньоквадратичне відхилення та дисперсія, значення яких наведені в табл. 5.7.

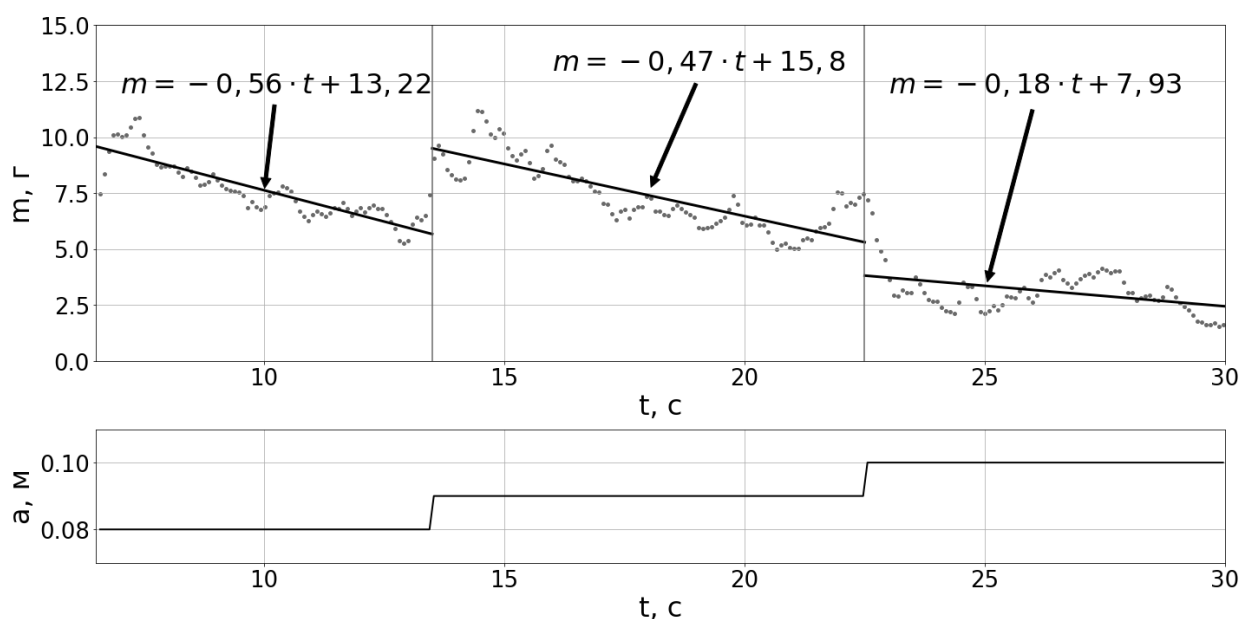


Рис. 5.30. Залежність маси матеріалу на виході живильника від положення ножа за швидкістю обертання 16 об/хв

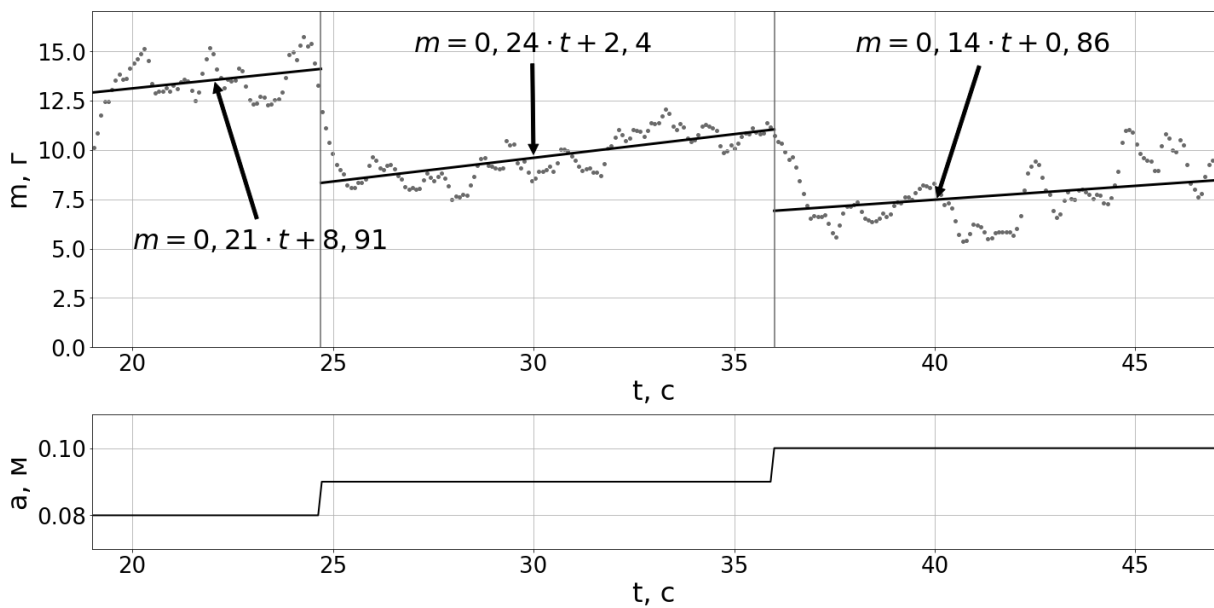


Рис. 5.31. Залежність маси матеріалу на виході живильника від положення ножа за швидкістю обертання 27 об/хв

Таблиця 5.7

Результати дослідження впливу технологічних параметрів живильника на його продуктивність

Швидкість обертання тарелі, об/хв	Відстань від кромки ножа до вісі обертання, м	Середнє значення маси матеріалу на виході живильника, кг	СКВ маси матеріалу на виході живильника	Дисперсія маси матеріалу на виході живильника
16	0,08	7,62	1,3	1,7
	0,09	7,4	1,52	2,32
	0,1	3,12	0,98	0,96
27	0,08	13,49	1,09	1,18
	0,09	9,67	1,14	1,31
	0,1	7,83	1,4	1,96

Оскільки в ідеальному випадку за незмінних положень ножа та швидкості обертання тарелі продуктивність живильника має лишатись

незмінною, для всіх режимів роботи методом найменших квадратів розраховувались коефіцієнти лінійних рівнянь регресії. Отримані рівняння показані на рис. 5.30 та 5.31 суцільними лініями.

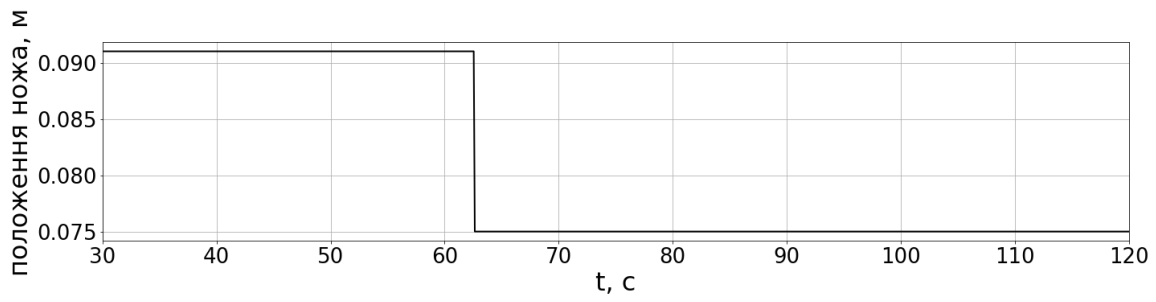
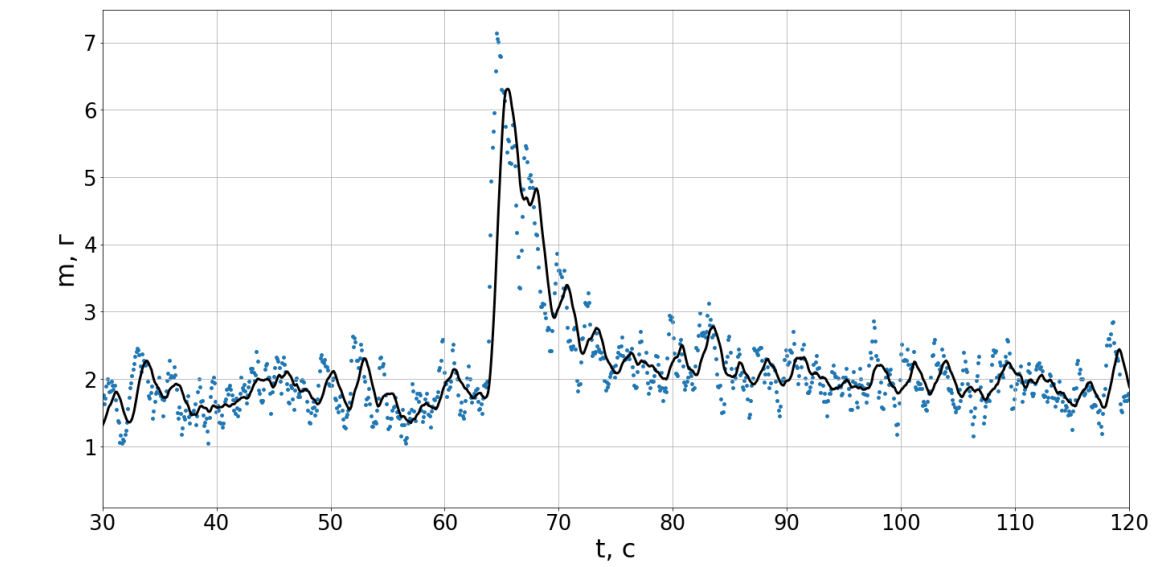
Вигляд отриманих рівнянь регресії та розраховані за ними значення маси матеріалу на виході живильника (суцільна лінія) показані на рис. 5.30 та 5.31.

Результати всіх проведених досліджень свідчать, що після зміни положення ножа відбувається поступова зміна сигналів датчиків маси. Візуальні спостереження за рухом матеріалу показали, що форма конусу сипкого матеріалу на поверхні тарелі змінюється під час контакту з ножом і величина цих змін залежить від переміщення ножа.

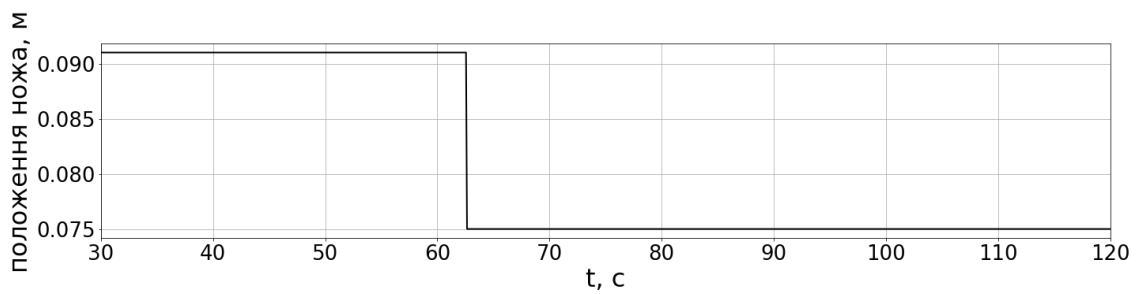
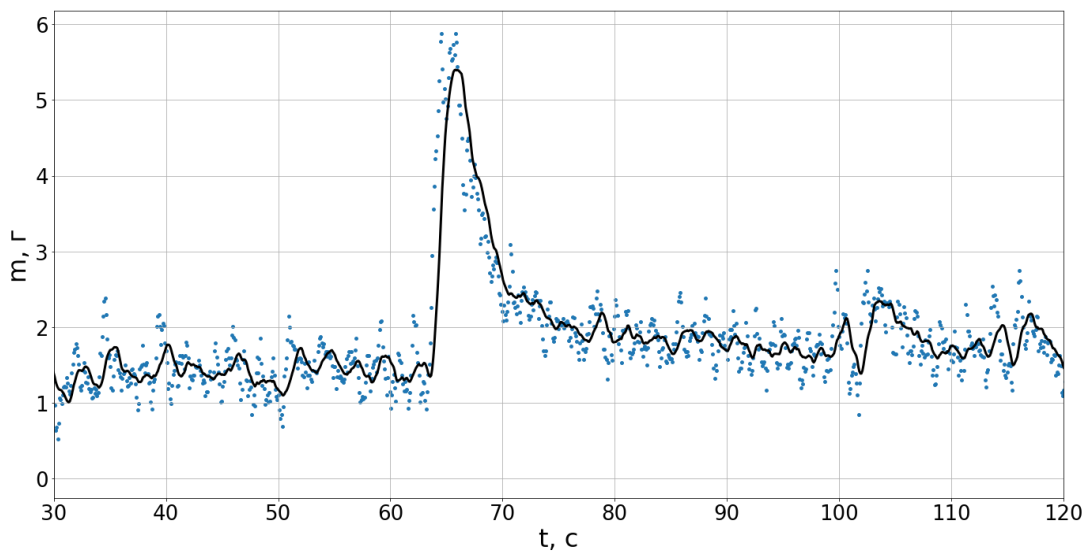
Для більш детального визначення впливу переміщення ножа на рух сипкого матеріалу проведені додаткові дослідження, під час яких швидкість обертання тарелі задавалась рівною 10 об/хв, а відстань від кромки ножа до вісі обертання змінювалось від 0,091 м до 0,075 м. Значення обрані таким чином, щоб у початковому положенні ніж захоплював мінімальну кількість сипкого матеріалу, тобто практично не впливав на форму конусу. Швидкість обертання обиралась максимально низькою для того, щоб максимально зменшити вплив відцентрових сил та вібрації на рух частинок.

У заданий момент часу ($t = 62,7$ с) мікроконтролер змінював сигнал керування ножом для зменшення відстані між кромкою ножа та віссю тарелі до 0,075 м. Зміна положення ножа призводила до «занурення» ножа всередину конусу сипкого матеріалу та, відповідно, до зміни характеру його руху. Оскільки в цьому режимі ніж знімав більшу кількість матеріалу за один оберт, збільшувалась швидкість витікання частинок із бункера, що зумовлювало деформацію конусу.

Результати двох паралельних дослідів такого режиму роботи показані на рис. 5.32 а, б.



a)



б)

Рис. 5.32. Реакція системи на стрибкоподібну зміну сигналу керування
166

Суцільна лінія на рис. 5.32 (верхній графік) показує середні значення кількості сипкого матеріалу на поверхні формувача, що визначені для кожних 15 послідовних результатів вимірів.

Отримані результати свідчать, що при зміні положення ножа спостерігалось короткочасне зростання кількості сипкого матеріалу на поверхні формувача. Через деякий час система приходила до усталеного режиму. В даному дослідженні тривалість перехідного процесу становила $t_{\text{шт}} = 18,5$ с. Наявність такого сплеску можна пояснити зміною форми конусу сипкого матеріалу на поверхні тарелі при переміщенні ножа.

Також спостерігалась різниця у часі між зміною положення ножа та відповідною зміною сигналів датчика маси. В даному випадку цей час становив близько 0,4 с. Це час, який потрібен для переміщення частинок матеріалу вздовж поверхні ножа до краю тарелі.

Результати досліджень свідчать, що при наближенні ножа до осі обертання продуктивність живильника зростає, що відповідає теоретичним розрахункам. Водночас, залежність продуктивності живильника від положення ножа носить явно не лінійний характер. Під час рух матеріалу спостерігаються пульсації у потоці, які носять випадковий характер. Їх наявність підтверджує ефективність результатів моделювання на основі МДЕ.

Водночас, наявність сплесків продуктивності під час перехідних процесів, наприклад, при змінюванні положення ножа, дозволяє зробити припущення про те, що кожному режиму роботи тарілчастого живильника відповідає власна форма конуса. Оскільки верхні шари конусу знаходяться у постійному русі, кут нахилу бічної стінки конуса може не дорівнювати куту природнього укусу матеріалу. Це припущення підтверджується результатами розрахунків з використанням МДЕ, які вказують, що швидкість руху частинок у верхніх шарах матеріалу є нерівномірною.

Порівняння результатів експериментальних досліджень та розрахунків на основі МДЕ

Характер руху частинок сипкого матеріалу на виході тарілчастого живильника, визначений за допомогою МДЕ, найбільшою мірою відповідає результатам експериментальних досліджень. Водночас, математичні моделі, що використовуються при розрахунках МДЕ є ідеалізованими. Наприклад, частинки вважаються ідеальними сферами однакового розміру, не враховується вплив вібрацій, що виникає під час роботи обладнання, тощо. З метою чисельної оцінки різниці між результатами розрахунків МДЕ та експериментальних досліджень створено математичну модель живильника, що має параметри, які максимально точно відповідають параметрам дослідного стенда.

На її основі визначено масу матеріалу, що знаходиться на поверхні формувача, при швидкості обертання тарелі та положенні ножа, які співпадають з параметрами дослідного стенду. Визначення параметрів руху частинок здійснювалось для усталеного режиму роботи, тобто момент часу $t = 0$ відповідає початку усталеного режиму. Результати показані на рис. 5.33.

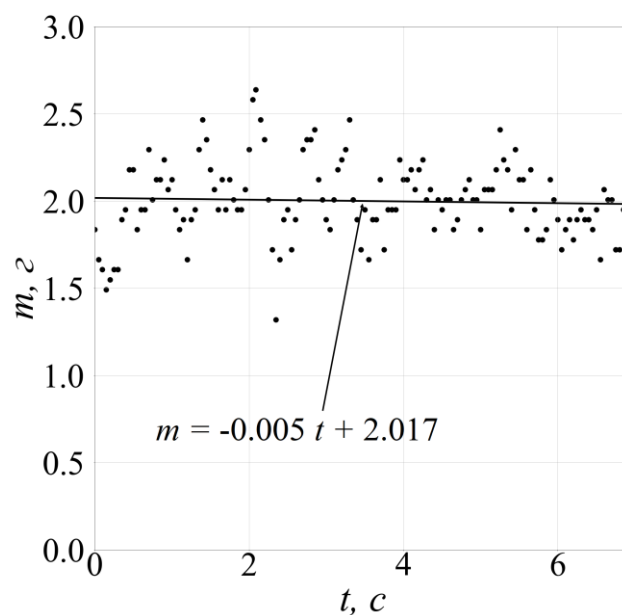


Рис. 5.33. Залежність маси матеріалу від часу на поверхні формувача, що визначена методом дискретних елементів

Під час експериментальних досліджень тривалість вимірювання обрана рівною тривалості моделювання МДЕ та дорівнює 7 с. Результати показані на рис. 5.34.

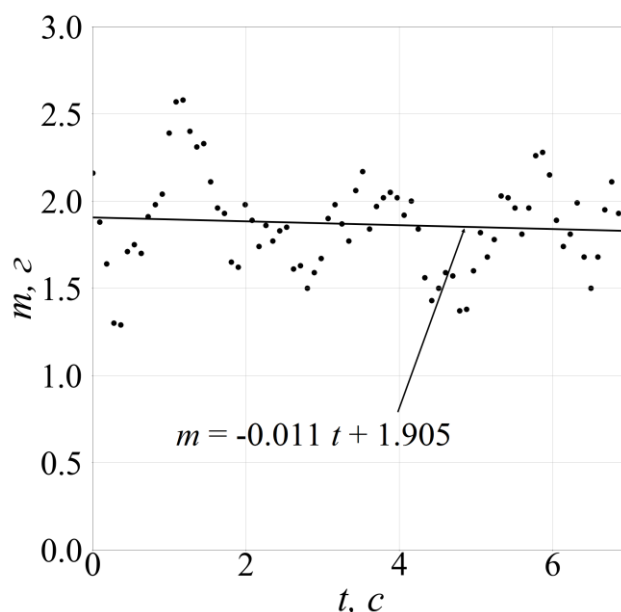


Рис. 5.34. Залежність маси матеріалу від часу на поверхні формувача, що визначена експериментально

На рис. 5.33 і 5.34 наведені рівняння апроксимуючих лінійних функцій у натуральних одиницях вимірювання, графічне зображення яких показано суцільними лініями.

Також визначені коефіцієнти детермінації R^2 між отриманими даними та значеннями, розрахованими за рівняннями регресії. Результати розрахунків показані в табл. 5.8.

Таблиця 5.8

Значення коефіцієнтів детермінації

Рівняння для розрахунку коефіцієнта детермінації	Значення R^2
Результати розрахунків МДЕ – значення, що отримані за рівнянням регресії $m = -0,011 \cdot t + 1,905$	0,0902
Результати експериментальних досліджень – значення, що отримані за рівнянням регресії $m = -0,055 \cdot t + 2,017$	0,0021

В ідеальному випадку в усталеному режимі роботи продуктивність живильника (маса матеріалу, що проходить по поверхні формувача за одиницю часу) є сталою величиною і має дорівнювати середнім значенням експериментальних даних та значенням, що отримані за допомогою МДЕ. Величина коефіцієнту детермінації R^2 , яка наближається до нуля, свідчить, що результати розрахунків, які отримані за рівняннями регресії, збігаються з середніми значеннями. Тобто і для випадку МДЕ, і для випадку експериментальних досліджень можна вважати, що живильник працює в усталеному режимі роботи.

З метою перевірки усталених режимів роботи для експериментально отриманих даних (рис. 5.34) та результатів, що визначені за допомогою МДЕ (рис. 5.33), розраховано основні статистичні характеристики процесів та здійснено перевірку рівності їх дисперсій (табл. 5.9).

Таблиця 5.9

Порівняння експериментальних результатів та розрахункових значень

Назва параметра	МДЕ	Експеримент
Середнє значення, г	2,0	1,87
Середньоквадратичне відхилення	0,22	0,273
Дисперсія	0,049	0,074
Довірчий інтервал (для надійності 95%)	1,963...2,037	1,805...1,928
Середньоквадратичне відхилення регресії	0,22	0,27
Дисперсія регресії	0,048	0,073

У табл. 5.9 наведено результати розрахунків параметрів потоків сипкого матеріалу, що визначені за допомогою МДЕ та експериментально отримані. Всі значення розраховувались для діапазону часу від 0 до 7с. Середні значення, середньоквадратичні відхилення, дисперсія та довірчі інтервали визначались окремо для результатів експерименту та результатів розрахунків МДЕ. Середньоквадратичні відхилення регресії та дисперсії

регресії обчислювались між експериментальними значеннями та значеннями, що розраховано за відповідним рівнянням регресії.

Отримані експериментальні та розраховані за МДЕ значення носять випадковий характер і для їх порівняння проведено перевірку рівності дисперсій за критерієм Фішера (F-критерієм). З цією метою розраховано дисперсію експериментальних значень $\sigma_E^2 = 0,082$ та дисперсію значень розрахованих за МДЕ $\sigma_{MDE}^2 = 0,056$.

Перевірка за критерієм Фішера свідчить про відповідність моделі, яка використовувалась для дослідження МДЕ, реальному процесу руху сипкого матеріалу в системі «бункер – живильник». Крім того, можна стверджувати, що результати досліджень, які представлені на рис. 5.34, також відповідають реальному процесу.

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ЧАСТИНКИ У КОНІЧНОМУ РОТОРІ

З метою перевірки математичних моделей руху частинок сипкого матеріалу всередині ротора ВЗБД проведені експериментальні дослідження, які дозволили визначити траєкторії частинок всередині конічного ротора.

Основною проблемою, що виникає при проведенні таких досліджень, є відсутність можливості введення додаткових пристроїв у конструкцію змішувача, оскільки вони впливатимуть на траєкторії руху частинок. Тому найбільш інформативні дані можна отримати про рух частинок вздовж поверхонь робочих органів обладнання.

У випадку ВЗБД такою поверхнею є внутрішня поверхня ротора, оскільки саме в цій зоні відбувається розподілення частинок у об'ємі змішувача. Окрім того, на частинки, що знаходяться всередині ротора, діє відцентрова сила, яка притискає їх до його поверхні. В результаті з'являється можливість отримати дані про їх траєкторії.

Послідовність проведення досліджу:

- 1) Внутрішня поверхня ротора обклеювалась папером, що дозволяло фіксувати переміщення частинок.
- 2) Змішувач виводився на усталений режим роботи.
- 3) У вихідний патрубок опускалась частинка, покрита фарбою.
- 4) Після виходу частинки, змішувач зупинявся і фіксувалась траєкторія руху частинки вздовж поверхні ротора.

Слід зазначити, що через наявність вібрації, яка виникає під час роботи обладнання, відбитки траєкторій руху частинок не є суцільними лініями, що значно ускладнює їх аналіз. Тому під час проведення досліджень визначались траєкторії, початок яких знаходився у основи ротора, далі розраховувалась середня траєкторія руху частинки.

Експериментальні дослідження траєкторії руху частинки проводились у конічному роторі відцентрового змішувача безперервної дії з параметрами, що наведені у табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Параметри ротора ВЗБД

Назва параметра	Значення
Швидкість обертання ротора, об/хв	520
Половина кута розтрубу ротора, град	35
Радіус основи ротора, м	0,051

Результати експериментальних досліджень показані на рис. 6.1 (вигляд згори) та рис. 6.2 (вигляд збоку).

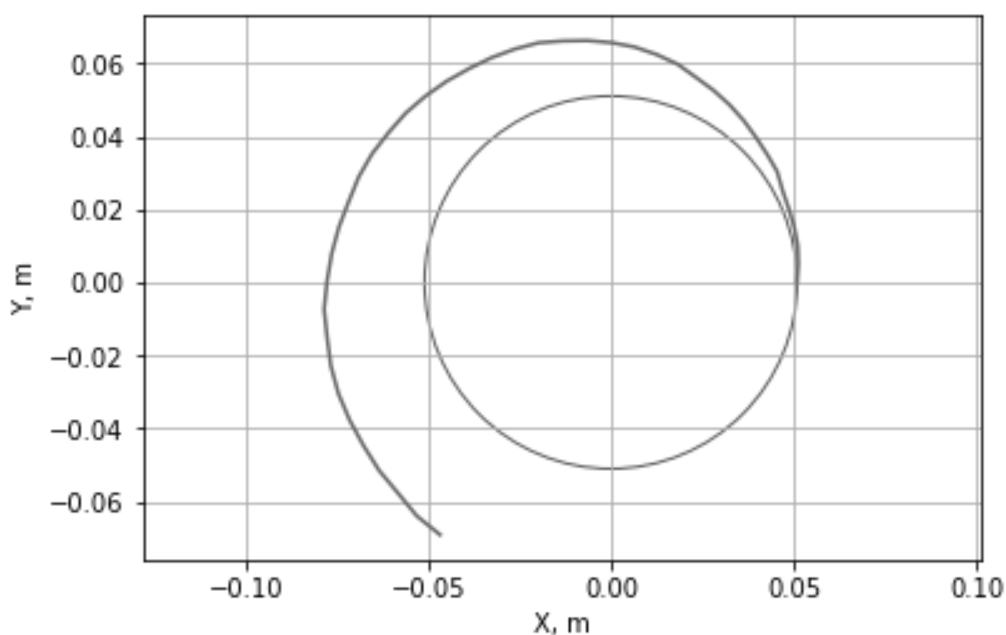


Рис. 6.1. Траєкторія частинки у конічному роторі (вигляд згори): коло – границя основи ротора; спіральна лінія – траєкторія частинки

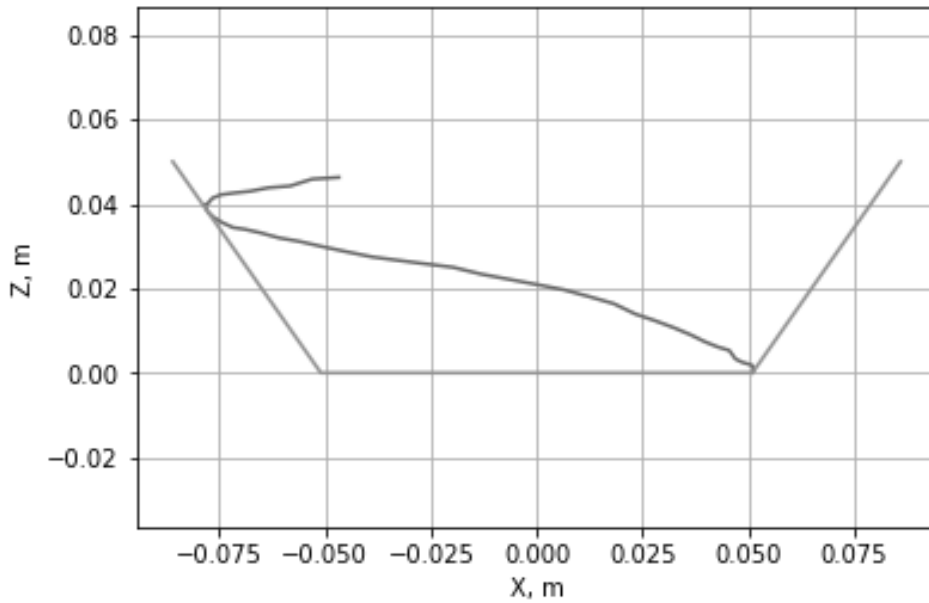


Рис. 6.2 Траєкторія руху частинки у конічному роторі (вигляд збоку): ламана лінія – границя ротора; спіральна лінія – траєкторія частинки

Для порівняння експериментальних результатів з аналітичною моделлю за системою диференційних рівнянь (2.8) розрахована траєкторія руху частинки у роторі, що має параметри, наведені у табл. 6.1. Траєкторії, що визначені експериментальним та аналітичним шляхами, показані на рис. 6.3 та рис. 6.4.

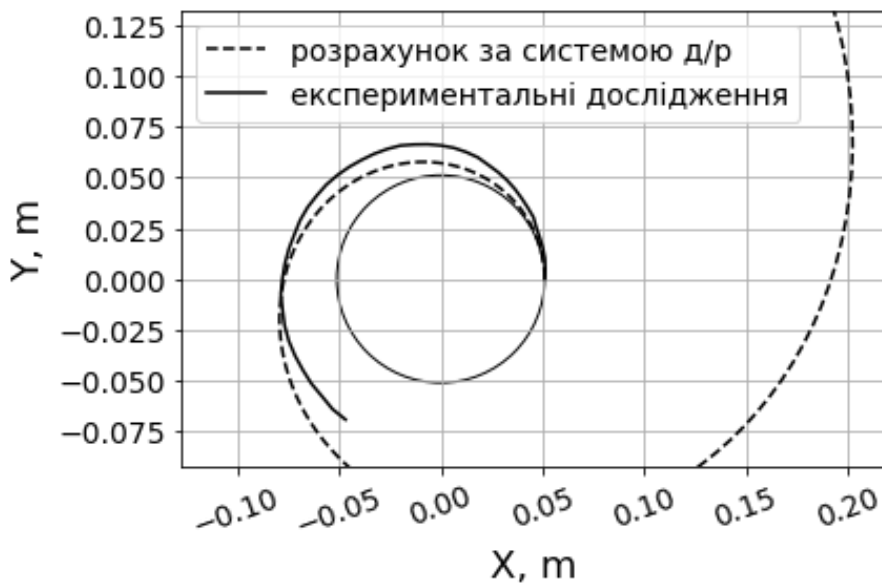


Рис. 6.3. Аналітична та експериментальна траєкторії руху частинок у конічному роторі (вигляд згори)

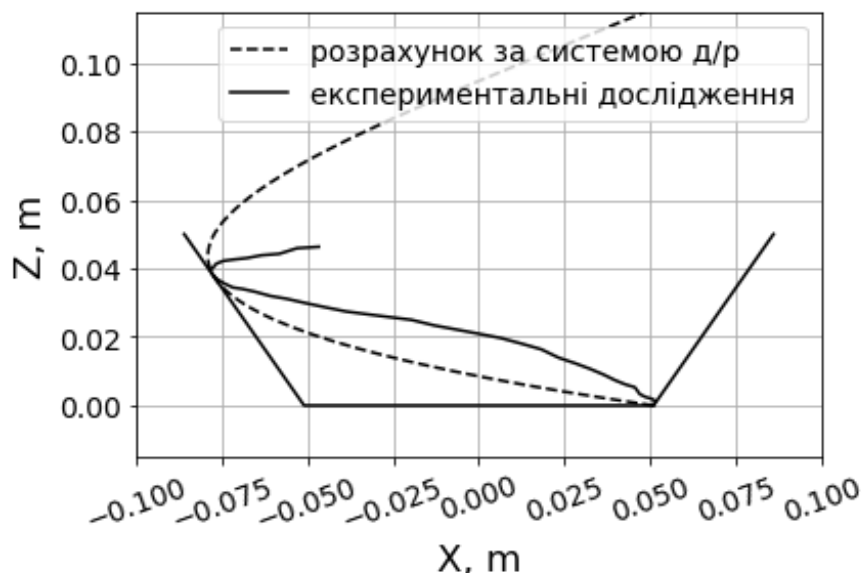


Рис. 6.4. Аналітична та експериментальна траєкторії руху частинок у конічному роторі (вигляд збоку)

Обидві траєкторії мають вигляд спіралі, але форми цих спіралей відрізняються. На початку руху у експериментальній траєкторії значно швидше зростає координата Z . Така ситуація може виникати за рахунок впливу початкової швидкості частинки, з якою вона починає рух вздовж бічної стінки ротора.

Оскільки під час проведення експериментальних досліджень неможливо визначити початкову швидкість частинки у момент, коли вона потрапляє на бічну стінку ротора, за системою рівнянь (2.8) розраховувались траєкторії частинок для діапазону початкових швидкостей від 0 до 1 м/с.

На рис. 6.5 та рис. 6.6 показані траєкторії руху частинки для початкової швидкості 0,6 м/с. В результаті різниця між формами траєкторій значно зменшується, що дозволяє зробити висновок про суттєвий вплив початкової швидкості руху частинки на її траєкторію всередині ротора.

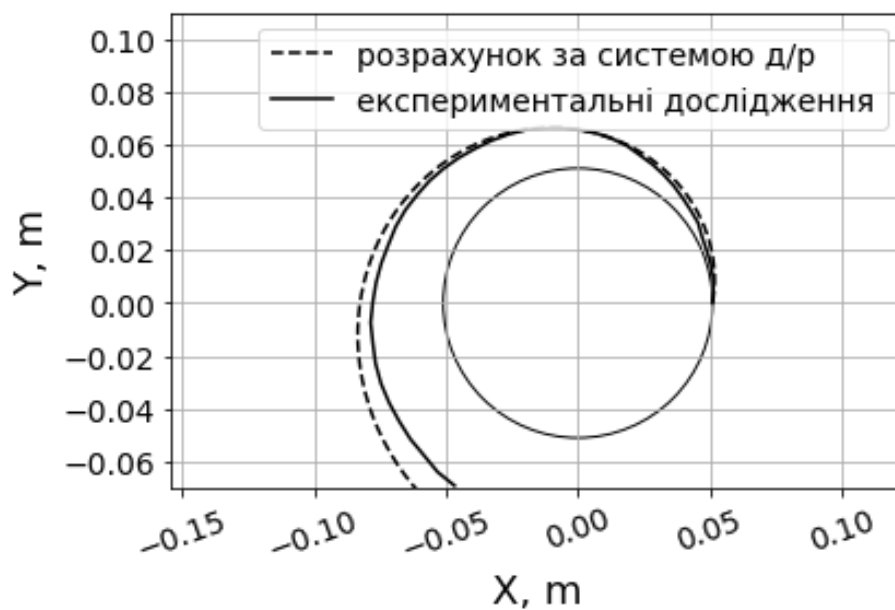


Рис. 6.5. Аналітична (з початковою швидкістю руху 0,6 м/с) та експериментальна траєкторії руху частинок у конічному роторі (вигляд згори)

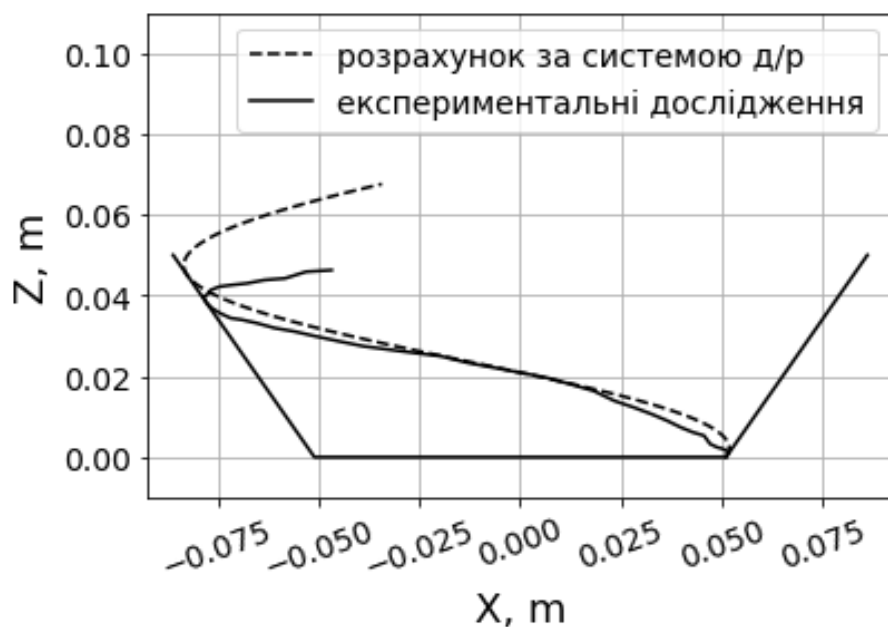


Рис. 6.6. Аналітична (з початковою швидкістю руху 0,6 м/с) та експериментальна траєкторії руху частинок у конічному роторі (вигляд збоку)

Результати порівняння з розрахунковою траєкторією, що отримана за допомогою МДЕ, показані на рис. 6.7 та рис. 6.8.

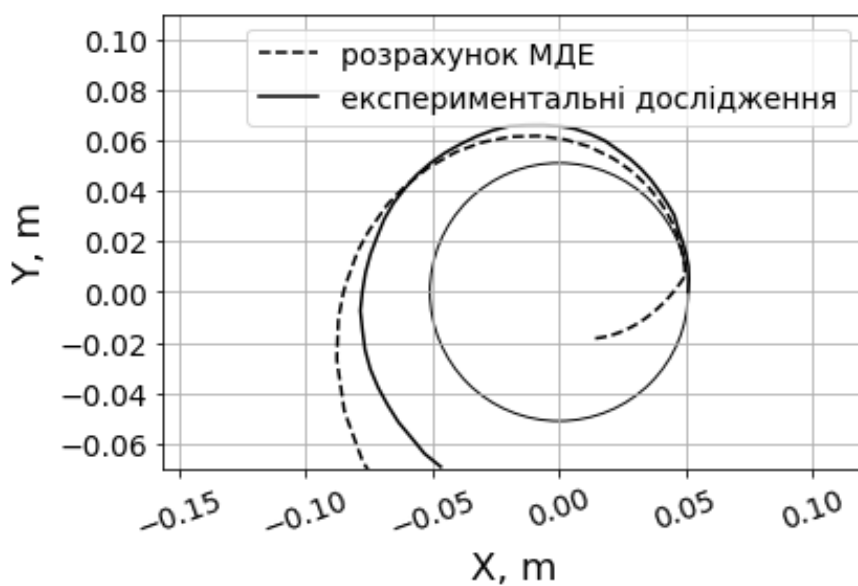


Рис. 6.7. Експериментальна та розрахована за МДЕ траєкторії
(вигляд згори)

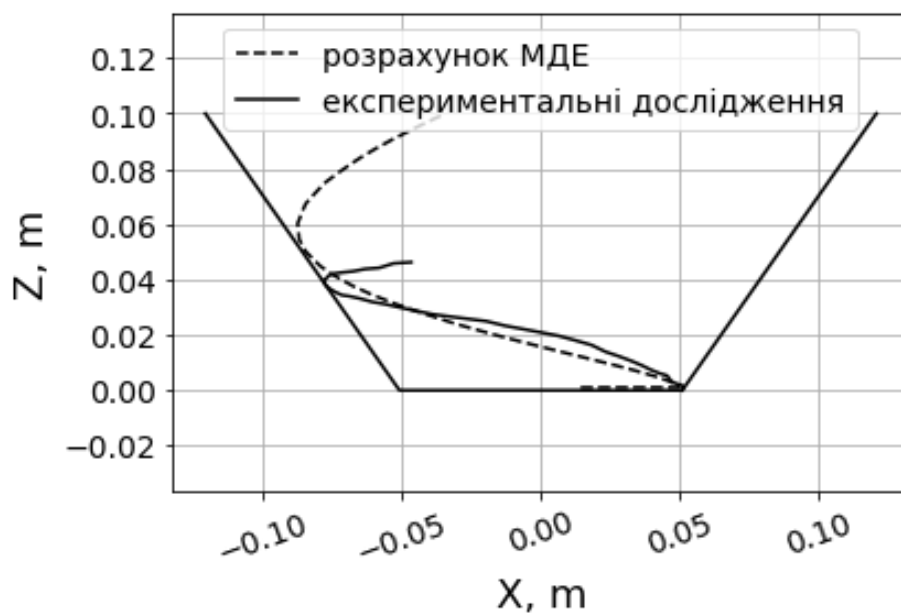


Рис. 6.8. Експериментальна та розрахована за МДЕ траєкторії
(вигляд збоку)

При проведенні розрахунків МДЕ форма та швидкість обертання ротора відповідали аналогічним параметрам дослідної установки. Початкові положення частинок, що надходили у ротор, задавались на відстані 0,1 м від поверхні від дна ротора. В результаті частинки спочатку рухались по дну ротора та потрапляли на його бічну стінку з не нульовими початковими швидкостями. Окрім того, початкові точки руху частинок в нижній частині бічної стінки ротору також не співпадали.

Для порівняння отриманих траєкторій з експериментальними визначались координати частинки, за яких її відстань від осі обертання ротора дорівнювала радіусу його основи. Ця точка A_q відповідала початку руху частинки вздовж бічної стінки ротора. Далі визначався кут між вектором $\overline{OA_q}$ та напрямком вісі \overline{OX} . За допомогою афінних перетворень розрахована МДЕ траєкторія розгорталась на визначений кут. Таким чином, початкові точки руху частинок співпадали, що надавало можливість перевірити різницю між траєкторіями.

Експериментальні дослідження на розроблених стендах підтвердили вплив параметрів частинок сипкого матеріалу та параметрів бункера і ножа на продуктивність бункера. Показали відповідність результатам, що були отримані за допомогою методу дискретних елементів.

Проведені експериментальні дослідження руху частинок всередині ротора змішувача підтвердили збіг форм траєкторій частинок, що розраховані аналітично за СДР (2.2) та за допомогою МДЕ.

7. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЗМІШУВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

Конструктивні та технологічні параметри змішувальних комплексів визначаються параметрами сипких матеріалів, рецептурою суміші та вимогами до її якості. Зокрема кількість компонентів визначає мінімальну кількість ліній подачі сипкого матеріалу, відсотковий склад суміші обумовлює необхідну продуктивність живильників, вимоги до її якості мають бути враховані при визначенні похибок у роботі обладнання. З метою дослідження роботи змішувального комплексу обрана трикомпонентна суміш для виготовлення поліетиленової плівки товщиною 6...10 мкм з відомою рецептурою [105, 126]:

- 95% поліетилену низького тиску (ПНТ) (рис. 7.1, а);
- 4% поліетилену високого тиску (ПВТ) (рис. 7.1. б);
- 1% ковзної добавки (рис. 7.1, в).



а)

б)

в)

Рис. 7.1. Зовнішній вигляд гранул компонентів суміші:

а) ПНТ TIPELIN FS 471-02; б) ПВТ LLDPE Sabic 118N; в) EFPE 1001

Добавка типу EFPE 1001 складається з 80% CaCO_3 , гуми та інших компонентів.

Структурна схема змішувального комплексу для приготування суміші з цих компонентів показана на рис. 7.7.

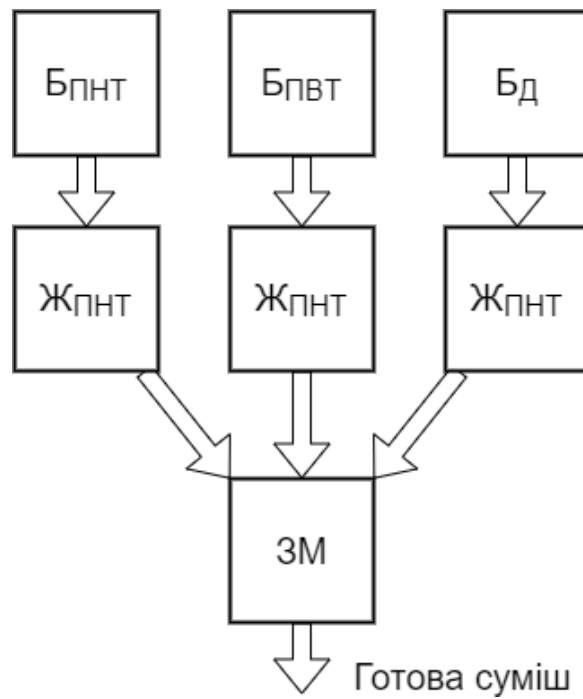


Рис. 7.7. Структурна схема змішувального комплексу для приготування плівки

До його складу входять три лінії дозування вхідних компонентів суміші, кожна з яких складається з конічно-циліндричного бункера, тарілчастого живильника та формувача потоку. Компоненти суміші надходять у відцентровий змішувач, де змішуються.

Враховуючи, що змішувальний комплекс може використовуватись для виготовлення сумішей з різним відсотковим складом, доцільно зробити лінії дозування всіх трьох компонентів з однаковими конструктивними параметрами, а необхідні значення продуктивності забезпечити за рахунок технологічних параметрів, а саме: швидкості обертання тарелі та положення ножа.

За результатами проведених досліджень запропоновано використати формувачі потоків компонентів суміші з параметрами, що наведені у табл.7.1.

Таблиця 7.1

Параметри формувачів потоків компонентів суміші

Назва параметру	ПНТ	ПВТ	Добавка EFPE 1001
Довжина поверхні формувача, м	0,12	0,12	0,12
Відстань від дна ротора до формувача, м	0,38	0,38	0,38
Відстань від вісі обертання до формувача, м	0,1	0,1	0,1
Кут нахилу формувача, град	45	45	45

Параметри тарілчастих живильників наведено у табл.7.2.

Таблиця 7.2

Параметри тарілчастих живильників

Назва параметра	ПНТ	ПВТ	Добавка EFPE 1001
Швидкість обертання тарелі, s^{-1}	1,5	0,35	0,1
Відстань від тарелі до патрубку бункера, м	0,2	0,2	0,2
Відстань від кромки ножа до вісі обертання тарелі, м	0,257	0,279	0,287

З метою перевірки запропонованих конструктивних та технологічних параметрів, а також оцінки якості суміші, створено математичну модель змішувального комплексу безперервної дії та проведено дослідження методом дискретних елементів.

Властивості частинок компонентів суміші, що враховувались під час моделювання приведено в табл. 7.3.

Таблиця 7.3

Параметри компонентів суміші

Параметр	TIPELIN FS 471-02	LLDPE 118N	EFPE 1001
Густина, кг/м ³	941	918	1150
Розміри гранул, мм	3...5	3...5	3
Кут природнього укосу, °	29	29	35
Коефіцієнт тертя ковзання	0,2	0,2	0,3

Створена 3-D модель ЗКБД містить бункери та живильники для всіх трьох компонентів суміші, формувачі потоків та відцентровий змішувач з конічним ротором та турбулізатором (рис. 7.2).

Конструктивні та технологічні параметри обладнання відповідали значенням, що наведені у табл.7.1 та 7.2.

Під час моделювання, з метою зменшення тривалості розрахунків, у бункери завантажувалась мінімальна кількість частинок, яка дозволяла забезпечити коректну роботу обладнання, а саме: ПНТ – 10000 частинок; ПВТ – 4000 частинок; добавка EFPE 1001 – 7000 частинок.

Частинки ПНТ показані жовтим кольором; ПВТ – червоним кольором; добавка EFPE 1001 – синім кольором (рис. 7.8).

Дослідження методом дискретних елементів процесу змішування в ЗКБД здійснювалось протягом 15 сек.

З метою аналізу однорідності суміші, частинки після виходу зі змішувача збирались у циліндричну ємність. Після завершення моделювання ємність розділялась на 16 зон (рис. 7.9) [99]. Границі зон показані тонкими лініями синього кольору.

У кожній зоні визначалась кількість частинок кожного з компонентів суміші (табл. 7.4).



Рис. 7.8. 3-D модель змішувального комплексу безперервної дії для приготування трикомпонентної суміші для виготовлення поліетиленової плівки

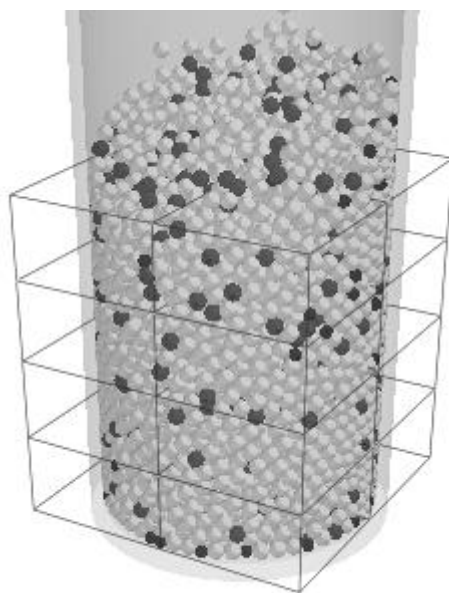


Рис. 7.9. Розділення ємності з готовою сумішшю на зони для визначення однорідності

Таблиця 7.4

Результати оцінки однорідності суміші

Зона	Кількість частинок			Концентрація, %		
	ПНТ	ПВТ	Добавка EFPE 1001	ПНТ	ПВТ	Добавка EFPE 1001
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
1	293	13	3	94,82	4,21	0,97
2	296	21	1	93,08	6,6	0,31
3	295	23	2	92,19	7,19	0,63
4	259	31	5	87,8	10,51	1,69
5	310	20	3	93,09	6,01	0,9
6	330	13	1	95,93	3,78	0,29
7	325	25	7	91,04	7,0	1,96
8	308	32	10	88,0	9,14	2,86
9	287	22	0	92,88	7,12	0

Закінчення табл. 7.4

1	2	3	4	5	6	7
10	301	20	1	93,48	6,21	0,31
11	281	36	3	87,81	11,25	0,94
12	280	21	2	92,41	6,93	0,66
13	314	16	3	94,29	4,8	0,9
14	332	14	2	95,4	4,02	0,57
15	309	30	7	89,31	8,67	2,02
16	311	30	4	90,14	8,7	1,16

На основі отриманих значень за формулою (4.1) розраховувався коефіцієнт неоднорідності для кожного компонента, що входять до складу композиції. В результаті отримані наступні значення:

- для ПНТ $V_c = 0,028$;
- для ПВТ $V_c = 0,307$;
- для добавки EFPE 1001 $V_c = 0,735$.

Отримані значення коефіцієнту неоднорідності підтверджують ефективність роботи запропонованого змішувального комплексу безперервної дії.

Вивчення динаміки сипких матеріалів за допомогою метода дискретних елементів в окремих ланках та змішувальному комплексі в цілому дозволило оцінити характер руху середовища, створити умови для проектування та конструювання, а також оптимізувати конструктивні та технологічні параметри обладнання, підвищити продуктивність комплексу та якість готової суміші [56, 66].

Моделювання методом дискретних елементів дозволило передбачити розриви у потоках матеріалу та утворення склепінь в бункерних пристроях. Створено математичні моделі живильників безперервної дії для дослідження за допомогою МДЕ.

Створено експериментальний стенд, на якому проведені дослідження процесу витікання частинок сипких матеріалів із бункерів різної форми, їх руху в системі «бункер – тарілчастий живильник» та конічному роторі змішувача. Результати експериментальних досліджень підтвердили розрахунки, що виконані за допомогою МДЕ.

Проведені дослідження змішувального комплексу безперервної дії методом дискретних елементів підтверджують ефективність роботи запропонованого комплексу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alizadeh M., Hassanpour A., Pasha M., Ghadiri M., Bayly A. The effect of particle shape on predicted segregation in binary powder mixtures. *Powder Technology*. Vol. 319. 2017. P.313–322. DOI:10.1016/j.powtec.2017.06.059.
2. Balevicius Robertas, Kacianauskas Rimantas. DEM analysis of effect of the particle size during the material flow in wedge-shaped hopper. *The 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius, Lithuania. 2008. June 26-29.
3. Basel Alchikh-Sulaiman. Assessment of the Mixing of Polydisperse Solid Particles in the Rotary Drum and Slant Cone Mixers Using Discrete Element Method. A Thesis. Toronto, Ontario, Canada. 2014. 108p.
4. Behjani M. A., Motlagh Y. G., Bayly A., Hassanpour A. Assessment of blending performance of pharmaceutical powder mixtures in a continuous mixer using Discrete Element Method (DEM). *Powder Technology*. Vol. 366. 2019. P.73–81. doi:10.1016/j.powtec.2019.10.102.
5. Benvenuti L., Kloss Ch., Pirker S. DEM parameter identification by means of artificial neural network for iron ore sintering. *Eleventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. CSIRO, Melbourne, Australia. 7-9 December 2015.
6. Bertrand F., Leclaire L., Levecque G. DEM-based models for the mixing of granular materials. *Chem. Eng. Sci.* Apr. 2005. Vol. 60. No. 8–9 SPEC. ISS. P.2517–2531.
7. Cundall P. A., Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*. Vol. 29 (1). 1979. P.47–65. DOI:10.1680/geot.1979.29.1.47.
8. Di Renzo A., Di Maio F. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chem. Eng. Sci.* Feb. 2004. Vol. 59. No. 3. pp. 525–541.

9. Dubey A., Sarkar A., Ierapetritou M., Wassgren C. R., Muzzio F. J. Computational Approaches for Studying the Granular Dynamics of Continuous Blending Processes *DEM Based Methods*. 2011. pp. 290–307.
10. Dubey A., Vanarase A. U., Muzzio F. J. Impact of Process Parameters on Critical Performance Attributes of a Continuous Blender. A DEM Based Study. *AIChE J.* 2012. vol. 58. no. 12.
11. Gao Y., Muzzio F. J., Ierapetritou M. G. A review of the Residence Time Distribution (RTD) applications in solid unit operations. *Powder Technol.* Sep. 2012. Vol. 228, P.416–423.
12. Gethin D. T., Yang X. S., Lewis R. W. A two dimensional combined discrete and finite element scheme for simulating the flow and compaction of systems comprising irregular particulates. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol.195 (41–43). 2006. P.5552. DOI:10.1016/j.cma.2005.10.025.
13. Govender N., Wilke D. N., Kok S. Blaze-DEMGPU: Modular high performance DEM framework for the GPU architecture. *SoftwareX*. Vol.5. 2016. P.62–66. DOI:10.1016/j.softx.2016.04.004.
14. He Yi, Bayly A. E., Hassanpour Ali, Muller Frans, Wu Ke, Yang Dongmin. A GPU-based coupled SPH-DEM method for particle-fluid flow with free surfaces. *Powder Technology*. Vol.338. 2018. P.548–562. DOI:10.1016/j.powtec.2018.07.043.
15. Kafashan J., Wiącek J., Abd Rahman N., Gan J. Two-dimensional particle shapes modelling for DEM simulations in engineering: a review. *Granular Matter*. Vol. 21 (3). 2019. 80 p. DOI:10.1007/s10035-019-0935-1.
16. Kessler F., Prenner M. DEM – Simulation of Conveyor Transfer Chutes. *FME Transactions*. 2009. Vol. 37. No 4. P.185–192.
17. Luding S. Introduction to Discrete Element Methods Basics of Contact Force Models and how to perform the Micro-Macro Transition to Continuum Theory. 2008. no. Md, P.785–826.

18. Magalhaes F.G.R., Atman A. P. F., Moreira J. G., Herrmann H. J. Analysis of the velocity field of granular hopper flow. *Granular Matter*. January 5, 2016. 11 p.
19. Mason A. Improved Transfer Chute Design Using DEM Software to Predict Material Flow Behaviour. University of Southern Queensland. 2016. 126 p.
20. Munjiza A. The combined finite-discrete element method. Wiley. 2004. 333 p. DOI:10.1002/0470020180.
21. Nakano M., Abe T., Kano J., Kunitomo K. DEM Analysis on Size Segregation in Feed Bed of Sintering Machine. *ISIJ International*. 2012. Vol. 52. No. 9. P.1559-1564.
22. O'Sullivan C., Bray J. Selecting a suitable time step for discrete element simulations that use the central difference time integration scheme. *Engineering Computations*. Vol. 21. 2004. P.278-303. DOI: 10.1108/02644400410519794.
23. Otsubo M., O'Sullivan C., Shire T. Empirical assessment of the critical time increment in explicit particulate discrete element method simulations. *Computers and Geotechnics*. Vol. 86. 2017. P.67-79. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.12.022>
24. P. Van Liedekerke., Tijskens E., Dintwa E., Ramon H. A discrete element model for simulation of a spinning disc fertilizer spreader. *Communications in agricultural and applied biological sciences*. February 2005.
25. Paula Macías Vera, Torben Brøchner, Jan S. Strøm, Hisamitsu Takai. Report 12: Flow of salt particles on a spinning spreader disk. External Influences on Spray Patterns. EPAS. 2014.
26. Potapov A. V., Campbell C. S. Computer simulation of hopper flow. *Phys. Fluids*. 1996. № 8 (11).
27. Rohrs B. R., Amidon G. E., Meury R. H., Seccrest P. J., King H. M., Skoug C. J. Particle Size Limits to Meet USP Content Uniformity Criteria for Tablets and Capsules. 2006. Vol. 95. No. 5. P.1049–1059.

28. Sarkar A., Wassgren C. Continuous blending of cohesive granular material. *Chem. Eng. Sci.* Nov. 2010. Vol. 65. No. 21. P.5687–5698.
29. Sarkar A., Wassgren C. R. Simulation of a continuous granular mixer: Effect of operating conditions on flow and mixing. *Chem. Eng. Sci.* Jun. 2009. Vol. 64. No. 11. P.2672–2682.
30. Shinichi Yuu, Toshihiko Umekage. Simulation of Granular Flows and Pile Formation in a Flat-Bottomed Hopper and Bin, and Experimental Verification. *Materials*. 2011. Vol. 4. P.1440-1468.
31. Shouju Li, De Li, Lijuan Cao, Zichang Shangguan. Parameter estimation approach for particle flow model of rockfill materials using response surface method. *ICCM2014*. 28-30th July, Cambridge, England. 2014.
32. Statsenko V., Burmistenkov O., Bila T., Statsenko D. Determining the motion character of loose materials in the system of continuous action «hopper – reciprocating plate feeder». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2/1 (98). P.21-28. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163545
33. Statsenko V., Burmistenkov O., Bila T., Demishonkova S. Determining the Loose Medium Movement Parameters in a Centrifugal Continuous Mixer Using a Discrete Element Method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3(7 (111)). P.59–67. DOI:10.15587/1729-4061.2021.232636
34. Statsenko V. The research of bulk material motion in continuous action feeders. *VII International Scientific and Practical Conference «Dynamics of the development of world science»*. Vancouver. 18-20 March 2020.
35. Trivino L.F., Mohanty B. Assessment of crack initiation and propagation in rock from explosion-induced stress waves and gas expansion by cross-hole seismometry and FEM–DEM method. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. Vol. 77. 2015. P.287–299.
36. Vance F.P. Statistical Properties of Dry Blends. *Eng. Chem.* 1986. Vol.58. P.37.

37. Williams J. R., O'Connor R. Discrete element simulation and the contact problem. *Archives of Computational Methods in Engineering*. Vol. 6 (4). 1999. P.279–304. DOI:10.1007/BF02818917.
38. Xu J., Qi H., Fang X., Lu L., Ge W., Wang X., Xu M., Chen F., He X., Li J. Quasi-real-time simulation of rotating drum using discrete element method with parallel GPU computing. *Particuology*. Vol. 9 (4): 2011. P.446–450. DOI:10.1016/j.partic.2011.01.003.
39. Yan Z., Wilkinson S. K., Stitt E. H., Marigo M. Discrete element modeling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis. *Comp. Part. Mech.* 2015. P.283–299.
40. Zhang Y., Johnson K. C. Effect of drug particle size on content uniformity of low-dose solid dosage forms. *Journal of pharmaceuticals*. 1997. Vol. 154. P.179–183.
41. Zhu H. P., Zhou Z. Y., Yang R. Y., Yu A. B. Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments. *Chemical Engineering Science*. Vol. 62 (13): 2007. P.3378–3396. DOI:10.1016/j.ces.2006.12.089.
42. Zhu H. P., Zhou Z. Y., Yang R. Y., Yu A. B. Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings. *Chemical Engineering Science*. Vol. 63 (23). 2008. P.5728–5770. DOI:10.1016/j.ces.2008.08.006.
43. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Butterworth-Heinemann. 2005. 756 p.
44. А.с. 1150014 СССР. Центробежный смеситель / А. П. Бурмистенков, Т. Я. Белая, В. В. Корзун (СССР). Опубл. 1985, Бюл. №14.
45. А.с. 1165446 СССР, МКИ В01/28. Центробежный смеситель / А. П. Бурмистенков, Т. Я. Белая, В. В. Корзун, В. А. Слижевский (СССР). Опубл. 1985, Бюл. №25.

46. А.с. 1428445 СССР. Центробежный смеситель непрерывного действия / А. П. Бурмистенков, Т. Я. Белая, В. В. Корзун, Е. М. Волошина, С. М. Новиченко (СССР). Оpubл. 1987, Бюл. №2.
47. А.с. 92181 СССР, МКИ В01 F7/26. Устройство для непрерывного смешивания мелкодисперсных материалов: /А.М. Ластовцев (СССР). Оpubл. 1950, Бюл. №13.
48. Аракава М. Свойства сыпучих тел и степень зернистости. Секубай. 2004. Т. 16, № 3. С.51-58.
49. Аракава М. Характеристики порошков и их измерения. Сэрамиккусу. 2004. Т. 12, № 5. С.399-412.
50. Арутюнов С. Ю., Дорохов И. И. Системный анализ процессов измельчения и смешения сыпучих материалов. В сб. тез. докл. 1-ой Всесоюз. конф. «КХТП-1». М., 1984. С.47.
51. Ахмадиев Ф. Г., Александровский А. А. Моделирование и реализация способов приготовления смесей. *Журн. Всесоюз. хим. общ-ва им. Д.И. Менделеева*. 1988. Т. 33. № 4. С.448.
52. Бакин И. А., Саблинский А. И., Белоусов Г. Н. Комплексное моделирование процессов непрерывного смесеприготовления. *Технология и техника пищевых производств*. Сборник научных работ. Кемерово: КемТИПП, 2003. С.137–141.
53. Бакин М. Н., Капранова А. Б., Верлока И. И. Современные методы математического описания процесса смешивания сыпучих материалов. *Фундаментальные исследования*. 2014. № 5 (часть 5). С. 923-927.
54. Барышникова С. В., Филимонов Д. В. Модернизация шнекового питателя для непрерывного дозирования сыпучих материалов. *Труды ТГТУ*: сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. Вып. 13. С.17-20.

55. Белая Т. Я. Разработка центробежных устройств непрерывного действия для смешения сыпучих материалов. Автореф. дисс. к-та техн. наук. Киев, 1985.
56. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Визначення оптимальних параметрів відцентрового змішувача безперервної дії. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2016. № 4 (239). С. 25-27.
57. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Аналітичне дослідження руху часток суміші у двороторному змішувачі безперервної дії. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2006. № 5. С.30–34.
58. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Імітаційне моделювання системи керування змішувальним комплексом з fuzzy logic контролером. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: тези доповідей міжнар. наук.-практ. конф., 15 червня 2017р. Київ: КНУТД*. С.93-94.
59. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Алгоритм керування двороторним відцентровим змішувачем безперервної дії. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали VII міжнар. наук.-практ. конф., 24 - 27 квітня 2017 р. Том 2. Чернігів, 2017*. С.26-27.
60. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Дослідження впливу типу та параметрів регуляторів на роботу системи керування змішувальним комплексом на базі відцентрового змішувача безперервної дії. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2009. № 6. С.13-16.
61. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Дослідження можливості використання адаптивних систем для керування приводом змішувачів сипких матеріалів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2008. № 4. С. 22-25.
62. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Дослідження роботи систем контролю параметрів дозаторів сипких компонентів на основі контролерів нечіткої логіки. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2012. №3 (спец. випуск). С.248-252.

63. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Дослідження руху частинок суміші у зоні турбулізатора відцентрового змішувача безперервної дії. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2008. № 1. С. 301-305.
64. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Дослідження руху частинок суміші у ступінчастому роторі відцентрового змішувача безперервної дії. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2012. №6. С.17-21.
65. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Моделювання динамічних навантажень в змішувальних комплексах безперервної дії. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2015. №4. С.24-29.
66. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Проектування двороторних відцентрових змішувачів безперервної дії. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2011. № 5. С.27-32.
67. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Створення системи керування дозаторами сипких матеріалів на основі контролеру нечіткої логіки. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2015. №6. С.73-76.
68. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Створення системи контролю параметрів суміші сипких компонентів на основі контролера нечіткої логіки. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2011. №6, С.58-62.
69. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Моделювання автоматизованої системи керування приводом тарілчастого дозатора сипких матеріалів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2010. №6. С.11-15.
70. Бородулин Д. М., Андрюшков А. А. Прогнозирование сглаживающей способности центробежного смесителя на основе корреляционного анализа. *Техника и технология пищевых производств*. Кемерово. 2015. Том 192. № 3-4.

71. Бородулин Д. М., Комаров С. С. Определение сглаживающей способности барабанного смесителя непрерывного действия с регулируемыми лопастями. *Техника и технология пищевых производств*. 2013. № 4. С.107-112.
72. Бородулин Д. М., Шушпанников А. Б., Зорина Т. В., Шушпанников Е. А., Иванец В. Н. Определение сглаживающей способности вибрационного смесителя на основе корреляционного анализа. *Вестник ВГУИТ/Proceedings of VSUET*, 2018. Т. 80. № 4. С.30-34.
73. Борщев В. Я., Гусев Ю. И., Промтов М. А., Тимонин А. С. Оборудование для переработки сыпучих материалов: учебное пособие. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006. 208 с.
74. Бурмистенков А. П., Белая Т. Я. Исследование процесса приготовления полимерных композиций для производства пленочных полимерных материалов. *Изв. вузов. Технология легкой промышленности*. 1982. № 6. 5с.
75. Бурмистенков А. П., Белая Т. Я. Однопараметрическая диффузионная модель центробежного смесителя непрерывного действия для сыпучих материалов. *Изв. вузов. Технология легкой промышленности*. 1987. № 5. С.137–139.
76. Бурмістенков О. П., Стаценко В.В. Використання методу дискретних елементів для дослідження руху сипких матеріалів в бункерних пристроях. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції, 15 червня 2018*. Київ: КНУТД. С.97-95.
77. Бурмістенков О. П., Біла Т. Я., Стаценко В. В. Дослідження енергоефективності обладнання для змішування сипких матеріалів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2019. № 4, С.42-48.
78. Бурмістенков О. П., Стаценко В. В. Дослідження ефективності керування робочими параметрами тарілчастого дозатора безперервної дії.

VII Українсько-Польські наукові діалоги: матеріали міжнар. конф., 18-21 жовтня 2017 р. Меджибіж, 2017.

79. Бурмістенков О. П., Стаценко В. В. Дослідження роботи системи керування продуктивністю тарілчастого живильника безперервної дії. *VIII Українсько-Польські наукові діалоги: матеріали міжнар. конф., 16-19 жовтня 2019 р. Хмельницький – Кам'янець-Подільський.*

80. Бурмістенков О. П., Біла Т. Я., Стаценко В. В. Дослідження енерговитрат тарілчастих живильників для сипких матеріалів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки.* 2020. № 4 (148). С. 67-76.

81. Бурмістенков О. П., Біла Т. Я., Стаценко В. В. Основні напрямки автоматизації змішувальних комплексів безперервної дії для сипких матеріалів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2017. № 6. С.28-31.

82. Бурмістенков О. П., Стаценко В. В. Створення системи визначення продуктивності дозаторів сипких матеріалів тарілчастого типу. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: тези доповідей міжнар. наук.-практ. конф., 15 червня 2017р. Київ: КНУТД.* С.95-96.

83. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: «Высшая школа», 1998. 576 с.

84. Весовое дозирование зернистых материалов. / Першина С. В. и др. М.: Машиностроение, 2009. 164 с.

85. Видинеев Ю. Д. Автоматическое непрерывное дозирование сыпучих материалов. Москва: Энергия, 2004. 120 с.

86. Виноградов И. М. Аффинное преобразование. Математическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия (рус.). 1977—1985.

87. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості: монографія / Бурмістенков О. П. та ін.; заг. ред. В. П. Коновал. Хмельницький, 2007. 255 с.

88. Витратомір сипкого матеріалу: пат. України на корисну модель UA 133520 U, G01F 1/05. Бурмістенков О. П., Біла Т. Я., Стаценко В. В. № u201811022, заявл. 08.11.2018, опубл. 10.04.2019. Бюл. №7/2019.
89. Відцентровий змішувач безперервної дії: пат. 82419 Україна, МПК B01F 7/26. Біла Т. Я., Ковальов А. П., Стаценко В. В. Заявл.02.06.06; Опубл. 10.04.2008, Бюл. №7, 2008.
90. Гавва О. М., Деренівська А. В. Лінійні вагові дозувальні пристрої дискретної дії для сипкої продукції (обґрунтування раціональних параметрів). *Упаковка*. 2014. С.42-47.
91. Гавва О. М., Деренівська А. В., Кривопляс-Володіна Л. О. Шляхи зменшення динамічної складової похибки дозування сипкої продукції. *Харчова промисловість*, 2013. С.125-130.
92. Гаврилова О. Е., Никитина Л. Л., Канаева Н. С., Геркина О. Ю. Обзор современных полимерных материалов, применяемых в производствах легкой промышленности. *Вестник Казанского технологического университета*, 2015. С.276-278.
93. Гаврилова О. Е., Никитина Л. Л., Коваленко Ю. А. Перспективы развития исследований полимерных и композиционных материалов в современной химической и легкой промышленности. *Вестник Казанского технологического университета*, 2011. С.127-129.
94. Гаврилова О. Е., Никитина Л. Л. Применение перспективных полимерных материалов в легкой промышленности для повышения качества изделий. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. С.96-99.
95. Гарипова Г. И., Фатхуллина Л. Р., Коваленко Ю. А. Современные полимерные материалы для низа обуви. *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. С.92-94.
96. Глобин А. Н., Краснов И. Н. Дозаторы: монография. М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. 384 с.

97. Глобин А. Н. Пути совершенствования дозирующих устройств. *Совершенствование технологических процессов и технических средств в АПК*. Сб. научн. Тр. АЧГАА. Зерноград, 2009. С. 5–6.
98. Дорофеенко С. О. Моделирование сыпучих сред методом дискретных элементов: автореф. дис. на соискание уч. степ. к-та физ.-мат. наук. Черноголовка: РАН Институт проблем химической физики, 2008.
99. ДСТУ ISO 11648-2:2010. Статистичний контроль. Вибірковий контроль матеріалів насипом. Частина 2. Контроль сипких матеріалів (ISO 11648-2:2001, IDT)
100. Инякин А. И., Давидчук А. Ю., Филимонов Д. В., Першина С. В. Использование имитационного моделирования при расчетах ленточных весовых дозаторов. *Труды ТГТУ*: сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 2004. Вып. 15. С. 27-30.
101. Карнадуд О. С., Чечко С. Г. Определение модельных параметров процесса периодического смешивания. *Техника и технология пищевых производств*. 2009. №3 (14). С.32-35.
102. Каталымов А. В., Любартович В. А. Дозирование сыпучих и вязких материалов. Санкт-Петербург: Химия, 2000. 240 с.
103. Кудрина М. А., Мурзин А. В. Аффинные преобразования объектов в компьютерной графике. *Надежность и качество*. Труды Международного симпозиума, Самара, Россия. 2014.
104. Лебедев А. Е., Зайцев А. И., Петров А. А. Метод оценки коэффициента неоднородности смесей сыпучих сред. *Инженерный вестник Дона*, 2014. №4.
105. Литвиненко А. Г., Кипнис Б. Я., Брук Л. Я. Искусственные кожи и пленочные материалы: Справочник под ред. В. А. Михайлова и Б. Я. Кипниса. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Легпромбытиздат, 1987. 400 с.
106. Макевнин М. П. Свойства сыпучих материалов и термины. *Механика сыпучих материалов*: тез. докл. IV Всесоюз. конф. Одесса, 2007. С.6-7.

107. Мануленко А. Ф., Ленартович Л. А., Прокопчук Н. Р. Влияние суперконцентратов наполнителей и стабилизаторов на термостабильность полиэтилена. *Труды БГТУ*, 2016. № 4. С.106–113.

108. Мруз З., Шиманский Ч. Неассоциированный закон течения в описании пластического течения гранулированных сред. *Механика гранулированных сред: Теория быстрых движений*. Сб. статей. Пер. с англ./Сост. И.В. Ширко. М.: Мир, 1985. 280 с.

109. Неддерман Р., Дэвис С., Хортон Д. Течение гранулированных материалов вокруг препятствий. *Механика гранулированных сред: Теория быстрых движений*. Сб. статей. Пер. с англ./Сост. И.В. Ширко. М.: Мир, 1985. 280 с.

110. Неддерман Р., Тюзюн У. Кинематическая модель течения гранулированных материалов. *Механика гранулированных сред: Теория быстрых движений*. Сб. статей. Пер. с англ./Сост. И.В. Ширко. М.: Мир, 1985. 280 с.

111. Никитина Л. Л., Гаврилова О. Е. Перспективные полимерные материалы в производстве обуви. *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. С.190-194.

112. Ничеглод В. В., Стаценко В. В. Стенд для дослідження системи керування дозувальним обладнанням безперервної дії. *Технології та дизайн*. 2019. № 4. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2019_4_8

113. Оцука А. Основные свойства порошков. *Кагаку соти*. 2004. Т. 16. №7. С.58-67.

114. Парамонова М. С. Общие методы моделирования процессов смешения сыпучих материалов. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2018. С.582-584.

115. Першин В. Ф., Капитонов Е. Н., Деревякин Н. А. К расчету точности дозирования. *Каучук и резина*. 2003. № 10. С.44-45.

116. Першин В. Ф., Свиридов М. М., Черный В. В. Коэффициенты трения сыпучих материалов. *Сушка и грануляция продуктов*

микробиологии и тонкого химического синтеза: тез. докл. респ. науч. конф. Тамбов, 2008. С.113-114.

117. Першина С. В. Совершенствование метода автоматизированного определения углов обрушения сыпучих материалов. *Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании*: сб. науч. ст. Одесса, 2007. Т.3: Технические науки. С.92-94.

118. Полимерные смеси. Том 1: Систематика / под ред. Д.Р. Пола и К.Б. Бакнелла / Пер. с англ. Под ред. В.Н. Кулезнова. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 618 с.

119. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. М: Физматлит, 2012. 348с.

120. Производство окрашенных пластмасс. / Под ред. Чарвата Р. А. Пер. с англ. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 400 с.

121. Рогинский Г. А. Дозирование сыпучих материалов. Москва: Химия. 2008. 176 с.

122. Процеси та обладнання підготовчих виробництв легкої промисловості: навч. посіб. / Бурмістенков О. П. та ін. Київ: КНУТД, 2011. 135 с.

123. Садовская О. В., Садовский В. М. Математическое моделирование в задачах механики сыпучих сред. М.: Физматлит, 2008. 368 с.

124. Салимова А. И. Применение полимеров в производстве текстильных материалов со специфическими свойствами. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. С.92-94.

125. Сандитов Д. С., Голубь П. Д., Сангадиев С. Ш. Упругие модули и коэффициент Пуассона аморфных полимеров и стекол. *Журнал технической физики*, 2013. том 83. вып. 9. С.154-156.

126. Седых В. А., Жучков А. В. Технические свойства упаковочных пленок на основе ПВХ. *Фундаментальная и прикладная химия, химическая технология*. 2013. С.141-146.

127. Система керування процесом змішування сипких матеріалів: пат. України на корисну модель UA 134411 U, B01F 3/18. Бурмістенков О. П., Біла Т. Я., Стаценко В. В. № u201813066, заявл. 29.12.2018, опубл. 10.05.2019. Бюл. №9/2019.

128. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. Москва: Физматгиз, 2005. 243 с.

129. Спосіб визначення неоднорідності суміші сипучих компонентів: пат. 66717 України МКИ 7G01N15/02. Костицький В. В., Біла Т. Я., Стаценко В. В. Заявл. 13.10.03; Опубл. 17.05.04; Бюл.№5, від 17.05.2004.

130. Способ контроля расхода и дозирования сыпучих материалов: пат.2532596 Российская Федерация, МПК G 01F 1/56 (2006.01) Багаев А. А., Чернусь Р. С., Костюков А. Ф., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО АГАУ. -: №2013122014/28, заявл. 13.05.2013; опубл.: 10.11.2014. Бюл. № 31.

131. Стаценко В. В., Біла Т. Я., Бурмістенков О. П. Аналіз руху сипкого матеріалу на виході бункерів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2018. № 4 (124). С. 85-95.

132. Стаценко В. В., Біла Т. Я. Дослідження плинучого сипкого матеріалу в бункерних пристроях. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: тези доповідей II міжнар. наук.-практ. конф., 15 червня 2018 р.* Київ: КНУТД. С.93-94.

133. Стаценко В. В., Біла Т. Я. Дослідження процесу виготовлення сумішей сипких матеріалів у відцентровому змішувачі. *Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації: зб. наук. праць XVIII Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Переяслав-Хмельницький, 2016. Вип. 18. С. 405-409.*

134. Стаценко В. В., Бурмістенков О. П., Біла Т. Я. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів: монографія. Київ: КНУТД, 2017. 220 с.

135. Стаценко В. В., Бурмістенков О. П., Біла Т. Я. Визначення розподілення частинок сипких матеріалів під час перемішування у роторі відцентрового змішувача безперервної дії. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2020. №1 (281). С. 238-244.

136. Стаценко В. В., Бурмістенков О. П., Біла Т. Я. Вплив конструкцій відцентрових змішувачів на їх згладжувальну здатність. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2020. №1 (142). С.11-18.

137. Стаценко В. В., Бурмістенков О. П., Біла Т. Я. Дослідження характеру плинущості сипких матеріалів в бункерних пристроях методом дискретних елементів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. №6. С.7-14.

138. Стаценко В. В., Бурмістенков О. П., Біла Т. Я. Системна і параметрична моделі бункерних пристроїв в агрегатах для приготування композицій із сипких матеріалів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки*. 2016. №6. С.60-69.

139. Стаценко В. В., Бурмістенков О. П., Біла Т. Я., Стаценко Д. В. Розроблення комп'ютерної централізованої системи збору даних від аналогових датчиків. *Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки*. 2021. №3 (297). С.46-50. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2021-297-3-46-50>

140. Стаценко В. В. Исследование влияния случайных колебаний в потоке сыпучего материала на работу систем управления дозаторами. *Colloquium-journal. Międzynarodowe czasopismo naukowe*. 2017. №11. P.53-56. (Warszawa, Polska).

141. Стаценко В. В. Определение интенсивности движения частиц сыпучих материалов. *Colloquium-journal. Międzynarodowe czasopismo naukowe*. 2020. №8 (60). P.55-58. (Warszawa, Polska).

142. Сэвидж С. Гравитационное течение несвязанных гранулированных материалов в лотках и каналах. *Механика*

гранулированных сред: Теория быстрых движений. Сб. статей. Пер. с англ./Сост. И.В. Ширко. М.: Мир, 1985. 280 с.

143. Трофимченко В. Н., Воронов В. П., Мордовская О. С., Ханин С. И. К вопросу определения скорости движения частицы по вращающейся поверхности конуса. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2016. №8. С.117-121.

144. Тюзюн У., Неддерман Р. Исследование границы потока при установившемся истечении из воронкообразного бункера. *Механика гранулированных сред: Теория быстрых движений. Сб. статей. Пер. с англ./Сост. И.В. Ширко. М.: Мир, 1985. 280 с.*

145. Тюзюн У., Неддерман Р. Экспериментальное доказательство кинематического моделирования течений гранулированных сред в отсутствие сопротивления воздуха. *Механика гранулированных сред: Теория быстрых движений. Сб. статей. Пер. с англ./Сост. И.В. Ширко. М.: Мир, 1985. 280 с.*

146. Филимонов Д. В., Першина С. В. Расчет производительности шнековых и спиральных питателей. *Труды ТГТУ: сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. Вып. 15. С.64 - 68.*

147. Цвайфель Х., Маер Р. Д., Шиллер М. Добавки к полимерам. Справочник. Пер. с англ. 6-го издания под ред. В. Б. Узденского, А. О. Григорова. СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. 1144 с.

148. Центробежный смеситель: пат. 2207901 РФ. Иванец В. Н., Бакин И. А., Бородулин Д. М., Зверев В. П. Бюл. №19, от 10.07.2003 г.

149. Шершукова А. И. Автоматизированное определение углов естественного откоса. *Труды ТГТУ: сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 2007. Вып. 20. С.78-81.*

150. Шершукова А. И. Автоматизированное определение углов трения покоя и движения сыпучих материалов. *Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: сб. науч. ст. - Одесса, 2007. Т. 3: Технические науки. С.94-97.*

151. Шипулин А. С. Исследование физико-механических свойств порошка полиэтилена. *XIX Международная научно-практическая конференция имени профессора Л.П. Кулёва*. 21-24 мая 2018 г., г. Томск. С.558-559.

152. Шубин И. Н., Свиридов М. М., Таров В. П. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 76 с.

ДОДАТКИ

Програма для визначення розподілу частинок всередині кінчного ротора

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import solve_ivp

def createParticle(x0, y0, sigma):
    randX = x0 + np.random.randn() * sigma
    randY = y0 + np.random.randn() * sigma
    return {'X':randX, 'Y':randY}

def placeParticles(num, x0, y0, sigma):
    particles = []
    for i in range(num):
        particles = np.append(particles,
createParticle(x0, y0, sigma))
    return particles

def coriolisTrenie(t, y, omega, f):
    g = 9.8
    absV = np.hypot(y[1], y[3])
    if absV == 0:
        Ktr = 0
    else:
        Ktr = g * f / absV
    dydt = [
        y[1],
```

```

    y[0] * (omega**2) + 2 * y[3] * omega - Ktr * y[1],
    y[3],
    y[2] * (omega**2) - 2 * y[1] * omega - Ktr * y[3],
    0,
    0
]
return dydt

```

```

def cutTrajectory(trajjectory, distance):
    pX = []
    pVx = []
    pY = []
    pVy = []
    pZ = []
    pVz = []
    t = []
    for i in range(len(trajjectory['t'])):
        wasAdded = False
        if np.hypot(trajjectory.y[0][i],
trajjectory.y[2][i]) < distance:
            t = np.append(t, trajjectory.t[i])
            pX = np.append(pX, trajjectory.y[0][i])
            pVx = np.append(pVx, trajjectory.y[1][i])
            pY = np.append(pY, trajjectory.y[2][i])
            pVy = np.append(pVy, trajjectory.y[3][i])
            pZ = np.append(pZ, trajjectory.y[4][i])
            pVz = np.append(pVz, trajjectory.y[5][i])
            wasAdded = True
    if wasAdded == False:

```

```

        break
    return {'t': t, 'x': pX, 'Vx': pVx, 'y': pY, 'Vy':
pVy, 'z': pZ, 'Vz': pVz}

def calcDnoMovement(particlesPositions, omega, R, f,
Tspan):
    trajectories = []
    for particle in particlesPositions:
        if np.hypot(particle['X'], particle['Y']) < R:
            tr = solve_ivp(lambda t, y: coriolisTrenie(t,
y, omega, f), Tspan, [particle['X'], 0, particle['Y'], 0,
0, 0], max_step=0.001)
            if np.hypot(tr.y[0][-1], tr.y[2][-1]) >= R:
                trajectories = np.append(trajectories,
cutTrajectory(tr, R))
    return trajectories

def getOutCoordinates(trajectory):
    return {"x":trajectory['x'][-1], "y":trajectory['y'][-
1], "z":trajectory['z'][-1],
            "Vx":trajectory['Vx'][-1],
            "Vy":trajectory['Vy'][-1], "Vz":trajectory['Vz'][-1],
            "t":trajectory['t'][-1]}

def getPerpendicular(baseVector):
    theta = np.arctan2(baseVector[1], baseVector[0])
    rotateZ = [
        [np.cos(theta), -1*np.sin(theta), 0],
        [np.sin(theta), np.cos(theta), 0],

```



```

        [0, 0, 1]
    ]

    x1 = [1, 0, 0]
    y1 = [0, 1, 0]
    z1 = [0, 0, 1]

    x2 = np.dot(x1, rotateZ)
    y2 = np.dot(y1, rotateZ)
    z2 = np.dot(z1, rotateZ)

    xx = np.dot(baseVector, [x2, y2, z2])

    xxP = [xx[2], xx[1], -1*xx[0]]

    rotateZreverse = [
        [np.cos(-1*theta), -1*np.sin(-1*theta), 0],
        [np.sin(-1*theta), np.cos(-1*theta), 0],
        [0, 0, 1]
    ]
    xP = np.dot(xxP, [np.dot(x1, rotateZreverse),
np.dot(y1, rotateZreverse), np.dot(z1, rotateZreverse)])
    return xP

def calcProjection(a, b):
    return np.dot(a, b)/np.linalg.norm(b)

def konusTrenieEx(t, y, omega, k, g, alpha, R):
    absV = np.linalg.norm([y[1], y[3], y[5]])

```

```

    perpV = getPerpendicular([y[0], y[2], y[4] +
R/np.tan(alpha)])
    perpVnorm = perpV / np.linalg.norm(perpV)

    F_projection = calcProjection([y[0] * (omega**2), y[2]
* (omega**2), 0], perpVnorm)
    g_projection = calcProjection([0, 0, -1*g], perpVnorm)
    Fkor_projection = calcProjection([2 * y[3] * omega, -2
* y[1] * omega, 0], perpVnorm)
    a_n = (F_projection + g_projection + Fkor_projection)
* (-1) * perpVnorm

    if absV == 0:
        K_tr = 0
    else:
        K_tr = k / absV

    absF = np.linalg.norm([y[0] * (omega**2), y[2] *
(omega**2), 0])

    dydt = [
        y[1],
        y[0] * (omega**2) + 2 * y[3] * omega - K_tr *
a_n[0] * y[1] + a_n[0],
        y[3],
        y[2] * (omega**2) - 2 * y[1] * omega - K_tr *
a_n[1] * y[3] + a_n[1],
        y[5],

```

```

        -1*g + (absF * np.cos(alpha) + g * np.sin(alpha))
* np.sin(alpha) - (absF * np.cos(alpha) + g *
np.sin(alpha)) * k * np.cos(alpha)
    ]
    return dydt

```

```

def calcKonusMovement(dnoTrajectories, omega, R, H, f,
alpha, Tspan):
    g = 9.8
    Rvn = R + np.tan(alpha) * H
    trajectories = []
    for dnoTrajectory in dnoTrajectories:
        startPos = getOutCoordinates(dnoTrajectory)
        Yinit = [startPos['x'], startPos['Vx'],
startPos['y'], startPos['Vy'], startPos['z'],
startPos['Vz']]
        res = solve_ivp(fun = lambda t, y:
konusTrenieEx(t, y, omega, f, g, alpha, R), t_span=Tspan,
                        y0=Yinit, max_step=0.0005)
        rotorTrajectory = cutTrajectory(res, Rvn)
        combinedTrajectory = {
            'x': np.hstack((dnoTrajectory['x'],
rotorTrajectory['x'])),
            'y': np.hstack((dnoTrajectory['y'],
rotorTrajectory['y'])),
            'z': np.hstack((dnoTrajectory['z'],
rotorTrajectory['z'])),
            'Vx': np.hstack((dnoTrajectory['Vx'],
rotorTrajectory['Vz'])),

```

```

        'Vy': np.hstack((dnoTrajectory['Vy'],
rotorTrajectory['Vy'])),
        'Vz': np.hstack((dnoTrajectory['Vz'],
rotorTrajectory['Vz'])),
        't': np.hstack((dnoTrajectory['t'],
(startPos['t'] + rotorTrajectory['t'])))
    }
    trajectories = np.append(trajectories,
combinedTrajectory)
    return trajectories

def getOutTrajectoriesCoordinates(trajectories):
    outPoints = []
    for trajectory in trajectories:
        outPoints = np.append(outPoints,
getOutCoordinates(trajectory))
    return outPoints

def calcAngle(point):
    return np.rad2deg(np.arctan2(point['y'], point['x']))

def getHistogram(particlesPoints, degreesStep):
    bins = np.arange(-180, 180, degreesStep)
    degrees = [calcAngle(point) for point in
particlesPoints]
    return np.histogram(degrees, bins=bins)

X0 = 0.01
Y0 = 0.01

```

```

particlesNum = 10
sigma = 0.005
omega = 120
R0 = 0.051
H = 0.18
alpha = np.deg2rad(30)
f = 0.1

startParticlesPositions = placeParticles(particlesNum, X0,
Y0, sigma)
dnoTrajectories = calcDnoMovement(startParticlesPositions,
omega, R0, f, [0, 0.5])
konusTrajectories = calcKonusMovement(dnoTrajectories,
omega, R0, H, f, alpha, [0, 0.5])

endPoints =
getOutTrajectoriesCoordinates(konusTrajectories)

plt.figure(figsize=(10,10))
for tr in konusTrajectories:
    plt.plot(tr['x'], tr['y'], c='k', alpha=0.1)
plt.scatter([point['x'] for point in endPoints],
[point['y'] for point in endPoints], alpha=0.3)
circle = plt.Circle((0, 0), R0, color='g', fill=False)
plt.gcf().gca().add_artist(circle)
circleVn = plt.Circle((0, 0), R0 + np.tan(np.deg2rad(30))
* 0.18, color='g', fill=False)
plt.gcf().gca().add_artist(circleVn)
plt.axis('equal')

```

```

plt.xlim((-0.2, 0.2))
plt.ylim((-0.2, 0.2))
plt.grid()
plt.show()

npHistKonus = getHistogram(endPoints, 15)

plt.figure(figsize=(15, 5))
plt.bar(npHistKonus[1][0:-1], npHistKonus[0], width=10,
alpha=0.5)
plt.xlim(-180, 180)
plt.xlabel('кут, град')
plt.ylabel('кількість частинок')
plt.grid()
plt.show()

def showTrajectories(trajectories, endPoints):
    plt.figure(figsize=(10,10))

    for tr in trajectories:
        plt.plot(tr['x'], tr['y'], c='k', alpha=0.1)
        plt.scatter([point['x'] for point in endPoints],
[point['y'] for point in endPoints], alpha=0.3)
        circle = plt.Circle((0, 0), R0, color='g', fill=False)
        plt.gcf().gca().add_artist(circle)
        circleVn = plt.Circle((0, 0), R0 +
np.tan(np.deg2rad(30)) * 0.18, color='g', fill=False)
        plt.gcf().gca().add_artist(circleVn)
        plt.axis('equal')

```

```

plt.xlim((-0.2, 0.2))
plt.ylim((-0.2, 0.2))
plt.grid()
plt.show()

def showTrajectories2(trajectoriesKK, endPointsKK,
trajectoriesOK, endPointsOK):
    plt.figure(figsize=(10,10))

    for tr in trajectoriesKK:
        plt.plot(tr['x'], tr['y'], c='k', ls='--',
alpha=0.1)
        plt.scatter([point['x'] for point in endPointsKK],
[point['y'] for point in endPointsKK], c='b', alpha=0.3)

    for tr in trajectoriesOK:
        plt.plot(tr['x'], tr['y'], c='b', ls='-',
alpha=0.1)
        plt.scatter([point['x'] for point in endPointsOK],
[point['y'] for point in endPointsOK], c='r', alpha=0.3)

    circle = plt.Circle((0, 0), R0, color='g', fill=False)
    plt.gcf().gca().add_artist(circle)
    circleVn = plt.Circle((0, 0), R0 +
np.tan(np.deg2rad(30)) * 0.18, color='g', fill=False)
    plt.gcf().gca().add_artist(circleVn)
    plt.axis('equal')
    plt.xlim((-0.2, 0.2))
    plt.ylim((-0.2, 0.2))

```

```
plt.grid()
plt.show()
```

```
def showHistogram(npHistKonus):
    plt.figure(figsize=(15,7))
    plt.bar(npHistKonus[1][0:-1], npHistKonus[0],
width=10, alpha=0.5)
    plt.xlim(-180, 180)
    plt.xlabel('кут, град', fontsize=24)
    plt.ylabel('кількість частинок', fontsize=24)
    plt.xticks(fontsize = 18)
    plt.yticks(fontsize = 18)
    plt.grid()
    plt.show()
```

```
def showHistogram2(npHistKK, npHistOK):
    plt.figure(figsize=(15,7))
    kkBar = plt.bar(npHistKonus[1][0:-1], npHistKK[0],
width=10, alpha=0.5, color='c', edgecolor='k')
    okBar = plt.bar(npHistKonus[1][0:-1], npHistOK[0],
width=10, alpha=0.5, color='y', edgecolor='k',
bottom=npHistKK[0])
    plt.xlim(-180, 180)
    plt.xlabel('кут, град', fontsize=24)
    plt.ylabel('кількість частинок', fontsize=24)
    plt.legend((kkBar[0], okBar[0]), ('Ключовий
компонент', 'Основний компонент'), fontsize=24)
    plt.xticks(fontsize = 18)
    plt.yticks(fontsize = 18)
```



```
plt.grid()
plt.show()
```

```
def calcSK0(npHistKonus):
    particlesNum = npHistKonus[0].sum()
    sectorsNum = len(npHistKonus[0])
    particlesAvg = particlesNum / sectorsNum
    diff = npHistKonus[0] - particlesAvg
    S = 1 / sectorsNum * np.sqrt((diff ** 2).sum())
    return S
```

```
def calcC(npHistKK, npHistOK):
    KKtotal = npHistKK[0].sum()
    print('KKtotal', KKtotal)
    OKtotal = npHistOK[0].sum()
    print('OKtotal', OKtotal)
    n = len(npHistOK[0])
    print('n', n)
    Ckk = npHistKK[0] / (npHistKK[0] + npHistOK[0])
    print(Ckk)
    CkkAvg = KKtotal / (KKtotal + OKtotal)
    print('CkkAvg', CkkAvg)
    return 100 / CkkAvg * np.sqrt(1/(n-1) * ((Ckk -
CkkAvg)**2).sum())
```

```
def calcDisp(npHistKK, npHistOK):
    KKtotal = npHistKK[0].sum()
    print('KKtotal', KKtotal)
    OKtotal = npHistOK[0].sum()
```

```

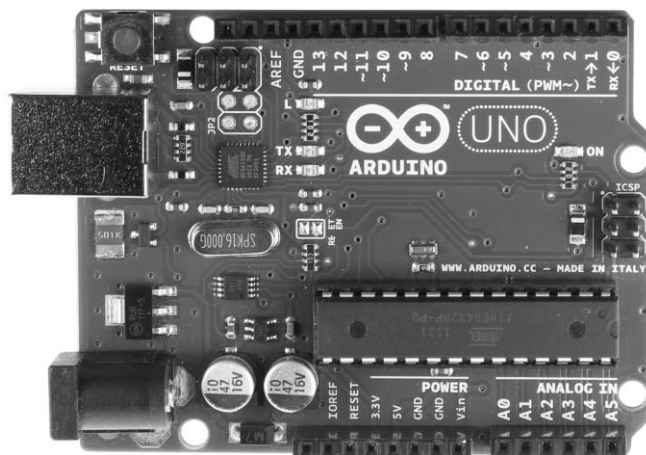
print('OKtotal', OKtotal)
n = len(npHistOK[0])
print('n', n)
Ckk = npHistKK[0] / (npHistKK[0] + npHistOK[0])
print(Ckk)
print('Ckk var', Ckk.var())
X0 = 0.01
Y0 = 0.01
particlesNum = 400
sigma = 0.005
omega = 120
R0 = 0.051
H = 0.18
alpha = np.deg2rad(30)
f = 0.1
startParticlesPositions_1 = placeParticles(particlesNum,
X0, Y0, sigma)
dnoTrajectories_1 =
calcDnoMovement(startParticlesPositions_1, omega, R0, f,
[0, 0.5])
konusTrajectories_1 = calcKonusMovement(dnoTrajectories_1,
omega, R0, H, f, alpha, [0, 0.5])
endPoints_1 =
getOutTrajectoriesCoordinates(konusTrajectories_1)
npHistKonus_1 = getHistogram(endPoints_1, 15)
showTrajectories(konusTrajectories_1, endPoints_1)
showHistogram(npHistKonus_1)
S1 = calcSK0(npHistKonus_1)
print(S1)

```

Плата Arduino Uno

Технічні характеристики:

- Тип мікроконтролера: ATmega328.
- Робоча напруга: 5 В.
- Вхідна напруга: 7-12 В.
- Цифрові входи/виходи: 14 (6 з яких підключені до ШІМ).
- Кількість аналогових входів: 6.
- Максимальний постійний струм через входи/виходи: 40 мА.
- Об'єм флеш-пам'яті: 32 КБ.
- Об'єм ОЗУ 2 КБ.
- EEPROM 1 КБ.
- Тактова частота: 16 МГц.



Сервопривод MG995 Tower Pro.

Технічні характеристики:

- Крутний момент: 8.5 кг·см (напруга 4.8 В), 10 кг·см (6 В).
- Швидкість: 0.2 с / 60° (4.8 В), 0.16 с / 60° (6 В).
- Робоче живлення: 4.8 - 7.2 В.
- Кут повороту валу: 120°.



Двигун постійного струму з черв'ячним редуктором ASLONG A58SW-555B.

Технічні характеристики:

- Модель: A58SW-555B.
- Вихідна потужність: 28 Вт.
- Обертальний момент: 17-60 кг·см.
- Струм холостого ходу: 0,4А.
- Постійний струм: 2А.
- Номінальна напруга: 24В.
- Швидкість обертання: 27 об/хв.
- Коефіцієнт передачі редуктора: 1:290.



Тензометричний датчик YZC131.

Технічні характеристики:

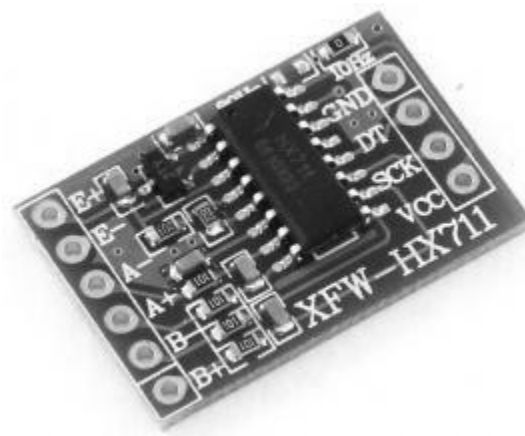
- Імпеданс: $1000 \pm 50\Omega$.
- Рекомендована напруга: 5-10В.
- Максимальна маса: до 5 кг.
- Матеріал: алюміній.
- Комплексна похибка: 0,2 % FS.



Аналого-цифровий перетворювач HX711.

Технічні характеристики:

- Точність перетворення: 24 біт (24 біт / D конвертер).
- Частота оновлення: 80 Гц.
- Робоча напруга: 5 В постійного струму.
- Робочий струм: <10 мА.



Наукове видання

Стаценко Володимир Володимирович
Бурмістенков Олександр Петрович
Біла Тетяна Яківна
Ліщук Віктор Іванович

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
РУХУ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ
В ЗМІШУВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ
МЕТОДОМ ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Монографія

Редактор Стаценко В. В.

Підп. до друку 27.10.2021 р. Формат 60x84 1/16.

Ум. друк. арк. 13,01. Облік. вид. арк. 10,18. Наклад 300 пр. Зам. 1701.

Видавець і виготовлювач Київський національний університет технологій та дизайну.
вул. Немировича-Данченка, 2, м. Київ-11, 01011.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 993 від 24.07.2002.