3	Севостьяненко Каріна Валеріївна	ЗГМО-24-1м	Обгрунтування раціональних параметрів конічних грохотів	Громадський А.С. проф., док.тех.наук

ВСТУП

Гірничо-збагачувальна промисловість є однією з ключових галузей сучасної економіки, яка забезпечує сировинною базою багато інших галузей — від металургії до енергетики та будівельного матеріалознавства. У сучасному виробництві, особливо в гірничодобувній, будівельній, металургійній, хімічній, харчовій та медичній галузях, критично важливою технологічною стадією є поділ сипких матеріалів по крупності. Цей етап дозволяє відокремити фракції, придатні для подальшої переробки, від надлишково дрібних або крупних фракцій, що сприяє підвищенню якості кінцевого продукту, зменшенню втрат корисних компонентів і оптимізації роботи наступних технологічних операцій.

Особливе значення у процесі грохочення має використання сучасного обладнання, здатного забезпечити високу продуктивність і точність розділення. Серед різноманітних типів грохотів конічні грохоти набувають все більшого поширення завдяки своїй унікальній конструкції, яка дозволяє реалізувати інтенсивний рух матеріалу по робочій поверхні та забезпечує ефективне просіювання навіть важкопросіюваних матеріалів. Проте на сьогоднішній день існуючі конструкції конічних грохотів часто не забезпечують оптимальних умов для грохочення через недостатнє урахування фізико-механічних властивостей перероблюваних матеріалів, режимів роботи та геометричних параметрів робочого органу. Це призводить до зниження продуктивності, підвищення енерговитрат і зростання втрат цінних фракцій.

Первинний поділ сипких матеріалів має виняткове значення у технологічних схемах збагачення. Воно застосовується на різних етапах, включаючи попереднє грохочення підірваної крупнокускової гірської маси в кар'єрах (де розмір вихідного матеріалу може досягати 1200-1500 мм), первинне гуркотіння вугілля, будівельних матеріалів та руди після великого дроблення, а також сортування металургійної сировини перед доменною плавкою. На збагачувальних та агломераційних фабриках, металургійних та дробильно-сортувальних заводах вібраційні гуркоти широко використовуються для

класифікації матеріалів перед дробленням, промивання матеріалу перед збагаченням у важких середовищах, подальшого відмивання суспензій та зневоднення продуктів збагачення. Ефективність цих процесів безпосередньо впливає собівартість і якість кінцевої продукції. Таким чином, точний та надійний первинний поділ є невід'ємною умовою для оптимізації всіх наступних етапів переробки матеріалів.

Підвищення ефективності процесу грохочення є невід’ємною умовою модернізації гірничо-збагачувальних виробництв. У зв’язку зі зростанням вимог до якості продуктів збагачення, скороченням запасів високоякісної сировини та необхідністю мінімізації впливу на навколишнє середовище, актуальною стає задача створення нових, більш досконалих схем грохотів, здатних забезпечити високу продуктивність при мінімальних експлуатаційних витратах. Особливу увагу слід приділити розробці грохотів із оптимізованими конструктивними та режимними параметрами, що дозволять підвищити якість фракціонування, зменшити відсоток забивання сит і збільшити термін служби обладнання.

Одним із перспективних напрямів удосконалення технологічних схем грохочення є розвиток конічних грохотів, які мають потенціал для досягнення високих показників ефективності завдяки особливостям руху матеріалу у конічному просторі. Проте наукові дослідження у цій галузі залишаються недостатньо розробленими, особливо щодо системного підходу до визначення раціональних параметрів їхньої роботи. Відсутні узагальнені моделі, що враховують взаємозв’язок кута конусності, амплітуди та частоти коливань, кута нахилу сита, властивостей матеріалу та інших чинників, які безпосередньо впливають на процес грохочення. Це ускладнює проектування нових зразків обладнання та обмежує можливості його широкого впровадження на практиці.

Однак, незважаючи на десятиліття розвитку, існуючі конструкції гуркотів та методи грохочення не завжди повною мірою задовольняють сучасні вимоги промисловості. Відзначено бурхливе зростання обсягів матеріалів, що переробляються, різноманітність їх видів та посилення вимог до обладнання. Це призвело до того, що накопичений століттями експлуатаційний досвід, часто

заснований на методі проб і помилок, перестав відповідати запитам виробництв, що розвиваються.

Особливого значення набуває підвищення продуктивності та ефективності грохочення, оскільки від цих показників безпосередньо залежить економічна доцільність і якість продукції, що випускається. Однак досягнення високих показників утруднено низкою факторів. Теоретичні моделі, що описують закономірності процесу грохочення, часто не можуть дати відповіді на багато питань, що виникають під час експлуатації та проектування вібраційних гуркотів. Складність фізико-механічних властивостей сипучих матеріалів та різноманітність режимів вібровпливу на шар матеріалу призвели до того, що суворі рівняння руху частинок сипучого середовища у загальновизнаному вигляді дотепер не сформульовані. В результаті, технологічні параметри в умовах промислового виробництва нерідко визначаються емпірично.

Крім того, традиційні методи грохочення стикаються із суттєвими обмеженнями, особливо при поділі дрібнозернистих, вологих чи забруднених матеріалів. Роздільна здатність гуркотіння різко знижується при наближенні граничної крупності поділу до 1 мм і практично зводиться до нуля для класів крупності менше 0,5 мм. Наявність у вихідній сировині "важких" зерен (великість яких становить від 0,8 до 1 діаметра отвору сита) значно ускладнює процес, приводячи до забиття отворів та зниження ефективності. Ефективність поділу на гуркотах різних типів також залежить від гранулометричного складу вихідної сировини. Якість грохочення характеризується залишковим вмістом матеріалу розрахункової крупності в надрешітному продукті (подрібненість). Низька ефективність грохочення може бути пов'язана з недостатнім урахуванням впливу технологічних параметрів гуркоту на такі процеси, як рух частинок шаром, транспортування сипучого матеріалу і проникнення проходових частинок через осередки сита.

В умовах, коли існуючі конструкції грохотів при всій їх надійності і простоті не задовольняють повною мірою потребам сучасного виробництва будівельних матеріалів, особливо в частині адаптації до умов і темпів

класифікації, що змінюються, виникає гостра необхідність у їх вдосконаленні. Спостерігається тенденція використання принципу складного динамічного збудження сипких матеріалів, що розвивається, що дозволяє, зберігаючи базову конструкцію гуркоту, значно поліпшити процес грохочення за рахунок додаткового впливу на матеріал.

У зв'язку з цим, особливо гостро постає потреба в науковому обґрунтуванні раціональних параметрів конічних грохотів, які б забезпечували максимальну продуктивність і ефективність процесу розділення сипких матеріалів. Необхідно розробити науково обґрунтований підхід до визначення оптимальних геометричних, кінематичних і динамічних характеристик конічних грохотів, що враховував би специфіку перероблюваних матеріалів та умов експлуатації. Такий підхід дозволить не лише підвищити техніко-економічні показники діючих виробництв, але й створити передумови для розробки нових поколінь високоефективного грохочувального обладнання.

Таким чином, обґрунтування раціональних параметрів конічних грохотів, здатних забезпечити значне підвищення продуктивності та ефективності процесу розділення сипких матеріалів, поліпшення якості готової продукції за рахунок інтенсифікації процесів поділу шляхом дослідження впливу геометричних, кінематичних і технологічних чинників на ефективність процесу грохочення сипких матеріалів у гірничо-збагачувальному виробництві є ***актуальною науково-технічною задачею***.

Мета роботи — підвищення ефективності процесу грохочення сипких матеріалів у гірничо-збагачувальному виробництві за рахунок наукового обґрунтування раціональних параметрів конічних грохотів шляхом аналізу впливу геометричних, кінематичних і технологічних чинників на якість фракціонування та продуктивність обладнання.

Об'єкт дослідження — процес грохочення сипких матеріалів на конічних грохотах з обертовим ситом і змушеними коливаннями робочої поверхні.

Предмет дослідження — режимні та конструктивні параметри конічних грохотів, зокрема: амплітуда та частота коливань, кут нахилу сита, частота обертання ексцентрикового механізму, а також властивості перероблюваного матеріалу (гранулометричний склад, коефіцієнт тертя).

Наукові положення.

1. Вперше розроблено умову розвантаження грубих фракції на конічному грохоті з горизонтально розташованим ситом без додаткової вібрації, якаа враховує дію ваги, відцентрової сили, реакції опори та сили тертя і показує, що рух частинок по поверхні конічного грохота не залежить від маси зерен, а визначається переважно швидкістю обертання сита та радіусом розташування частинки.
2. Вперше встановлено, що поєднання нахилу сита конічного грохоту (15°) із горизонтальною вібрацією амплітудлю 2 мм, частотою 15 Гц та швидкістю обертання 55 об/хв забезпечує найбільш стабільну роботу грохота і максимальну ефективність просіювання як дрібних так і грубих фракцій.

1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ГРОХОТІВ ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Аналіз конструкції інерційних грохотів

Вібраційні грохоти – це пристрої, призначені для розділу кускового та сипучого матеріалу, а також твердої фази пульпи на продукти різної крупності за допомогою поверхонь, що просівають з каліброваними отворами. Вони широко застосовуються у виробничій діяльності людини, оскільки майже 95% сипучої сировини, що видобувається і переробляється, піддається поділу по крупності. Від досконалості процесу грохочення залежить собівартість і якість продукції [11, 12, 13].

Інерційні грохоти є одним із найпоширеніших типів грохочувального обладнання, що застосовується у гірничо-збагачувальній, будівельній, харчовій та хімічній промисловості для розділення сипких матеріалів за крупністю. Їхнє призначення полягає у відділенні матеріалу на фракції шляхом просіювання через сита під дією змушених коливань, які створюються інерційними віброзбудниками. Особлива роль інерційних грохотів полягає в їхній здатності ефективно працювати з великими обсягами матеріалу, включаючи важкопросіювані, вологі та липкі маси, що робить їх незамінними на підприємствах первинної та вторинної переробки корисних копалин [11, 12, 13].

Область використання інерційних грохотів охоплює первинне, середнє та дрібне грохочення рудних і нерудних матеріалів, класифікацію вугілля, баласту, щебеню, піску, а також очищення промислових відходів. Вони широко застосовуються як на стадії дроблення, так і перед збагаченням, забезпечуючи оптимальну крупність матеріалу для подальшої технологічної обробки [11, 12, 13].

Вібраційні грохоти широко використовуються у різних галузях промисловості, таких як [11, 12, 13]:

– гірничодобувна промисловість для класифікації матеріалів за фракціями перед дробленням, промивання матеріалу перед збагаченням у важких

середовищах, подальшого відмивання суспензій та зневоднення продуктів збагачення;

- гірничо-хімічна та вугільна промисловість для аналогічних цілей, а також для поділу готового продукту (вугілля) на кондиційні товарні класи;
- промисловість будівельних матеріалів для поділу готового продукту (щебеню, гравійно-піщаних мас) на кондиційні товарні класи;
- металургійна промисловість для видалення некондиційної по крупності дрібниці з сирих котунів та агломерату, а також контрольного гуркотіння сировинних матеріалів перед доменною плавкою;
- хімічна, харчова та медична промисловість.

На грохотах також можуть зневоднювати продукти або поєднувати операції промивання матеріалу з подальшим виділенням з відмитої зернистої частини дрібних класів.

Класифікація інерційних грохотів. Вібраційні гуркіти класифікуються за такими ознаками [11, 12, 13]:

- за способом збудження коливань:
  - з дебалансним (відцентровим) віброзбудником;
  - з електромагнітним віброзбудником;
- за кількістю віброзбудників:
  - з одним,
  - з двома;
  - з кількома;
- за способом синхронізації роботи віброзбудників (якщо їх більше одного):
  - з примусовою механічною синхронізацією;
  - з самосинхронізацією;
  - з примусовою електричною синхронізацією;
- за кількістю мас, що коливаються:
  - одномасні;

- двомасні;
- тримасні;

– за співвідношенням частоти збурюючої сили та власної частоти коливань:
  - дорезонансні;
  - резонансні;
  - навколорезонансні;
  - зарезонансні;
  - міжрезонансні;

– за формою коливань робочого органу (короба):
  - з круговими та близькими до них;
  - з еліптичними;
  - з прямолінійно спрямованими;
  - з комбінованими (неоднорідним полем коливань);

– за кількістю встановлених поверхонь, що просівають:
  - односитові;
  - двоситові
  - багатоситові;

– за розташуванням поверхонь, що просівають, щодо горизонту:
  - похилі (кут нахилу α = 15-30 °);
  - горизонтальні або слабопохилі (α = 5-10 °);

– за наявності переміщень поверхонь, що просівають в цілому або окремих їх елементів щодо короба грохоту:
  - з нерухомими поверхнями, що просівають;
  - з активними поверхнями, що просівають.

Інерційні грохоти (стандартизовані як типи ГІЛ, ГІС, ГІТ) характеризуються круговими або близькими до них коливаннями, що збуджуються одним відцентровим віброзбудником. Вони зазвичай "похилі". Самобалансні грохоти (стандартизовані як типи ГСЛ, ГСС, ГСТ, ГІСЛ, ГІСС, ГІСТ) – це горизонтальні

або слабопохилі грохоти з прямолінійними коливаннями, що збуджуються самобалансним віброзбудником (двома дебалансними валами з віброзбудниками) [11, 12, 13].

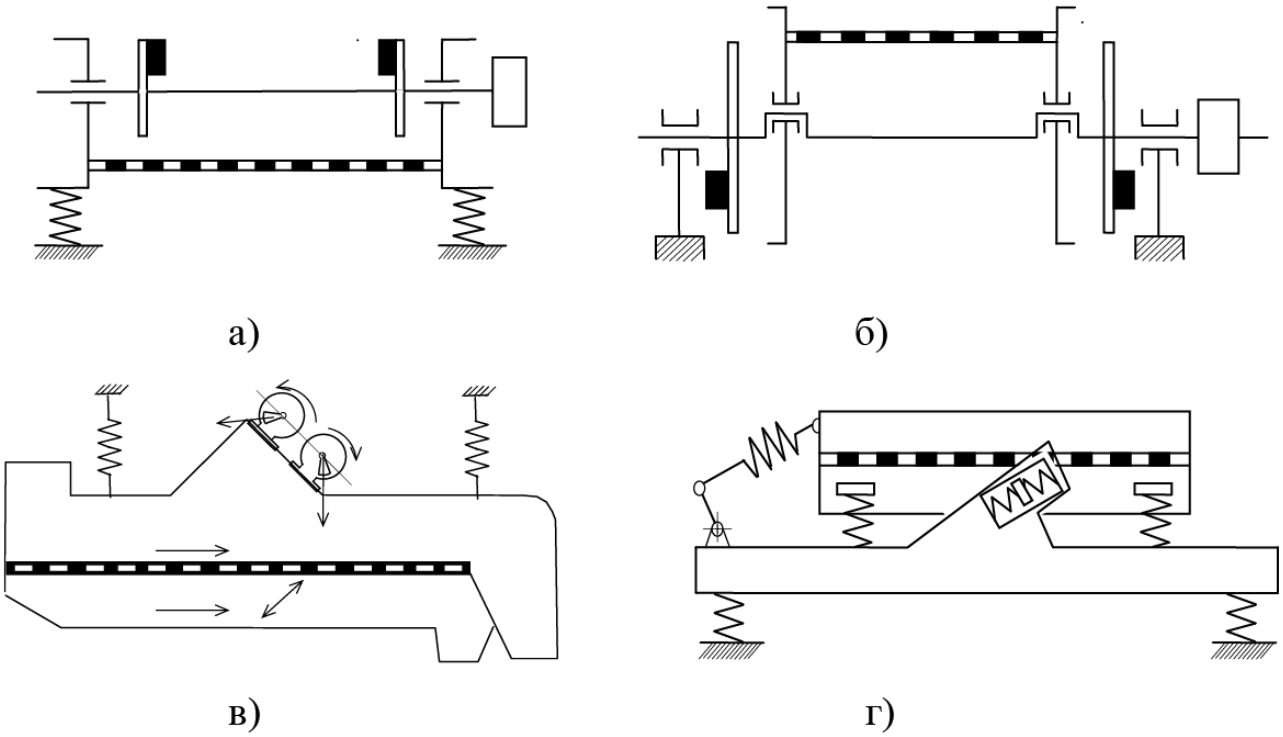


Рис 1.1 – Вида вібраційних грохоті,: а) інерційний грохот; б) гіраційний грохот; в) самобалансний грохот; г) резонансний грохот [11, 12, 13]

Переваги інерційних грохотів [11, 12, 13]:

- висока стабільність робочого режиму, за якої амплітуда коливань робочого органу практично не залежить від "дрейфу" частоти збудження;
- при використанні м'якої віброізоляції передають на опори та фундаменти порівняно невеликі динамічні навантаження;
- простота конструкції, легкий ремонт, надійність у роботі, високі технологічні показники;
- при однаковій продуктивності маса та розміри пласких віброгрохотів менші;

– висока продуктивність на м² поверхні, що просіває, пов'язана з активною фазою підкидання матеріалу та участю всієї поверхні просіювання в роботі.

Недоліки [11, 12, 13]:

– низька ефективність використання вимушальної сили, що стає суттєвим у великих грохотах з великою масою робочого органу, що коливається;
– можливість створення високопродуктивної машини з високими значеннями параметрів коливань обмежується довговічністю підшипників;
– геометрична вісь валу здійснює коливання, описуючи циліндричну поверхню в просторі, що несприятливо позначається на процесі сортування та роботі клинопасової передачі;
– залежність амплітуди коливань грохоту від навантаження на нього;
– різке збільшення амплітуди короба при пуску і, особливо, зупинці, що потребує встановлення спеціальних фундаментів;
– близько 30% поверхні сит, що просіває, використовується не повністю, що призводить до нераціонального зносу.

Розглянемо переваги та недоліки горизонтальних самобалансних грохотів (з прямолінійними коливаннями).

Переваги [11, 12, 13]:

– добре компонуються для сортування та вимагають меншої висоти промислових приміщень;
– можуть використовувати явище самосинхронізації, що дозволяє відмовитися від жорстких кінематичних зв'язків (зубчастих зачеплень), спрощуючи конструкцію та покращуючи умови змащення;
– приводи можуть бути рознесені на значні відстані.

Недоліки [11, 12, 13]:

– складність конструкції;

- загальний недолік для всіх інерційних грохотів – залежність амплітуди коливань від навантаження;
- не завжди забезпечується надійна та безвідмовна робота приводу з точки зору стійкої та стабільної підтримки синхронного обертання та необхідного фазування віброзбудників;
- у разі несприятливої синхронізації (відхилення фаз обертання роторів) може досягати 30°, хоча не завжди суттєво позначається на технологічних показниках.

Зазначимо аереваги та недоліки грохотів з електромагнітним приводом (часто двомасні резонансні):

Переваги [11, 12, 13]:

- відсутність деталей, що труться;
- достатньо легкі пуск та регулювання амплітуди коливань;
- генерують вимушальну силу **направленої (прямолінійної) дії;
- амплітуда коливань легко регулюється зміною напруги живлення.

Недоліки [11, 12, 13]:

- неврівноваженість (якщо одномасні), що обмежує їх застосування в машинах невеликих розмірів;
- низька стабільність у резонансних або навколорезонансних двомасних системах через крутість амплітудно-частотної характеристики;
- амплітуда коливань може змінюватись через мимовільну зміну жорсткості пружних елементів або некеровану зміну маси матеріалу;
- частоти коливань, як правило, не регулюються;
- поступаються дебалансним віброзбудникам за габаритами та масою.

Розглянемо грохоти з двомасовими схеми.

Переваги [11, 12, 13]:

- дозволяють покращити віброізоляцію, що особливо важливо для машин з електромагнітним приводом;
- підвищують врівноваженість;

- дають можливість використовувати резонансний або навколорезонансний режим коливань і покращити використання вимушальної сили (тобто підвищити коефіцієнт посилення);
- можуть використовуватися як додатковий робочий орган або допоміжний вібруючий пристрій;

Недоліки [11, 12, 13]:

- низька стабільність при роботі в резонансному або навколорезонансному режимі;
- складність конструкції та розрахунку, особливо в частині забезпечення працездатності пружних елементів та виключення паразитних резонансних коливань;
- внесення другої маси часто незначно впливає збільшення маси і габаритів всієї установки.

Розглянемо грохоти з тримасними схеми віброзбудників.

Переваги [11, 12, 13]:

- можуть забезпечити значне підвищення стабільності при одночасному збереженні врівноваженості та високої ефективності використання примусової сили, особливо у міжрезонансному режимі.

Недоліки [11, 12, 13]:

- значне ускладнення пружної системи;
- збільшення непродуктивних енерговитрат;
- вкрай рідко реалізуються на практиці через складність конструювання та розрахунку.

Розглянуті існуючі конструкції грохотів, незважаючи на надійність і простоту, не повною мірою задовольняють потребам сучасного виробництва. Залишаються відкритими питання підвищення ефективності процесу грохочення, поліпшення якості одержуваних сипких матеріалів і зниження енергоємності сучасних гуркотів [10].

Аналіз показує, що кожна схема інерційних грохотів має свої специфічні сфери ефективного застосування. Лінійні грохоти доцільні для сухих, добре

просіюваних матеріалів, кругові — для важких і вологих, а еліптичні — для універсальних умов. Разом з тим, конічні грохоти, незважаючи на значний потенціал підвищення ефективності грохочення, залишаються недостатньо вивченими та розповсюдженими через відсутність науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору їхніх конструктивних і режимних параметрів [10].

Спостерігається тенденція використання принципу складного динамічного збудження сипких матеріалів, що розвивається, а також додаткового перемішування матеріалу при русі по ситу для значного підвищення ефективності та якості грохочення [10].

У зв'язку з цим існує потреба в розробці нових конструкцій віброгрохотів з додатковими збуджуючими елементами, що дозволяють збільшити ефективність процесу грохочення за рахунок динамічного впливу. Такі рішення спрямовані на підвищення продуктивності, зниження енерго- та металомісткості, зменшення засмічливості поверхонь, що просівають, і поліпшення якості продукції. Пропоновані рішення включають створення теоретичних основ розрахунку, математичних моделей та експериментальну апробацію дослідних зразків [10].

1.2. Аналіз умов роботи інерційних грохотів

Ефективність роботи інерційних грохотів значною мірою залежить не лише від їхньої конструкції та кінематичних параметрів, але й від фізико-механічних властивостей перероблюваних матеріалів. Умови експлуатації грохотів у гірничо-збагачувальному виробництві характеризуються високим різноманіттям сипких матеріалів, кожен з яких має унікальні властивості, що впливають на процес грохочення. Тому для обґрунтованого вибору параметрів грохотів необхідно детально аналізувати характеристики матеріалів, що підлягають просіюванню [6, 9, 14].

Процеси грохочення, зокрема з використанням вібраційних грохотів, широко застосовуються в різних галузях промисловості, оскільки майже 95% сипучої сировини, що видобувається і переробляється, піддається поділу по

крупності. Від досконалості процесу грохочення залежить собівартість і якість продукції [11, 12, 13].

Вібраційні грохоти, включаючи інерційні, широко використовуються в гірнічій, будівельній, металургійній, хімічній, харчовій та медичній галузях [11, 12, 13].

У гірничо-рудній промисловості грохочення використовують для класифікації матеріалів за фракціями перед дробленням, промивання матеріалу перед збагаченням у важких середовищах та подальшого відмивання суспензій, зневоднення продуктів збагачення [11, 12, 13].

У гірничо-хімічній, вугільній промисловості та при виробництві будівельних матеріалів для аналогічних цілей, а також для поділу готового продукту (вугілля, щебеню, гравійно-піщаних мас) на кондиційні товарні класи перед відправкою споживачам [11, 12, 13].

У металургійній промисловості для видалення некондиційної дрібній фракії з сирих окотишів до і після випалу, а також з агломерату після спікання. Перед доменною плавкою всі сировинні матеріали піддаються контрольному гуркоту видалення дрібниці [11, 12, 13].

При підготовці тонкоподрібненої сировини до подальшого пресування та спікання в абразивному, вогнетривкому, керамічному, електродному та інших виробництвах, заснованих на порошковій технології, а також для поділу тонкоподрібненої твердої фази рудних пульп перед збагачувальними операціями [11, 12, 13].

До числа найпоширеніших матеріалів, які обробляються на інерційних грохотах, належать [11, 12, 13]:

- рудні матеріали (залізні, мідні, марганцеві, поліметалічні руди);
- нерудні корисні копалини (бурий і кам’яний вугілля, боксити, фосфорити);
- будівельні матеріали (щебінь, гравій, пісок, вторинний будівельний утфіл);
- промислові відходи (шлаки, зола, шахтна порода);
- вторинна сировина (перероблений бетон, скло, пластмаси).

Кожен із цих матеріалів має різний гранулометричний склад, щільність, вологість, ступінь абразивності та інші властивості, що безпосередньо впливають на продуктивність і довговічність грохота [11, 12, 13].

Основні характеристики матеріалів, що впливають на процес грохочення [6]:

1. Гранулометричний склад (крупність) вихідного матеріалу. Наявність "важких" зерен, крупність яких становить від 0,8 до 1 діаметра отвору, значно ускладнює грохочення. Частинки, крупність яких дещо більше граничної, можуть забивати отвори сита, що негативно позначається на результатах поділу. Дрібнозернисті матеріали (менше 0,5-1 мм) особливо складно ефективно розділяти, для них пропонується тонкошарове грохочення.
2. Щільність насипного матеріалу. Грохоти поділяються за насипною щільністю матеріалу для грохочення на легкі (до 1,4 т/м^3), середні (до 1,8 т/м^3) та важкі (до 2,8 т/м^3) типи. Поділ сумішей матеріалів різної щільності показав, що параметри процесу для кожного компонента близькі до значень, характерних для поділу кожного компонента окремо.
3. Вологість та липкість матеріалу. Вологі сипучі матеріали, особливо з підвищеним вмістом глинистих включень, можуть призводити до залипання сит та зниження живого перерізу. Арфоподібні сітки завдяки схильності до самоочищення практично не замазуються зволоженою дрібницею та шламами. * Проблеми зчеплення вологих глин можуть бути подолані за допомогою спеціальних струнних сит.
4. Абразивність. Визначає зносостійкість матеріалу поверхні, що просіває, що впливає на термін служби сита.
5. Форма частинок. Наявність пластинчастої та голчастої (лещадної) форми зерен у щебені погіршує зручність укладання сумішей, провокує зайву витрату цементу, а також впливає на міцність і середню щільність бетону. Відсів ліщадних зерен є важливим завданням, яке вирішується використанням сит із щілиноподібними отворами. Потрапляння в

подрешетный продукт великих зерен плоскої (ліщадної) форми є характерним для всіх щілинних поверхонь, що просівають.

6. Пилоутворюваність (зміст дрібних фракцій). Високий вміст дрібних фракцій може призводити до засмічення верхнього класу сипучого матеріалу. У процесах фракціонування порошкоподібних матеріалів однією з цілей є отримання знепилених продуктів. У повітряному потоці має місце утворення агломератів частинок у результаті затягування дрібниці у "тінь" крупних частинок. Для особливо дрібних порошків (мікронної крупності) характерне утворення агломератів через розвинену поверхню та електростатичні заряди, що ускладнює якісний поділ.
7. Температура матеріалу. Грохоти для гарячих матеріалів вимагають врахування термічних впливів та спеціальних конструктивних рішень, наприклад, водяного охолодження електродвигуна. * Вибір конструкційних матеріалів і напруг, що допускаються, повинен враховувати високу або низьку температуру.
8. Коефіцієнт тертя та кут природного укосу. Ці параметри визначають рухомість матеріалу по робочій поверхні. Високий коефіцієнт тертя і великий кут природного укосу (наприклад, у глинистих матеріалів) ускладнюють транспортування матеріалу, що вимагає збільшення кута нахилу або амплітуди коливань. Навпаки, матеріали з низьким тертям (наприклад, сухий пісок) можуть надто швидко рухатися, що зменшує час контакту з ситом і погіршує якість розділення.
9. Хімічна агресивність. Деякі матеріали (наприклад, шахтні води, продукти збагачення сульфідних руд) мають агресивне хімічне середовище, що призводить до корозії металевих елементів грохота. У таких випадках застосовують корозійностійкі покриття або матеріали (нержавіюча сталь, полімерні композити).

Ці фактори, пов'язані як з конструкцією грохоту, так і з характеристиками матеріалу, що сортується, мають великий вплив на продуктивність вібраційних грохотів.

Умови роботи інерційних грохотів є складними і багатофакторними, оскільки визначаються не лише конструктивними особливостями обладнання, але й різноманіттям фізико-механічних властивостей перероблюваних матеріалів. Ефективність грохочення безпосередньо залежить від гранулометричного складу, вологості, липкості, абразивності, щільності та інших характеристик сипкої маси. Саме тому при проектуванні та налагодженні грохотів, зокрема конічних, необхідно враховувати ці параметри для забезпечення стабільної роботи, мінімізації простоїв та підвищення загальної ефективності технологічного процесу.

1.3. Аналіз методів розрахунку параметрів грохотів

Розрахунок параметрів інерційних грохотів є важливим етапом проектування та оптимізації процесу грохочення. Від правильного вибору конструктивних і режимних параметрів залежать продуктивність, ефективність розділення, енерговитрати та термін служби обладнання. На сьогодні існує ряд науково обґрунтованих та практично апробованих методик розрахунку грохотів, які базуються на теоретичних моделях руху матеріалу, емпіричних залежностях і експериментальних даних. У цьому підрозділі розглянуто основні підходи до визначення ключових параметрів грохочувального обладнання, зокрема показників ефективності, амплітуди, частоти коливань, кута нахилу сита та площі робочої поверхні [6, 10, 14].

Аналіз методів розрахунку грохотів передбачає вивчення відомих методик для визначення показників ефективності грохочення, розрахунку динамічних параметрів, таких як частота та амплітуда коливань, залежно від продуктивності, крупності матеріалу, кута нахилу сита та інших параметрів.

Незважаючи на значну кількість досліджень у цій галузі, на сьогодні відсутня загальноприйнята теорія грохочення, яка б повно та завершено описувала процеси, що відбуваються під час сортування сипучих матеріалів [6, 7, 8, 10, 14].

1. Ефективність грохочення оцінюється за кількома показниками, найпоширенішими з яких є коефіцієнт ефективності грохочення η, що визначається за формулою Рамма або Герцмана [7, 8, 11, 12, 13]:

$$\eta = \frac{E}{E_{\max}} \cdot 100\% \tag{1.1}$$

де E — фактична вихідна маса підсітного продукту, що пройшла крізь сито; E_{max} — максимально можлива кількість підсітного продукту в завантаженому матеріалі.

або [7, 8, 11, 12, 13]:

$$\eta = \frac{q \cdot (\beta - \alpha)}{p \cdot (100 - \alpha)} \cdot 100\% \tag{1.2}$$

де: q — вихід підсітного продукту, %; β — вміст класу підсітного продукту в підсітному продукті, %; α — вміст цього ж класу в надсітному продукті, %; p — вміст класу підсітного продукту в вихідному матеріалі, %.

Цей показник дозволяє оцінити, наскільки повно відбулося розділення за заданим класом крупності.

2. Розрахунок площі робочої поверхні сита за стандартними методиками (наприклад, за В.Н. Кожушко, В.Я. Борисенком, або рекомендаціями ВНДІСтройдормаш), площа сита визначається за формулою [7, 8, 11, 12, 13]:

$$F = \frac{Q}{q_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4} \tag{1.3}$$

де: F — площа сита, м²; Q — продуктивність грохота, т/год; q_0 — питома продуктивність на 1 м² сита (емпіричний показник, залежить від матеріалу та крупності); K_1 = 0,7-1,0 — коефіцієнт впливу вологості; K_2 — коефіцієнт крупності (менший для дрібнозернистих матеріалів); K_3 — коефіцієнт форми частинок (кулясті — 1,0, пластинчасті — 0,7); K_4 = 0,8-1,0 — коефіцієнт нерівномірності подачі.

Цей підхід широко використовується для плоских грохотів, але потребує корекції при застосуванні до конічних грохотів через інший характер руху матеріалу.

3. Визначення частоти та амплітуди коливань. Частота (n , хв$^{-1}$) і амплітуда (А , мм) коливань є ключовими кінематичними параметрами, що забезпечують інтенсивність просіювання і транспортування матеріалу. За класичною методикою (на основі теорії А.С. Константінова, В.Н. Кожушка), оптимальна амплітуда вибирається в межах [7, 8, 11, 12, 13]:

$$A = (0{,}15 \div 0{,}4) \cdot d_{отв}, \tag{1.4}$$

де $d_{отв}$ — розмір отвору сита, мм.

Частота обертання віброзбудника пов'язана з критичною частотою, при якій частинки матеріалу відриваються від поверхні [7, 8, 11, 12, 13]:

$$n = \frac{30}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot k}{A}} \tag{1.5}$$

де: g — прискорення вільного падіння, м/с²; k = 3-6 — коефіцієнт динамічної дії; А — амплітуда, м.

На практиці частота коливань інерційних грохотів становить 700–1500 об/хв, а амплітуда — 2–8 мм, залежно від класу грохочення (грубе, середнє, дрібне) [7, 8, 11, 12, 13].

Для важкопросіюваних матеріалів застосовують високочастотні грохоти (1500–3000 об/хв) з малою амплітудою (1–3 мм), що забезпечує інтенсивне просіювання без перевантаження конструкції.

4. Визначення кута нахилу робочої поверхні. Кут нахилу сита α впливає на швидкість руху матеріалу та час його перебування на ситі. Для лінійних грохотів кут нахилу зазвичай становить 10°–25°. Чим більший кут, тим вища продуктивність, але нижча точність грохочення [7, 8, 11, 12, 13].

Для кругових грохотів кут нахилу менший — 5°–10°, оскільки транспортування матеріалу забезпечується ексцентриковим рухом.

У конічних грохотах кут нахилу визначається кутом конусності, який може змінюватися від 15° до 60°. Оптимальне значення підбирається з урахуванням балансу між радіальним розтіканням матеріалу і часом контакту з ситом.

5. Методи розрахунку для конічних грохотів

Особливістю конічних грохотів є радіальний рух матеріалу від центру до периферії під дією відцентрових сил. Це вимагає використання спеціалізованих моделей.

Один із підходів, запропонований у дослідженнях О.І. Лур'є та інших, базується на рівнянні руху частинки по конічній поверхні [7, 8, 11, 12, 13]:

$$m \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} = m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin\varphi - m \cdot g \cdot \cos\varphi \cdot \mu - m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin\varphi \quad (1.6)$$

де: r — радіальна координата частинки; ω — кутова швидкість обертання; φ — кут конусності; μ — коефіцієнт тертя.

Ця модель дозволяє визначити оптимальні значення ω , A , φ для забезпечення стабільного руху матеріалу без застою або надмірного викиду.

Крім того, для конічних грохотів пропонується модифікована формула продуктивності [7, 8, 11, 12, 13]:

$$Q = k \cdot \pi \cdot \left(R^2 - r_0^2\right) \cdot h \cdot \rho \cdot \upsilon_r \quad (1.7)$$

де: R — зовнішній радіус конуса; r_0 — внутрішній радіус (центральний отвір); h — висота шару матеріалу; ρ — насипна щільність; v_r — радіальна швидкість руху матеріалу.

Існуючі методи розрахунку грохотів дозволяють визначати основні параметри обладнання — площу сита, амплітуду, частоту, кут нахилу — з урахуванням продуктивності, крупності матеріалу та його фізико-механічних властивостей. Проте більшість методик розроблені для плоских грохотів і не повністю враховують специфіку роботи конічних грохотів, зокрема радіальний рух матеріалу, відцентрові сили та складну геометрію робочої поверхні. Це обумовлює необхідність розробки уточнених математичних моделей і експериментальних методик для обґрунтування раціональних параметрів конічних грохотів, що і є метою подальших досліджень у цій роботі.

1.4. Мета, об’єкт, предмет, завдання та методи дослідження

Мета роботи — підвищення ефективності процесу грохочення сипких матеріалів у гірничо-збагачувальному виробництві за рахунок наукового обґрунтування раціональних параметрів конічних грохотів шляхом аналізу впливу геометричних, кінематичних і технологічних чинників на якість фракціонування та продуктивність обладнання.

Об’єкт дослідження — процес грохочення сипких матеріалів на конічних грохотах з обертовим ситом і змушеними коливаннями робочої поверхні.

Предмет дослідження — режимні та конструктивні параметри конічних грохотів, зокрема: амплітуда та частота коливань, кут нахилу сита, частота обертання ексцентрикового механізму, а також властивості перероблюваного матеріалу (гранулометричний склад, коефіцієнт тертя).

Задачі дослідження:

1. Проаналізувати існуючі конструкції конічних грохотів та визначити їхні переваги та обмеження у застосуванні для розділення сипких матеріалів у гірничо-збагачувальному виробництві.
2. Розробити математичну модель руху частинок матеріалу по конічній поверхні сита з урахуванням кінематичних параметрів коливань та фізико-механічних властивостей матеріалу.
3. Встановити залежність ефективності грохочення від геометричних параметрів (кут конусності, діаметр основи, висота конуса) та режимних чинників (амплітуда, частота, кут нахилу).
4. Провести аналітичні дослідження конічного грохота для визначення впливу зміни параметрів на продуктивність і точність розділення.
5. За результатами моделювання та експериментів визначити сукупність раціональних параметрів, що забезпечують максимальну ефективність грохочення для типових сипких матеріалів гірничо-збагачувальних підприємств.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ КОНСТРУКЦІЇ КОНІЧНОГО ГРОХОТУ

2.1. Загальна методика досліджень

Заждя досягненя посталеної мети роботи планується проведення наступних досліджень.

На першому етапі планується провести аналіз шляхів удосконалення конструкції грохотів на основі літературно-патентного аналізу. Обираються та аналізуються моделі кончних грохотів, які можуть забезпечити підвищення ефективності просіювання матеріалу та продуктивності в цілому.

На наступному етапі розрбляється математична модель руху матреіалу ситом обраної конструкції грохоту. Метою такого аналітичного дослідження є визначення раціональних режимних параметрів обертання сита грохота.

Далі проводяться комплексні дослідження впливу різних чинниів на процес розділення матералу на ситгі грохота, а саме швидкості обертання сита, параметрів вібрації, кута нахилу сита.

На основі проведених дослідженя розробляються рекомендації щодо

2.2. Аналіз шляхів удосконалення інерційних грохотів

Винахід [1] відноситься до галузі збагачення корисних копалин.

Відомі конусні грхоти для поділу зернистих матеріалів, що включають корпус з конічним ситом, пристрій для завантаження, виконаний у вигляді гвинтоподібного патрубка і розвантажувальні пристрої.

Описуваний грохохіт відрізняється тим, що завантажувальний пристрій забезпечений кільцевим клапаном, що вертикально переміщається, розташованим в нижній його частині. Це підвищує ефективність поділу.

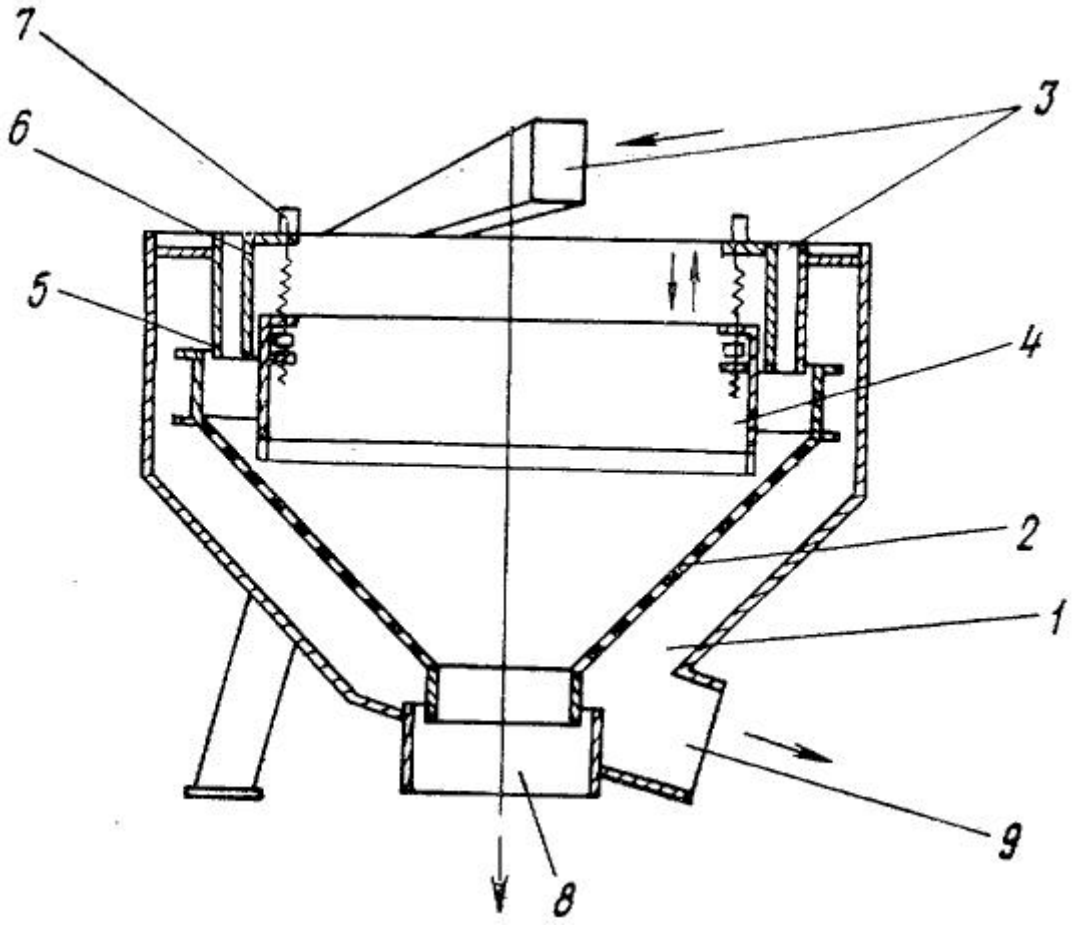


Рис 2.1 – До патенту [1]

Описуваний грохіт включає корпус 1, просіваючу поверхню 2, завантажувальний пристрій 3, виконаний у вигляді гвинтоподібного патрубка з вертикально перекидним клапаном 4. Гвинтоподібний патрубок з'єднаний з двома концентричними обичайками 5 до 6, скріпленими між собою. З внутрішньою обічайкою щільно сполучається по всьому периметру рухомий клапан, що переміщається підйомно-опускними механізмами 7. Поверхня, що просіває, може бути виконана сітчастою або з колосникових сит типу шпальтових, цільної або з окремих секцій. Розвантаження проводиться через розвантажувальні пристрої 8 та 9.

Переміщення кільцевого клапана створює можливість у процесі роботи, гуркоту задавати тільки інтенсивність завантаження вихідним матеріалом на сітчасту поверхню, але і розподіляти це навантаження рівномірним шаром одночасно по всьому периметру конуса.

Винахід [2] відноситься до засобів для збагачення корисних копалин, а саме до конічного грохоту, призначеним для підготовчого і тонкого грохочення сипучих матеріалів, і може бути використане у вугільній, гірничо-металургійній, будівельній та інших галузях поверхню, що просіває.

Мета винаходу - підвищення ефективності процесу поділу матеріалу за рахунок рівномірної подачі матеріалу в бункер, а також рівномірного розподілу матеріалу на поверхні, що просівають.

Зазначена мета досягається тим, що в конічному грохоті, що включає корпус, просіваючі поверхні конічної форми, звернені великими основами один до одного, розподільний пристрій, бункер, нижня частина якого виконана у вигляді усіченого конуса з тангенціально встановленим патрубком живлення, пристосування для регулювання потоку матеріалу з регулювальними гвинтами, пристосування для регулювання потоку матеріалу виконано у вигляді гнучкої спіралі, яка встановлена в розподільчому пристрої, при цьому спіраль шарнірно закріплена на утворюючій циліндричної частини розподільного пристрою в місці сполучення його по дотичній з патрубком живлення з можливістю настановного регулювання її кута закручування.

Конічний грохіт складається з тангенціально встановленого патрубка живлення 1 з торцевою щілиною 2 для подачі води, розподільного пристрою 3 з встановленим всередині нього пристосуванням для регулювання потоку матеріалу (гнучким відбійником) 4, з'єднаним з регулювальними гвинтами 5, завантажувального бункера 6 з гасниками швидкості 7, просіваючої поверхні верхнього 8 і нижнього 9 конусів, звернених великими основами один до одного, сопел 10, встановлених на кільцевому колекторі для оборотної води 11, бризкав 12, з'єднаних з кільцевим колектором для технічної води 15, і нижнього 16 конусів, жолобів для евакуації підгратного продукту 17 і 18, жолоби для надгратного продукту 19. Пристрій для регулювання потоку матеріалу (гнучкий відбійник) 4 являє собою стінку у вигляді спіралі, один кінець якої шарнірно закріплений на утворює циліндричної частини розподільного пристрою 3 в місці сполучення його по дотичній з патрубком живлення 1, а другий не закріплений, і

може бути виконано з еластичного матеріалу або з окремих секцій, шарнірно з'єднаних між собою.

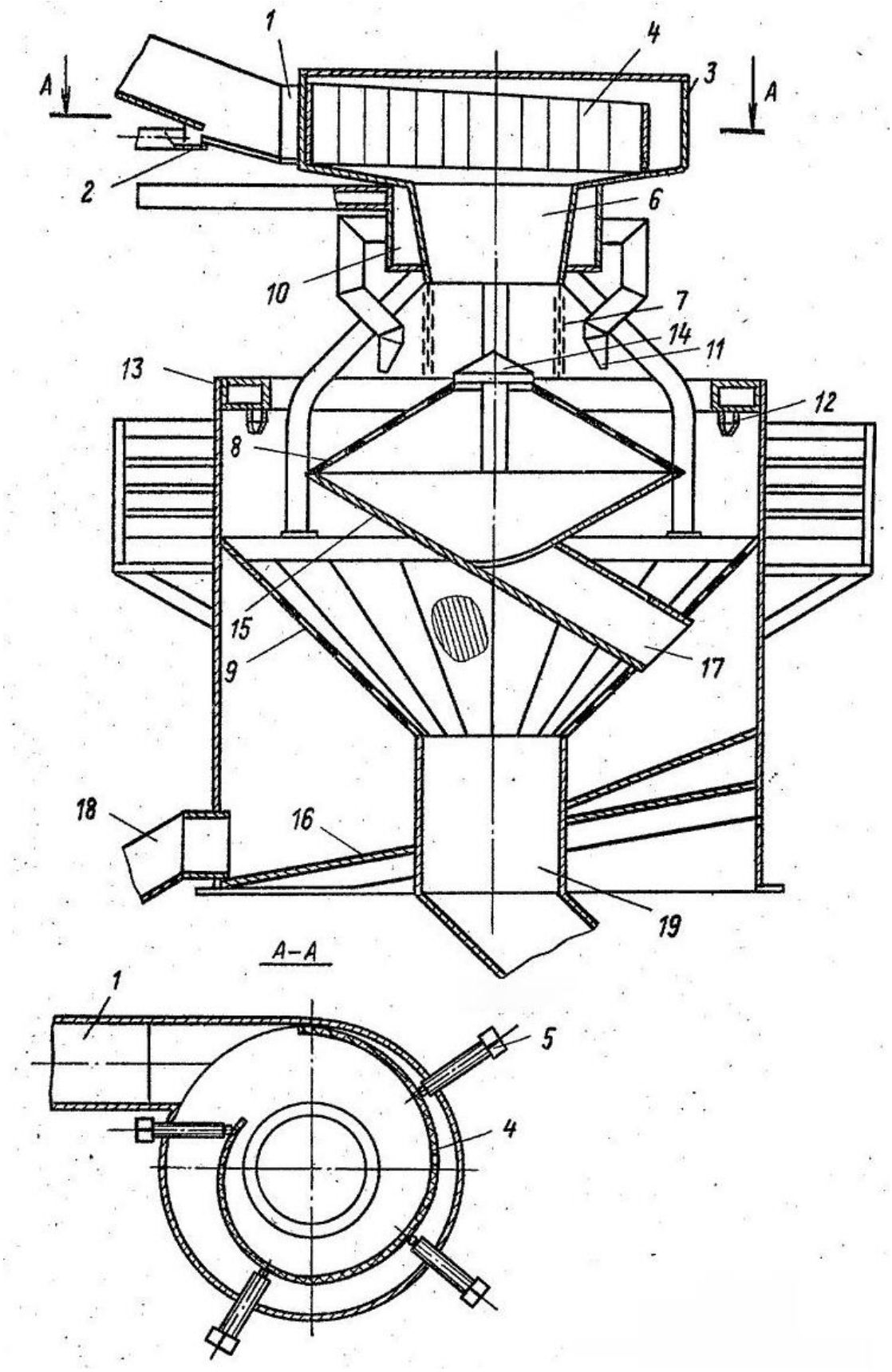


Рис 2.2 – До патенту [2]

Пристосування 4 встановлюється таким чином, що кривизна його поверхні збільшується по довжині, починаючи від місця шарнірного кріплення до стінки патрубка живлення 1, в результаті більшого зміщення кожного наступного ділянки пристосування 4 щодо циліндричної частини розподільника за допомогою регулювальних гвинтів 5. Бічна поверхня пристосування для регулювання потоку матеріалу (гнучкого відбійника) 4 з'єднана в декількох точках з регулювальними гвинтами 5, кожен з яких одним кінцем шарнірно з'єднаний з пристосуванням 4 і другим закріплений за допомогою різьбового з'єднання на частині циліндричної корпусу розподільного пристрою 3. Зміщення зазначеного пристосування здійснюється за рахунок повороту гвинтів.

Робота грохоту здійснюється в такий спосіб. Вихідний матеріал попередньо змочений водою, що подається з торцевої щілини 2, надходить по патрубку живлення 1 в розподільний пристрій 3, де рухається по його похилому кільцевому майданчику одночасно в поздовжньому і поперечному напрямках. При цьому відбувається розподіл матеріалу по периметру розвантажувального отвору бункера 6. Рівномірний розподіл матеріалу, що надходить в бункер, здійснюється шляхом зміщення регулювальних гвинтів 5 пристосування для регулювання потоку матеріалу (гнучкого відбійника) 4 до розвантажувального отвору бункера 6. При цьому по ходу руху матеріалу ширина потоку рівномірно зменшується на всіх ділянках кільцевого жолоба розподільного пристрою 3. Це дозволяє рівномірно зменшити ширину потоку по ходу руху і тим самим досягти рівномірного надходження матеріалу в бункер по всьому периметру його розвантажувального отвору 3 завантажувального бункера 6 змочений матеріал надходить на розподільний конус 14, розподіляється на ньому і рівномірним шаром направляється на поверхню, що просіває верхнього конуса. Під впливом струменів води, що випливають із сопел 10, розташованих по колу над поверхнею, що просіває верхнього конуса 8, відбувається поділ вихідного матеріалу на два продукти. Надрешітний продукт 1 верхнього конуса 8 надходить на колосникову поверхню, що просіває нижнього конуса 9, де здійснюється доведення надрещетного продукту за рахунок додаткового виділення зерен

розміром менше граничної крупності поділу, а також знешламлювання його і зневоднення. Знешламлювання надрещетного продукту здійснюється за рахунок подачі технічної води з бризків 12, розташованих по колу над початковою ділянкою сита нижнього конуса. Евакуація подрешетного продукту з піддону верхнього конуса 15 здійснюється за жолобом 17, та якщо з піддону нижнього конуса - по жолобу 18. Надрешітний продукт гидрогрохота видаляється по жолобу 19.

Виконання пристосування для регулювання потоку матеріалу у вигляді спіралі, встановленої в розподільному пристрої, а також шарнірне її закріплення на утворює циліндричної частини розподільного пристрою в місці сполучення його по дотичній з патрубком живлення з можливістю настановного регулювання її кута закручування дозволяє підвищити ефективність процесу поділу матеріалу.

Винахід [3] відноситься до техніки поділу сипких матеріалів по крупності і може бути використане у вугільній, хімічній, гірничо-рудній промисловості, промисловості будівельних матеріалів.

Мета винаходу - поліпшення якості процесу грохочення за рахунок збільшення довжини поверхні, що просіває без зміни габаритів короба

Пропонований гуркіт складається з короба 1 вибровозбудителя, виконаного у вигляді коливається у вертикальній площині рами 2, встановленої всередині короба 1 співвісно його вертикальної осі і ексцентрикових валів 3, на яких встановлена рама 1, секцій поверхні, що просіває 4, розвантажувальних пластин 5.

Короб забезпечений жолобами 6 і вікнами 7, розташованими між місцями кріплення секцій поверхні, що просіває 4 і розвантажувальних пластин 5. Ексцентриковий привід включає в себе двигун 8, клинопасову передачу 9 і тяги 10. Короб встановлений на віброізолюючих опорах 11.

Секції поверхні, що просіває 4 виконані з еластичного матеріалу і розташовані каскадно назустріч один одному так, що верхні їх кінці з'єднані з коробом 1, а нижні - з рамою 2.

Розвантажувальні пластини 5 також виконані з еластичного матеріалу, при цьому верхні кінці з'єднані з рамою 2.

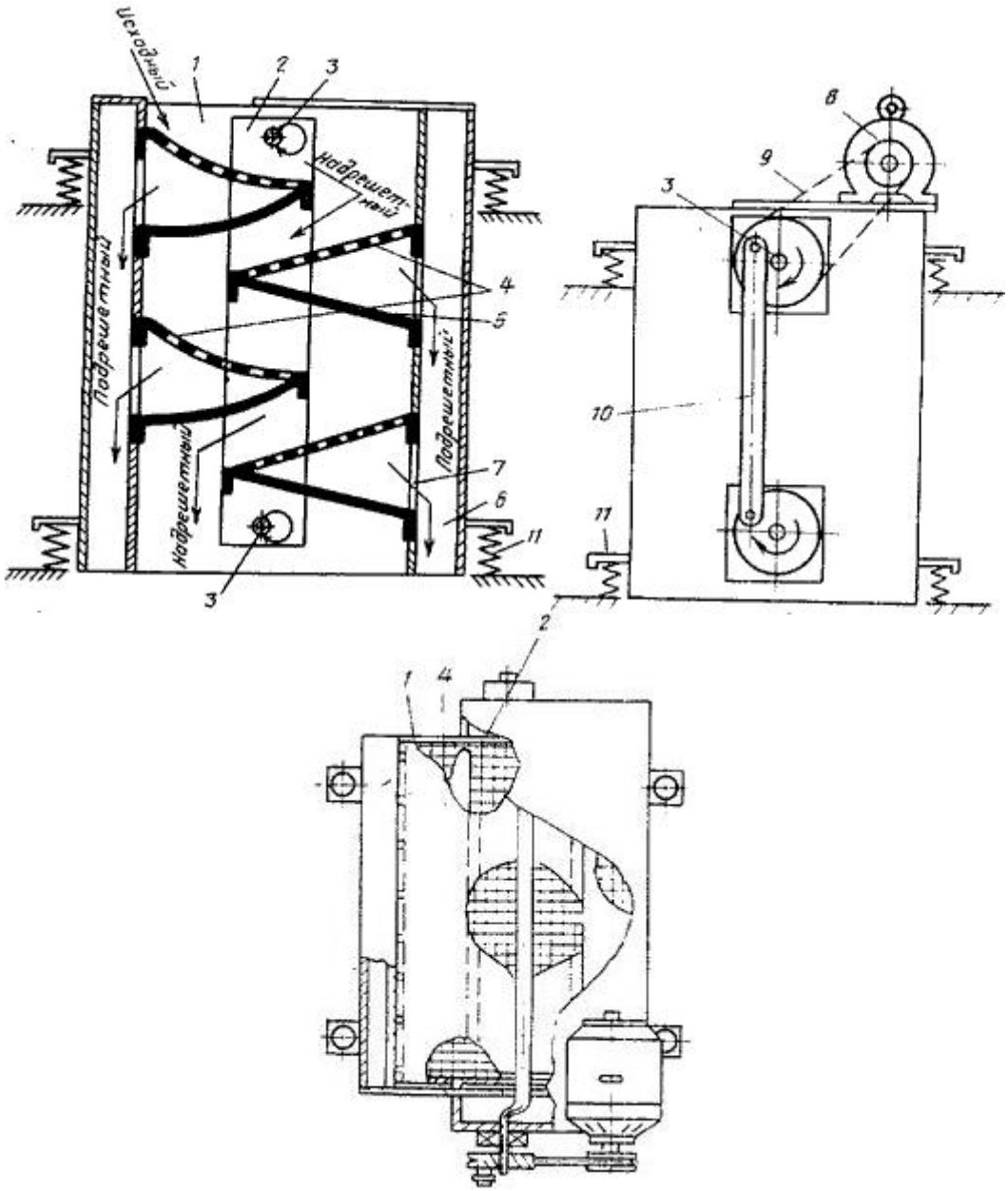
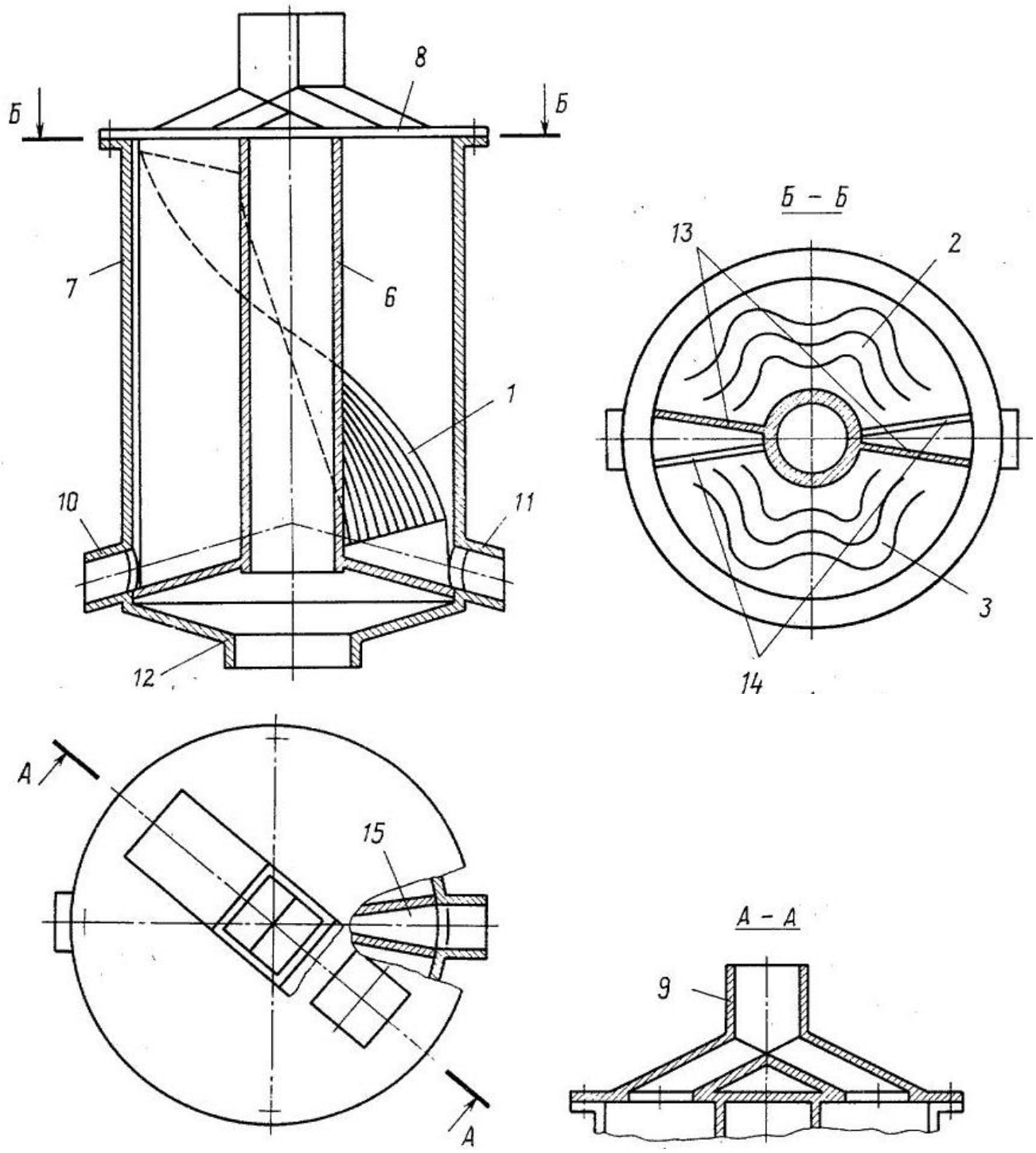


Рис 2.3 – До патенту [3]

Грохот працює наступним чином.

Двигун 8 через клинопасову передачу 9 і тяги 10 повідомляє ексцентриковим валам 3 синхронне синфазне в одному напрямку обертання. При цьому рама 2 здійснює кругові коливання. По черзі натягуються і провисають секції поверхні, що просіває 4 і встановлені під ними розвантажувальні пластини 5. Через отвори еластичного сита відбувається відсів подрешетного матеріалу, евакуацію якого через вікна 7 в жолоб 6 забезпечують розвантажувальні пластини 5. Розвантаження надрішетного матеріалу відбувається з нижньої поверхні.

Винахід [4] відноситься до техніки сортування зернистих матеріалів за крупністю і може бути використано у гірничій промисловості, промисловості нерудних будівельних матеріалів та інших галузях народного господарства. Мета винаходу - підвищення ефективності грохочення за рахунок збільшення траєкторії руху і ліквідації зон застою матеріалу, що просіюється.



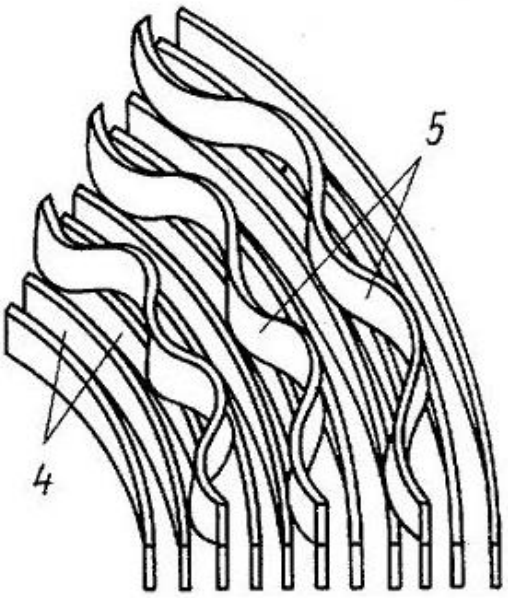


Рис 2.4 – До патенту [4]

Грохот працює наступним чином.

Матеріал, що підлягає розсіву, подається через завантажувальний пристрій 9 на ділянки 2 і 3 поверхні, що просіває. Під дією гравітаційної і відцентрової сил матеріал рухається поверхнею вниз, поділяючись при цьому на два продукти, надрешітний, який виводиться з патрубків 10 і 11, і підрешетний, який виводиться з патрубка 12.

Винахід [5] відноситься до пристроїв для поділу матеріалів крупно і може бути використане в гірській та інших галузях народного господарства. Метою винаходу є підвищення продуктивності та ефективності грохочення.

Грохіт містить короб 1 з конічним решетом 2. розташованим вершиною вниз, раму 3, віброзбудник 4 коливань, завантажувальний патрубок 5, розвантажувальний патрубок б, котки 7, привід обертання короба 1, очищувальне пристосування 8 і амортизатори 9. При цьому короб 2 котки 7 з рамою 3. Рама 3 встановлена на опорних амортизаторах 9 і призначена для передачі від віброзбудника 4 через котки 7 і 1 короб коливань решету 2.

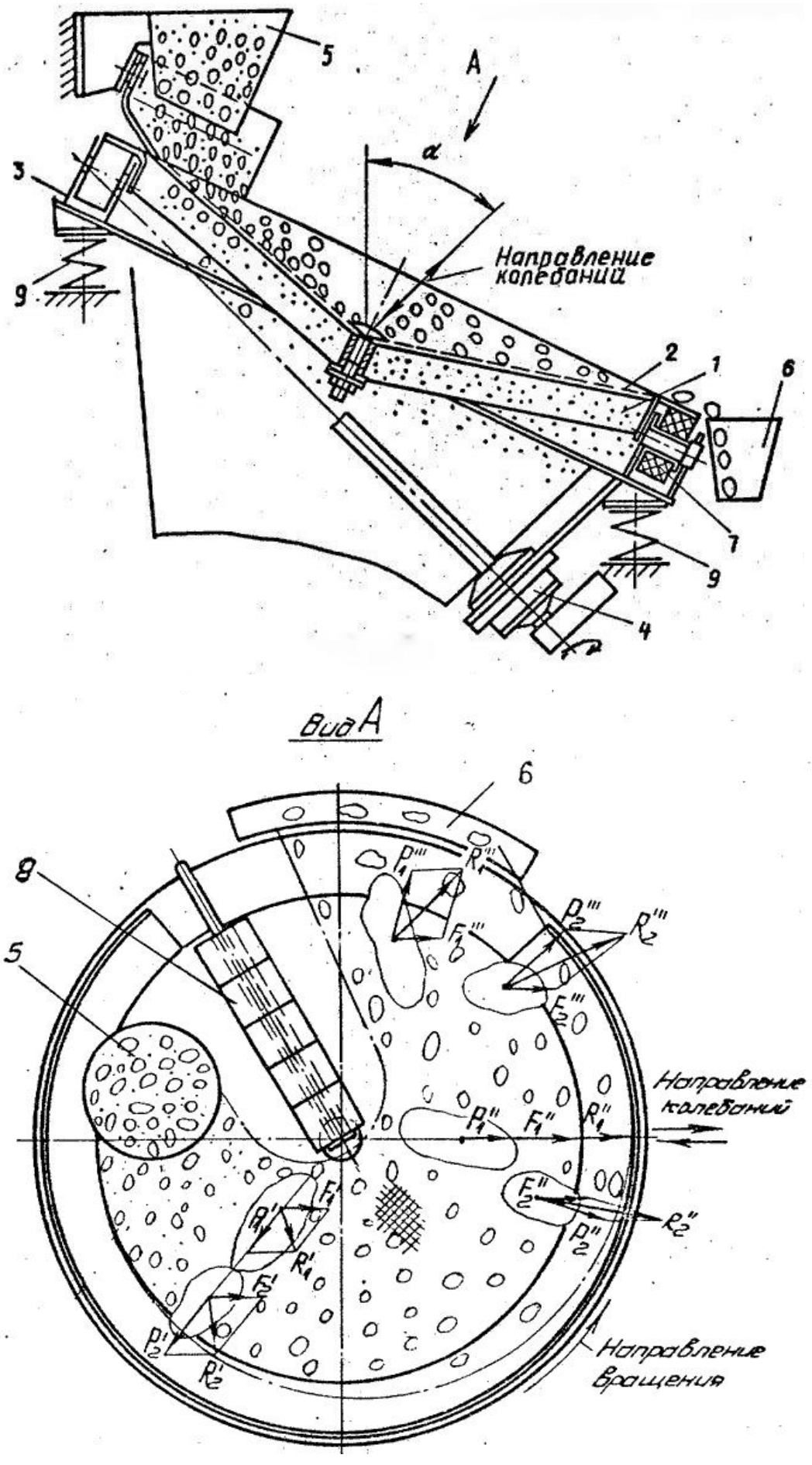


Рис 2.5 – До патенту [5]

Вісь обертання решета розташована 2 під кутом до вертикалі. Лінія дії примушує сили вибровозбудителя 4 також розташована під кутом у напрямку відхилення осі обертання решета 2. Завантажувальний патрубок 5 зміщений від осі обертання в бік, протилежний напряму її відхилення, і розташований над периферійною частиною решета 2. Очищаючий пристрій 8 встановлено на ділянці решета 2. вільному від гуркотливого матеріалу, перед завантажувальним патрубком 5, тобто. зміщено щодо нього у напрямку, протилежному напрямку обертання решета 2. Пристрій 8 виконано у вигляді гумового валика або йоржа, поздовжня вісь якого спрямована вздовж утворює конічної поверхні, що просіває. Очищувальне пристосування 8 призначене для додаткової (шляхом безпосереднього контакту) очищення решета 2.

Грохіт працює наступним чином.

Короб 1 здійснює складний рух: під дією віброзбудника 4, закріпленого на рамі 3, відчуває коливання під кутом до вертикалі, а від окремого приводу через котки 7 отримує обертання. Вихідний матеріал із завантажувального патрубка 5 надходить на решето 2. При цьому різні шматки матеріалу потрапляють на ділянки решета 2, видалені на різні відстані від центру короба.

Шматки матеріалу сприймають різні за величиною відцентрові сили інерції Рі і однакові за величиною та напрямом вібраційні зусилля Рі. Наявність останніх обумовлена напрямом коливань під кутом а, що створює можливість на матеріал з метою переміщення у напрямі сили Рі. Надрешітний продукт потрапляє в розвантажувальний патрубок 6.

Наведено три характерні положення сусідніх шматків на початку, середині та наприкінці шляху руху матеріалу. На схемі видно, що зусиль, що рівнодіють, змінюються в часі як за величиною, так і за напрямом. Гранична величина відцентрової сили інерції не обмежується будь-якими умовами та вибирається шляхом регулювання частоти обертання короба з умов найкращих результатів технологічного процесу.

Зазначені особливості конструкції забезпечують ефективне поділ шматків матеріалу та активне перемішування.

У результаті аналізу шляхів підвищення ефективності процесу грохочення сипких матеріалів у гірничо-збагачувальному виробництві було визначено перспективну конструкцію конічного обертового грохоту [5].

При детальному розгляді перспективної конструкції було визначено такі основні переваги та недоліки.

Переваги конструкції.

1. Підвищена ефективність за рахунок вібрації та колового руху сита та його формі та нахилу, має сприяти ефективному розділенню матеріалу та забезпечувати активне просіювання;
2. Наявність очищувальних пристосувань на поверхні сита слугує для запобігання забиванню (залипанню) сита матеріалом, що значно підвищує безперервність роботи;
3. Особливе розташування решета під кутом до вертикалі та протилежний напрямок обертання решета відносно завантажувального патрубка сприяють кращому переміщенню матеріалу.

Недоліки

1. Складність конструкції, яка повиння обертатися та вібрувати одночасно;
2. Очищувальний пристрій може як запобігати так і навпаки сприяти застряганню шматків матеріалу у решутці за певних умов.

Таким чином надалі потрібне провети детальне дослідження пропонованої конструкції з метою визначення її роботоспроможності та раціональних параметрів.

2.3. Математична модель руху зерен матеріалу на поверхні конусного сита

Метою аналітичного дослідження є визначення раціональних режимних параметрів обертання сита грохота.

Розглянемо схему сил, що діють на частинку на ситі конічного грохоту (рис 2.6):

- вага частинки G, Н, спрямована верникально униз:

$$G = m \cdot 9.8 = \frac{9.8 \cdot \rho}{6} \pi \left(\frac{d_x + d_y + d_z}{3} \right)^3 \quad (2.1)$$

де m – маса частинки, кг; d_x d_y d_z – розміри частинки у трьох взаємно перпендикулярних напрямах, м; ρ - щільність матеріалу частинки, кг/м^3.

- проекція ваги на вісь X’

$$G_{x'} = G \cdot \sin(\alpha) \quad (2.2)$$

- проекція ваги на вісь Y’

$$G_{Y'} = G \cdot \cos(\alpha) \quad (2.3)$$

- відцентрова сила $F_{вц}$, Н

$$F_{вц} = m \cdot \omega^2 \cdot r = m \cdot \left(\pi \cdot \frac{n}{30} \right)^2 \cdot r \quad (2.4)$$

де n – кількість обертів, об/хв; r – радіус розташування частинки від центру, м.

- проекція ваги на вісь $F_{вц\ x'}$

$$F_{вц\ x'} = F_{вц} \cdot \cos(\alpha) \quad (2.5)$$

- проекція ваги на вісь $F_{вц\ y'}$

$$F_{вц\ y'} = F_{вц} \cdot \sin(\alpha) \quad (2.6)$$

- сила реакції опори N, Н

$$N = F_{вц\ y'} + G_{Y'} \quad (2.7)$$

- сила тертя , Н

$$F_{TP} = N \cdot f \quad (2.8)$$

де f – коефіцієнт тертя між породю та сіткою

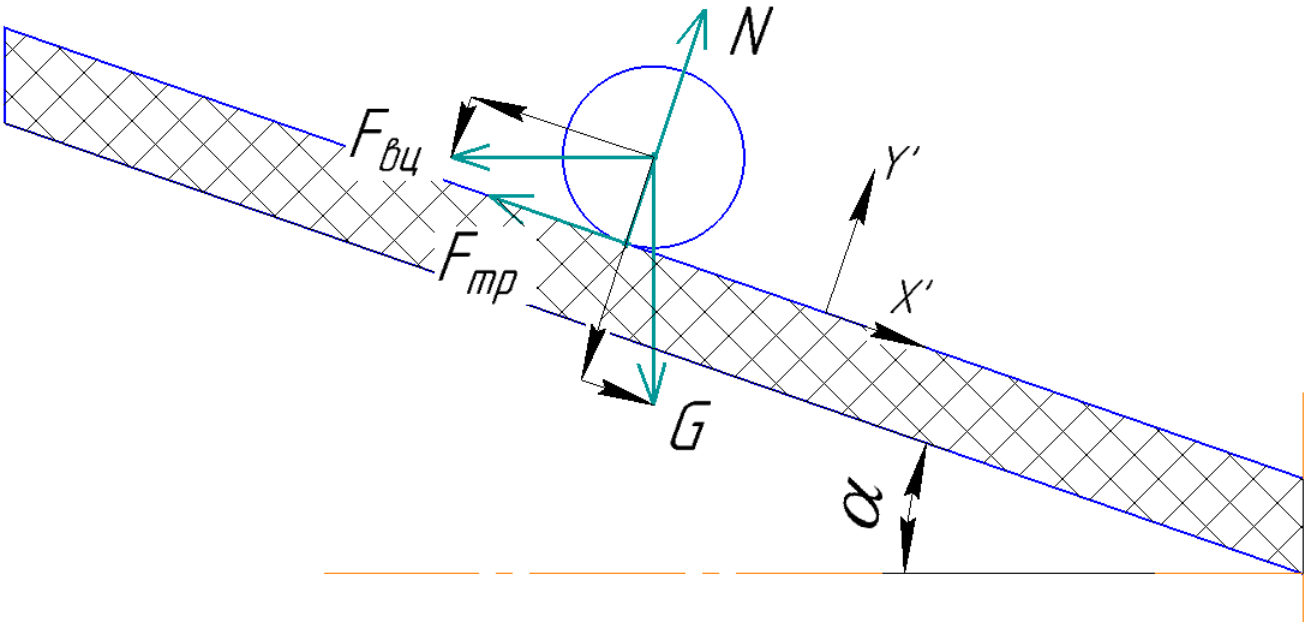


Рис 2.6 – Схема сил, що діють на частинку на ситі

Умова розвантаження часток під дією відцентрової сили

$$F_{вц\,x'} > G_{X'} + F_{тр} \tag{2.9}$$

Підставивши у цю нерівність (2.9) залежності (2.1-2.8), отримаємо

$$m \cdot \left(\pi \cdot \frac{n}{30}\right)^2 \cdot r \cdot \cos(\alpha) > 9.8 \cdot m \cdot \sin(\alpha) + \left(m \cdot \left(\pi \cdot \frac{n}{30}\right)^2 \cdot r \cdot \sin(\alpha) + m \cdot 9.8 \cdot \cos(\alpha)\right) \cdot f \tag{2.10}$$

Очевидно, що отриманий вираз (2.10) можна скоротити на m, тоді

$$\left(\pi \cdot \frac{n}{30}\right)^2 \cdot \frac{r}{9.8} > \frac{\sin(\alpha) + f \cdot \cos(\alpha)}{\cos(\alpha) - f \cdot \sin(\alpha)} \tag{2.11}$$

або

$$n^2 \cdot r > \frac{91{,}8}{\pi^2} \cdot \frac{\sin(\alpha) + f \cdot \cos(\alpha)}{\cos(\alpha) - f \cdot \sin(\alpha)} \tag{2.12}$$

З виразів (2.11) та (2.12) випливає, що рух частинок матеріалу по поверхні конічного грохоту не залежить від власної маси частинок. Найбільний вплив спричиняє саме кількість обертів за хвилину, трохи менший вплив – радіус розташування частинок на коловому ситі.

Графічно ця умова наведена на рис 2.7. Біла частина поверхні у клітинку – сила тяжіння вища за відцентрову і счастинки будуть скатуватися до центра

конусного сита, кольорова частина графіка – частинки будуть розвантажуватися під дією відцентрового зусилля.

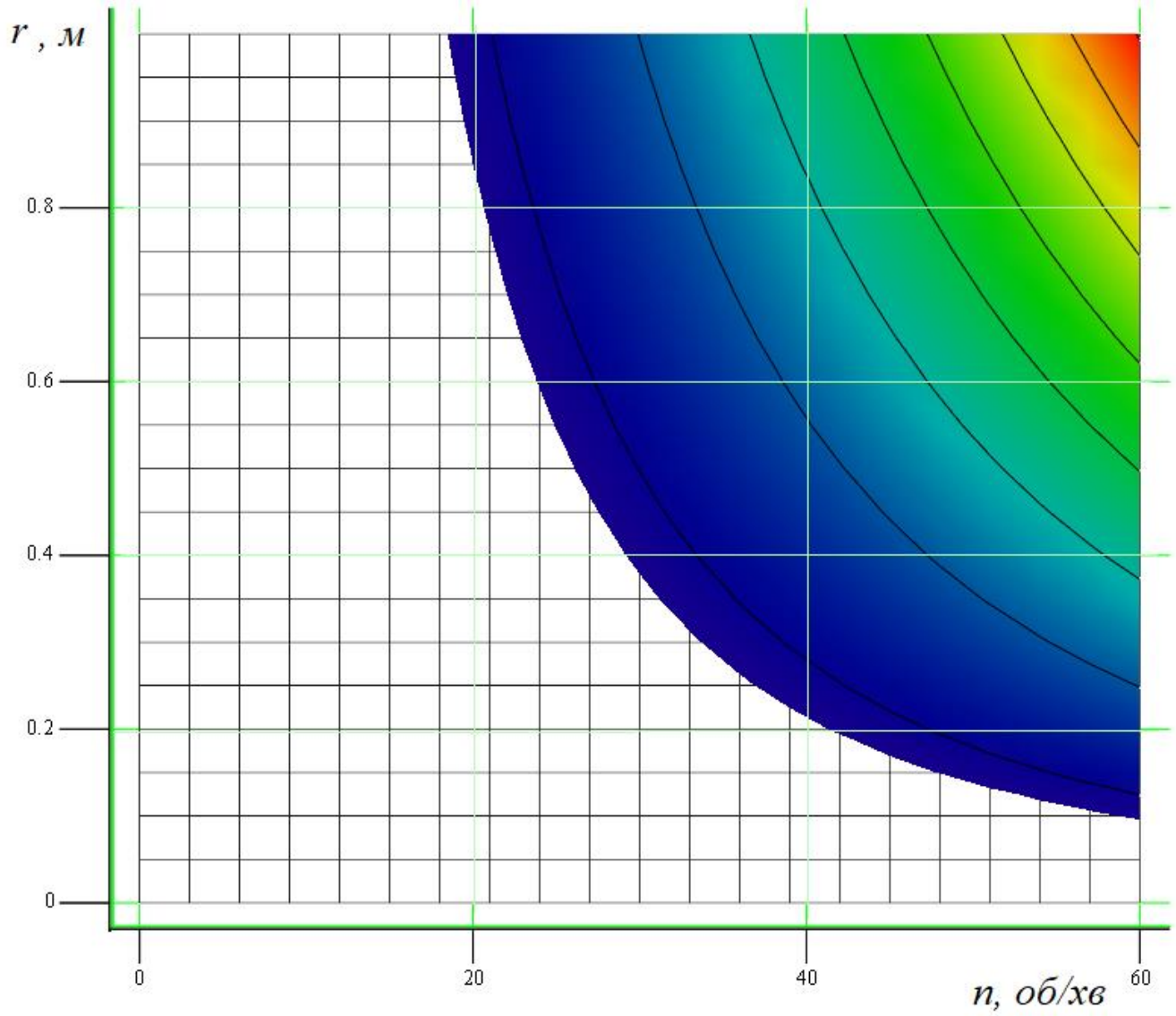


Рис 2.7 – Графічне відображення умови перевищення відцентрового зусилля перед силою тяжіння.

2.4. Методика комп’ютерного моделювання руху матеріалу конусним грохотом

Мета моделювання: визначення раціональних режимних параметрів грохотів з конусним обертовим вібруючим ситом.

Через складність фізичного процесу, моделювання, яке наведено у п. 2.3. досить спрощене та потребує уточненя.

2.4.1. Методика моделювання впливу швидкості обертання сита на рух матеріалу

Метою дослідження впливу швидкості оьбертання сита відносно горизонту є підтвердження математичної моделі руху зерен матеріалу поверхнею конусного сита та підтвердження умови перевищення відцентрового зусилля перед силою тяжіння, що діють на частики породи не залежно від їх маси.
Розрухункова модель наведена на рис 2.7.

Припущення дослідження:

1. Кут нахилу конусного сита до горизонту вважаємо 0 (сито розташовано горизонтально);
2. Вібрація відсутня.

Сталі чинники:

1. Щільність породи $\rho = 1600$ кг/м^3;
2. Діметр сита 2м;
3. Розтащування пристрою живлення - 0,4 м від центру обертання сита;
4. Кут конуса: 160 град;
5. Завантажувьна порода:
    - Подача: 36 т/год;
    - Форма частинок: Plyhedron;
    - Розмір частинок: 20 мм 60%, 100 мм 40%.

Варійовані чинники:

1. Кількість обертів сита, об/хв: 10, 35, 55.

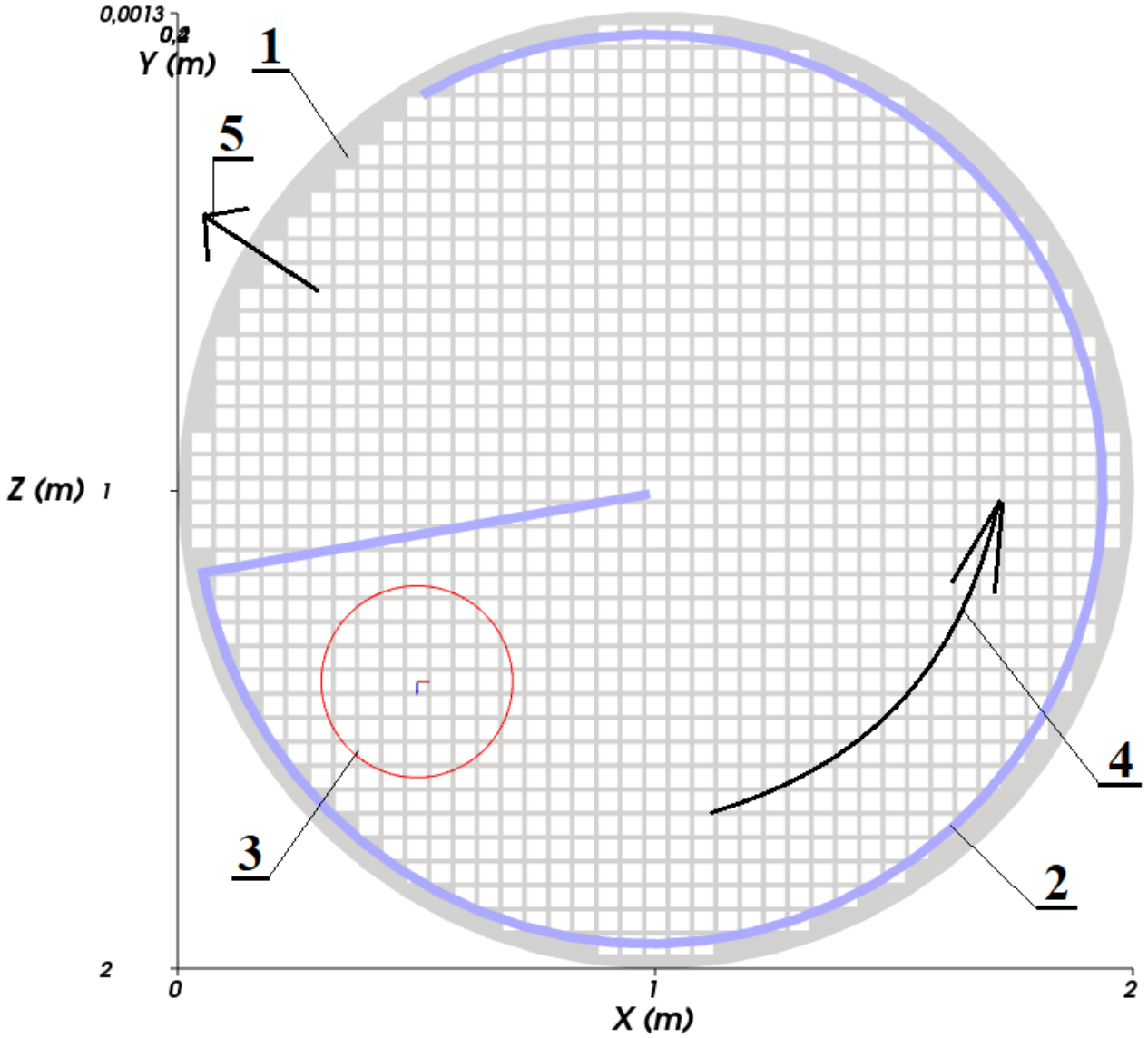
Функція відгуку:

1. Характер руху матеріалу на поверхні сита грохота;

2. Ефективність просіювання виражене у відсотках чи частках одиниці відношення маси подрешетного продукту до маси нижнього класу вихідному матеріалі, %:

$$E = \frac{m}{M} \cdot 100\% = \frac{\gamma \cdot b}{a} \cdot 100\%, \qquad (2.13)$$

де m - маса подрешітного продукту, г; M - маса нижнього класу у вихідному матеріалі; γ - вихід підрешітного продукту, %; b - зміст нижнього класу в подрешетном продукті, %; a - зміст нижнього класу у вихідному матеріалі, %.



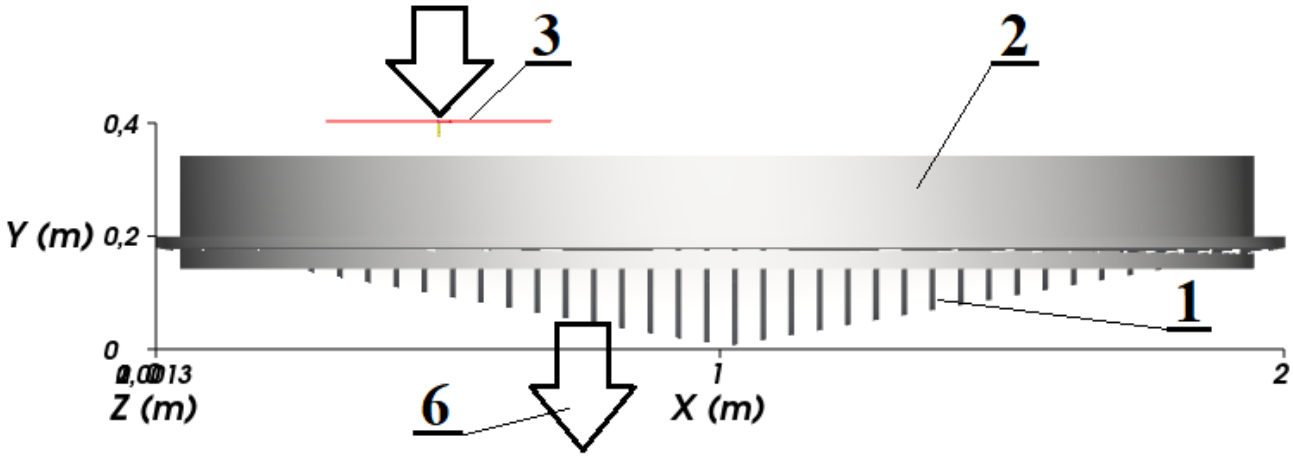


Рис 2.7 – Розрахункова модель: 1 – конічне сито; 2 - огорожа; 3 – зона завантаження матеріалу; 4 – напрям обертання сита; 5 – розвантаження грубого; 6 – розвантаження тонкого

Масова витрата у живленні тонкого класу, кг/с

$$Q_T = \frac{Q \cdot 1000}{3600} \cdot 0.6 = \frac{65 \cdot 1000}{3600} \cdot 0.6 = 10.83 \quad (2.14)$$

де 0,6 – вміть класц 20 мм (60%); Q =65 т/год - задана масова вирати у живленні,

Маса подрешітного продукту, кг

$$m_T = \sum_{i=0}^{200} m_i \quad (2.15)$$

де m_i – маса розвантаженого тонкого класу за результатами дослідження при різній кількості оберів сита.

Ефекивність грохочення, %

$$\varepsilon = \frac{m_T}{Q_T \cdot t} \cdot 100\% \quad (2.16)$$

де t – час моделювання, с.

2.4.2. Методика моделювання впливу спрямування вектору збурюючого зусилля на рух матеріалу

Метою дослідження впливу спрямування вектору збурюючого зусилля на рух матеріалу є визначення найкращого з точки зору збільшення ефективності просіювання режиму вібрації.

Як зазначають джерела [7, 8, 12, 13] найкращий поділ матеріалу відбувається при амплітуді коливань (5…8 мм) і низкій частоті 11-15 Гц.

Припущення дослідження:

1. Кут нахилу конусного сита до горизонту вважаємо 0 (сито розташовано горизонтально);

Сталі чинники:

1. Щільність породи $\rho = 1600$ кг/м^3;
2. Діметр сита 2м;
3. Розтащування пристрою живлення - 0,4 м від центру обертання сита;
4. Кут конуса: 160 град;
5. Завантажувьна порода:
    - Подача: 36 т/год;
    - Форма частинок: Plyhedron;
    - Розмір частинок: 20 мм 60%, 100 мм 40%.
6. Кількість обертів сита, об/хв: 65.

Варійовані чинники:

1. Спрямування вектору збурюючого зусилля: у горизонтальній площині, у вертикальній площині, просторові

Функція відгуку:

1. Характер руху матеріалу на поверхні сита грохота;
2. Ефективність просіювання виражена у відсотках чи частках одиниці відношення маси подрешетного продукту до маси нижнього класу вихідному матеріалі, %.

Модель така ж, як у п. 2.4.1.

2.4.3. Методика моделювання впливу нахилу сита відносно горизонту на рух матеріалу

Метою дослідження впливу впливу нахилу сита відносно горизонту на рух матеріалу є визначення найкращого з точки зору збільшення ефективності просіювання нахилу сита за відсутності вібрації та з її урахуванням.

Сталі чинники:

1. Щільність породи $\rho = 1600$ кг/м^3;
2. Діметр сита 2м;
3. Розтащування пристрою живлення - 0,4 м від центру обертання сита;
4. Кут конуса: 160 град;
5. Завантажувьна порода:
    - Подача: 36 т/год;
    - Форма частинок: Plyhedron;
    - Розмір частинок: 20 мм 60%, 100 мм 40%.
    - Параметри вібрації: амплітуда 2 мм, частота 15 Гц.

Варійовані чинники:

1. Кількість обертів сита, об/хв: 35 (без вібрації), 55 (з вібрацією).
2. Кут нахилу сита, град: 5, 10, 15;

Функція відгуку:

1. Характер руху матеріалу на поверхні сита грохота;
2. Ефективність просіювання виражена у відсотках чи частках одиниці відношення маси подрешетного продукту до маси нижнього класу вихідному матеріалі, %.

Модель така ж, як у п. 2.4.1.

Висновки до розділу 2

1. Вперше розроблено умову розвантаження грубих фракції на конічному грохоті з горизонтально розташованим ситом без додаткової вібрації, якаа враховує дію ваги, відцентрової сили, реакції опори та сили тертя і показує, що рух частинок по поверхні конічного грохота не залежить від маси зерен, а визначається переважно швидкістю обертання сита та радіусом розташування частинки.
2. Графічний аналіз умови показав наявність двох характерних зон: у зоні, де сила тяжіння перевищує відцентрову, частинки переміщуються до центра сита; у зоні, де переважає відцентрова сила, відбувається розвантаження матеріалу. Таким чином, забезпечення перевищення відцентрової сили над силою тяжіння є умовою стабільного розділення матеріалу.
3. Методика комп’ютерного моделювання дозволила дослідити вплив основних режимних параметрів: швидкості обертання сита, спрямування вектора збурюючого зусилля, нахилу сита відносно горизонту, що дає змогу оцінити ефективність просіювання при різних умовах роботи грохота.
4. Встановлено, що зі збільшенням швидкості обертання підвищується частка відцентрової дії, що покращує рух матеріалу та збільшує ефективність просіювання до оптимального значення.
5. Спрямування вібраційного впливу у горизонтальній площині є найбільш ефективним, оскільки воно активізує переміщення матеріалу по ситу, запобігає злипанню та утворенню застійних зон.
6. Вплив нахилу сита показав, що при кутах 10–15° ефективність просіювання істотно підвищується, особливо при наявності вібрацій. Оптимальним режимом є поєднання нахилу сита 15° із горизонтальною вібрацією амплітудою 2 мм і частотою 15 Гц.
7. Проведені дослідження підтверджують адекватність розробленої математичної моделі та демонструють її практичну цінність для

визначення раціональних режимів роботи конічних грохотів, спрямованих на підвищення ефективності просіювання та стабільності процесу розділення матеріалу.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КОНІЧНОГО ГРОХОТУ

3.1. Дослідження впливу швидкості обертання сита на рух матеріалу

У результаті проведеного дослідження за розробленою методикою отримано результати, на ведені на рис 3.1-3.10.

З рис 3.1 очевидно, що грохот не працює – розвантаження тонкого крізьсито відбувається, а грубе не розвантажується і скочується ло центру конуса сита, як і передбачувалося за розробленою умово (2.12). Більша частина тонких зерен проходить крізь сито у місці завантаження і тільки невелика частиа рухається далі вздовж сита.

При збільшенні швидкості обертання до 35 об/хв видно (рис 3.2), що матеріал починає краще розподілятися ситом і починає відбуватися розвантаження грубого, хоча частина краних шамтків все ще скочуються до центру сита. Тонкі фракції проходять крізь сито трохи далі віж місця завантаження. Така картина підтверджується пропонованою умовою.

За максимальних досліджуваних обертах 55 об/хв прогнозовано видно (рис 3.3), що дія відцентрової сили максимальна і більша маса матеріалу відразу після завантаження притискається до периметру сита і погано просіюється. Тонкі фракції розвантажуються з грубими, не встигаючи пройти крізь сито. Така картина повністю підтверджується пропонованою умовою.

Таким чином, пропонована умова (2.12) повністю працездантна і добре прогнозує поведінку матеріалу на конічному ситі грохота.

Результати визначення ефективності просіювання за розробленою методикою наведено у табл 3.1

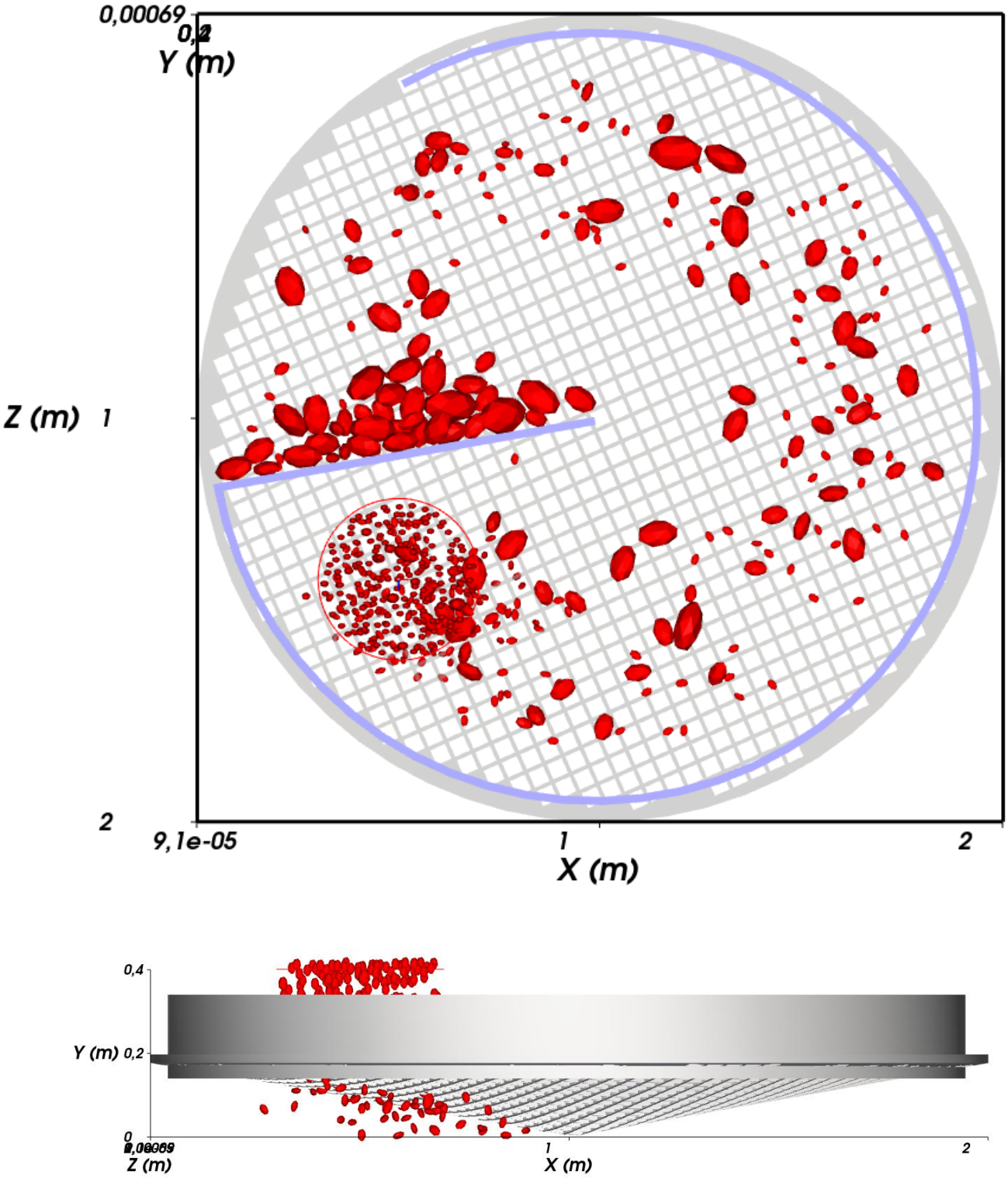


Рис 3.1 – Швидкість обертання 10 об/хв

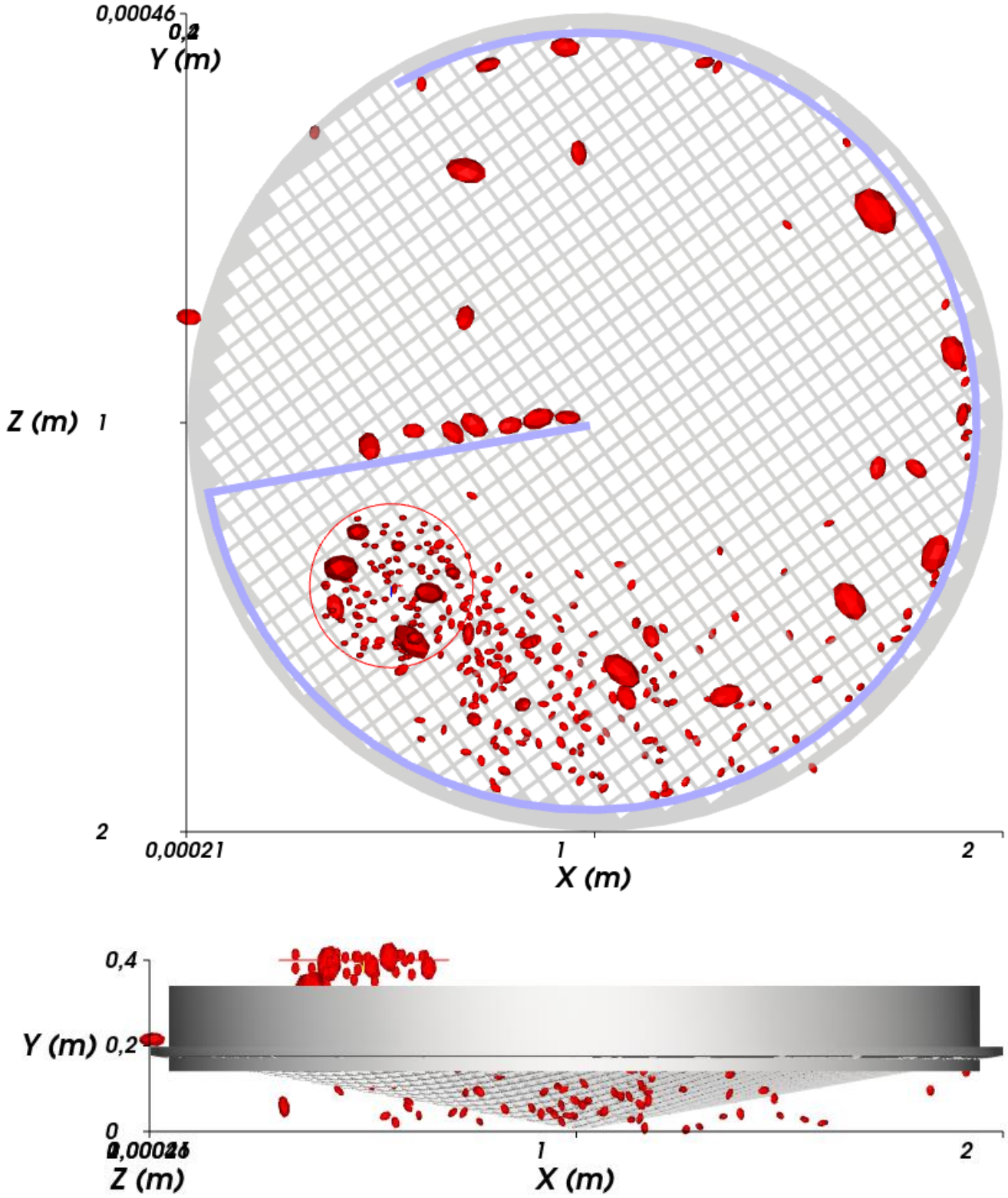


Рис 3.2 - Швидкість обертання 35 об/хв

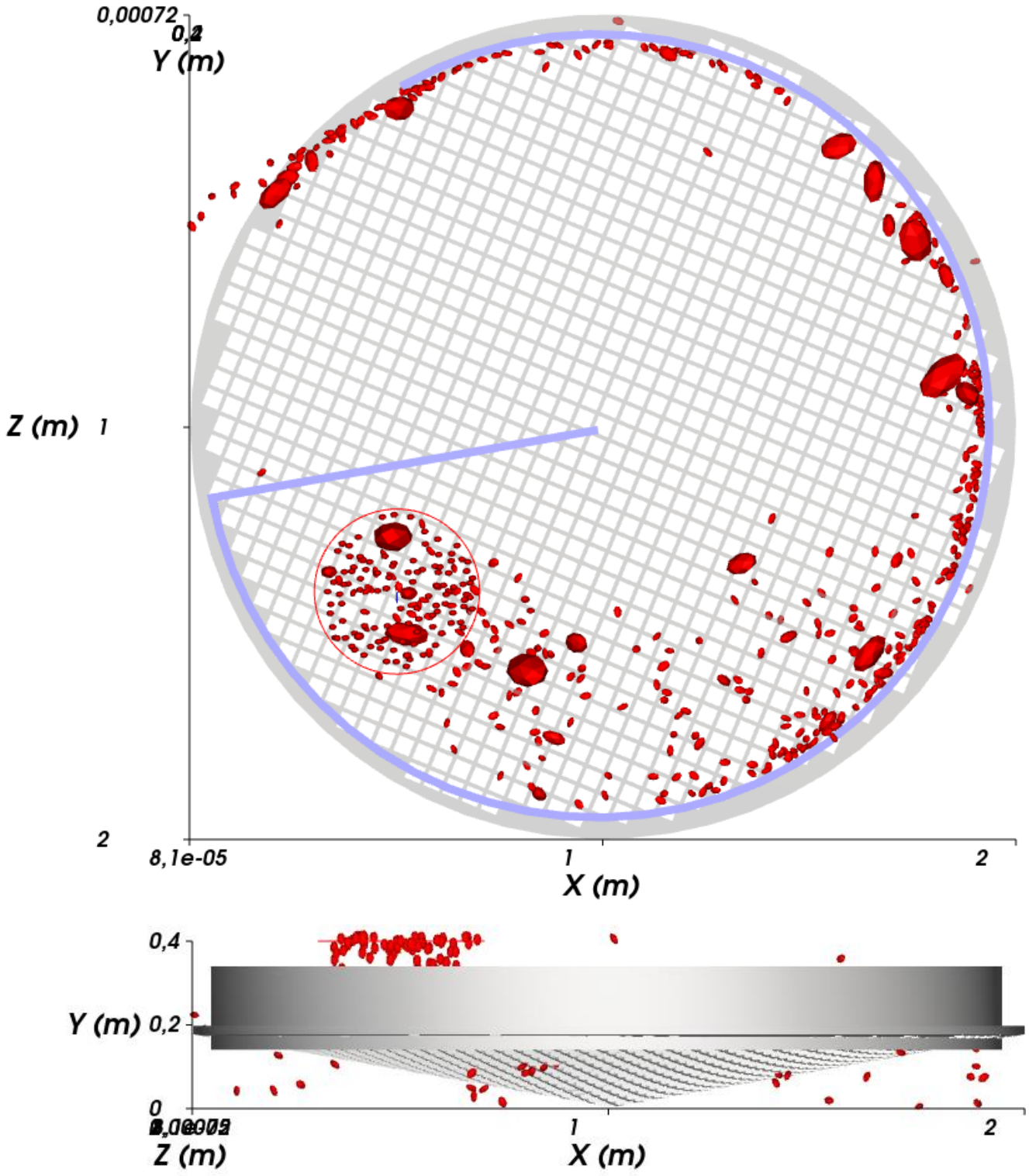


Рис 3.3 - Швидкість обертання 55 об/хв

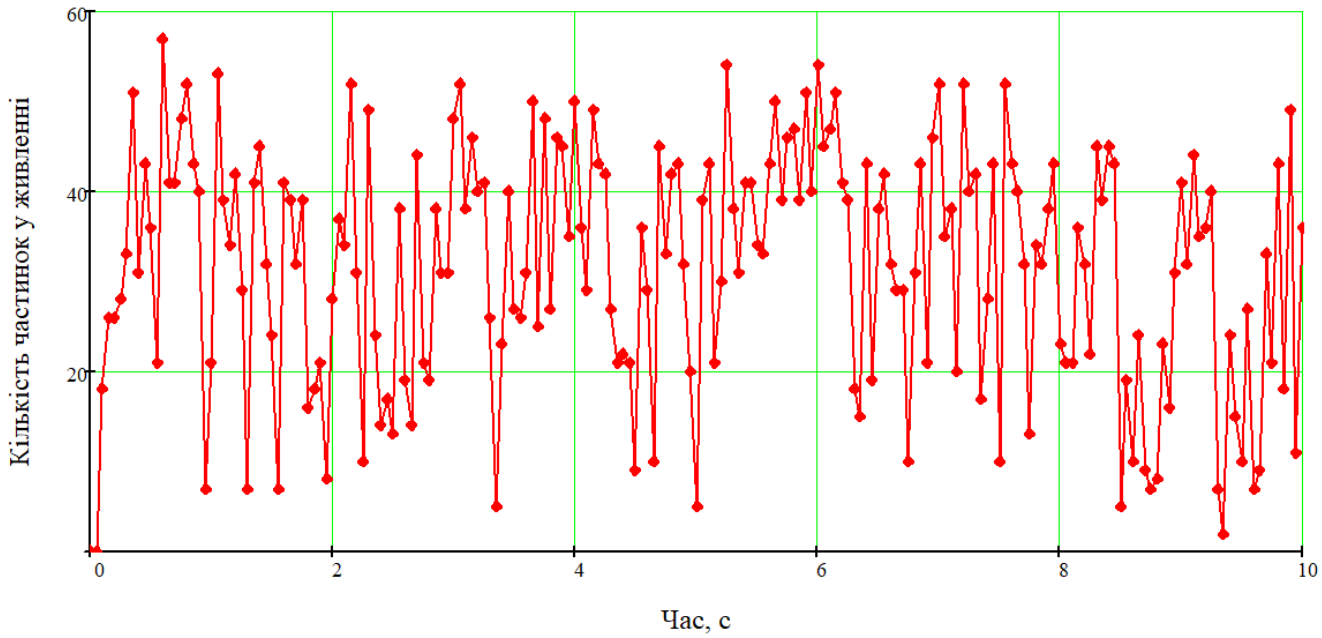


Рис 3.4 – Кількість частинок у живленні

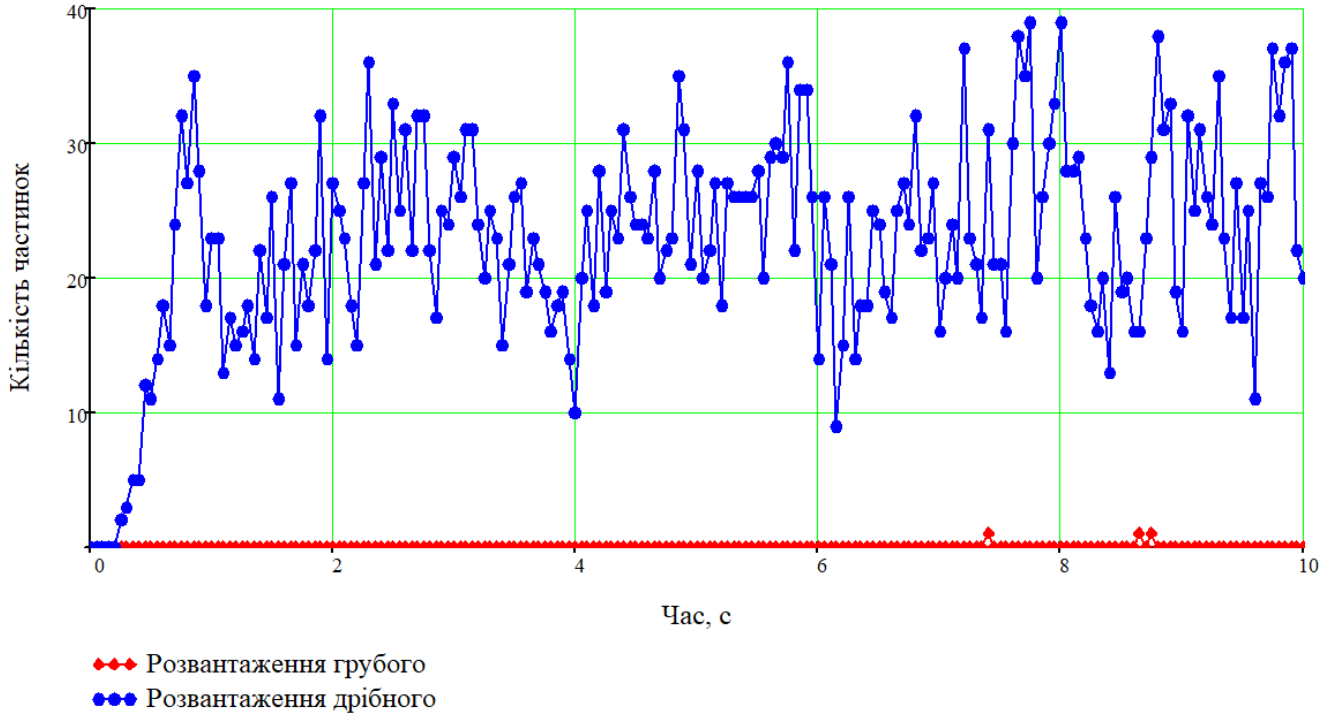


Рис 3.5 – Кількість частинок у розвантаженні при 10 об/хв

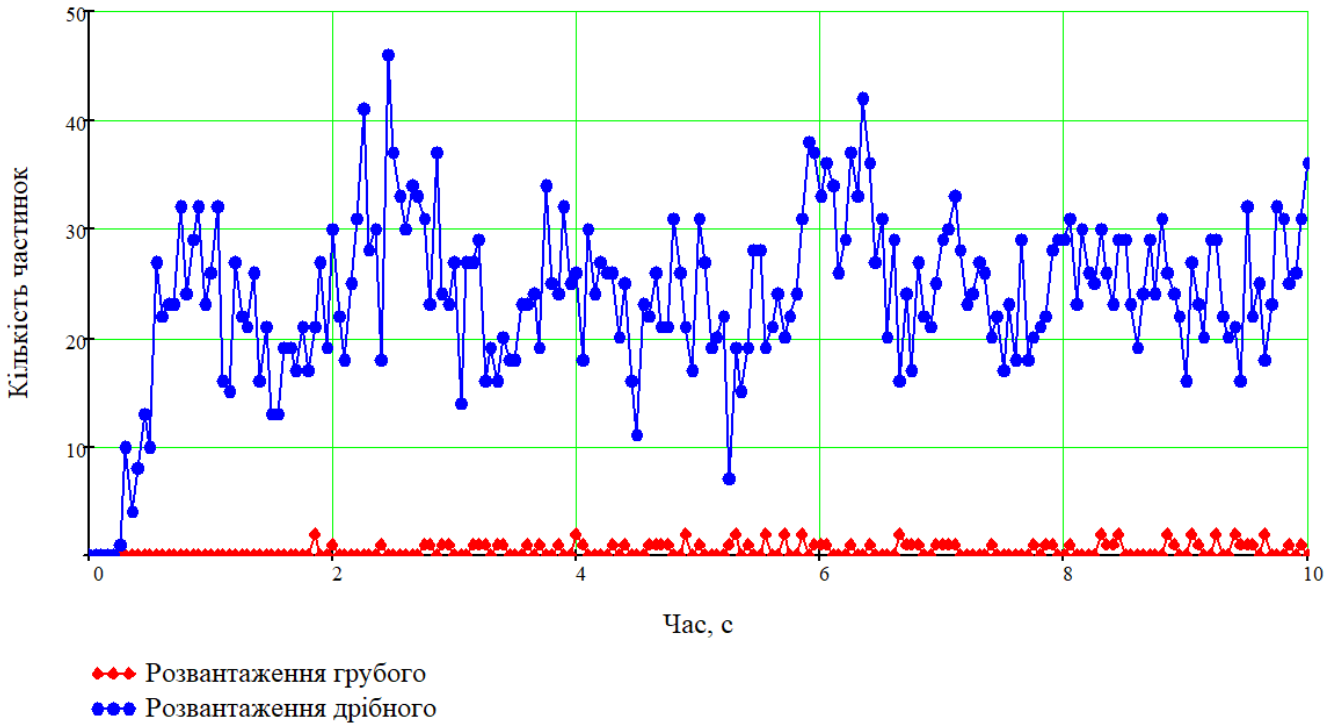


Рис 3.6 – Кількість частинок у розвантаженні при 35 об/хв

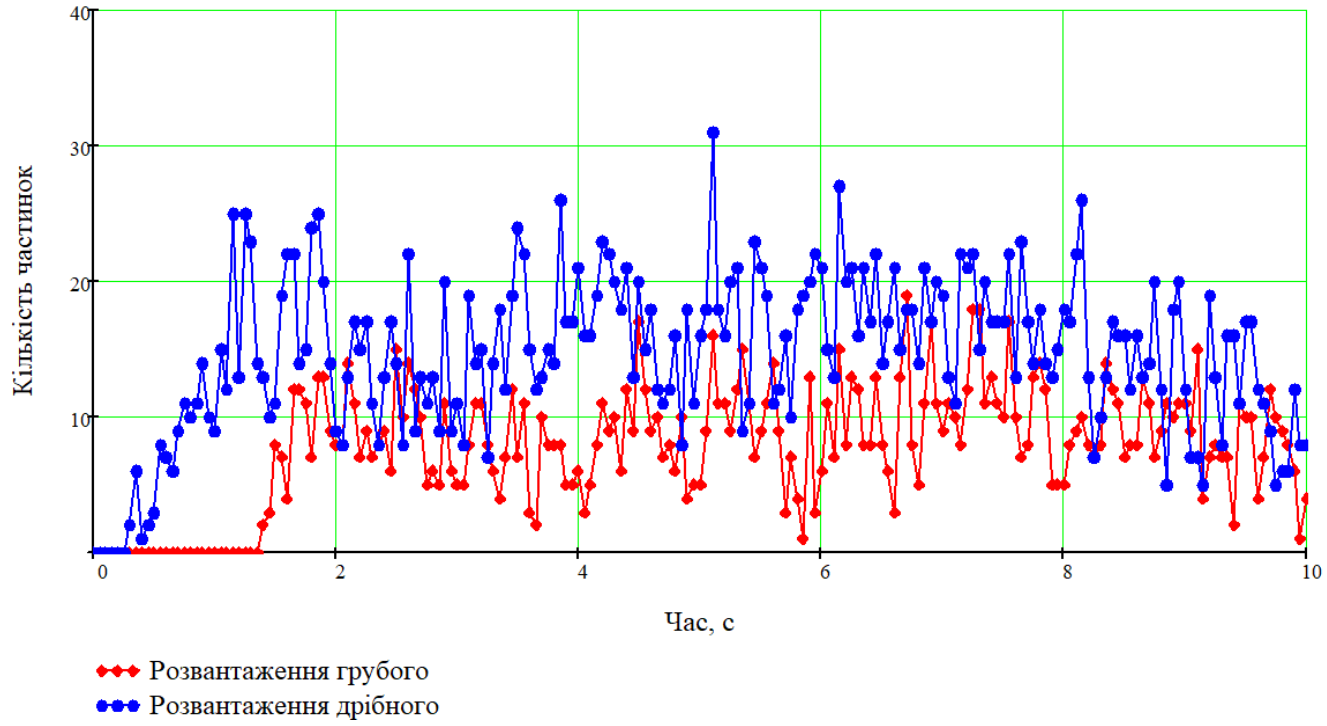


Рис 3.7 – Кількість частинок у розвантаженні при 55 об/хв

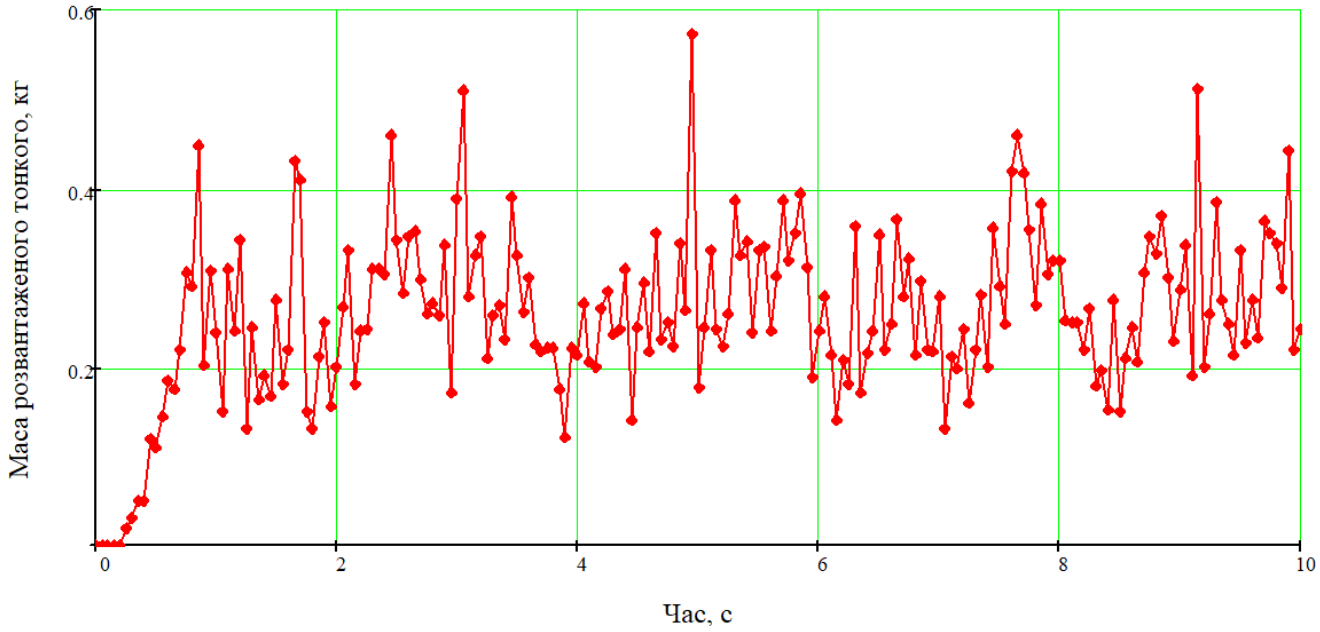


Рис 3.8 – Маса тонкого у розвантаженні при 10 об/хв

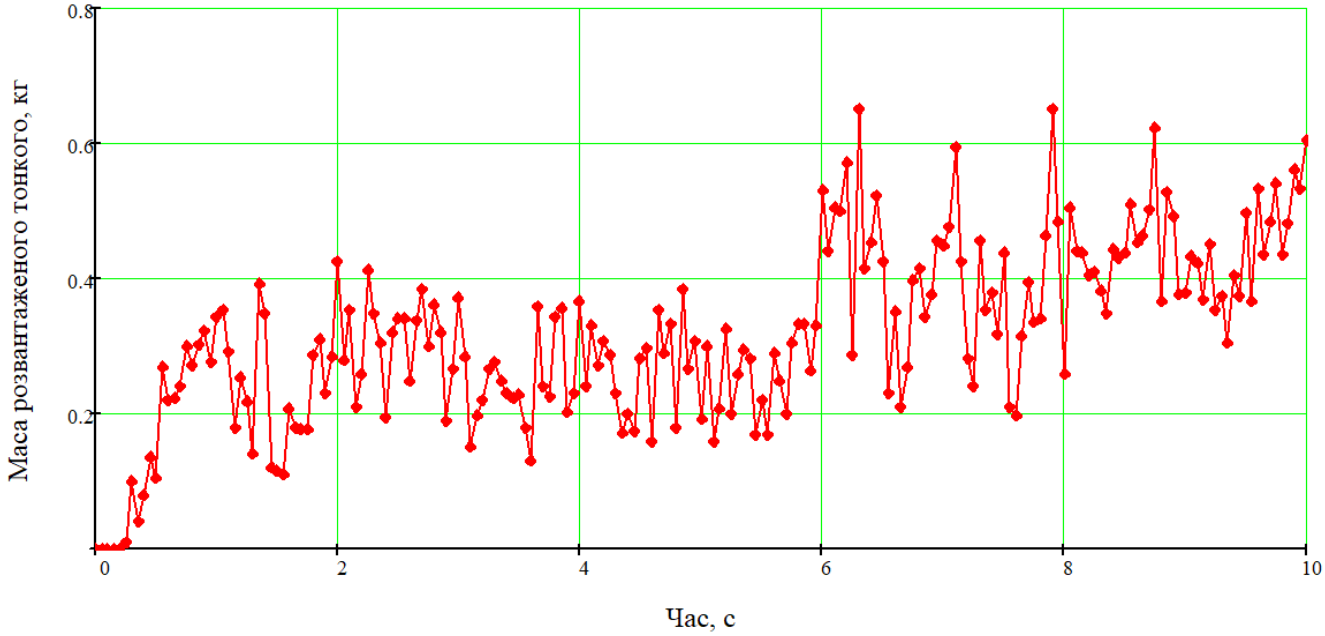


Рис 3.9 – Маса тонкого у розвантаженні при 35 об/хв

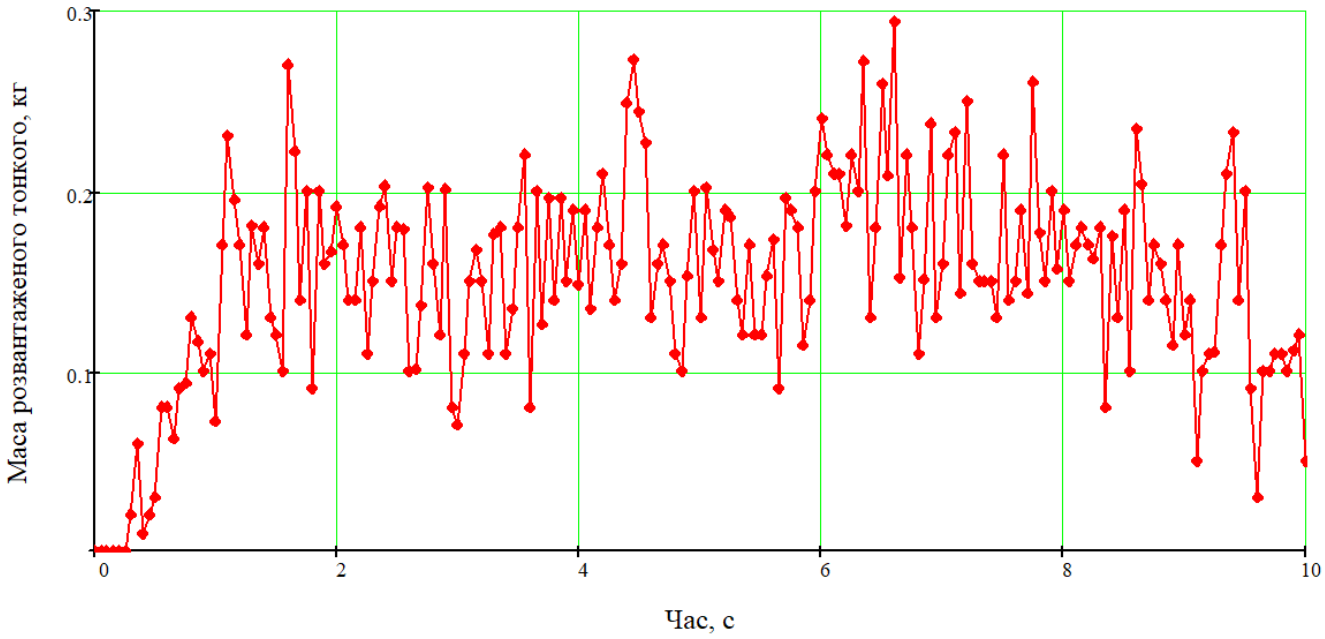


Рис 3.10 – Маса тонкого у розвантаженні при 55 об/хв

Таблиця 3.1 – Залежність ефективності просіювання від кількості обертів сита

Кількість обертів сита, об/хв	Сумарна маса розвантаженого тонкого класу, кг	Ефективність просіювання, %
10	51,751	47,8%
35	63,65	58,7%
55	30,266	27,9%

З рис 3.1-3.3 видно, що не завжди ефективність грохочення дійсно може оцінити роботоспроможність грохота в цілому. Так, наприклад, при частоті обертів 10 об/хв ефективність доволі висока. Натомість не відбувається розвантаження крупного продукту.

Можна сказати, що низька швидкість обертання не заезпечує розвантаження крупних фракцій, а висока швидкість не забезпечує розвантаження дрібних фракцій.

3.2. Дослідження впливу спрямування вектору збурюючого зусилля на рух матеріалу

На основі розробленої методики проведено дослідження впливу спрямування вектору збурюючого зусилля на рух матеріалу. Результати дослідження наведено на рис 3.11-3-17 і табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати дослідження

№	Кіль-кість обертів, об/хв	Вібрація			Сумарна маса розвантаже-ного тонкого класу за 10 с, кг	Ефектив-ність просіюван-ня, %	Розвантаження крупних зерен
		Спрямування	Амплітуда, мм	Частота, Гц			
1	65	Гориз.	8	15	63,382	58,506	погано
2	65	Вертик.	8	15	83,381	76,967	недостатньо
3	95	Гориз.	8	15	80,951	74,727	погано
4	95	Гориз.	4	15	75,533	69,723	недостатньо
5	95	Гориз.	2	15	94,951	87,647	погано
6	95	Вертик.	2	15	78,658	72,607	недостатньо

На основі аналізу результатів, встановлено, що спрямування вектора збурюючого зусилля істотно впливає на процес руху матеріалу по поверхні сита та ефективність просіювання.

При горизонтальному спрямуванні вібрації спостерігається нерівномірний рух матеріалу, що призводить до поганого розвантаження крупних зерен. Хоча зі зменшенням амплітуди до 2 мм (дослід №5) ефективність просіювання підвищується до 87,65 %, це супроводжується зниженням інтенсивності переміщення частинок і ризиком їхнього застою.

При вертикальному спрямуванні коливань забезпечується більш рівномірне розподілення матеріалу по поверхні сита, однак ефективність просіювання в цих режимах залишається нижчою (72–77 %), що пояснюється менш активним горизонтальним переміщенням частинок і недостатнім розвантаженням крупних фракцій.

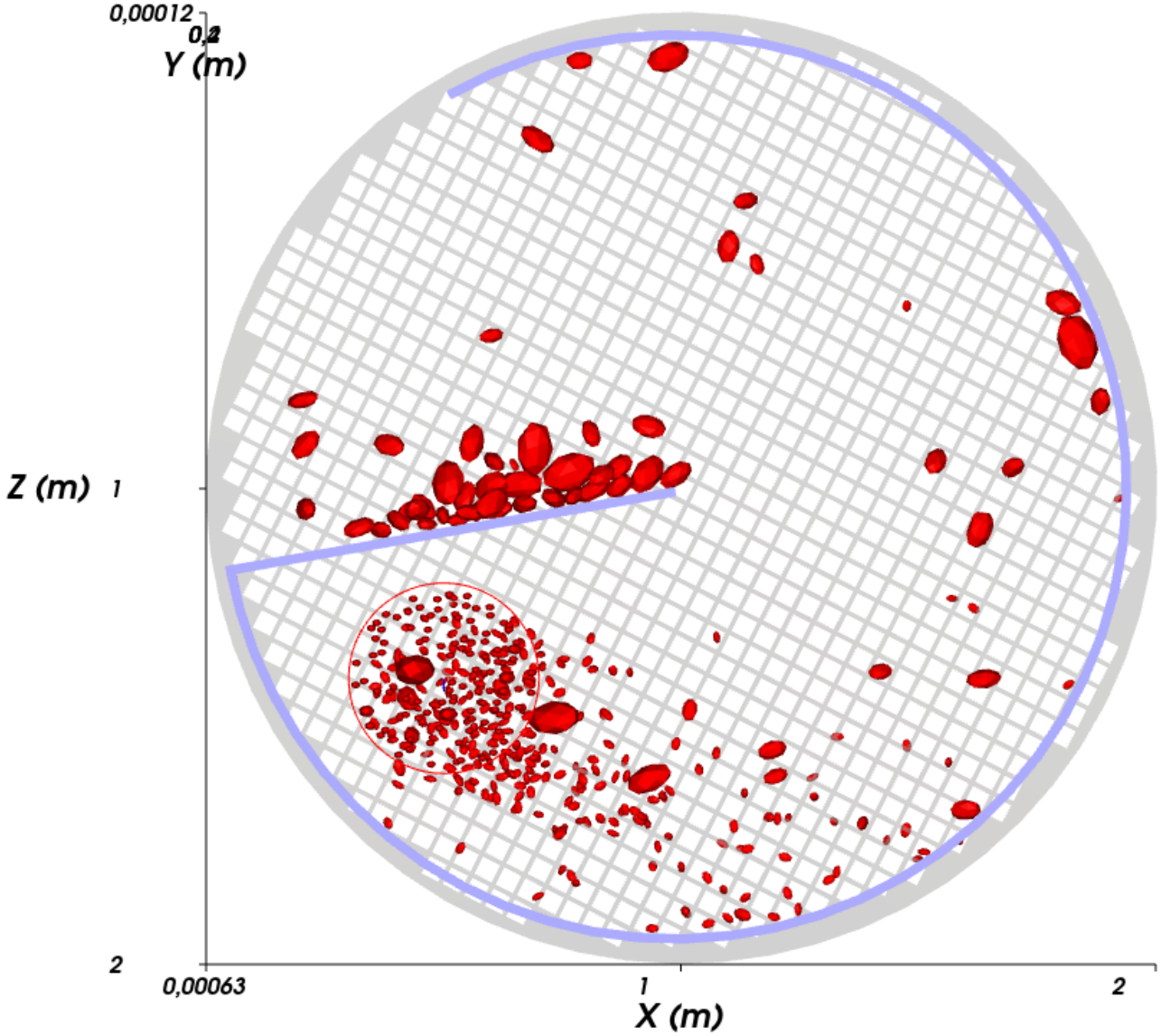


Рис 3.11 – Характер руху зерен матеріалу для досліду №1 (табл 3.2)

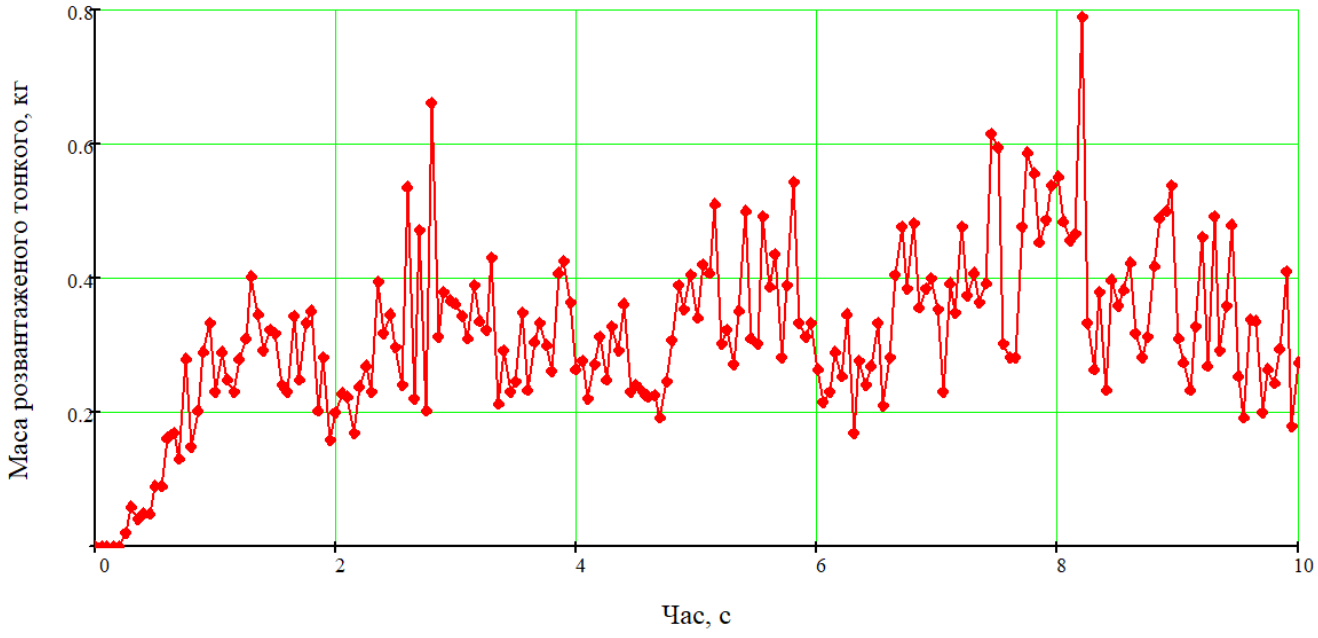


Рис 3.12 - Сумарна маса розвантаженого тонкого класу для досліду №1 (табл 3.2)

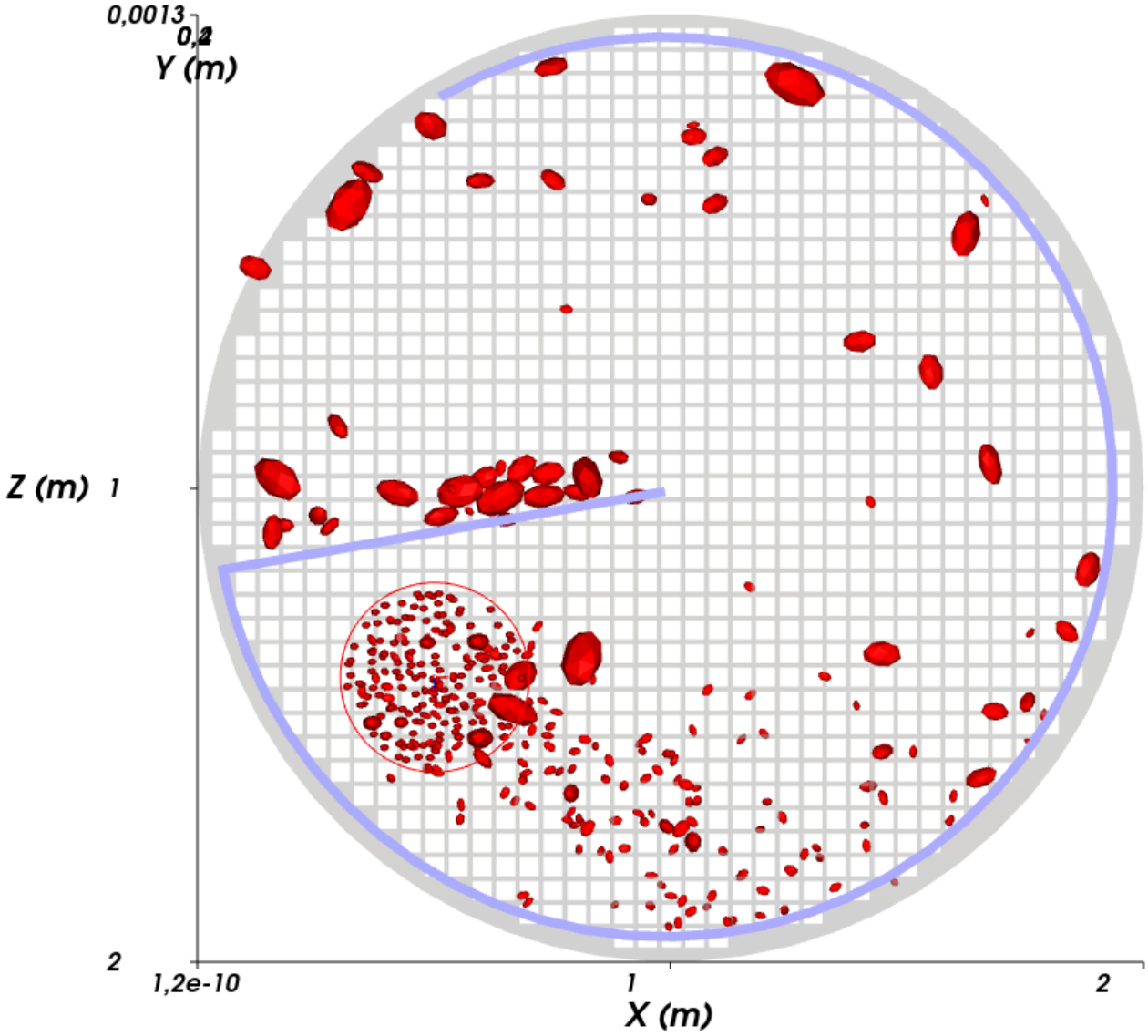


Рис 3.13– Характер руху зерен матеріалу для досліду №2 (табл 3.2)

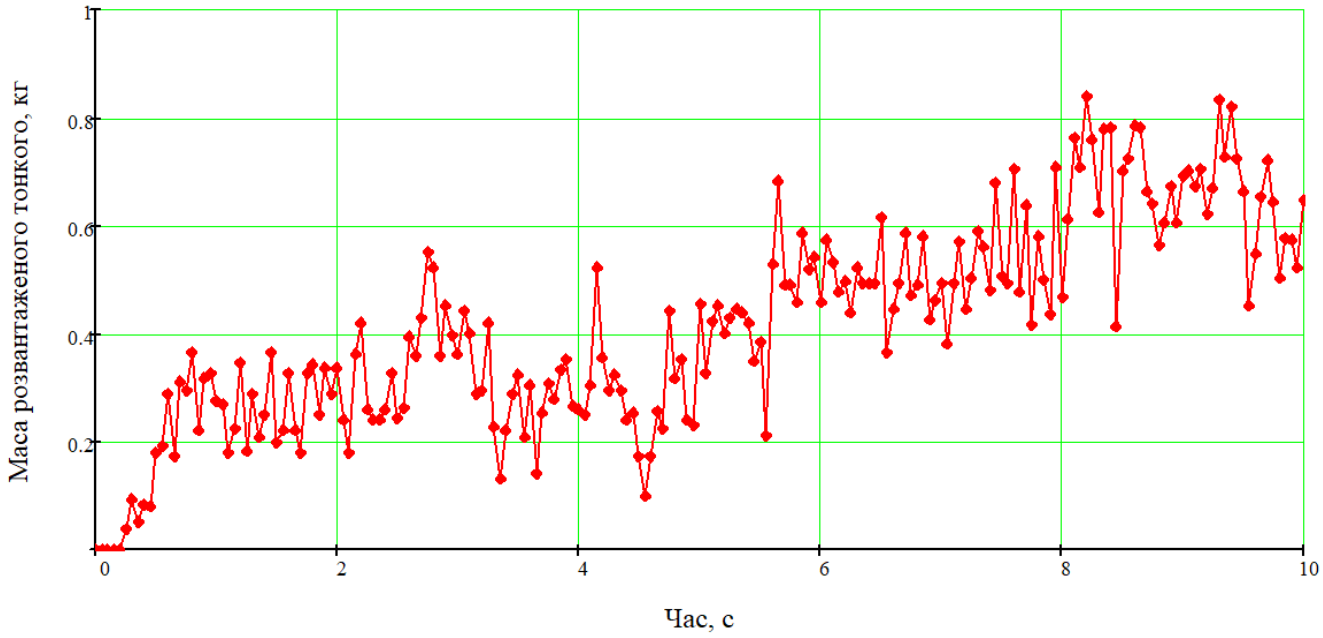


Рис 3.14 - Сумарна маса розвантаженого тонкого класу для досліду №2 (табл 3.2)

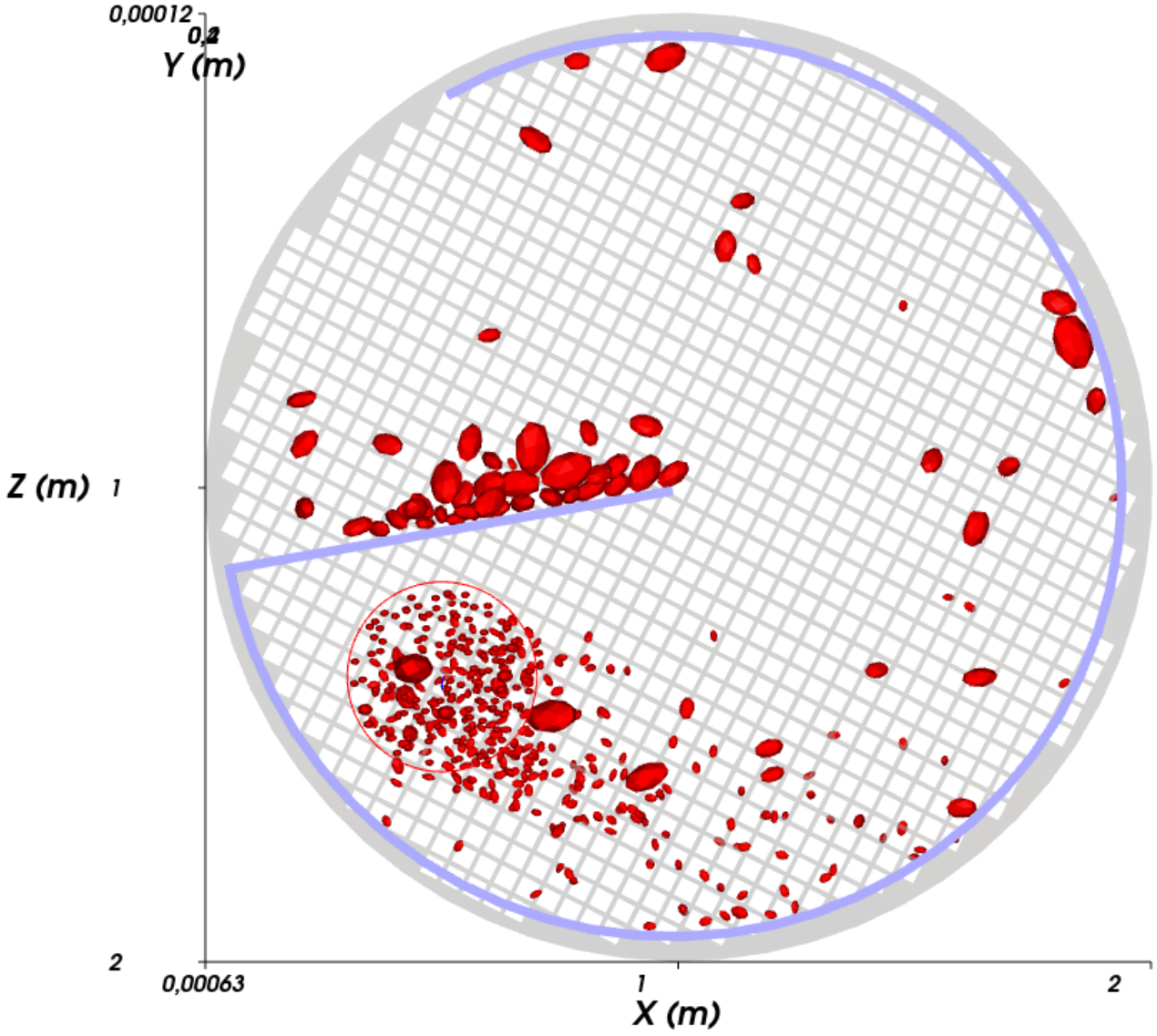


Рис 3.15– Характер руху зерен матеріалу для досліду №3 (табл 3.2)

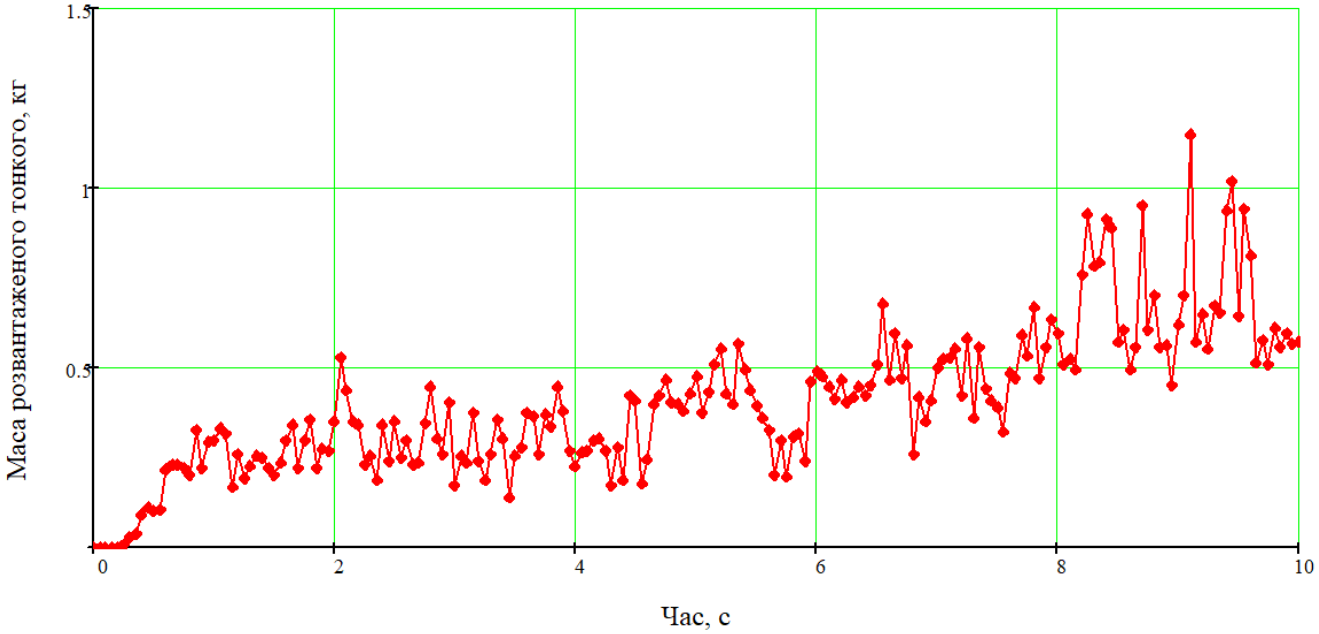


Рис 3.16 - Сумарна маса розвантаженого тонкого класу для досліду №3 (табл 3.2)

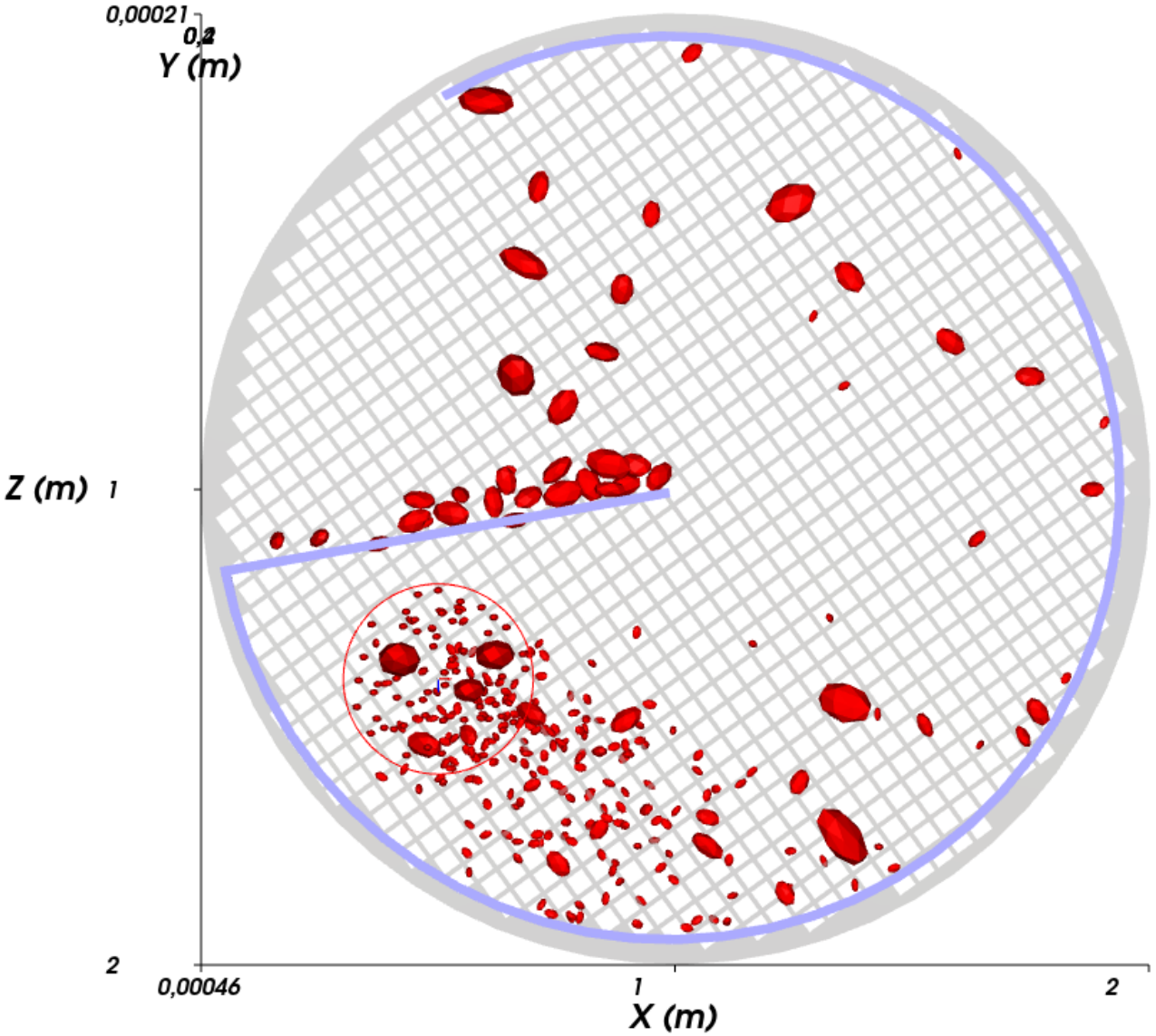


Рис 3.17– Характер руху зерен матеріалу для досліду №4 (табл 3.2)

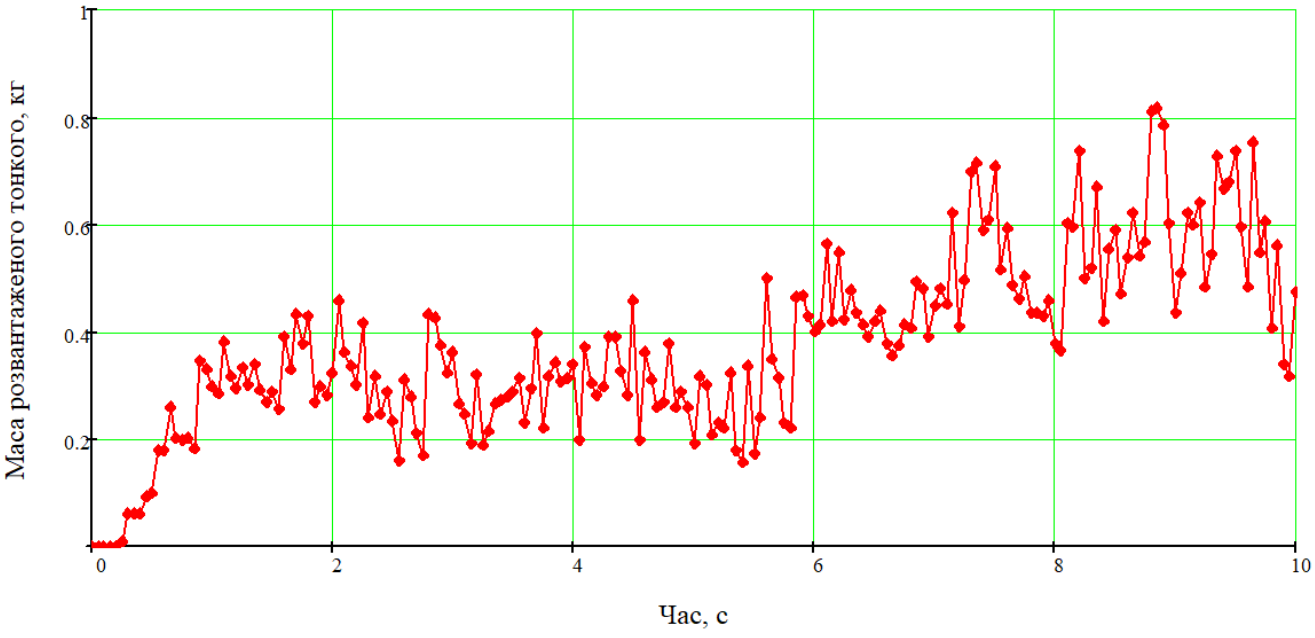


Рис 3.18 - Сумарна маса розвантаженого тонкого класу для досліду №4 (табл 3.2)

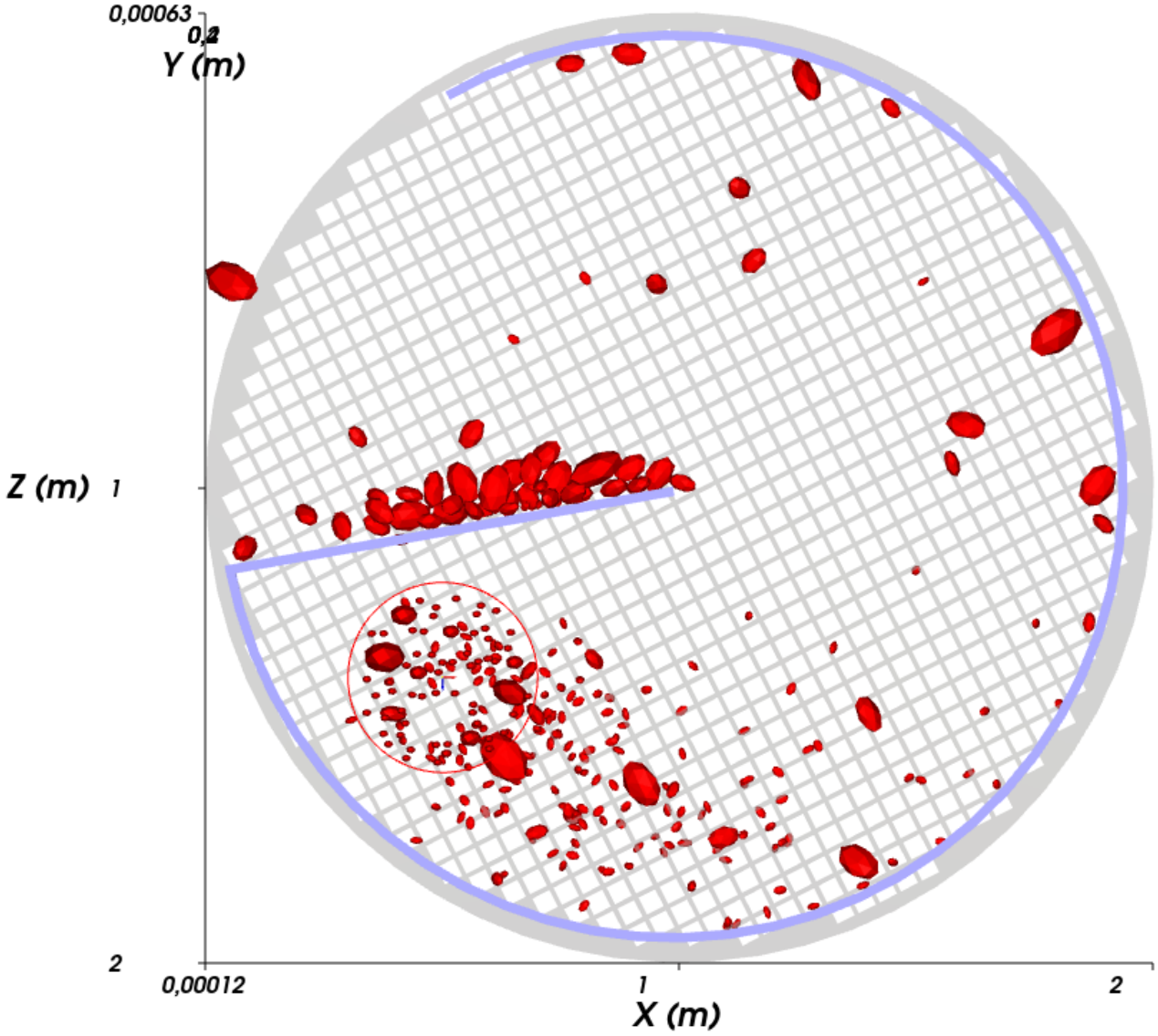


Рис 3.19– Характер руху зерен матеріалу для досліду №5 (табл 3.2)

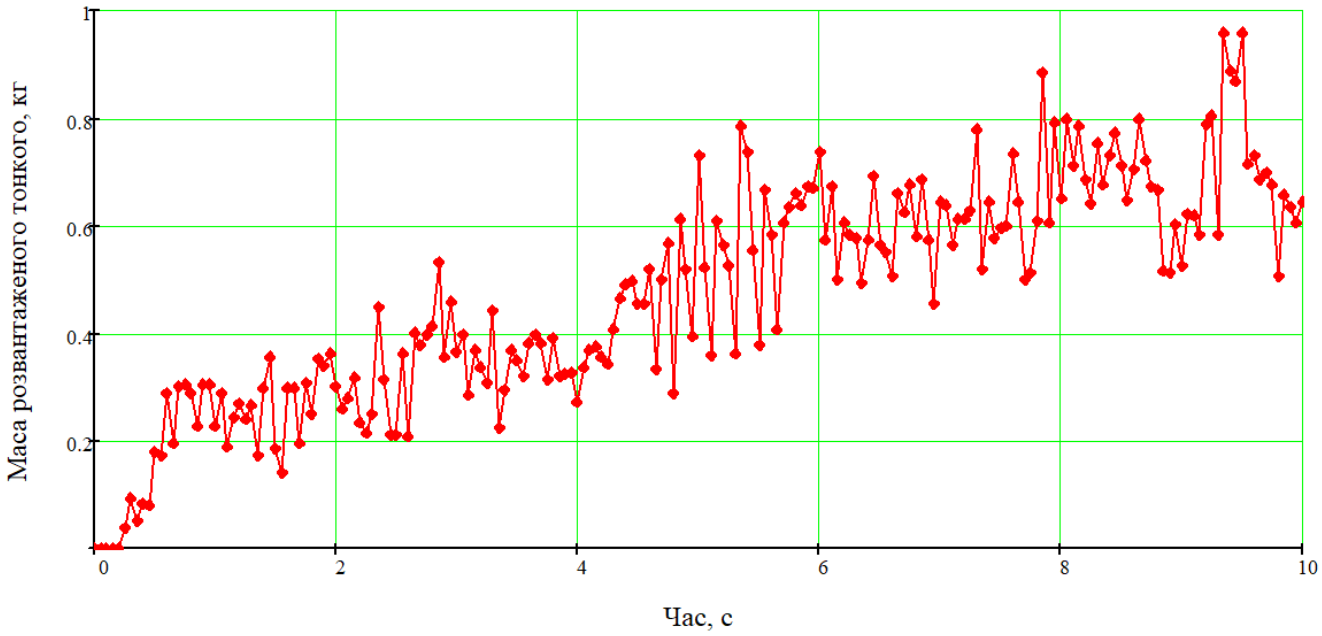


Рис 3.20 - Сумарна маса розвантаженого тонкого класу для досліду №5 (табл 3.2)

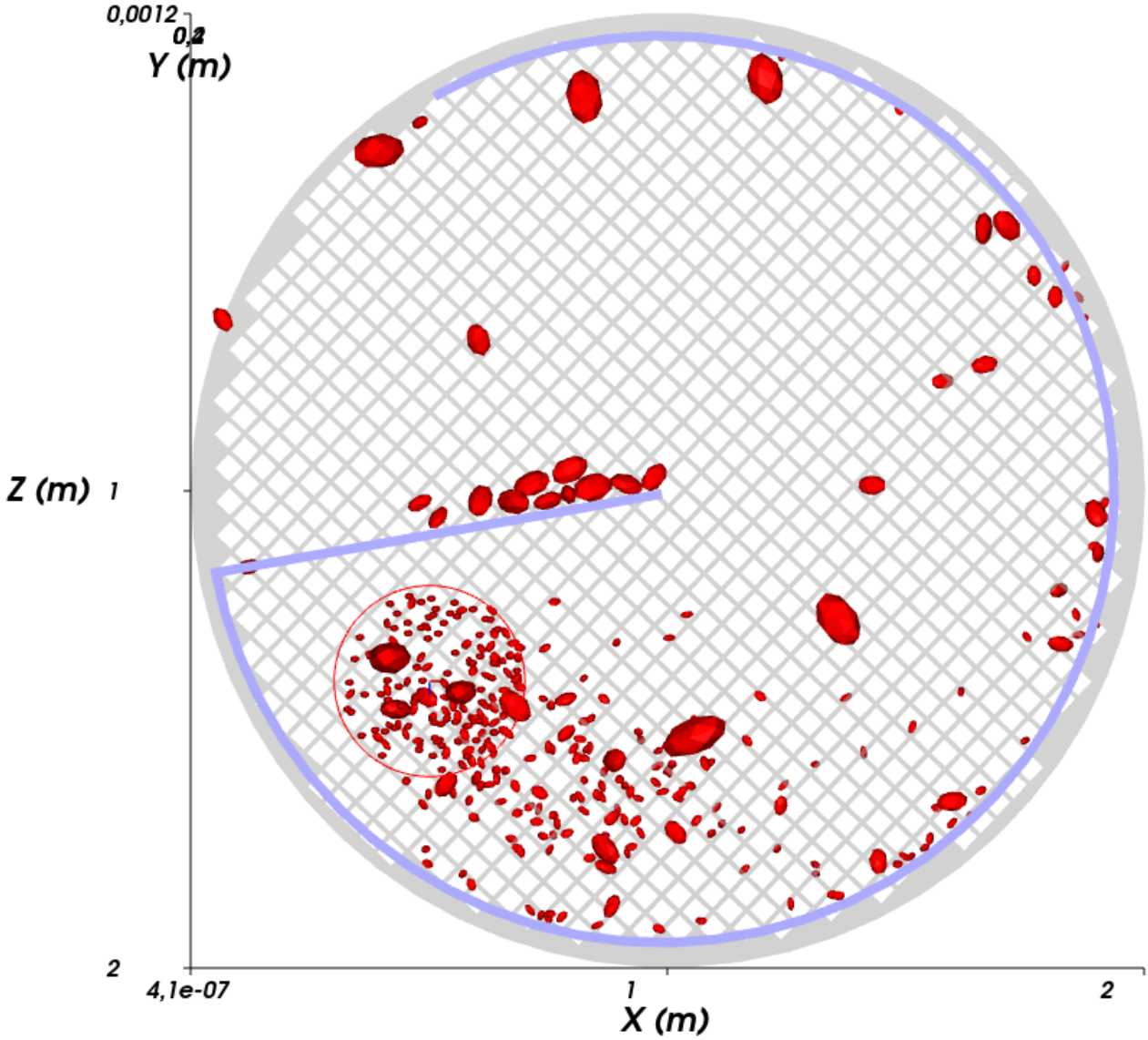


Рис 3.21– Характер руху зерен матеріалу для досліду №6 (табл 3.2)

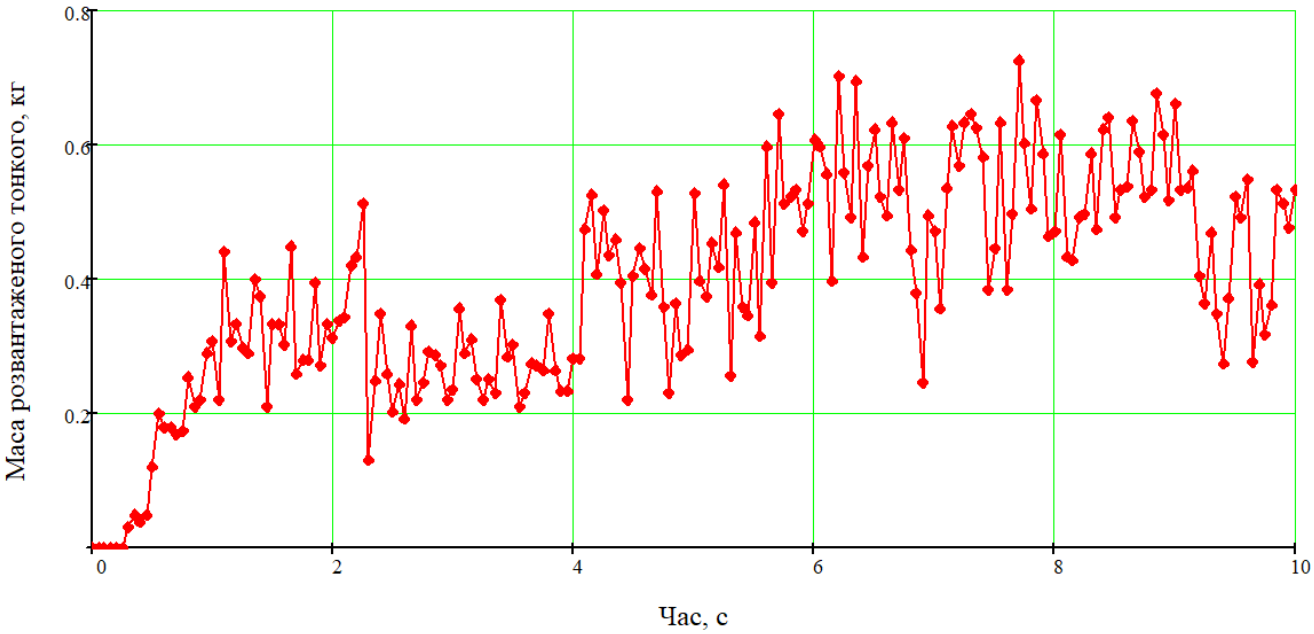


Рис 3.22 - Сумарна маса розвантаженого тонкого класу для досліду №6 (табл 3.2)

Підвищення частоти обертання до 95 об/хв покращує загальну ефективність процесу в порівнянні з режимом 65 об/хв, проте оптимальний результат досягається лише за умови раціонального поєднання частоти, амплітуди та напрямку вібрації.

Узагальнюючи, можна зробити висновок, що найвищу ефективність просіювання (до 87,6 %) забезпечує горизонтальне спрямування вібрації з амплітудою 2 мм при 95 об/хв, хоча для покращення відведення крупних зерен доцільно застосовувати комбіноване (похиле) спрямування вібраційного вектора, яке поєднує переваги вертикального і горизонтального коливань.

Однак, попри позитивний вплив вібрації на ефективність просіювання тонкого продукту, грубий продукт погано розвантажується за усіх розглянутих умов дослідів.

3.3. Дослідження впливу нахилу сита відносно горизонту на рух матеріалу

На основі розробленої методики проведено дослідження впливу нахилу сита конічного грохота до горизонту при додатковому вібраційному впливі та без нього на рух матеріалу. Результати дослідження наведено на рис 3.23-3.34 і табл. 3.3

Таблиця 3.3 – Результати дослідження

№	Кіль-кість обертів, об/хв	Кут нахилу сита, град	Вібрація			Сумарна маса розван-таженого тонкого класу за 10 с, кг	Ефектив-ність просіюван-ня, %	Розван-таження крупних зерен
			Спряму-вання	Амплітуда, мм	Частота, Гц			
1	35	5	–	–	–	71,331	65,844	середня
2	35	10	–	–	–	88,987	82,142	середня
3	35	15	–	–	–	87,091	80,392	середня
4	55	5	Гориз.	2	15	81,322	75,066	добре
5	55	10	Гориз.	2	15	85,899	79,282	добре
6	55	15	Гориз.	2	15	108,031	99,721	Дуже добре

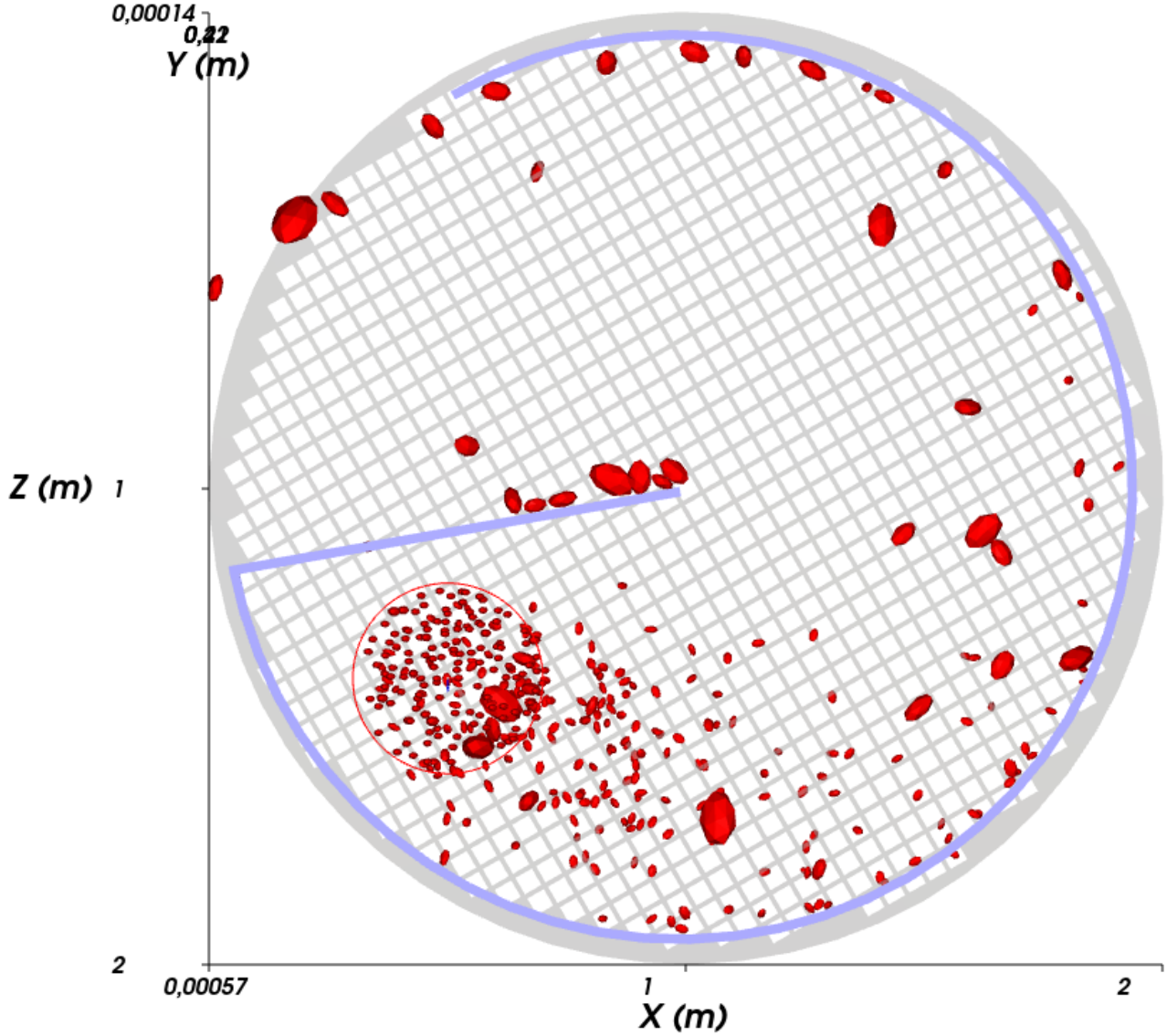


Рис 3.23– Характер руху зерен матеріалу для досліду №1 (табл 3.3)

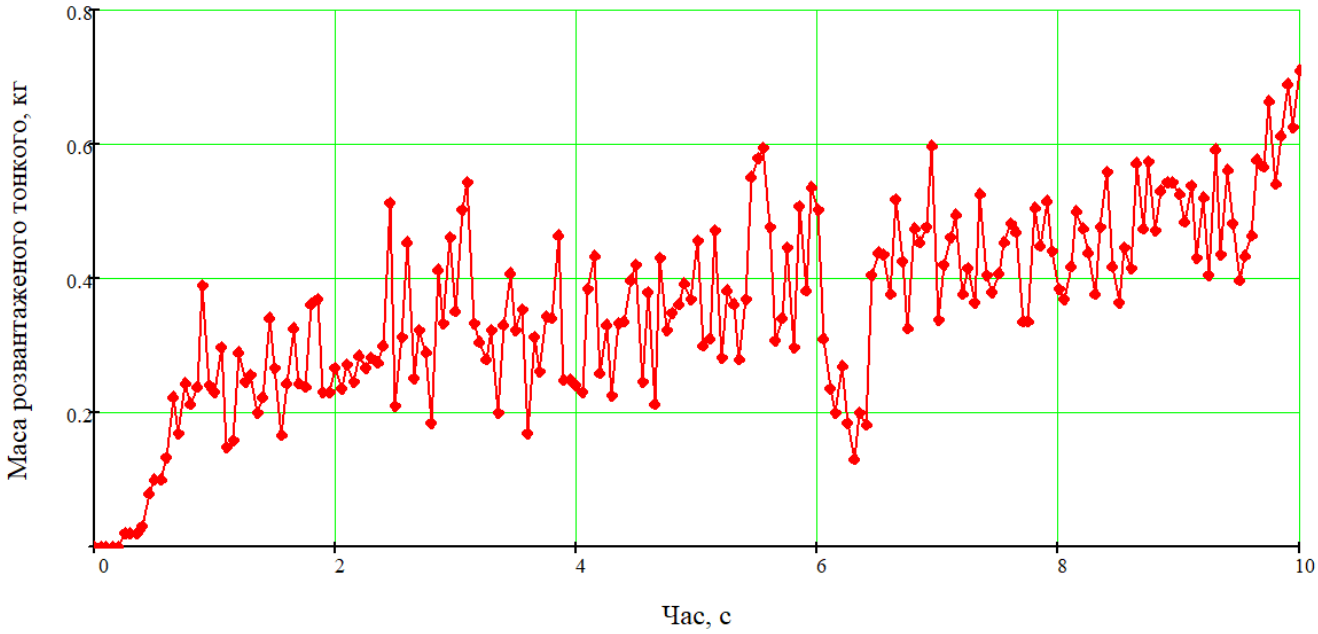


Рис 3.24 - Сумарна маса розвантаженого тонкого класу для досліду №1 (табл 3.3)

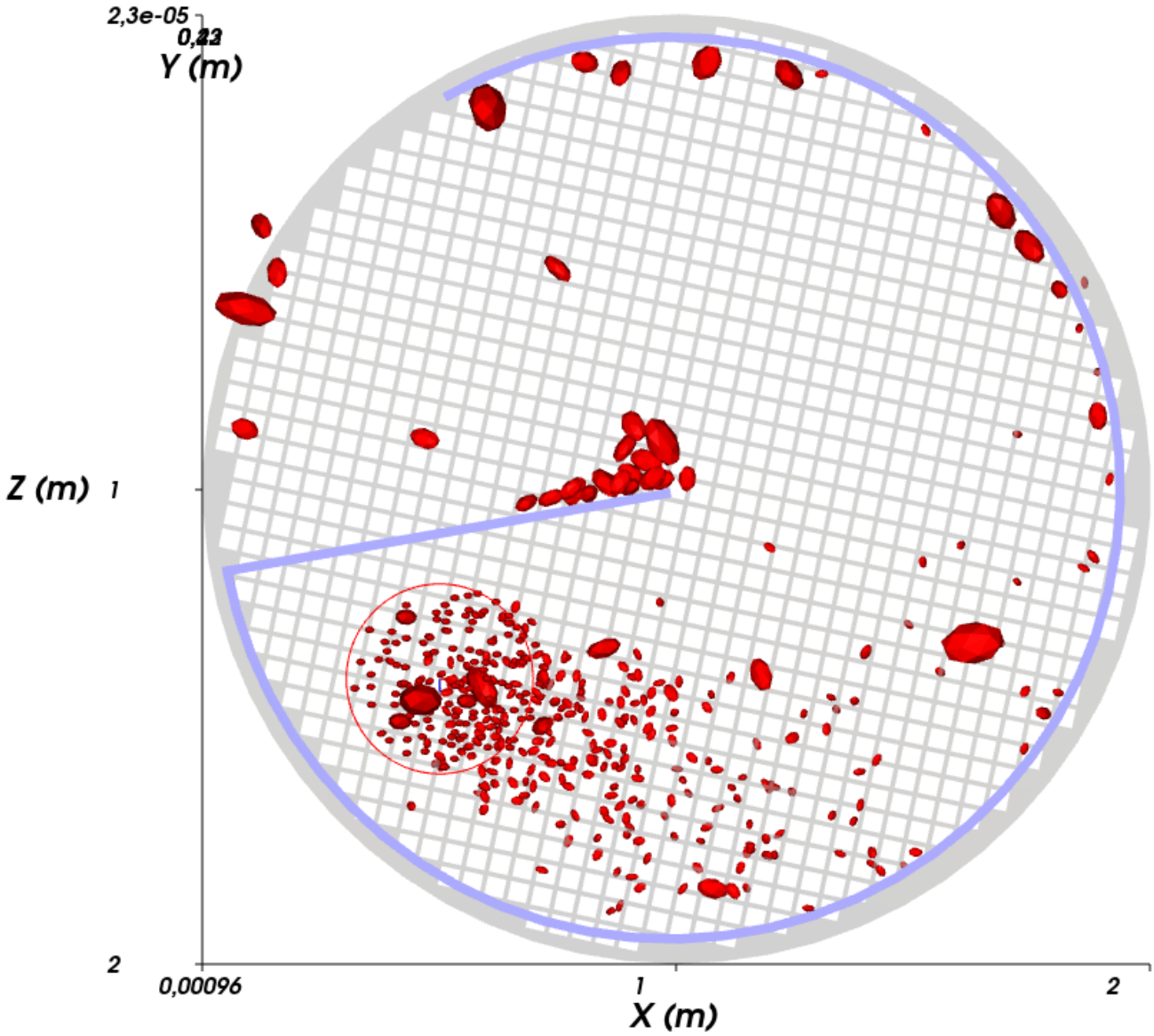


Рис 3.25– Характер руху зерен матеріалу для досліду №2 (табл 3.3)

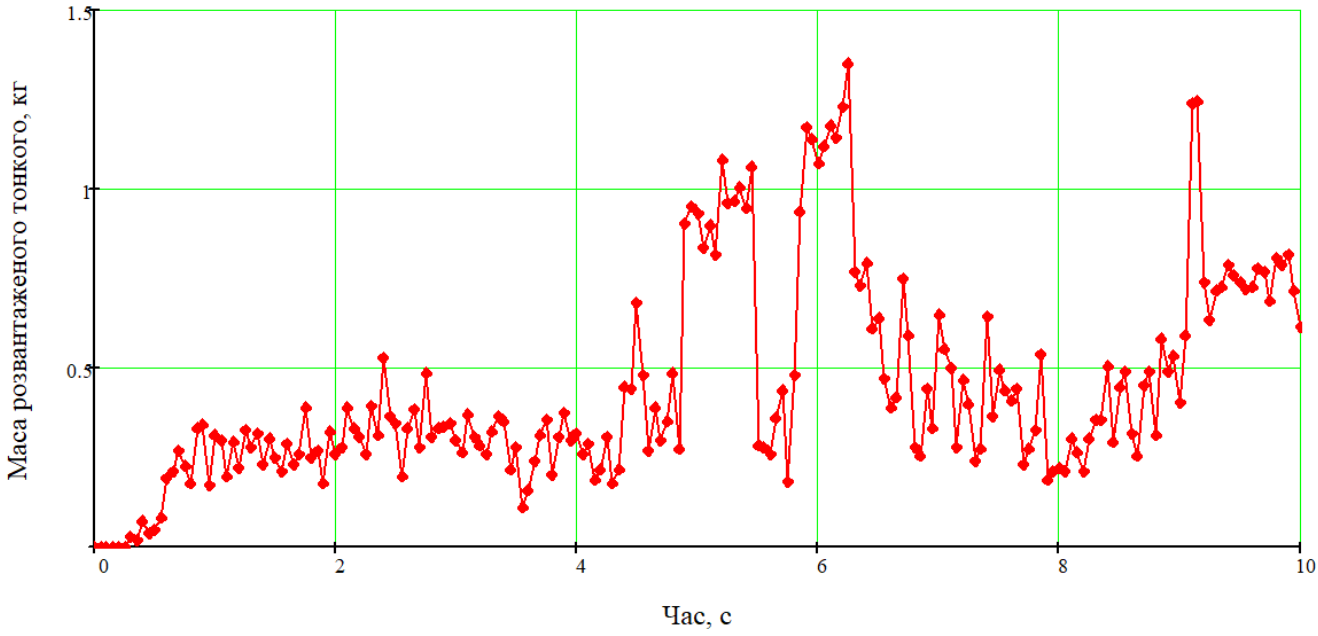


Рис 3.26 - Сумарна маса розвантаженого тонкого класу для досліду №2 (табл 3.3)

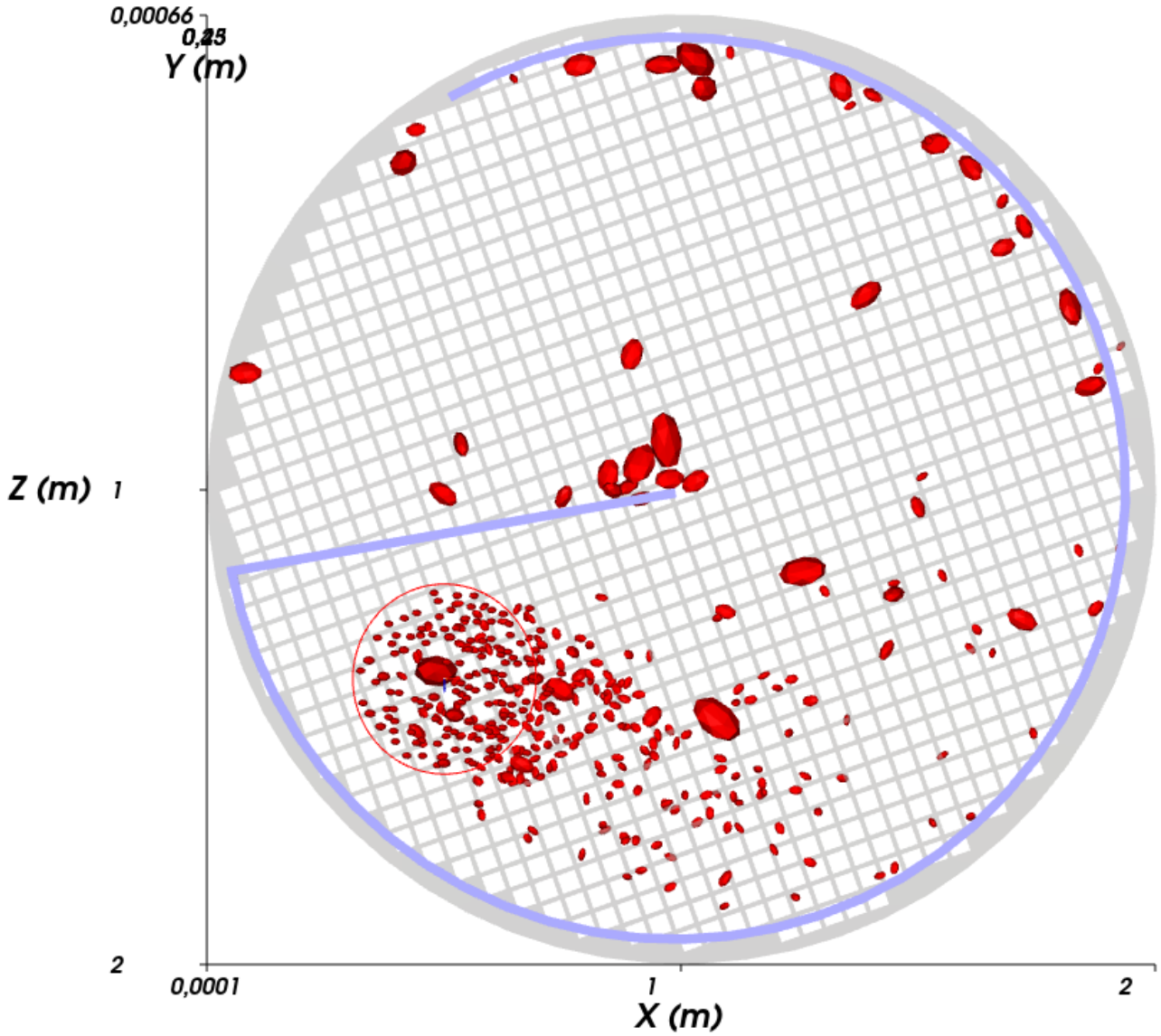


Рис 3.27– Характер руху зерен матеріалу для досліду №3 (табл 3.3)

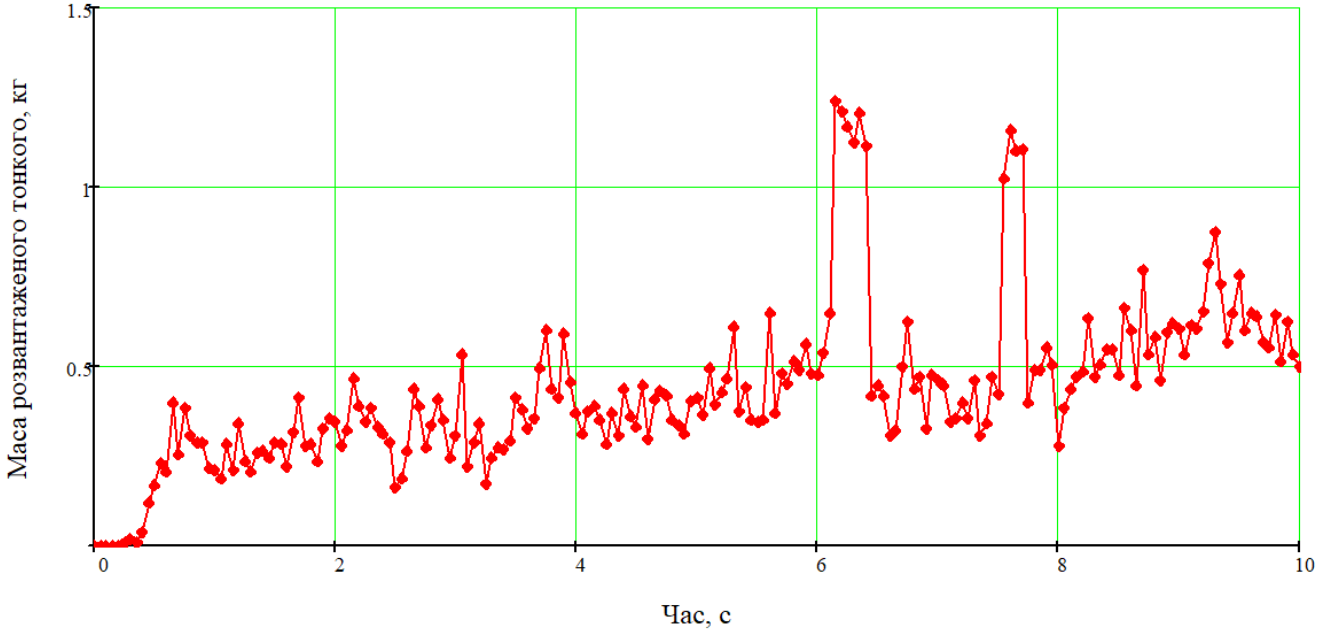


Рис 3.28 - Сумарна маса розвантаженого тонкого класу для досліду №3 (табл 3.3)

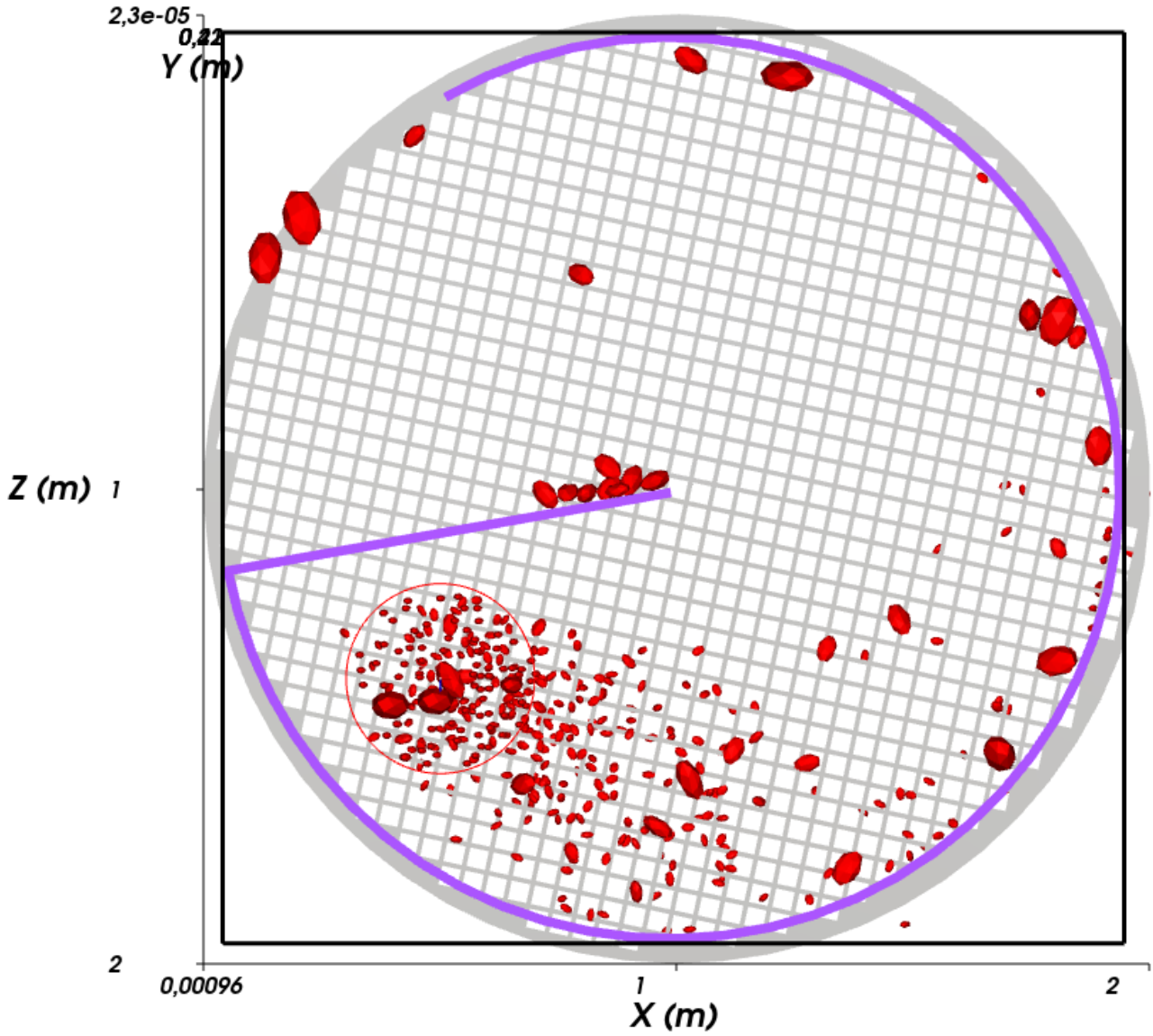


Рис 3.29– Характер руху зерен матеріалу для досліду №4 (табл 3.3)

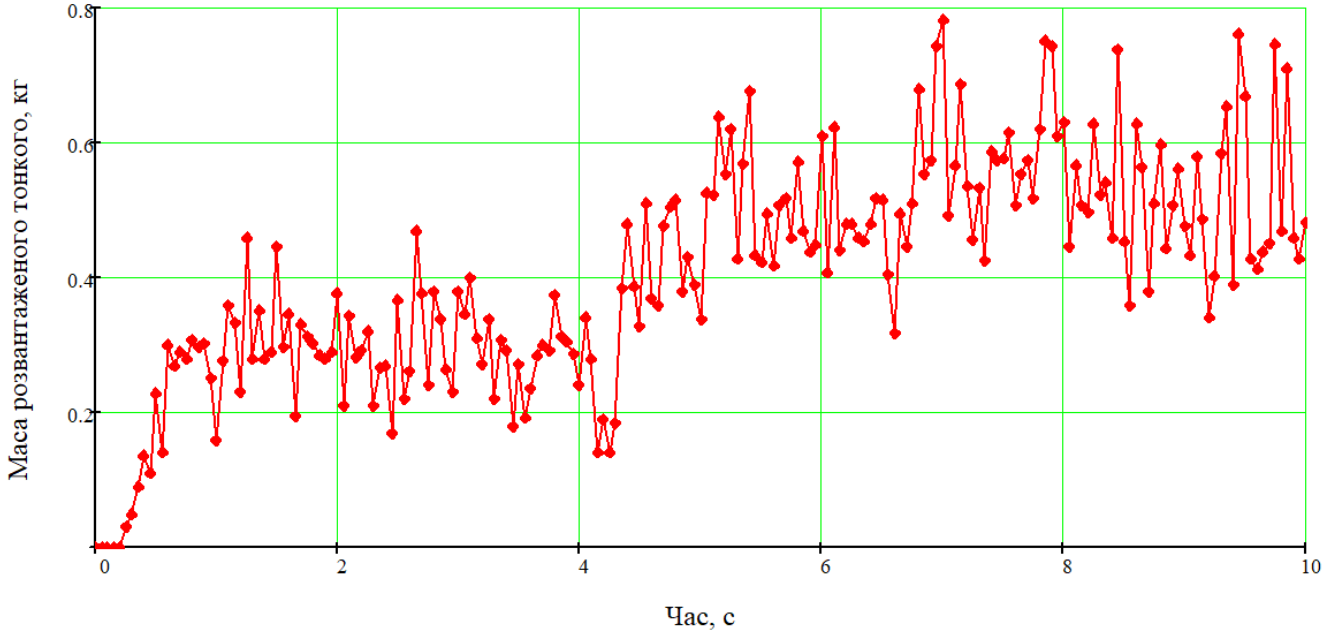


Рис 3.30 - Сумарна маса розвантаженого тонкого класу для досліду №4 (табл 3.3)

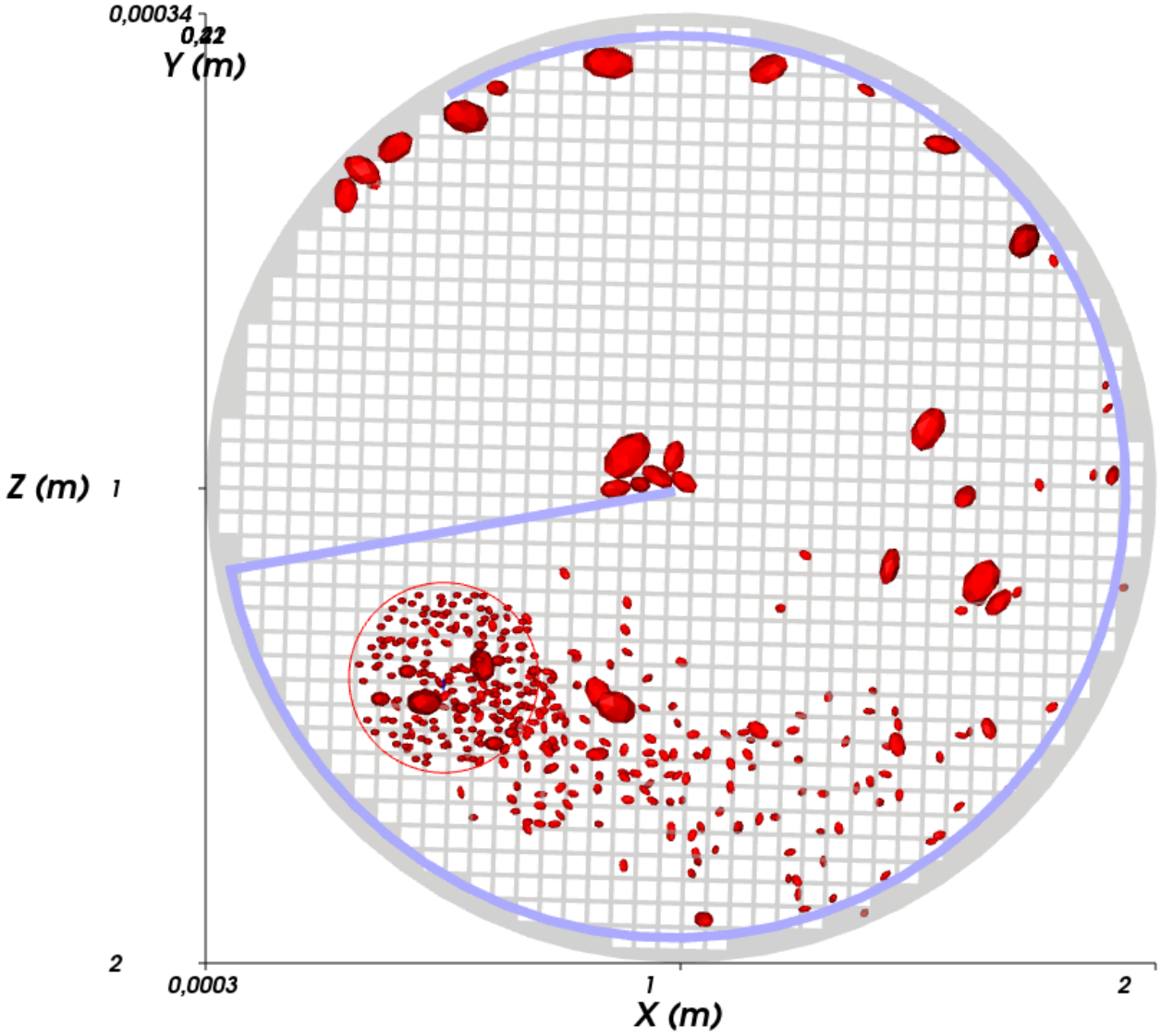


Рис 3.31– Характер руху зерен матеріалу для досліду №5 (табл 3.3)

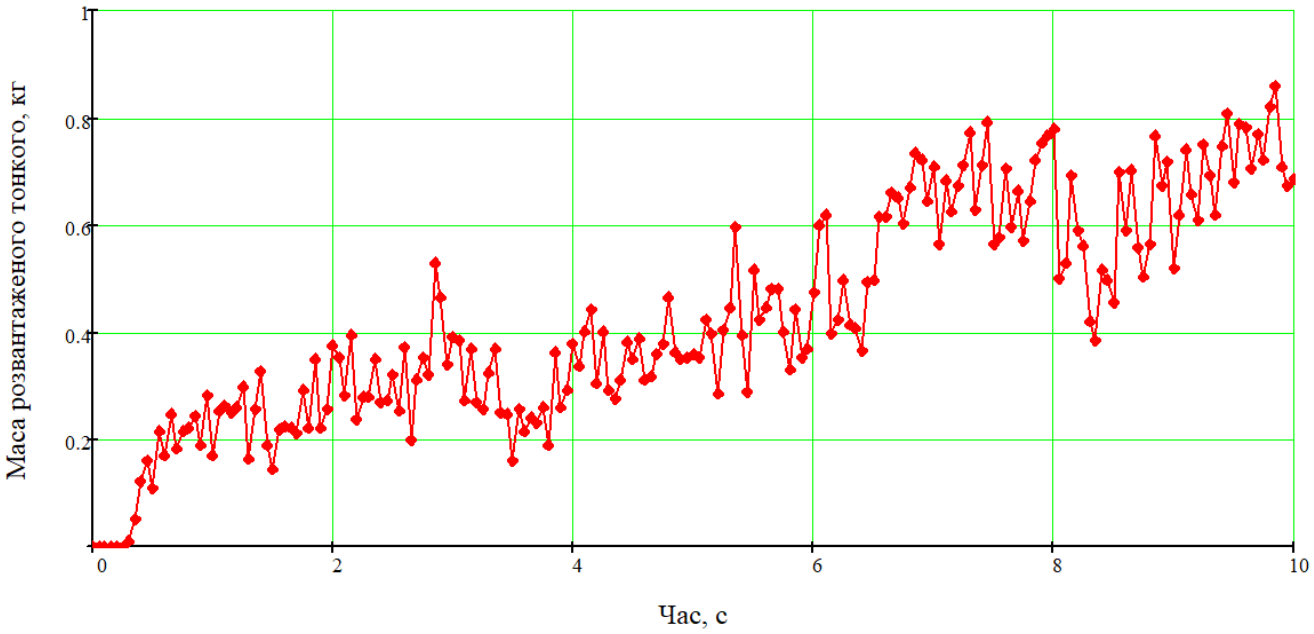


Рис 3.32 - Сумарна маса розвантаженого тонкого класу для досліду №5 (табл 3.3)

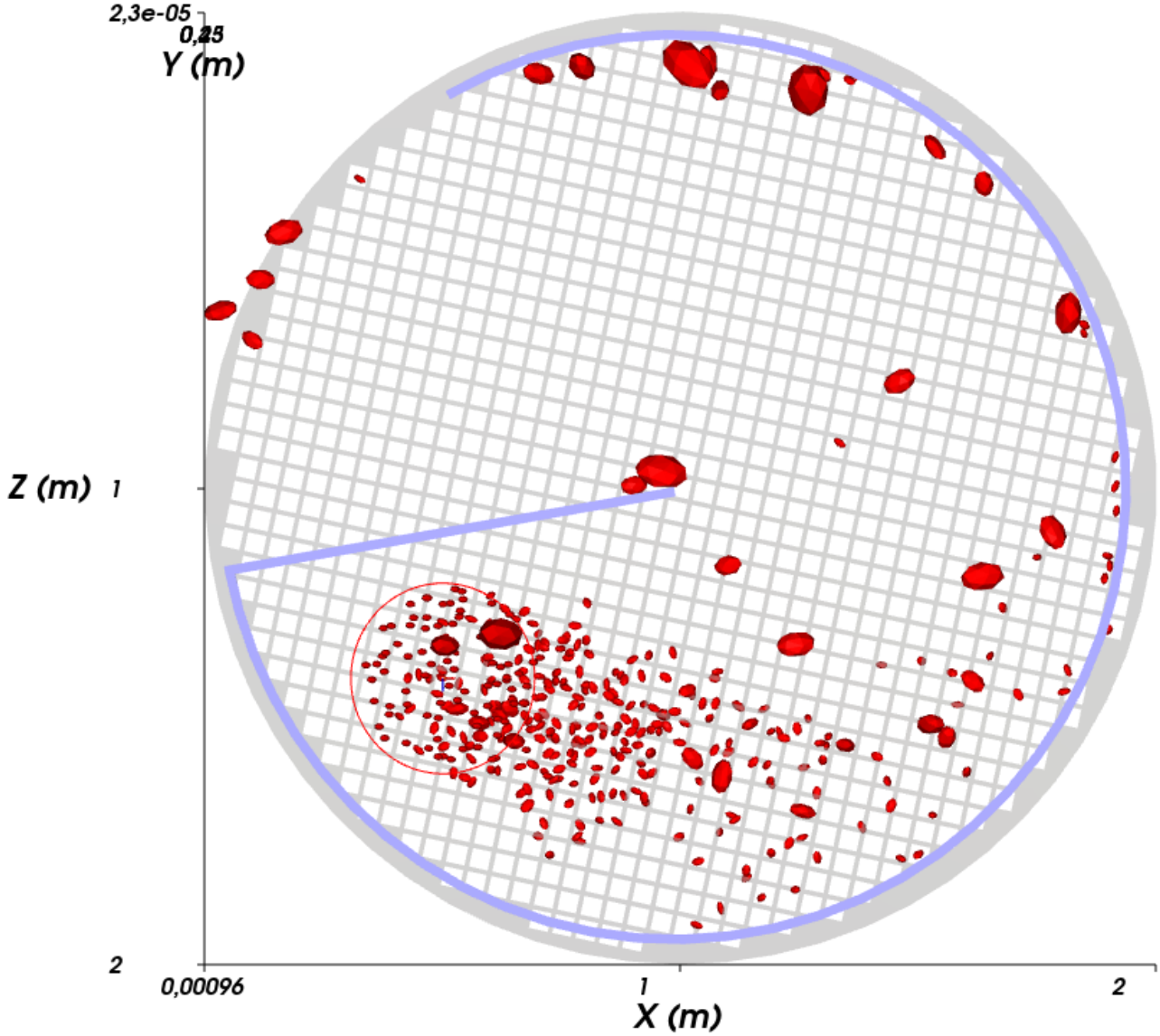


Рис 3.33– Характер руху зерен матеріалу для досліду №6 (табл 3.3)

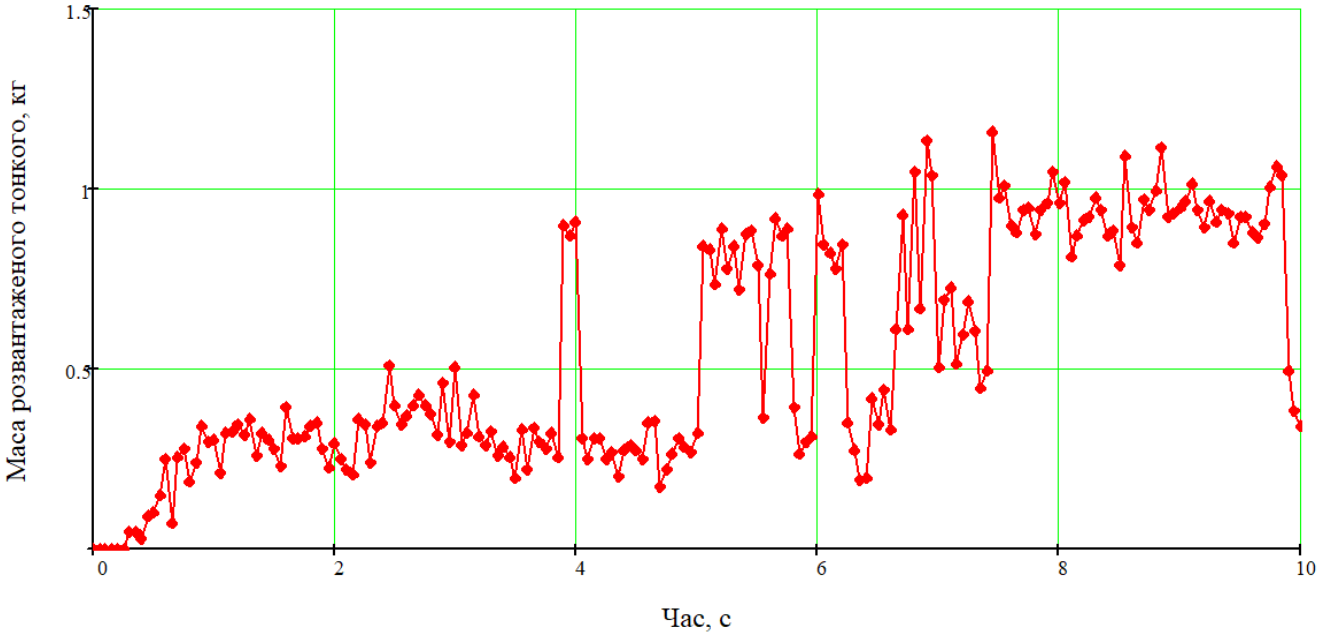


Рис 3.34 - Сумарна маса розвантаженого тонкого класу для досліду №6 (табл 3.3)

На основі аналізу результатів (табл. 3.3) встановлено суттєвий вплив кута нахилу ситаособливо за наявності вібраційного збудження на ефективність просіювання й характер руху матеріалу.

Без вібраційного впливу (досліди №1–3) зі збільшенням кута нахилу сита від 5° до 10° спостерігається помітне підвищення ефективності просіювання — з 65,8 % до 82,1 %, що пояснюється покращенням транспортування матеріалу під дією сили тяжіння. Подальше збільшення кута до 15° не дає суттєвого приросту ефективності (≈80 %), що свідчить про настання режиму часткового скочування матеріалу, при якому зменшується час контакту частинок із ситом.

За умов додатковго вібраційного впливуз горизонтальним розташуваннямвектора збурюючого зусилля (досліди №4–6) ефективність просіювання істотно підвищується для всіх кутів нахилу. Найбільше зростання спостерігається при нахилі 15°, де ефективність досягає 99,7 %, що свідчить про оптимальне поєднання гравітаційного руху та вібраційного впливу, який запобігає утворенню застійних зон і сприяє активнішому проходженню дрібних частинок через отвори сита. Особливо слід відмітити найкращим розвантаженням крупних зерен і стабільним рухом матеріалу.

Порівняння результатів дослідів показує, що додавання вібрації дозволяє підвищити ефективність просіювання в середньому на 15–20 % у всьому діапазоні кутів нахилу, а також покращує розвантаження крупних зерен, яке переходить з «середнього» до «доброго» та «дуже доброго» рівня.

Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що швидкість обертання сита має вирішальний вплив на розподіл та розвантаження матеріалу.
2. При низьких швидкостях (10 об/хв) грохот не забезпечує розвантаження крупного класу, оскільки відцентрова сила недостатня для подолання сили тяжіння — матеріал скочується до центра конуса.
3. За середніх швидкостей (35 об/хв) забезпечується оптимальний баланс між транспортуванням та просіюванням: крупний матеріал частково розвантажується, а тонкі фракції ефективно проходять крізь сито.
4. При підвищенні швидкості до 55 об/хв надмірна дія відцентрової сили призводить до притискання матеріалу до периметра сита, що знижує ефективність просіювання (до 27,9 %).
5. Встановлено, що раціональний режим обертання сита (без вібрації та нахину сита) досягається при середніх швидкостях обертання (≈35 об/хв), коли спостерігається найкраще співвідношення між ефективністю просіювання та стабільністю розвантаження матеріалу.
6. Встановлено, що спрямування вектора збурюючого зусилля та амплітуда вібрації істотно впливає на кінематику частинок на ситі та ефективність процесу.
7. При горизонтальному напрямі вібраційного зусилля відбувається активне переміщення матеріалу вздовж сита, однак грубі зерна часто розвантажуються нерівномірно.
8. При вертикальному напрямі коливань покращується розподілення матеріалу по поверхні, але зменшується горизонтальне переміщення, що призводить до недостатнього розвантаження крупних фракцій.
9. Найкращі показники (ефективність 87,6 %) досягнуто при поєднанні горизонтального спрямування вібрацій з амплітудою 2 мм і частотою 15 Гц за швидкості обертання 95 об/хв.

10 Встановлено, що нахил сита відносно горизонту визначає характер руху частинок і ступінь розвантаження крупних фракцій.

11. Без вібраційного впливу ефективність просіювання зростає зі збільшенням кута нахилу з 5° до 10° (з 65,8 % до 82,1 %), після чого при 15° спостерігається стабілізація або навіть незначне зниження ефективності через зменшення часу контакту матеріалу із ситом.

12. Додавання горизонтальної вібрації (амплітуда 2 мм, частота 15 Гц) підвищує ефективність у середньому на 15–20 %, забезпечуючи найкращі результати при нахилі 15° (ефективність 99,7 %). У цьому режимі спостерігається рівномірний рух матеріалу, інтенсивне проходження дрібних частинок крізь сито та дуже добре розвантаження крупного продукту.

13. Вперше встановлено, що поєднання нахилу сита конічного грохоту (15°) із горизонтальною вібрацією амплітудлю 2 мм, частотою 15 Гц та швидкістю обертання 55 об/хв забезпечує найбільш стабільну роботу грохота і максимальну ефективність просіювання як дрібних так і грубих фракцій.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв’язано актуальне науково-технічне завдання, що полягає у підвищенні продуктивності та ефективності процесу розділення сипких матеріалів, поліпшенні якості готової продукції за рахунок обґрунтування раціональних параметрів конічних грохотів**.**

1. Вперше розроблено умову розвантаження грубих фракції на конічному грохоті з горизонтально розташованим ситом без додаткової вібрації, якаа враховує дію ваги, відцентрової сили, реакції опори та сили тертя і показує, що рух частинок по поверхні конічного грохота не залежить від маси зерен, а визначається переважно швидкістю обертання сита та радіусом розташування частинки.
2. Графічний аналіз умови показав наявність двох характерних зон: у зоні, де сила тяжіння перевищує відцентрову, частинки переміщуються до центра сита; у зоні, де переважає відцентрова сила, відбувається розвантаження матеріалу. Таким чином, забезпечення перевищення відцентрової сили над силою тяжіння є умовою стабільного розділення матеріалу.
3. Методика комп’ютерного моделювання дозволила дослідити вплив основних режимних параметрів: швидкості обертання сита, спрямування вектора збурюючого зусилля, нахилу сита відносно горизонту, що дає змогу оцінити ефективність просіювання при різних умовах роботи грохота.
4. Встановлено, що зі збільшенням швидкості обертання підвищується частка відцентрової дії, що покращує рух матеріалу та збільшує ефективність просіювання до оптимального значення.
5. Спрямування вібраційного впливу у горизонтальній площині є найбільш ефективним, оскільки воно активізує переміщення матеріалу по ситу, запобігає злипанню та утворенню застійних зон.
6. Вплив нахилу сита показав, що при кутах 10–15° ефективність просіювання істотно підвищується, особливо при наявності вібрацій. Оптимальним

режимом є поєднання нахилу сита 15° із горизонтальною вібрацією амплітудою 2 мм і частотою 15 Гц.

7. Проведені дослідження підтверджують адекватність розробленої математичної моделі та демонструють її практичну цінність для визначення раціональних режимів роботи конічних грохотів, спрямованих на підвищення ефективності просіювання та стабільності процесу розділення матеріалу.
8. Встановлено, що швидкість обертання сита має вирішальний вплив на розподіл та розвантаження матеріалу.
9. При низьких швидкостях (10 об/хв) грохот не забезпечує розвантаження крупного класу, оскільки відцентрова сила недостатня для подолання сили тяжіння — матеріал скочується до центра конуса.
10. За середніх швидкостей (35 об/хв) забезпечується оптимальний баланс між транспортуванням та просіюванням: крупний матеріал частково розвантажується, а тонкі фракції ефективно проходять крізь сито.
11. При підвищенні швидкості до 55 об/хв надмірна дія відцентрової сили призводить до притискання матеріалу до периметра сита, що знижує ефективність просіювання (до 27,9 %).
12. Встановлено, що раціональний режим обертання сита (без вібрації та нахину сита) досягається при середніх швидкостях обертання (≈35 об/хв), коли спостерігається найкраще співвідношення між ефективністю просіювання та стабільністю розвантаження матеріалу.
13. Встановлено, що спрямування вектора збурюючого зусилля та амплітуда вібрації істотно впливає на кінематику частинок на ситі та ефективність процесу.
14. При горизонтальному напрямі вібраційного зусилля відбувається активне переміщення матеріалу вздовж сита, однак грубі зерна часто розвантажуються нерівномірно.

15. При вертикальному напрямі коливань покращується розподілення матеріалу по поверхні, але зменшується горизонтальне переміщення, що призводить до недостатнього розвантаження крупних фракцій.
16. .Найкращі показники (ефективність 87,6 %) досягнуто при поєднанні горизонтального спрямування вібрацій з амплітудою 2 мм і частотою 15 Гц за швидкості обертання 95 об/хв.
17. Встановлено, що нахил сита відносно горизонту визначає характер руху частинок і ступінь розвантаження крупних фракцій.
18. Без вібраційного впливу ефективність просіювання зростає зі збільшенням кута нахилу з 5° до 10° (з 65,8 % до 82,1 %), після чого при 15° спостерігається стабілізація або навіть незначне зниження ефективності через зменшення часу контакту матеріалу із ситом.
19. Додавання горизонтальної вібрації (амплітуда 2 мм, частота 15 Гц) підвищує ефективність у середньому на 15–20 %, забезпечуючи найкращі результати при нахилі 15° (ефективність 99,7 %). У цьому режимі спостерігається рівномірний рух матеріалу, інтенсивне проходження дрібних частинок крізь сито та дуже добре розвантаження крупного продукту.
20. Вперше встановлено, що поєднання нахилу сита конічного грохоту (15°) із горизонтальною вібрацією амплітудлю 2 мм, частотою 15 Гц та швидкістю обертання 55 об/хв забезпечує найбільш стабільну роботу грохота і максимальну ефективність просіювання як дрібних так і грубих фракцій.