

ВСТУП

Конусні дробарки широко використовуються в гірничо-збагачувальній галузі для подрібнення підірваного гірської породи. Метою використання дробарок є зменшення розміру частинок гірських матеріалів або звільнення цінних мінералів із руд. Величезна кількість матеріалу щорічно подрібнюється конусними дробарками. Основні параметри конусної дробарки включають продуктивність; розмір і форму частинок.

Не зважаючи на таке поширення конусних дробарок, процес подрібнення ними порід та визначення продуктивності та прогнозування гранулометричного складу готового продукту є не досить вивченим.

Моделювання процесів і імітація мають велике значення в гірничо-переробній промисловості. Точні динамічні моделі гірничо-збагачувальної фабрики допомагають у розробці системи керування, визначенні розмірів обладнання та навчанні операторів. Наразі, із запровадженням концепції Industry 4.0, симуляція процесу стає ще більш актуальною, оскільки вона може працювати як цифровий двійник процесу, щоб знайти оптимальні робочі умови, тренувати агенти навчання з посиленням або прогнозувати несправності в обладнанні.

Відомо кілька підходів до моделювання конусних дробарок. Зазвичай дослідники для визначення продуктивності конусної дробарки проводять інтегрування поля масового потоку по горизонтальному поперечному перерізу камери дроблення. Для вирішення складного інтеграла потрібно більше часу, що призводить до нижчої обчислювальної ефективності; особливо для оптимізації процесу. А для передбачення якості продукту, процес дроблення моделюється, як серія подій дроблення. Однак ці підходи не містять жодної інформації про розподіл розміру шматків, тому його не можна було використовувати для безпосереднього розрахунку масового відсотка крупності продукту.

Отже дослідження процесу дроблення у конусних дробарках середнього та дрібного дроблення та розробка математичної моделі для розрахунку

продуктивності конусної дробарки та прогнозування масового відсотка за крупністю є *актуальним науково-технічним завданням*.

Метою роботи є покращення режиму роботи конусних дробарках середнього та дрібного дроблення за рахунок обґрунтування раціональних експлуатаційних параметрів на основі розробленої математичної моделі.

Об'єкт досліджень – процес дроблення породи у конусних дробарках середнього та дрібного дроблення.

Предмет дослідження – параметри конусних дробарок середнього та дрібного дроблення.

Наукове положення. Встановлено, що залежність продуктивності конусної дробарки середнього дроблення від швидкості обертання рухомого конуса є квадратичною та обернено пропорційною, причому стандартні швидкості обертання рухомого конуса, обрані виробниками дробарок, не повністю використовують номінальний хід конусу.

1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПРОЦЕСУ РОБОТИ КОНУСНИХ ДРОБАРОК СЕРЕДНЬОГО ДРОБЛЕННЯ

1.1. Аналіз технологічного процесу застосування конусних дробарок

У гірничодобувній промисловості дроблення є першою механічною стадією процесу подрібнення, головною метою якого є звільнення цінних мінералів від пустої породи. Найважливішим аспектом дроблення зазвичай є коефіцієнт зменшення, який є неявним показником розподілу продукту за розміром [3, 7, 8, 10, 18].

Дробарки мають центральне значення як у гірничо-збагачувальній галузі, так і у інших галузях для дроблення гірської породи, видобутої у шахті або у кар'єрі. Важливими аспектами дроблення для виробників є підвищення якості продукції та потужності при одночасному зниженні витрат виробництва [3, 7, 8, 10, 18].

Протягом останніх кількох років вимоги до якості концентратів та сировини будівельних робіт стали більш високими через бажання мінімізувати витрати на технічне обслуговування [3, 7, 8, 10, 18].

Подрібнений матеріал для концентратів виробляється у три основні послідовні етапи, на яких утворюються частинки, а саме підривання, дроблення та подріднення. Сировиною для процесу є тверда порода. Метою вибухових робіт є, насамперед, звільнення матеріалу від навколишньої породи, а в другу чергу – зменшення його розміру, який необхідно обробити.

Після вибухових робіт гірський матеріал транспортується на первинну дробильну установку крупного дроблення, яка часто розташована поблизу кар'єру. Дробильні заводи мають дуже різні компонування залежно від того, коли і з якою метою вони були побудовані. Властивості гірської породи разом із типом продукту та вимогами до потужності є факторами, які впливають на вибір дробарок і планування дробильної установки.

Приклад дробильної установки наведено на рис 1.1 [3, 7, 8, 10, 18].

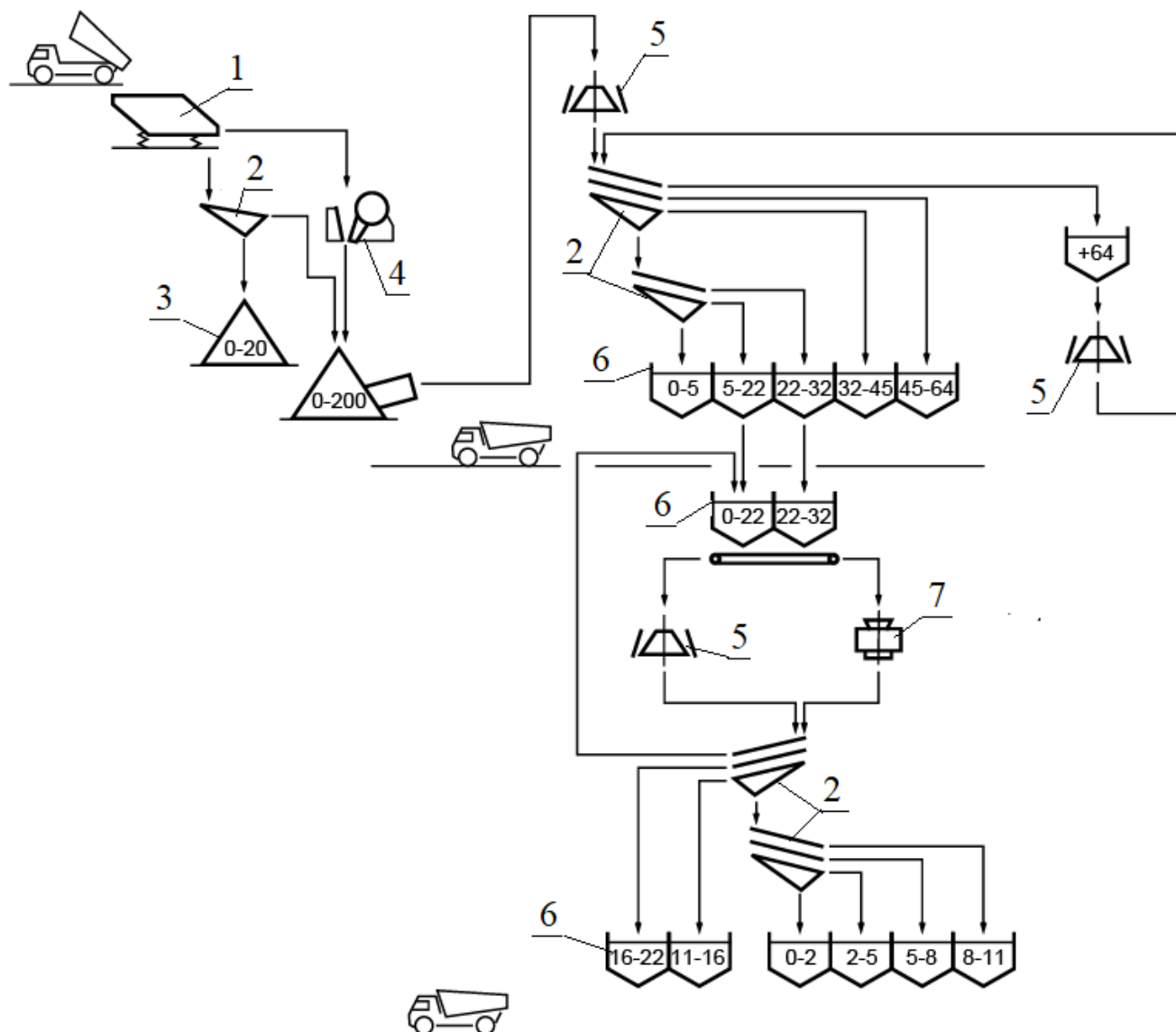


Рис 1.1 – Чотиристадійна схема дроблення [3, 7, 8, 10, 18]: 1 – колосниковий живильник; 2 – грохот; 3 – склад; 4 – щокова дробарка; 5 – конусна дробарка; 6 – бункери; 7 – дробарка ударна

На першому етапі процесу, подачі та колосниковий грохот, відбувається важливе покращення якості. Грунт, глину і дрібну фракцію відокремлюють від породи більш високої якості. Дрібний матеріал, що походить із слабких зон гірської маси, інакше проходив би через кілька етапів процесу з непотрібними та небажаними відходами. Якщо слабший матеріал можна додати до кінцевого продукту, якість продукту значно погіршується.

На сьогоднішній день не існує доступної технології, за допомогою якої можна було б досягти загального зменшення розміру всіх потрібних сортів продукції за один крок. Отже, дроблення виконується як серія послідовних етапів процесу. Шляхом відсіювання готові матеріали поділяють на проміжну і кінцеву стадії. При правильному компонованні схеми дроблення, якість продукту підвищується з кількістю етапів дроблення. Повторне зменшення розміру поступово покращує якість і міцність на кожному етапі. Відомо, що м'яке дроблення, тобто невелике зменшення розміру на останній стадії, дає продукт з високою міцністю та хорошою формою частинок, тобто високою кубатурою [3, 7, 8, 10, 18].

Первинна дробарка зазвичай є шоковою дробаркою або конусною дробаркою крупного дроблення, на яку подається підірваний гірським матеріалом. Оскільки розмір матеріалу, що підривається, може сильно відрізнитися, первинна дробарка повинна мати великий вхідний отвір. Вторинні дробарки зазвичай бувають конусного типу. Третинні та кінцеві дробарки переважно є конусними. У ситуаціях, коли необхідна дуже висока кубатура, кінцева дробарка може альтернативно бути ударною дробаркою, якщо породу особливо важко формувати [3, 7, 8, 10, 18].

Схема установки дроблення для подрібнення руди, багатой на нікель, показана на рис 1.2 [3, 7, 8, 10, 18].

Схема складається з трьох ступенів дроблення та однієї стадії подрібнення. Від дробильної установки потрібен лише один продукт. Потім цей продукт подається на етап подрібнення. Після подрібнення матеріал надходить на збагачувальну фабрику.

Первинна дробарка, як правило, конусна або шокова дробарка, залежно від вимог до потужності. Конусні дробарки мають значно вищу продуктивність, ніж шоківі дробарки. Це причина, чому конусні дробарки крупного дроблення зазвичай використовуються як первинні дробарки в гірничодобувній промисловості. Первинне дроблення може здійснюватися під землею в шахті або на поверхні поблизу наступних етапів дроблення та подрібнення [3, 7, 8, 10, 18].

Існує три принципи дроблення, що представляють промисловий інтерес. Інші можливі принципи (електричні тощо) на сьогодні не досягли рівня, необхідного для комерційного застосування [4, 5, 11-17, 20].

Основні принципи подрібнення [4, 5, 11-17, 20]:

- дроблення при стисканні;
- ударне дроблення;
- дроблення стиранням.

Усі важливі мінерали та гірські матеріали кристалічні. У кристалічній структурі атоми впорядковані в регулярний тривимірний візерунок. Щоб зменшити розмір частинок гірської породи, потрібно розділити кожну частинку на більш дрібні частинки. Для даного об'єму матеріалу загальна площа поверхні повинна збільшуватися зі збільшенням кількості частинок. Збільшення загальної площі поверхні є енерговитратним процесом [4, 5, 11-17, 20].

Під час стиснення енергія перетворюється з потенціальної в пружну, яка накопичується в кристалічній решітці. Коли десь у кристалі рівень напруги досягає критичного значення, міжатомні зв'язки розриваються і тріщина поширюється. Концентрація напруги залежить від механічних властивостей окремих матеріалів, але найважливішою зазвичай є наявність тріщин або дефектів у матриці. Ці тріщини та дефекти діятимуть як місця концентрації напруги, і з цих місць тріщини поширюватимуться. Коли тріщина поширюється, буде створена нова поверхня. Оскільки атом на вільній поверхні має вищий потенціал порівняно з атомом у матриці, створення вільної поверхні буде енерговитратним процесом. Частина пружно накопиченої енергії буде перетворюватися на поверхневу енергію під час поширення тріщини. Решта пружної енергії дисоціюватиме, коли кристал розслабиться. Така поведінка відома як крихке руйнування. Навпаки, міцний і пластичний матеріал, як, наприклад, сталь, може послабити пружну енергію за допомогою механізму пластичного потоку. Потім енергія витрачається на спотворення форми матеріалу [4, 5, 11-17, 20].

У дробарках, що руйнують матеріал стисканням гірська порода дробиться шляхом стискання частинок між двома поверхнями (рис 1.3). Стискаючи матеріал, контактні сили між частинками викликають поле напруги розтягу всередині частинок породи. Тріщини утворюються, коли поле напруги в деякій локальній точці перевищує критичне значення. Коли тріщини поширюються або з'єднуються разом шляхом крихкого розриву, досягається макроскопічне руйнування, що призводить до менших фрагментів [4, 5, 11-17, 20].

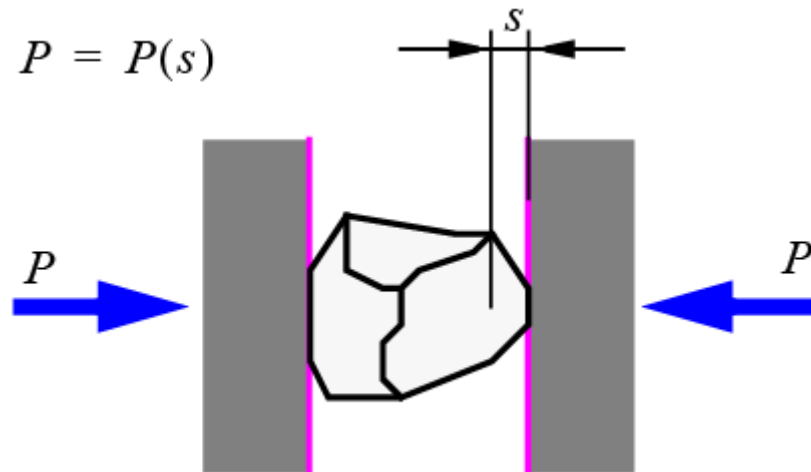


Рис 1.3 – Руйнування стисканням [4, 5, 11-17, 20]

Дроблення стисканням може бути силовим або обумовленим формою. Для випадку, зумовленого силою, переміщення, а отже, і зменшення розміру, є функцією прикладеної сили. Контролюючи силу та, неявно, також енергоспоживання, можна контролювати зменшення розміру. В обумовленому формою випадку зменшення розміру та прикладена сила є функцією переміщення. Зменшення розміру можна контролювати, контролюючи стиснення. Вкладена енергія і результуюча сила є вторинними параметрами в умовному випадку форми [4, 5, 11-17, 20].

Щокові, конусні та валкові дробарки — це приклади дробарок, у яких використовується кондиційне стиснення для зменшення розміру. Існує істотна і важлива відмінність між валковими дробарками та іншими типами дробарок. У валковій дробарці матеріал стискається лише один раз, тоді як, наприклад, у конусній дробарці дроблення є повторюваним процесом [4, 5, 11-17, 20].

Частинка, яка розбивається шляхом компресійного дроблення, генерує дочірні фрагменти, які діляться на два основних класи розміру. Дискретна кількість більших фрагментів утворюється внаслідок розтріскування внаслідок напруженого стану розтягування. Деяка кількість дрібного матеріалу утворюється в точках контакту через напруги зсуву [4, 5, 11-17, 20].

Іншим широко використовуваним принципом фрагментації є руйнування при ударі (рис 1.4). Ударне руйнування є енергетично контрольованою формою руйнування. Енергія може передаватися частинкам за допомогою ротора, який прискорює частинки до швидкості, близької до окружної швидкості ротора. Потім частинки стикаються зі стінкою інших частинок, де відбувається фрагментація. Отримане зменшення розміру контролюється кількістю енергії, що передається частинкам. Кінетична енергія, у свою чергу, залежить від швидкості частинки. Таким чином, зменшенням розміру можна керувати за допомогою швидкості ротора [4, 5, 11-17, 20].

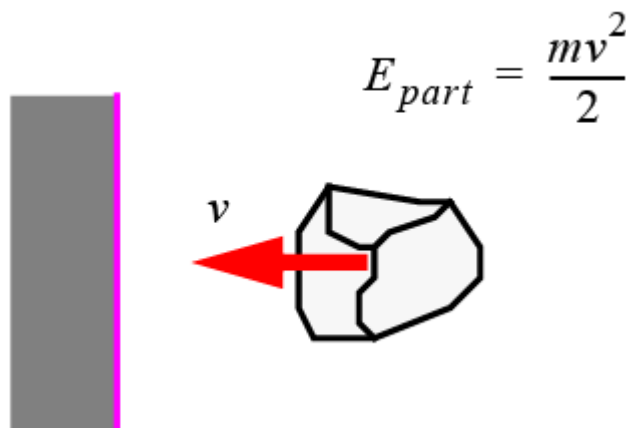


Рис 1.4 – Руйнування при ударі [4, 5, 11-17, 20]

Дробарки, в яких використовується руйнування, кероване енергією, називають ударними дробарками. Відомо, що ці типи дробарок виробляють продукт із хорошою формою частинок, тобто високою кубатурою. Залежно від рівня енергії, дробарку можна використовувати, перш за все, для покращення форми або для значного зменшення розміру. Недоліком ударних дробарок є те, що вони утворюють значну кількість дрібної фракції. Ця властивість є прямим наслідком використовуваного принципу подрібнення [4, 5, 11-17, 20].

Ударні дробарки виробляють матеріал, який містить меншу варіацію міцності, ніж подача, оскільки кожна частинка піддається впливу механізму руйнування. Конусні дробарки не подрібнюють матеріал так послідовно, як ударні дробарки, оскільки існує різна кількість частинок, що піддаються дії механізму подрібнення, і ступінь подрібнення частинок [4, 5, 11-17, 20].

Стирання - це руйнування внаслідок руйнування при зсуві, яке створює переважно тонкий матеріал. Генерація пилоподібних фракцій часто небажана. Стирання відбувається на практиці в основному через взаємодію між частинками, і тому його слід розглядати як міжчастинковий розрив [4, 5, 11-17, 20].

У конусній дробарці гірська порода подрібнюється між твердими поверхнями. Рух рухомої поверхні не залежить від завантаження дробарки. Тому досліджуваним принципом подрібнення є кондиційне компресійне дроблення.

У конусних дробарках дроблення досягається ексцентричним обертальним рухом осі головного валу, як показано на рис 1.5 [4, 5, 11-17, 20].

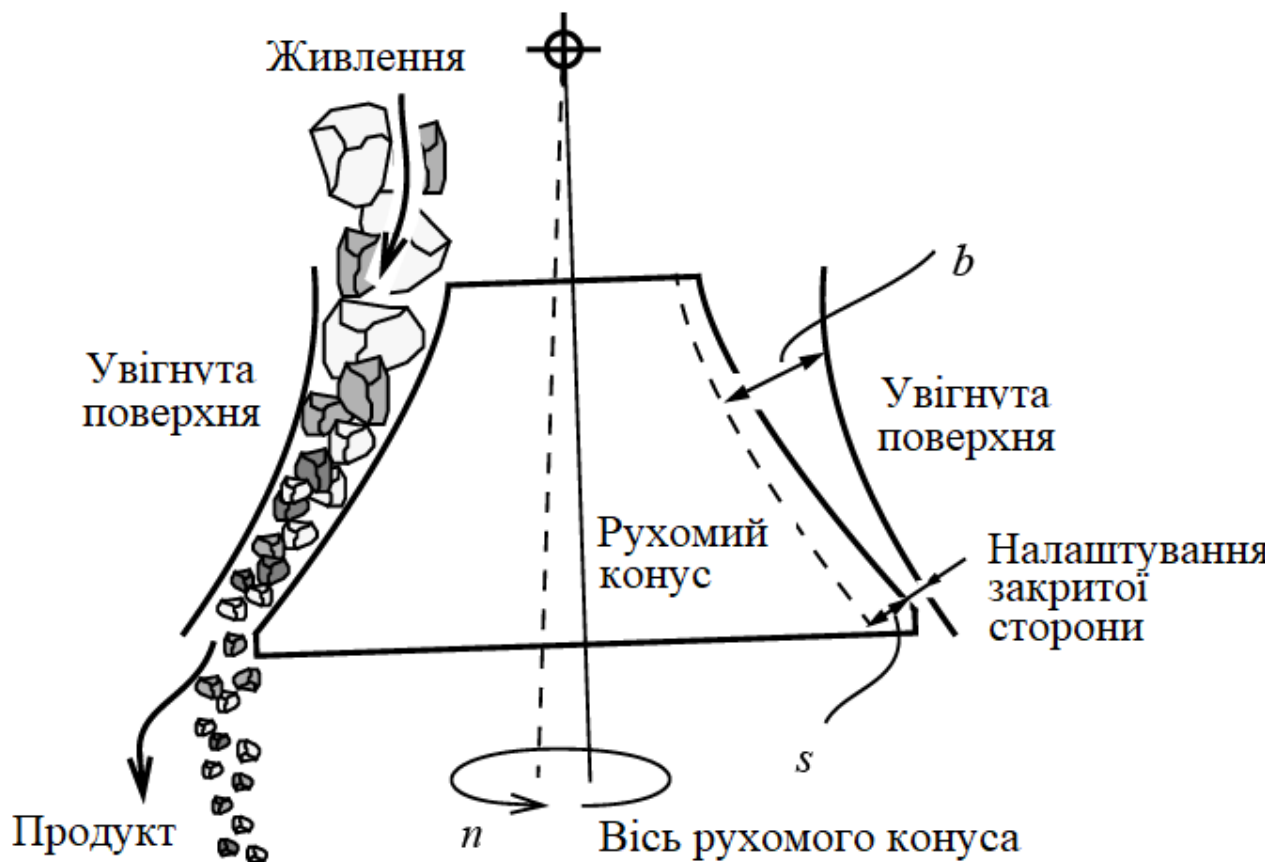


Рис 1.5 – Принцип дії конусних дробарок середнього та дрібного дроблення [4, 5, 11-17, 20]

Частинки затискаються, стискаються та роздавлюються між рухомим та нерухомим конусами. Розрив частинок може бути як одиничним (частинки розбиваються між конусами), так і міжчастинковим (між іншими частинками). Футерування конусів необхідно регулярно замінювати, оскільки вони постійно зношуються [4, 5, 11-17, 20].

Дроблення відбувається безперервно і значною мірою є міжчастинковим. Міжчастинкове дроблення досягається, коли частинка напружується та розривається між іншими частинками. Міжчастковий розрив є бажаним з точки зору зносу та терміну служби. Вважається також, що міжчастинковий розпад забезпечує найкращу форму отриманих частинок. Для досягнення міжчасткового руйнування зазвичай рекомендуються умови живлення через регульований живильник. Умови подачі живальником означають, що вхідний отвір дробарки закритий вихідним матеріалом. Потім подаваний матеріал подається в дробарку під дією сили тяжіння [4, 5, 11-17, 20].

Властивості, тобто розподіл розмірів і параметри якості, продукту, що виходить із дробарки, є результатом взаємодії між дробаркою та породою. У свою чергу, взаємодія залежить від геометрії камери, динаміки дробарки та характеристик гірського матеріалу [19].

Увігнутість нерухомого конуса, геометрія рухомого конуса, ексцентриситет і розташування точки повороту разом утворюють геометрію камери конусної дробарки. Подібно кривошипу, ексцентриситет повертає головний вал з постійною швидкістю. У верхній частині головний вал закріплений у точці повороту. Для деяких конструкцій точка опори є лише віртуальною. Рухомий конус закріплений на головному валу, а увігнутий нерухомий – на рамі дробарки. Результуючий рух конусу та головного валу буде обертальним рухом [19].

Якщо розглядати вертикальний поперечний переріз дробарки, поверхня рухомого конуса буде циклічно рухатися вперед і назад відносно нерухомого увігнутого. Під час стискаючого руху гірська порода буде піддаватися стискаючому полю напруги і таким чином подрібнюватися. Під час вивільняючого

руху матеріал може текти вниз через камеру. Рух обумовлений дією сили тяжіння і регулюється рухом конуса [15-17, 20].

У фіксованій точці розташування десь у камері дробарки відстань між рухомим та нерухомим конусами буде змінюватися між відкритим і закритим положенням, як показано на рис 1.6. Рух можна описати циклічною функцією ексцентричного кута α . Кут ексцентрики відповідає положенню ексцентриситету і, отже, також положенню головного вала [19].

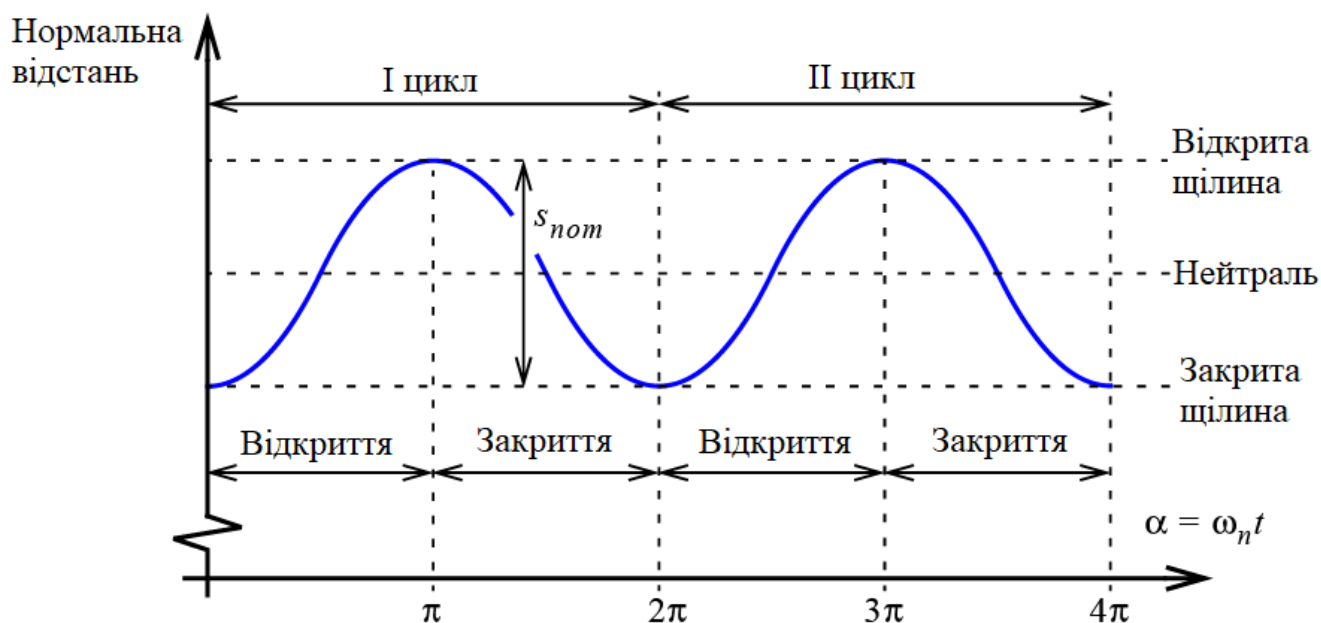


Рис 1.6 - Відстань між рухомим та нерухомим конусами [15-17, 20]

Відстань між мантиєю та увігнутою поверхнею на виході з дробильної камери називається закритою стороною, коли мантия знаходиться в закритому положенні. Налаштування закритої сторони зазвичай називають CSS.

Традиційно вважається, що руйнування матеріалу в дробарках конусного типу залежить від руйнування окремих частинок. За останні десять років акцент змінився на те, що виробники намагаються створити вищий ступінь міжчасткового розриву. Стверджується, що підвищення ступеня дроблення між частинками покращує ефективність дроблення та форму продукту [21].

Коли матеріал проходить через дробарку, він буде піддаватися повторюваним стисненням через циклічні коливання. Під час кожного стиснення

матеріал буде частково подрібнений. Через низхідний потік і багаторазове стиснення камери дробарки матеріал рухатиметься ступінчасто .

1.3. Аналіз методів моделювання роботи конусних дробарок середнього та дрібного дроблення

На перший погляд конусна дробарка може здатися досить простим устаткуванням - породи зменшуються в розмірах, проходячи крізь машину з рухомими поверхнями. Ця думка може бути вірною, якби не ставилося жодних вимог ні до подрібненого продукту, ні до ефективності роботи дробарки. Застосовуючи суворо визначені вимоги до якості продукції в поєднанні з бажанням оптимізувати важливі аспекти виробництва, виникає потреба в детальному розумінні роботи дробарки.

Процес зменшення розміру, що відбувається в конусній дробарці, ще не повністю вивчений. Проте можливість моделювання та прогнозування продуктивності конусної дробарки становить великий інтерес для розробки дробарок, а також для проектування та оптимізації дробильних установок. Модель, що дає виробникам можливість пристосувати дробарку до конкретних потреб клієнтів, безсумнівно, стане великим проривом для кар'єрної та гірничої промисловості.

Проблеми, пов'язані з конусними дробарками, можна розділити на три різні групи [1,2]:

- Технологічна схема дробильних установок
- Конструкція дробарки
- Робота дробарки

При проектуванні процесів подрібнення, звичайно, дуже цікаво мати знання про різні компоненти та задіяні машини.

Продуктивність існуючих дробарок можна визначити за допомогою повномасштабних випробувань. Потім ці багатовимірні карти можна використовувати для моделювання технологічних схем для оцінки дизайну різних

процесів. Застосовуючи відповідні методи оптимізації, можна було б отримати оптимальний вибір робочих параметрів для задіяних дробарок. Недолік такого підходу очевидний, оскільки повномасштабне тестування може зайняти дуже багато часу [6, 9].

Процес зменшення розміру, що відбувається в конусній дробарці, є складним за своєю природою. Прямих кореляцій між вхідними та вихідними параметрами немає. Якщо немає доступних моделей, можливість прогнозування продуктивності довільної конусної дробарки дуже обмежена. Тому розробки та вдосконалення конструкції дробарок будуть обмежені поступовими вдосконаленнями існуючого обладнання.

Параметри, пов'язані з дробаркою, можна розділити на незалежні та залежні параметри. Незалежними параметрами машини є [1,2, 6, 9]

- ексцентрична швидкість;
- налаштування закритої сторони (ширина щілини);
- хід;
- конструкція камери дроблення;
- міцність матеріалу;
- стійкість до стирання матеріалу.

Розмір, форма та міцність матеріалу в живленні є результатами попередніх етапів процесу і тому розглядаються як незалежні. Залежні параметри відповідають продуктивності дробарки. Параметри, пов'язані з дробаркою, це потужність, потреба в потужності та гідравлічний тиск (результуюче вертикальне навантаження). Залежними параметрами, що характеризують виріб, є розмір, форма і міцність виробу. Залежні параметри так чи інакше залежать принаймні від одного незалежного параметра [1,2, 6, 9].

Щоб проілюструвати залежність між незалежними вхідними параметрами та результатом дроблення, можна сформулювати так звану матрицю взаємозалежності. Ця матриця пов'язує вхідні та вихідні параметри [20]

$$\begin{bmatrix} \text{Місткість} \\ \text{Вимоги до живлення} \\ \text{Гідравлічний тиск} \\ \text{Розмір продукту} \\ \text{Форма продукту} \\ \text{Міцність продукту} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X & X & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ X & X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & 0 & 0 & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Швидкість} \\ \text{Ширина щілини} \\ \text{Хід} \\ \text{Конструкція камери} \\ \text{Міцність матеріалу} \\ \text{Стійкість до стирання} \\ \text{Розмір матеріалу в живленні} \\ \text{Форма матеріалу в живленні} \\ \text{Міцність матеріалу в живленні} \end{bmatrix}$$

X у матриці взаємозалежності символізує залежність між двома параметрами. Якби матриця взаємозалежності була квадратичною та діагональною, процес дроблення було б легко проаналізувати. У цьому випадку один вхідний параметр впливатиме лише на один вихідний параметр. Процес було б легко налаштувати, якби, наприклад, швидкість була єдиним параметром, що впливає на потужність [20].

Процес із квадратичною та трикутною матрицею взаємозалежності можна було б налаштувати шляхом налаштування вхідних параметрів процесу в правильному порядку. У разі дроблення за допомогою існуючого дробарного обладнання, такого як щоківі та конусні дробарки, матриця взаємозалежності буде відрізнятися від трикутної. У цьому полягає складність процесу дроблення. Часто виникають проблеми з якістю через варіації породного матеріалу, такі як тип мінералу, розмір зерен, розподіл тріщин тощо.

Управління процесом є бажаним для підтримки високої якості продукту, але сьогодні немає доступних систем для цієї мети через відсутність онлайнних детекторів для розподілу розміру та форми продукту. Іншим недоліком є те, що доступно дуже мало моделей, які описують характеристики дробарки.

Запропонована система керування процесом із замкнутим циклом показана на рис 1.7 [21].

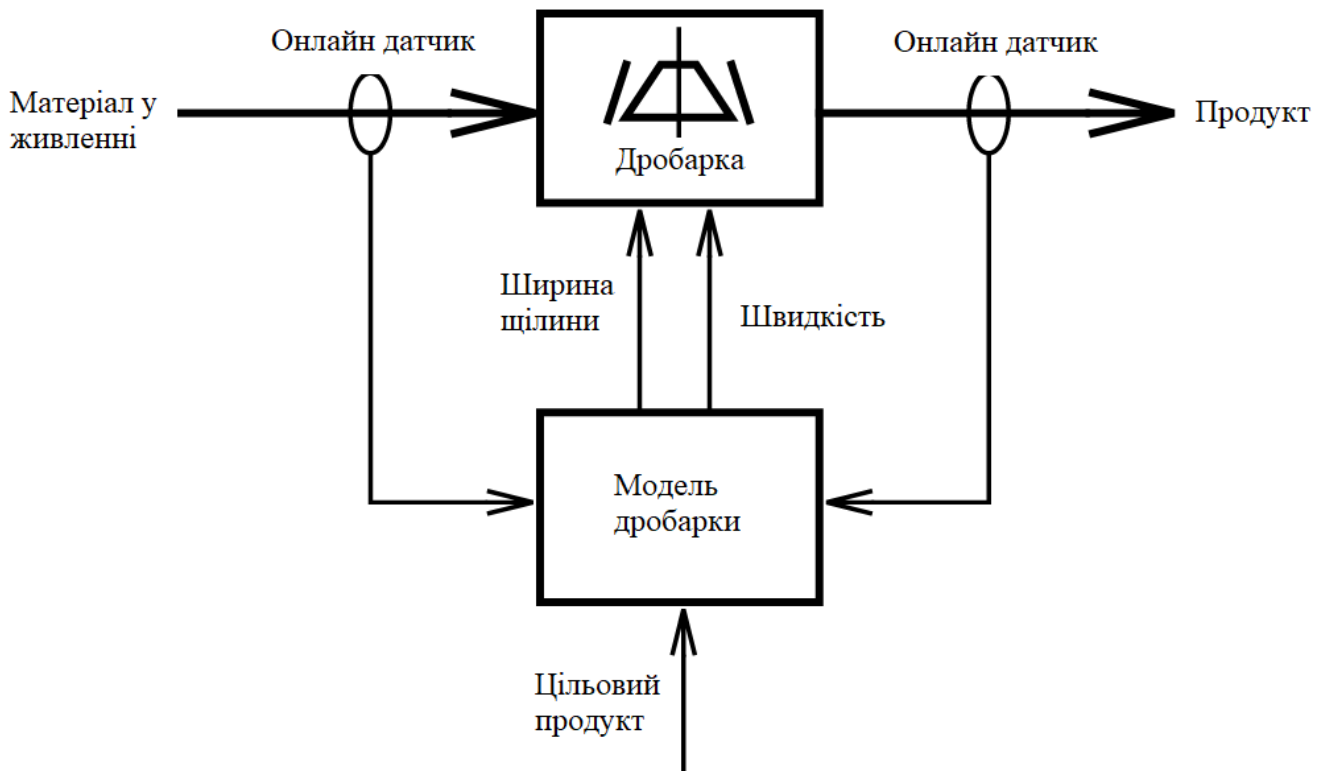


Рис 1.7 - Можлива система управління процесом однієї стадії дроблення [21].

Оперативні детектори можуть бути оптичними, акустичними або мікрохвильовими. Сигнали керування від моделі дробарки – це положення закритої сторони і ексцентрична швидкість [21].

Щоб досягти керування процесом із замкнутим циклом, необхідна розробка як детекторів, так і моделей дробарки.

Без детекторів система буде працювати з відкритим контуром і, отже, дуже чутлива до коливань подачі та зносу камери дробарки.

На кожному етапі дроблення утворюється певна кількість наддрібного матеріалу. Визначення дрібних частинок різне, але загальним визначенням є частинки розміром менше 2 мм. У деяких галузях, таких як будівництво, шляхобудівництво важливим є саме зменшення таких наддрібних частинок. Навпаки, для гірничо-збагачувальної галузі утворення таких частинок є прийнятним і навіть бажаним, оскільки зменшує навантаження на кожен наступний ступінь дроблення та подрібнення. промисловість.

У літературі доступні кілька підходів до моделювання конусних дробарок. Уайт [21] використовував баланс маси, а також матриці класифікації та руйнування для моделювання контуру дроблення. Модель Вайта була розширена Лінчем [18.], щоб включити прогноз електричного струму для дробарки. Додаткові рівняння руйнування частинок були введені Уайтом та ін. [22], щоб запропонувати альтернативні моделі перевірки даних про дроблення з різних шахт. Андерсен [11] розширив класифікаційну функцію Вайта, включивши в неї характеристики футеровки дробарки, і використав відсоток продукту, що проходить через сито з розміром, що дорівнює одній десятій початкового розміру частинок, для прогнозування руйнування. У моделі, представленій Евертссоном [17], ступінь стиснення, параметр, розрахований на основі даних геометрії конусної дробарки, допомагає визначити руйнування та класифікаційні матриці.

У цитованих вище роботах конусна дробарка розглядається як єдина секція дроблення та класифікатор. Хербст і Облад [15] запропонували інший підхід, при якому камера дроблення розділена на декілька зон. У тому ж дусі Atta et al. [16] використовували різні параметри руйнування та вибору в кожній зоні, а пізніше ці автори також представили моделі струму та споживання електроенергії [12]. Ще більш детальні спроби моделювання складаються з використання моделей на основі методу дискретних елементів. Використовуючи збільшення обчислювальної потужності, цей чисельний метод тепер також використовується для моделювання динамічної поведінки конусних дробарок [19].

З практичної точки зору, модель конусної дробарки, запропонована Уайтом, забезпечує розумний компроміс між репрезентативністю та простотою [17]. Для більш складних моделей може знадобитися інформація про геометрію дробарки, а подальший розрахунок займає багато часу [14]. Дослідження щодо розвитку розширеного керування [15], застосувань штучного інтелекту та порівняння схем оптимізації [19] спиралися на модель Вайта.

Крім того, блоки конусної дробарки в багатьох комерційних симуляторах (наприклад, IDEAS® — Andritz Automation, Mimic® — Emerson і DynSim® — Aveva) базуються на моделі Вайта.

Таке програмне забезпечення для динамічного моделювання користується високим попитом у додатках цифрових двійників, проектуванні систем керування, навчанні операторів та оцінці технологічних схем.

Вибір моделі є лише першим кроком у надійному моделюванні поведінки процесу.

Другий крок складається з калібрування моделі для її конкретних цілей (моделювання даної установки, робочого сценарію або набору даних). Зазвичай калібрування параметрів функції руйнування здійснюється за результатами лабораторних випробувань на руйнування при ударі, що є трудомістким завданням [14]. Деякі альтернативні підходи до калібрування включають метод проб і помилок, статистичні висновки та відповідну стратегію оптимізації [15]. Серед цих альтернатив оптимізація виділяється тим, що вона дає майже оптимальні рішення протягом можливого проміжку часу для практичних застосувань і пропонує структуровану та відтворювану структуру [19].

Переваги калібрування моделі на основі методів оптимізації були встановлені в літературі. У 1984 році Клімпель і Остін заявили про свою перевагу моделі згорнутої функції розриву, стверджуючи, що розв'язання задачі калібрування за допомогою неущільненої моделі вимагає надто великої обчислювальної потужності [20]. Проте з роками розвиток обчислювальних можливостей міг зробити цей аргумент застарілим, і надання більших ступенів свободи в задачі калібрування може призвести до більш точних і точних моделей дроблення, що дасть середню помилку та стандартне відхилення менше 0,5% і 3,0%, відповідно, між прогнозованим і вимірним розподілом розмірів частинок (PSD), як отримано Whiten. Наскільки нам відомо, останні роботи, які повідомляють про калібрування моделі конусної дробарки Вайта, датуються 1990-ми роками. Ця ситуація вказує на те, що або наукове співтовариство задоволене доступними стратегіями калібрування для моделі конусної дробарки Вайта, або не було зроблено жодних зусиль для підвищення точності калібрування. Ми вважаємо, що це останнє, і тому ми пропонуємо нову стратегію калібрування для моделі конусної дробарки.

У цьому документі калібр Проблема для моделі конусної дробарки Вайта представлена як задача оптимізації. Сума квадратів похибок між вимірними та оціненими кумулятивними значеннями PSD мінімізується за допомогою алгоритму послідовного квадратичного програмування. Замість моделі стислої матриці руйнування параметрів, запропонованої Уайтом, використовується неущільнена або повноматрична модель, у якій усі елементи матриці руйнування є параметрами калібрування. Це додає більше ступенів свободи до проблеми калібрування. Для стратегії калібрування необхідні лише дані, які регулярно збираються під час роботи (PSD, налаштування закритої сторони та пропускна здатність); додаткові дані лабораторних тестів, які може бути важко отримати [22], непотрібні.

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

Метою роботи є покращення режиму роботи конусних дробарках середнього та дрібного дроблення за рахунок обґрунтування раціональних експлуатаційних параметрів на основі розробленої математичної моделі.

Об'єкт досліджень – процес дроблення породи у конусних дробарках середнього та дрібного дроблення.

Предмет дослідження – параметри конусних дробарок середнього та дрібного дроблення.

Задачі дослідження

1. Розробка математичної моделі конусної дробарки на основі методу розрахунку з модульною структурою на основі дедуктивної моделі дробарки.
2. Проведення дослідження з визначення раціональних параметрів на основі розробленої математичної моделі.
3. Розробка рекомендацій щодо раціональних параметрів конусної дробарки

2. МОДЕЛЮВАННЯ РУЙНУВАННЯ ПОРОДИ КОНУСНОЮ ДРОБАРКОЮ

2.1. Загальна методика досліджень

Задля досягнення мети роботи, що полягає у покращенні режиму роботи конусних дробарках середнього та дрібного дроблення за рахунок обґрунтування раціональних експлуатаційних параметрів планується побудувати математичну модель конусної дробарки для прогнозування продуктивності конусної дробарки, яка враховує наступне:

- Моделювання процесу дроблення;
- Характеристика поведінки руйнування гірського матеріалу;
- Моделювання потоку;
- Взаємодія між потоком і зменшенням розміру.

Моделювання процесу включає ідентифікацію принципу подрібнення, що використовується разом з основним принципом роботи конусних дробарок.

Загальний процес зменшення розміру моделюється як серія повторюваних подій дроблення. Випробування на розчавлення з кондиційною формою проводяться, щоб охарактеризувати поведінку різних гірських порід щодо дроблення.

Рівняння руху використовуються для опису потоку матеріалу в камері дроблення. Геометричний модуль, здатний обробляти довільну геометрію камери, передає геометричні дані в модель потоку.

Щоб гарантувати збереження безперервності маси та відсутність інших вимог, взаємодії між потоком матеріалу та зменшенням розміру приділяється додаткова увага.

На рис 2.1. показано схему для аналізу конусної дробарки.

Для розрахунку розподілу продукту за розмірами на виході з конусної дробарки відповідно до запропонованої конструкції необхідні дві основні розрахункові моделі. Ці моделі:

- Модель зменшення розміру;

– Модель потоку.

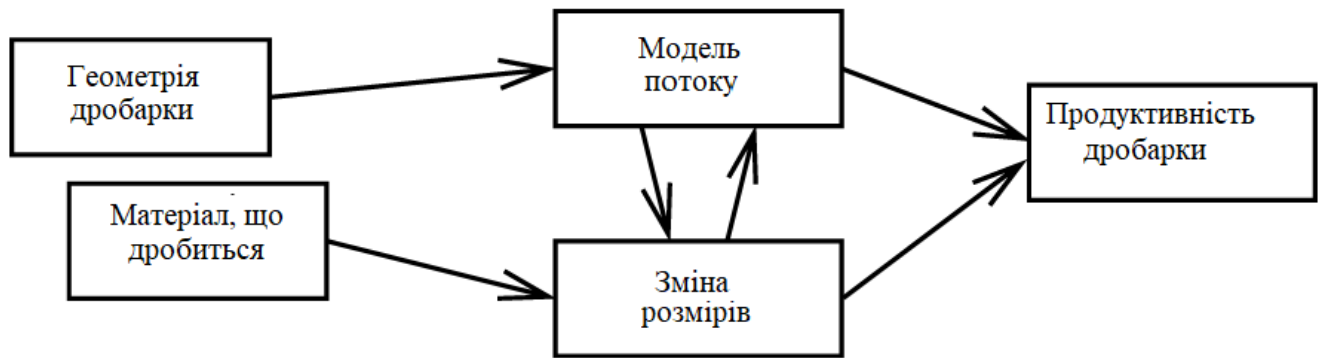


Рис.2.1. - Структура моделі продуктивності дробарки.

Модель зменшення розміру передбачає розподіл розміру після стиснення гірського матеріалу.

Кожен окремий крок зменшення описується функцією вибору та розриву. Модель потоку важлива, оскільки вона описує, як гірська порода рухається вниз через камеру дробарки. Таким чином, модель потоку надає вхідні дані для моделі зменшення розміру, яка використовується для визначення значень функцій відбору та руйнування.

Моделі потоку та зменшення розміру тісно пов'язані між собою, оскільки вхідні дані для моделі зменшення розміру залежатимуть від результату моделі потоку. У свою чергу, модель потоку буде залежати від розподілу за розміром, оскільки буде кілька повторюваних послідовних кроків зменшення.

Додаткова інформація, необхідна для виконання розрахунків:

- Поведінка фрагментації;
- Геометрія дробарки;
- Модель щільності (конститутивний зв'язок між розподілом розмірів і щільністю).

Поведінка фрагментації або характеристики руйнування досягаються за допомогою випробувань шару стиснення, де агрегат частинок подрібнюється у контрольованих умовах. Будь-яка існуюча та неіснуюча конструкція профілю повинна мати можливість аналізуватися модулем геометрії дробарки. Геометрії мантиї та увігнутості разом з іншими важливими параметрами дробарки надаються

як вхідні дані для модуля геометрії. Цей модуль надає дані, необхідні для моделі потоку. Потрібна конститутивна залежність, яка пов'язує розподіл розміру з об'ємною щільністю нестиснутого матеріалу, оскільки щільність змінюється залежно від розподілу частинок за розміром.

На основі структури моделі (рис.2.1) розробимо метод дослідження, який реалізовано в комп'ютерній програмі. Кожен модуль є самодостатнім і може бути оновлений або замінений, якщо необхідно. Інформаційний потік відповідає напрямку стрілок на рис. 2.2.

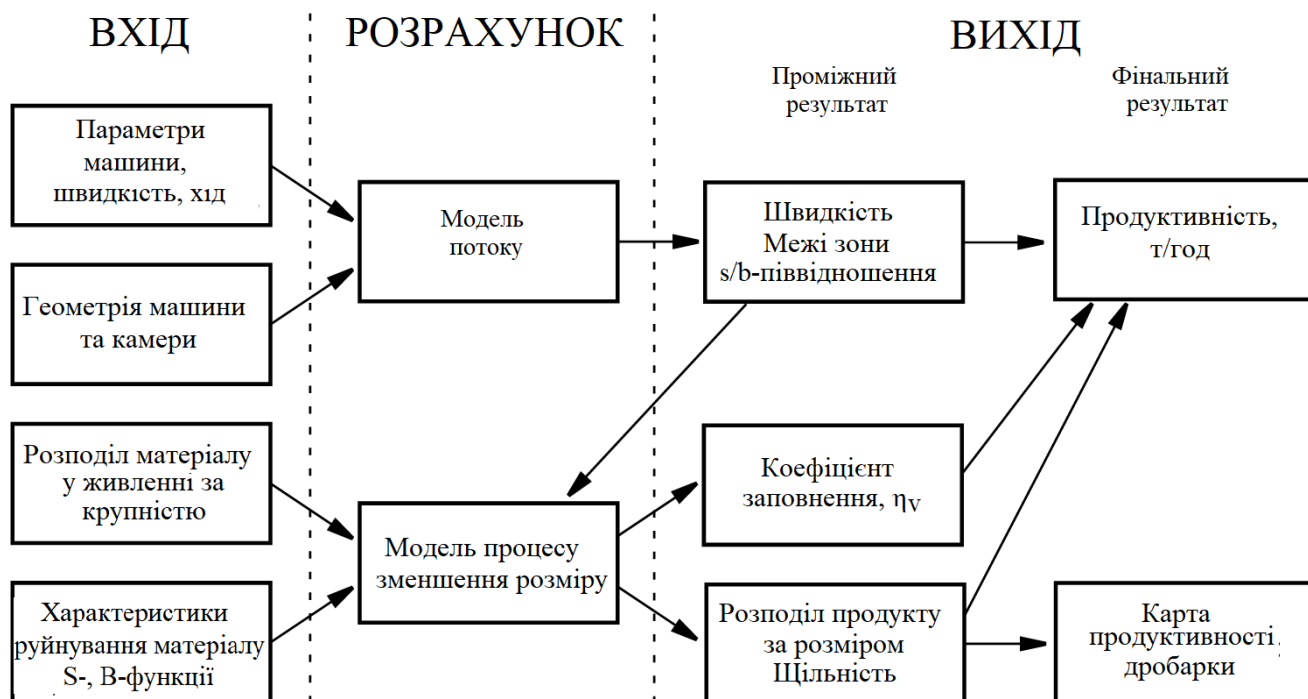


Рис.2.2 - Метод розрахунку з модульною структурою

Вхідними даними для методу розрахунку є параметри машини, такі як налаштування закритої шілини, швидкість, хід, геометрія камери, гранулометричний склад породи у живленні та характеристики руйнування матеріалу. ВХІД поділено на чотири модулі. Прогноз потоку матеріалу та зменшення розміру виконується у двох окремих модулях. Результатом методу є потужність і розподіл продукту за розміром. Межі зон і коефіцієнти стиснення (s/b -ratios) розраховуються як проміжні результати.

2.2. Розробка математичної моделі процесу дроблення у конусній дробарці

2.2.1. Мапа продуктивності дробарки

Об'єднавши загальну потужність із розподілом розміру продукту для кожного режиму роботи, можна отримати набір кривих, що відповідає продуктивності для різних класів продукту. Кінцевий досягнутий результат називається картою продуктивності дробарки, яка може бути багатовимірним і показувати, як кінцевий продукт залежить від варіацій параметрів машини для даної камери дроблення та матеріалу живлення.

Мапа продуктивності дробарки для орієнтовної конусної дробарки показано на рис.2.13.

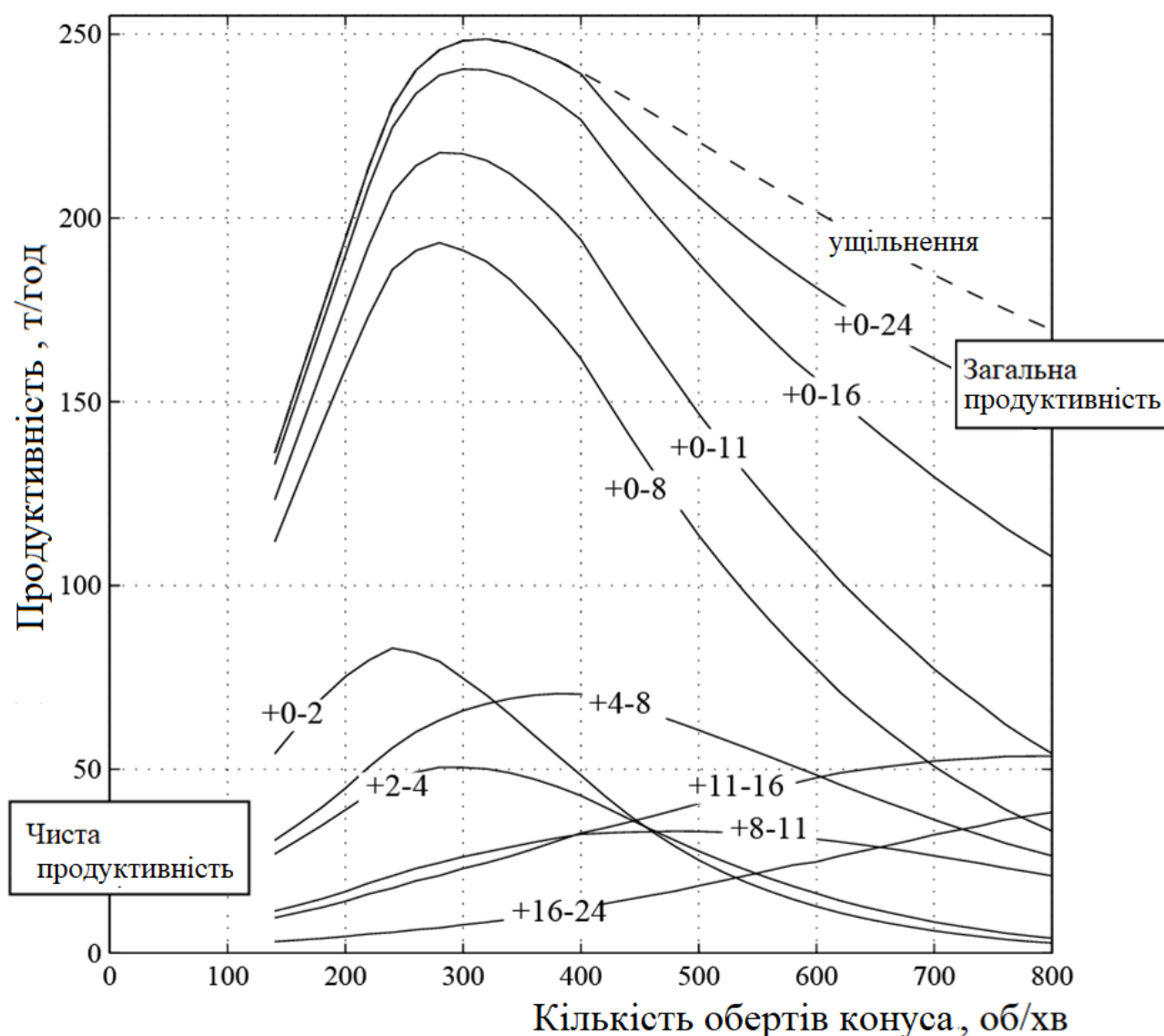


Рис 2.13 - Мапа продуктивності конусної дробарки для різної крупності продукту.

Ця конкретна мапа є двовимірною, оскільки була розрахована лише для одного значення швидкості обертання ексцентрикового стакану рухомого конуса. Можна побачити, що швидкість ексцентрика має великий вплив на кінцевий продукт, тобто розподіл розмірів і чиста ємність різних сортів продукту залежать від цієї швидкості.

Карта продуктивності дробарки описує комбіновану реакцію від взаємодії між дробаркою та гірським матеріалом. Лише загальна потужність не залежить від вибору матеріалу і, отже, дійсна для всіх гірських матеріалів. Карта в загальному випадку є багатовимірною і має стільки вимірів, скільки параметрів машини. У випадку, коли змінними параметрами є ексцентрична швидкість і закрита сторона, карта продуктивності дробарки матиме три виміри.

З карти продуктивності дробарки очевидно, що загальна потужність і всі чисті потужності досить суттєво змінюються зі зміною швидкості обертання рухомого конуса. При підвищенні швидкості обертання рухомого конусу вище 400 об/хв відбувається ущільнення, якщо подача в дробарку не обмежена. Чиста потужність для різних сортів продукту не має максимумів при однаковій швидкості обертання конуса. Цей факт робить оптимізацію дуже цікавою та складною.

2.2.2. Геометрія камери дроблення

Кожну існуючу геометрію камери, незалежно від марки та моделі, можна описати за допомогою набору вузлів, які з'єднані дугами або прямими лініями. Якщо потрібно, будь-яка довільна неперервна функція може бути використана для опису профілю геометрії камери між двома даними вузлами.

Номінальна геометрія дробарки середнього дроблення показана на рис 2.14. Уже на цьому етапі можна розрахувати набір номінальних параметрів, які характеризують камеру дробарки. У кожній точці поперечного перерізу камери визначають номінальний хід і товщина шару. Співвідношення між товщиною ходу

і товщиною шару називається номінальним ступенем стиснення і позначається $(s/b)_{\text{nom}}$. Цей параметр є центральним для подальших прогнозів зменшення розміру.

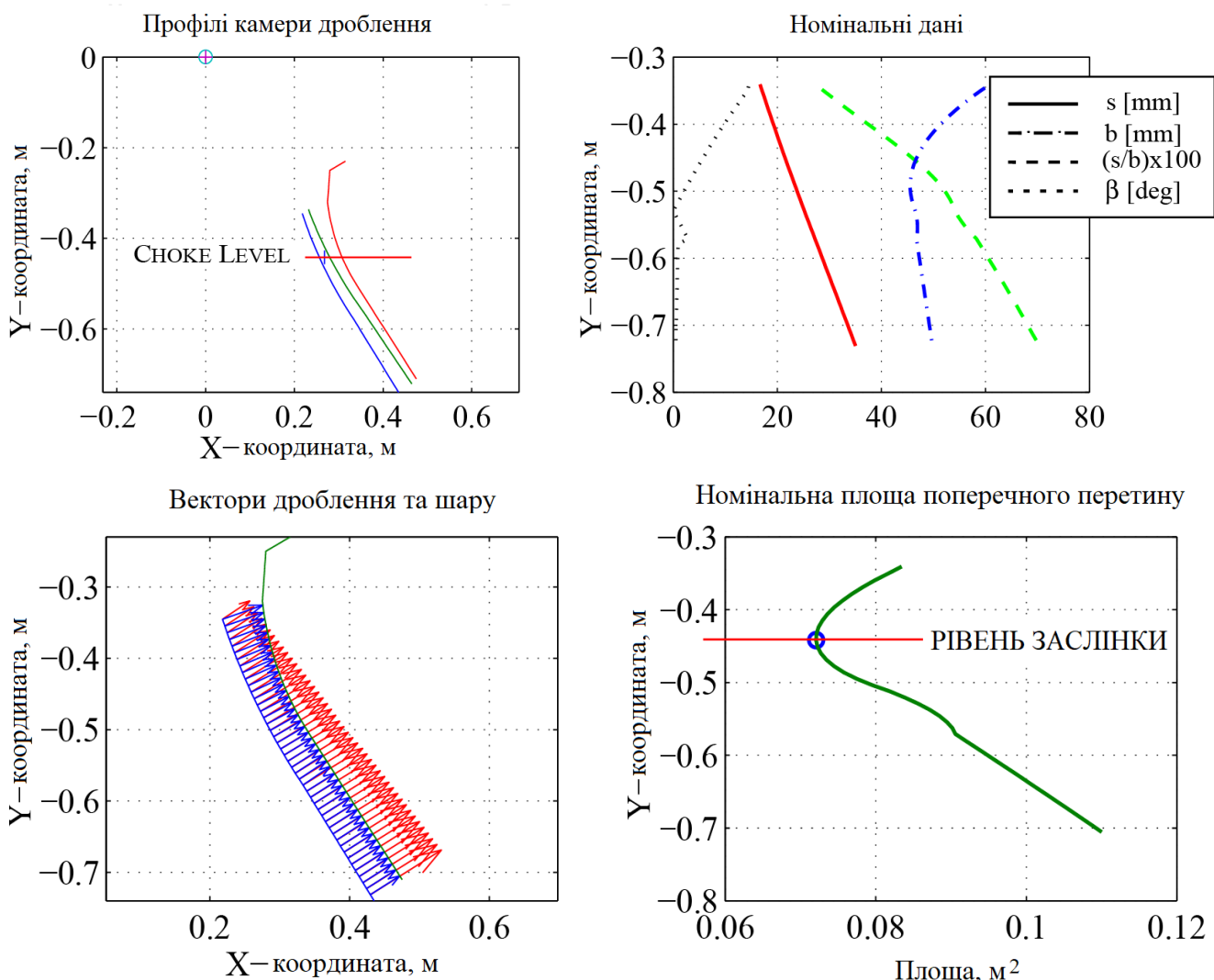


Рис. 2.14 - Геометрія камери дроблення конусної дробарки середнього дроблення

Площа горизонтального перерізу розраховується на всіх вертикальних рівнях. Мінімум площі поперечного перерізу визначає так званий choke level або рівень заслінки камери дробарки. Розташування рівня заслінок є важливим, оскільки він контролюватиме різні типи режимів дроблення в камері дроблення.

2.2.3. Модель процесу зменшення розміру

У конусній дробарці вихідний матеріал, що надходить, перетворюється на

продукт шляхом багаторазового процесу подрібнення. Кількість ступенів відновлення різна в різних дробарках, але було показано, що вона може становити десять або більше. Таким чином, аналітична модель, що описує процес, повинна включати всі ці кроки скорочення.

На рис 2.15 представлена модель із використанням двох основних механізмів для опису кожного окремого циклу скорочення, а саме: відбір і руйнування. Продукт від одного дроблення є живленням для наступного. Зменшення розміру, що відбувається під час кожного окремого дроблення, описується функцією вибору та руйнування. Вважається, що ці два механізми можуть описати всі аспекти важливості поведінки поломки.

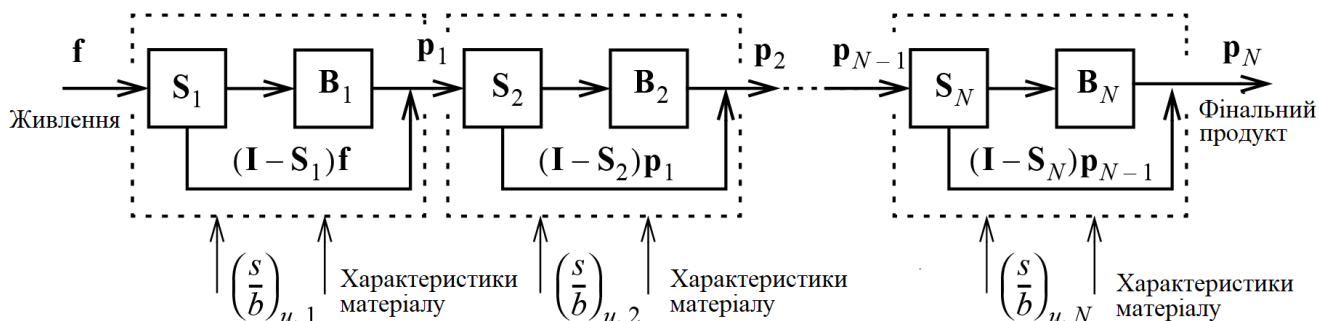


Рис 2.15 - Модель процесу циклічної роботи дробарки з N послідовними подіями дроблення.

Коефіцієнт використаного стиснення $(s/b)_u$ визначається на основі розташування кожної події дроблення, динаміки дробарки та щільності гірської породи. S =відбір, V =руйнування.

Вибір S відповідає ймовірності розбиття частинки. Розбиття V відображає спосіб розбивання частинки, тобто розподіл розмірів дочірніх фрагментів. Вводячи матричної алгебри, кожен окремий крок редукції можна описати як

$$\mathbf{p}_i = [\mathbf{B}_i \mathbf{S}_i + (\mathbf{I} - \mathbf{S}_i)] \mathbf{p}_{i-1} \quad (2.1)$$

де \mathbf{p}_i представляє продукт, а \mathbf{p}_{i-1} - подачу на крок i . Крім того, \mathbf{B}_i та \mathbf{S}_i є матричними операторами, що відповідають розриву та відбору відповідно.

Загальна кількість подій дроблення, що відбуваються в змодельованій дробарці, позначається N . Значення елементів у матрицях дроблення та відбору \mathbf{B}_i та \mathbf{S}_i змінюватимуться залежно від розташування в камері дробарки. Безрозмірний

машинний параметр $(s/b)_u$ називається ступенем стиснення. Цей параметр описує, наскільки гірський матеріал стискається в певному місці під час події дроблення i . Тому ступінь стиснення використовується для визначення значень елементів у B_i та S_i . Значення $(s/b)_u$, очевидно, є ключовим параметром для зменшення розміру i , отже, має надаватися потоковою моделлю.

У конусній дробарці можуть виникнути два основних типи руйнування. Різні види руйнування називаються режимами руйнування. Два розглянутих режиму руйнування є міжчастковим і одночастинковим. Режими руйнування не є взаємовиключними, але можуть відбуватися одночасно в зоні руйнування залежно від навколишніх умов.

Вводячи матрицю M_i до рівняння (2.1), досягається загальний вираз, що включає обидва типи руйнування. Подія роздавлення, коли відбувається як міжчастинковий, так і одиночний розрив, показана на малюнку 2.16. Відповідний математичний опис наведено у формулі. (2.2). Матриці M є діагональними за визначенням, і єдині значення, які елементи можуть приймати, це одиниця або нуль. Сума матриць M ідентична одиничній матриці I , в якій елементи є одиницею на головній діагоналі та нулем у кожній іншій позиції.

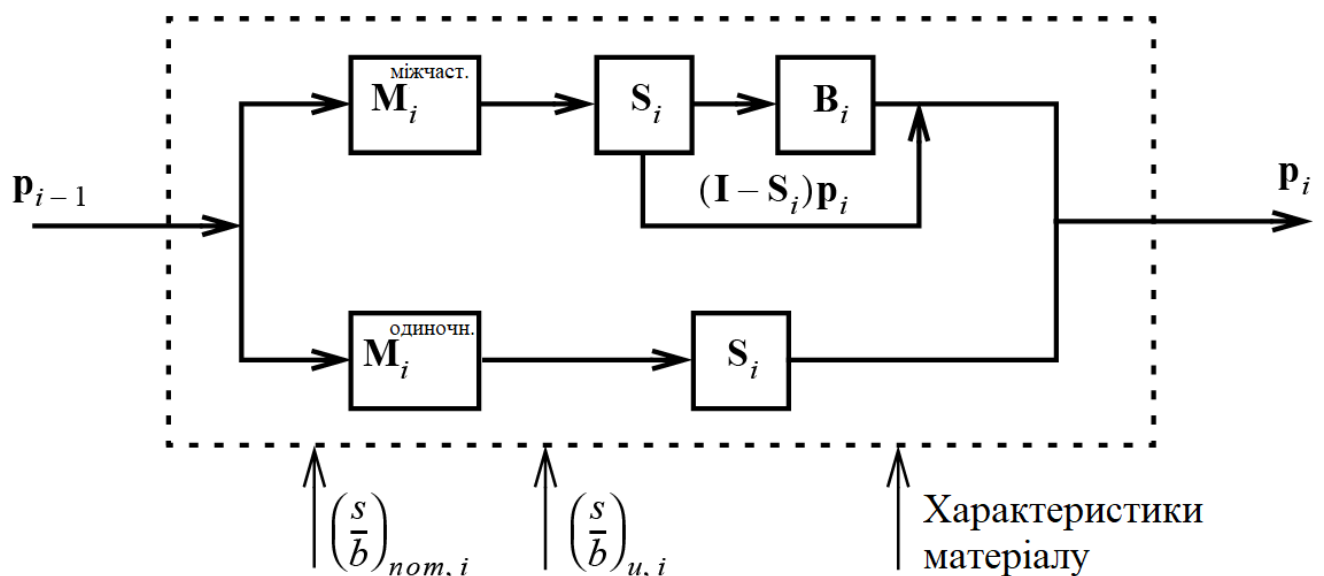


Рис 2.16 - Одиночна подія дроблення, яка включає як міжчастинковий, так і одиночне руйнування.

Залежно від розміру частинок і розташування в дробильній камері, частинки будуть подрібнені в режимі міжчастинкового або окремого дроблення.

$$\mathbf{p}_i = [[\mathbf{V}_i^{\text{міжчаст.}} \mathbf{S}_i + (\mathbf{I} - \mathbf{S}_i)] \mathbf{M}_i^{\text{міжчаст.}} + \mathbf{V}_i^{\text{одиничн.}} \mathbf{M}_i^{\text{одиничн.}}] \mathbf{p}_{i-1} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{M}_i^{\text{міжчаст.}} + \mathbf{M}_i^{\text{одиничн.}} = \mathbf{I} \quad (2.3)$$

Умови, які контролюють і активують різні режими руйнування, - це ступінь обмеження та локальне налаштування закритої сторони. Передбачається, що міжчастинковий розпад відбувається вище рівня дроселю, де утворюються обмежені шари частинок. Крім того, руйнування однієї частинки відбувається, коли частинка затискається між мантією та увігнутою частиною. Передбачається, що це єдиний режим обриву, який можна отримати нижче рівня дроселя.

2.2.4. Характеристики фрагментації порід

Щокові, конусні та гіраційні дробарки використовують стиснення з умовами форми для зменшення розміру. З цієї причини проводяться випробування на стискання з контрольованою геометрією (формою) для досягнення характеристик руйнування гірського матеріалу. Поведінка руйнування описується математично за допомогою вибору та функції руйнування. З випробувань на стиснення, обумовлених формою, поведінка руйнування отримана як основний ефект від ступеня стиснення. Сила та енергія є другорядними, але важливими параметрами, і їх можна отримати при бажанні.

Припущення щодо поведінки руйнування. Дві функції S і V складають опис поведінки руйнування гірського матеріалу. Необхідні деякі важливі припущення, щоб зробити можливим отримання S і V за допомогою лабораторних тестів.

Значення функції вибору S змінюється як від ступеня стиснення, так і від розподілу за розміром матеріалу, який потрібно подрібнити. Значення S змінюється залежно від ширини розподілу за розміром, але не залежить від розміру частинок у заданому розподілі за розміром. Розподіл частинок за розміром характеризується його шириною або розкидом і передбачається, що він відображає нормалізоване стандартне відхилення розподілу.

Поведінка руйнування описується функцією руйнування V . Функція руйнування є кумулятивною функцією, і значення V описує відносну кількість (за масою) частинок, що проходять через заданий відносний розмір. Для даного початкового розміру частинок передбачається, що поведінка руйнування залежить лише від ступеня стиснення. Це означає, що велика частинка дає початок розподілу розмірів дочірніх фрагментів, подібному до маленької частинки, якщо масштаб розміру нормалізований вихідним розміром.

Розподіл за розміром. Бажано описувати розподіл частинок за розміром одним числом. Тут передбачається, що розподіл за розміром характеризується нормалізованим стандартним відхиленням σ_N частотної функції f , що відповідає розподілу за розміром. Нормалізоване стандартне відхилення досягається шляхом ділення стандартного відхилення σ на середнє значення \bar{x} розподілу

$$\sigma_N = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2.4)$$

де σ і \bar{x} визначені

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n f_i (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.5)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n f_i x_i \quad (2.6)$$

$$N = \sum_{i=1}^n f_i \quad (2.7)$$

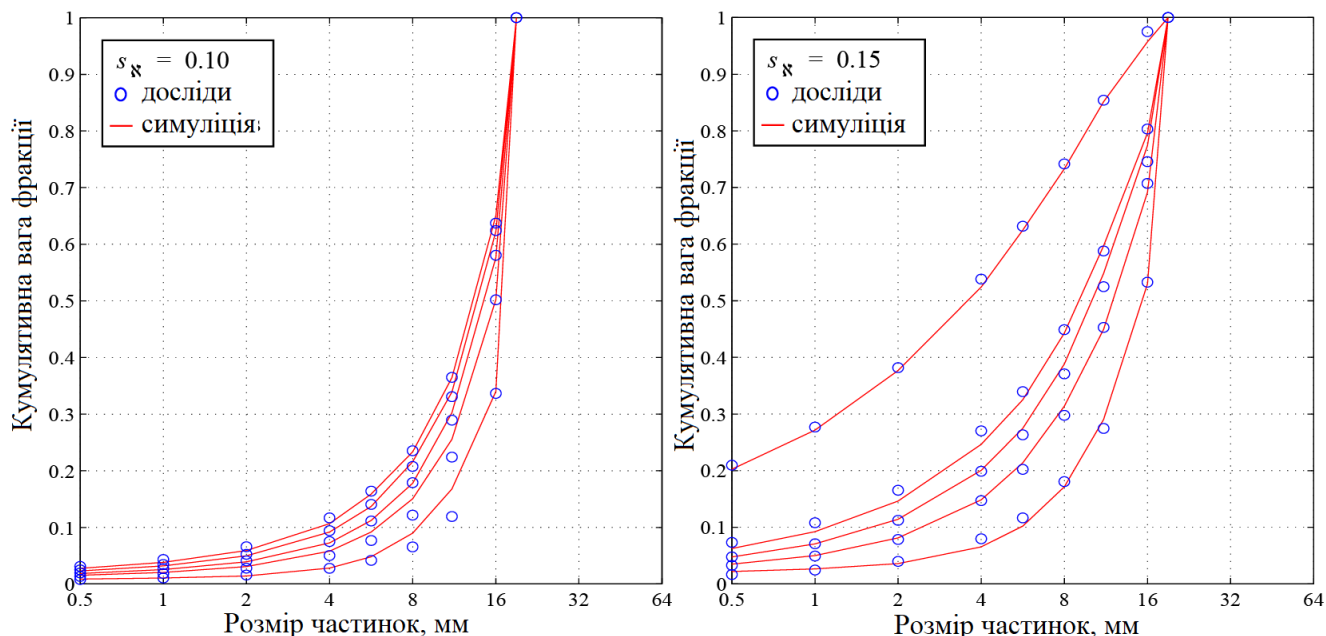
Перевага використання нормалізованого стандартного відхилення як міри розкиду розподілу за розміром полягає в тому, що це число не залежить від розміру частинок. Крім того, нормалізоване стандартне відхилення завжди прийматиме значення в інтервалі від нуля до одиниці.

Випробування на стискання. Перш ніж виконувати будь-яке моделювання за допомогою моделі зменшення розміру, необхідно знати про вигляд функцій S і V . Для кількісного визначення функцій S і V були взяті результати лабораторних випробувань на руйнування від стискання з [12].

У цих результатах лабораторних випробувань на стиснення нормалізований ступінь стиснення позначається s_N . Ця сама змінна називається використаним

ступенем стиснення $(s/b)_n$, якщо вона досягнута з розрахунків, що походять від моделі дробарки. Числові значення мають однакове значення щодо цих двох змінних.

Випробування проводилися в шести різних серіях, кожна з яких мала постійний ступінь стиснення s_k . Матеріалом, обраним для випробувань, був гнейс. Той самий матеріал використовувався під час моделювання та повномасштабних випробувань. Перше випробування в кожній серії проводили на однорозмірному заповнювачі фракції + 16-19 мм. Інші випробування проводилися на матеріалі, отриманому з попередніх випробувань. Після кожного випробування на стиснення матеріал просівали. Отримані розподіли розмірів у кожному тесті показані на рис 2.17.



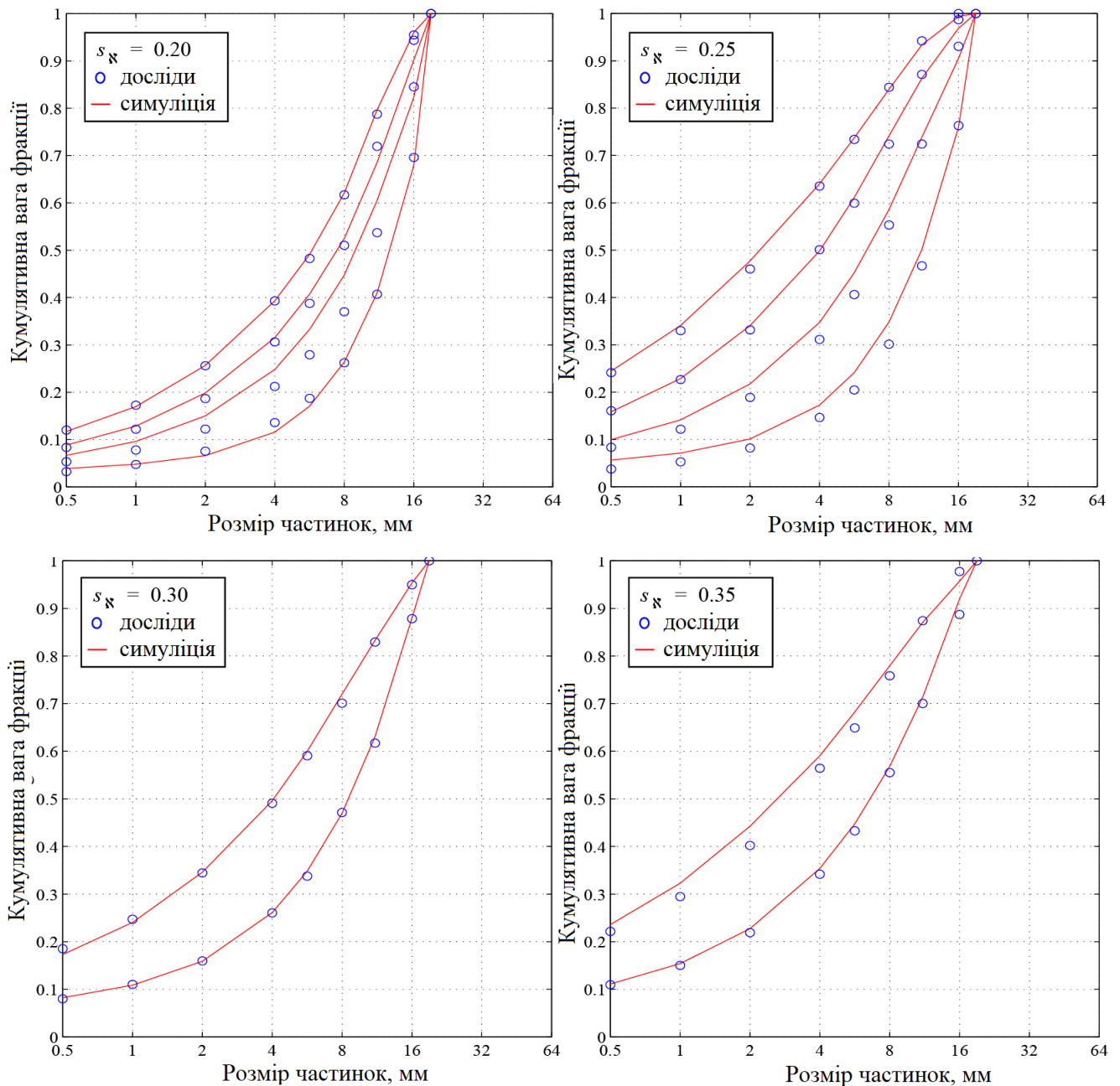


Рис 2.17 - Випробування та змодельовані результати шести серій послідовних випробувань на руйнування стисканням

Вибір. Значення вибору отримують безпосередньо з випробувань на стиснення. Для першого тесту в кожній серії з вузьким розподілом розмірів, визначеним $x_j - x_0$ (+16-19 мм), значення S просто отримується як вагова частка, що проходить розмір x_1 (16 мм). Для наступних тестів значення S досягається як

$$S_i = \frac{W_i^{x_1} - W_{i-1}^{x_1}}{1 - W_{i-1}^{x_1}} \quad (2.8)$$

де W^{x_1} — вагова частка, що проходить розмір x_1 після тесту i , а S_{i-1} — значення

функції вибору.

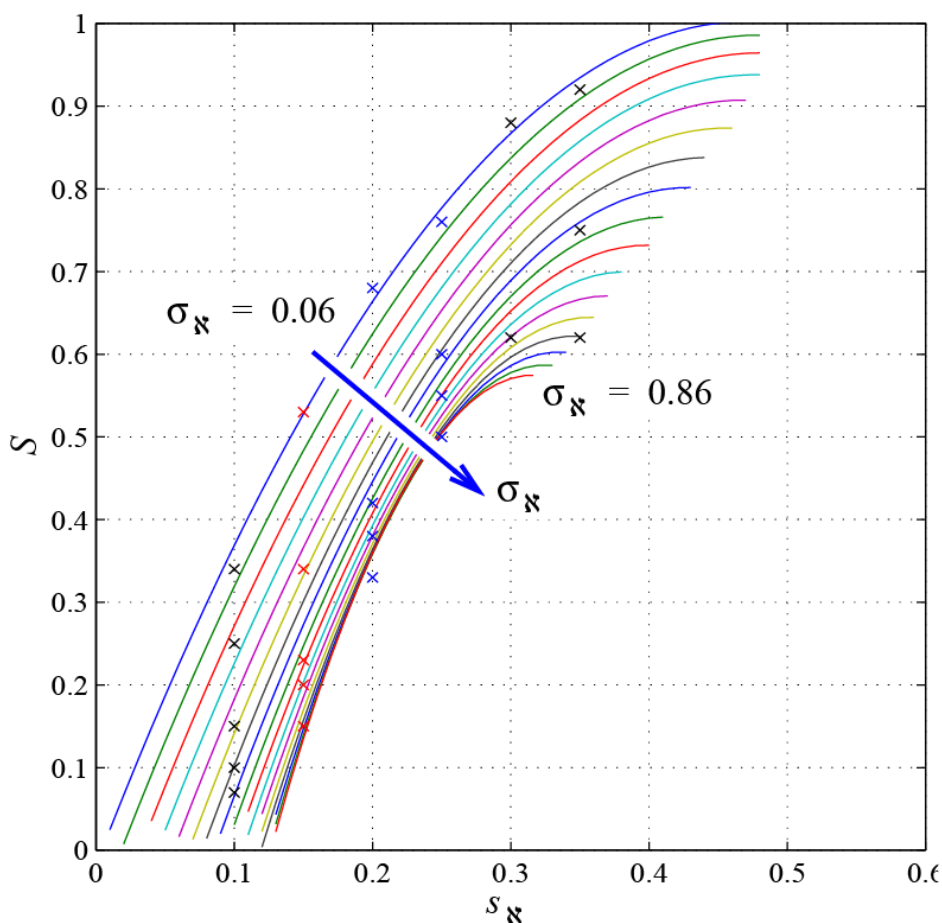
Досягнуті значення S відображені на малюнку 2.18, а в залежності від ступеня стиснення. Зрозуміло, що ймовірність поломки S змінюється як від ступеня стиснення s_N , так і від розподілу подачі за розміром σ_N . Значення S зростає зі збільшенням s_N , що є очевидною та природною поведінкою. Ширина розподілу за розміром впливає на значення S , так що для коротких фракцій виходять більш високі значення ймовірності поломки порівняно з широкими фракціями.

Функція вибору двох змінних $S(s_N, \sigma_N)$, може задовільно описати ймовірність руйнування. Функція відбору показано на рис. 2.18:

$$S(s_N, \sigma_N) = a_1 s_N^2 \sigma_N^2 + a_2 s_N^2 \sigma_N + a_3 s_N^2 + a_4 s_N \sigma_N^2 + a_5 s_N \sigma_N + a_6 s_N + a_7 \sigma_N^2 + a_8 \sigma_N + a_9 \quad (2.19)$$

Значення констант a_i для досліджуваного матеріалу становлять

$$\begin{aligned} a_1 &= -17,20202; & a_2 &= 1,64983; & a_3 &= -4,61729; \\ a_4 &= 6,26490; & a_5 &= 1,41795; & a_6 &= 4,21650; \\ a_7 &= -0,025766; & a_8 &= -1,22568; & a_9 &= 0,055819. \end{aligned}$$



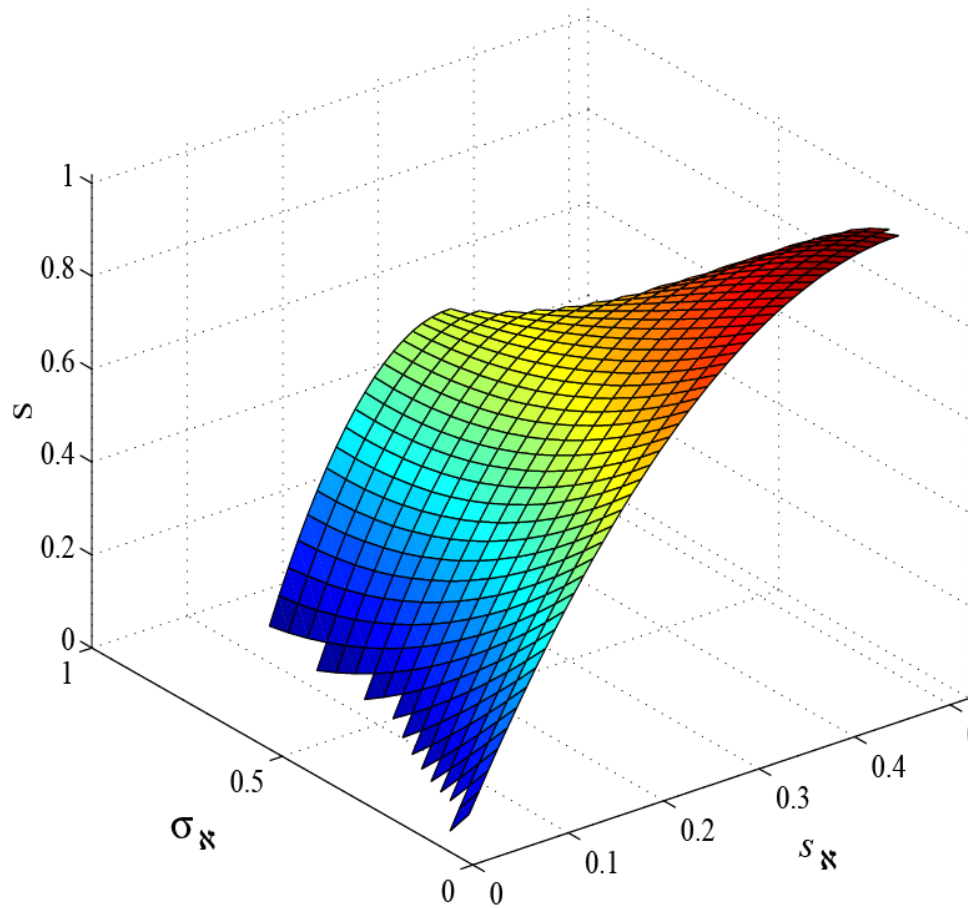


Рисунок 2.18 Функція відбору двох змінних.

Руйнування. Припускається, що поведінка на руйнування залежить лише від ступеня стиснення. Таким чином, для калібрування функції руйнування достатньо використовувати результат першого випробування в кожній серії, показаний на рис 2.19. Нормалізовані розподіли розмірів, отримані в результаті випробувань на стиск із різними коефіцієнтами руйнування, показані на рис 2.21. Ці функції руйнування отримані за допомогою нормалізація кривої розподілу розмірів нижче розміру x_1 (16 мм) зі значенням S у відповідному випадку.

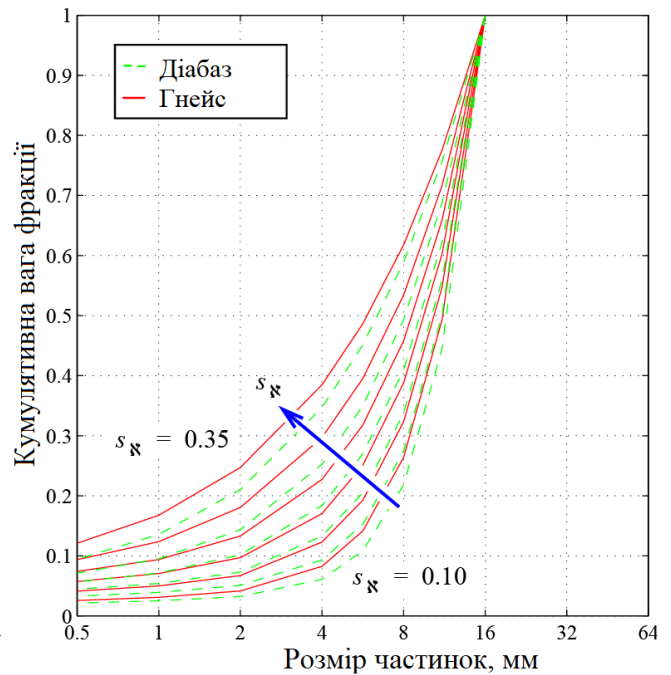
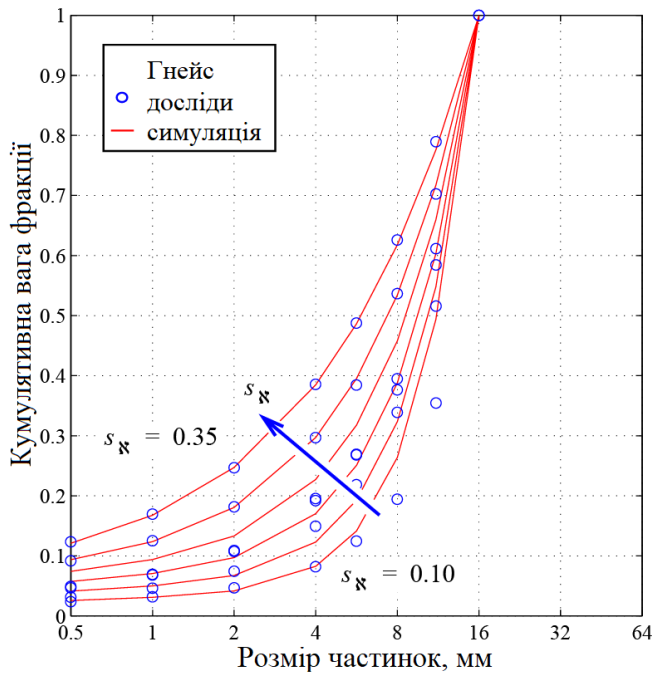


Рис 2.19 - Нормована поведінка руйнування випробуваного матеріалу гнейсу
Рисунок 2.20 - Порівняння руйнування діабазу і гнейсу

Очевидно, що загальне скорочення збільшується, коли s_N -відношення збільшується. Функція з s_N , параметром і чотирма константами можна підігнати до експериментальних даних. Тут x_N розмір частинок відносно початкового розміру частинок x_0 .

$$B(x_N, s_N) = (1 - (\alpha_3 + \alpha_4 s_N)) x_s^{\alpha_1 + \alpha_2 s_N} + (\alpha_3 + \alpha_4 s_N) x_s \quad (2.20)$$

$$x_N = \frac{\log(x / x_{\min})}{\log(x_0 / x_{\min})} \quad (2.21)$$

Після встановлення рівняння (2.20) до даних для гнейсу на рис 2.19, 2.20 числові значення констант є

$$\alpha_1 = 18,9539; \alpha_2 = -36,2309; \alpha_3 = -0,0095; \alpha_4 = 0,5657$$

Для порівняння дані для діабазу також показані на малюнку 17 (папір В). Можна відзначити, що два різних типи гірських матеріалів мають подібну поведінку до руйнування. Хоча при заданому ступені стиснення гнейс утворює більше дрібних частинок, ніж діабаз.

2.2.5. Модель потоку

Процес дроблення моделюється як серія повторюваних подій дроблення. Тому модель потоку повинна передбачати, де і за яких умов (як) матеріал стискається під час кожного циклу зменшення розміру. Загальний процес зменшення розміру описаний у формулі. (2.2). Для даного гірського матеріалу оператори S_i і V_i залежать від безрозмірного машинного параметра $(s/b)_n$. Тому модель потоку повинна передбачати ступінь стиснення в тих точках, де об'єм матеріалу піддається подіям дроблення.

Модель потоку повинна мати можливість обробляти варіації як конструктивних, так і робочих параметрів. Конструктивні параметри — це всі геометричні параметри, необхідні для опису різних профілів камери або конструкції дробарки. Для даної конструкції або дробарки робочими параметрами є налаштування закритої сторони щілини, швидкість ексцентрика n і номінальний Хід S_{nom} .

Механізми матеріальних потоків. Розроблена модель потоку базується на рівняннях руху. Передбачається, що три різні механізми описують потік матеріалу, а саме ковзання, вільне падіння та стискання. Ковзання відбувається, коли частинка гірської породи контактує з конусом і ковзає вниз. Якщо конус досить швидко розганяється, відповідна частинка буде вільно падати. Вільно падаюча частинка може наздогнати та вдаритися об поверхню конуса. Якщо так, то удар моделюється як повністю пластичний. Якщо конус все ще віддаляється від увігнутої, частинка продовжить свій рух шляхом ковзання.

Передбачається, що рух частинок відносно поверхні конуса припиняється і миттєво припиняється, коли частинка контактує з поверхнею конуса та коли конус рухається до увігнутої частини. Це припущення за своєю суттю означає, що утворення мостів між частинками відбувається за вказаних умов. Перемикання - це механізм самоблокування, який змушує рух частинок зупинятися відносно поверхні конуса.

Я тільки частинки перестануть рухатися, почнеться стискання. Під час віджимання частинки будуть стискатися і тим самим подрібнюватися. Фрагментація шляхом крихкого руйнування відбудеться, коли викликані розтягуючі напруги перевищать критичне значення. Частинки, розмір яких менший за локальне налаштування закритої сторони, зазнають міжчасткового руйнування. Ці частинки будуть контактувати як з мантиєю, так і з увігнутою формою, і, таким чином, вони будуть піддані руйнуванню окремої частинки під час стискання.

Залежно від механізму транспортування матеріалу, було визначено три різні області швидкості. Як частинка транспортується в цих трьох швидкостях, показано на рис 2.21. Під час стискання швидкість частинки визначається рухом мантиї. Швидкість частинки відносно поверхні мантиї буде дорівнювати нулю. Напруги зсуву можуть виникати залежно від геометрії камери.

На малих швидкостях рух частинки визначається виключно ковзанням. Ковзання відбуватиметься до тих пір, поки частинка не затиснеться між мантиєю та увігнутою частиною. Поки поверхня мантиї віддаляється від увігнутої, відбувається ковзання. Це визначається як область швидкості I.

В області швидкостей II ексцентрична швидкість достатньо висока, щоб прискорити поверхню мантиї від частинки. Тоді частинка буде вільно падати. У якийсь момент частинка наздожене поверхню мантиї. Якщо мантия все ще віддаляється від увігнутої, частинка продовжить свій рух зі ковзанням.

На високих швидкостях частинка буде вільно падати і вдаритиметься об мантию під ексцентричним кутом, більшим за π . Це область швидкості III.

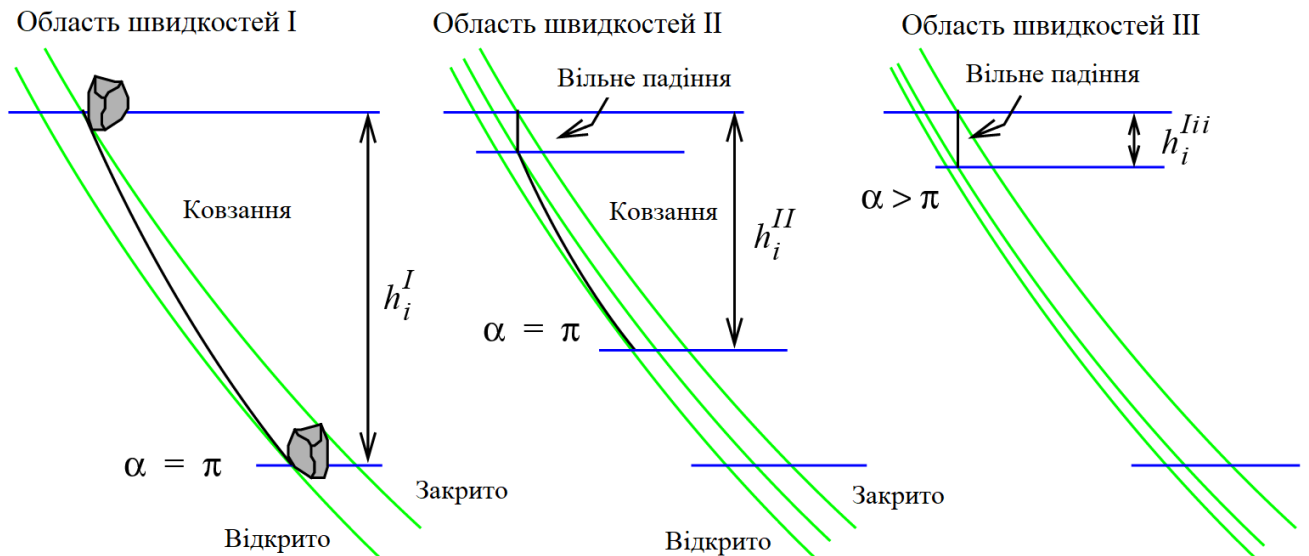


Рис 2.21 - Области швидкості залежно від активного механізму транспортування матеріалу.

Залежно від області швидкості ефективний хід, який буде використовуватися для стиснення та роздавлювання, буде змінюватися. Ефективний хід може бути рівним або меншим за локальний номінальний хід. Як використовується номінальний хід залежно від транспортного механізму, показано на рис 2.22. Зроблено висновок, що геометрія контролює рух частинок на низьких ексцентричних швидкостях, тоді як динаміка дробарки контролює рух на вищих швидкостях. В області швидкості I і II локальний номінальний хід використовується повністю і, отже, дорівнює ефективному ходу. Ефективний хід менше номінального в області швидкості III.

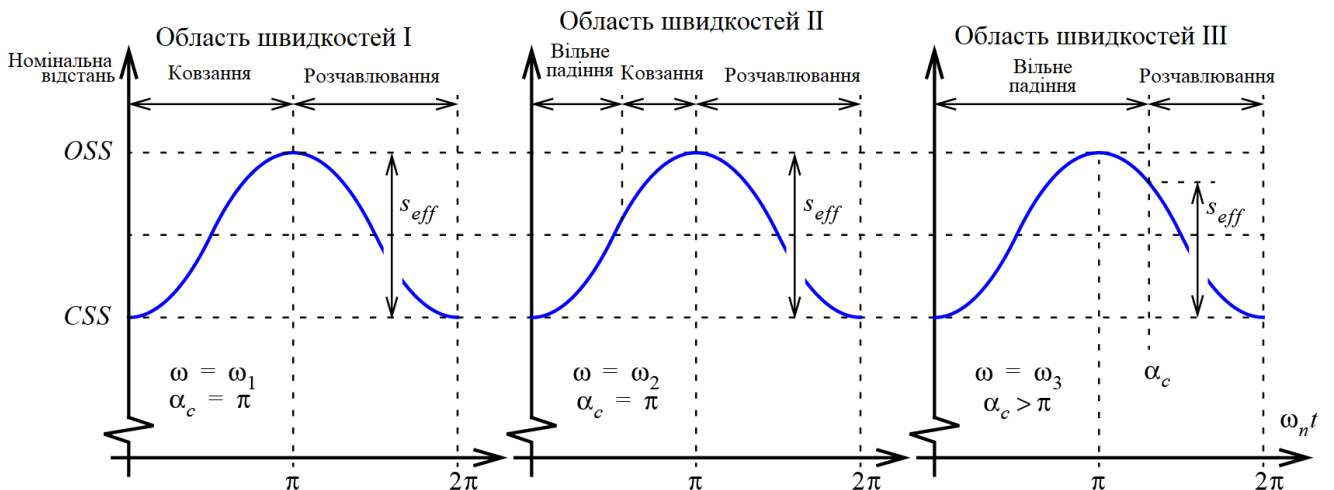


Рис 2.22 - Ефективний хід змінюється в залежності від ексцентричної швидкості

$$(\omega_1 < \omega_2 < \omega_3).$$

Виконуючи повторні удари, можна показати, як частинка транспортується вниз через камеру дробарки. Оскільки переважаючим механізмом потоку є вільне падіння, це моделювання дасть нам найшвидший можливий шлях, яким може рухатися частинка. Приклади результуючих шляхів від повторюваних штрихів показано на рис. 2.23.

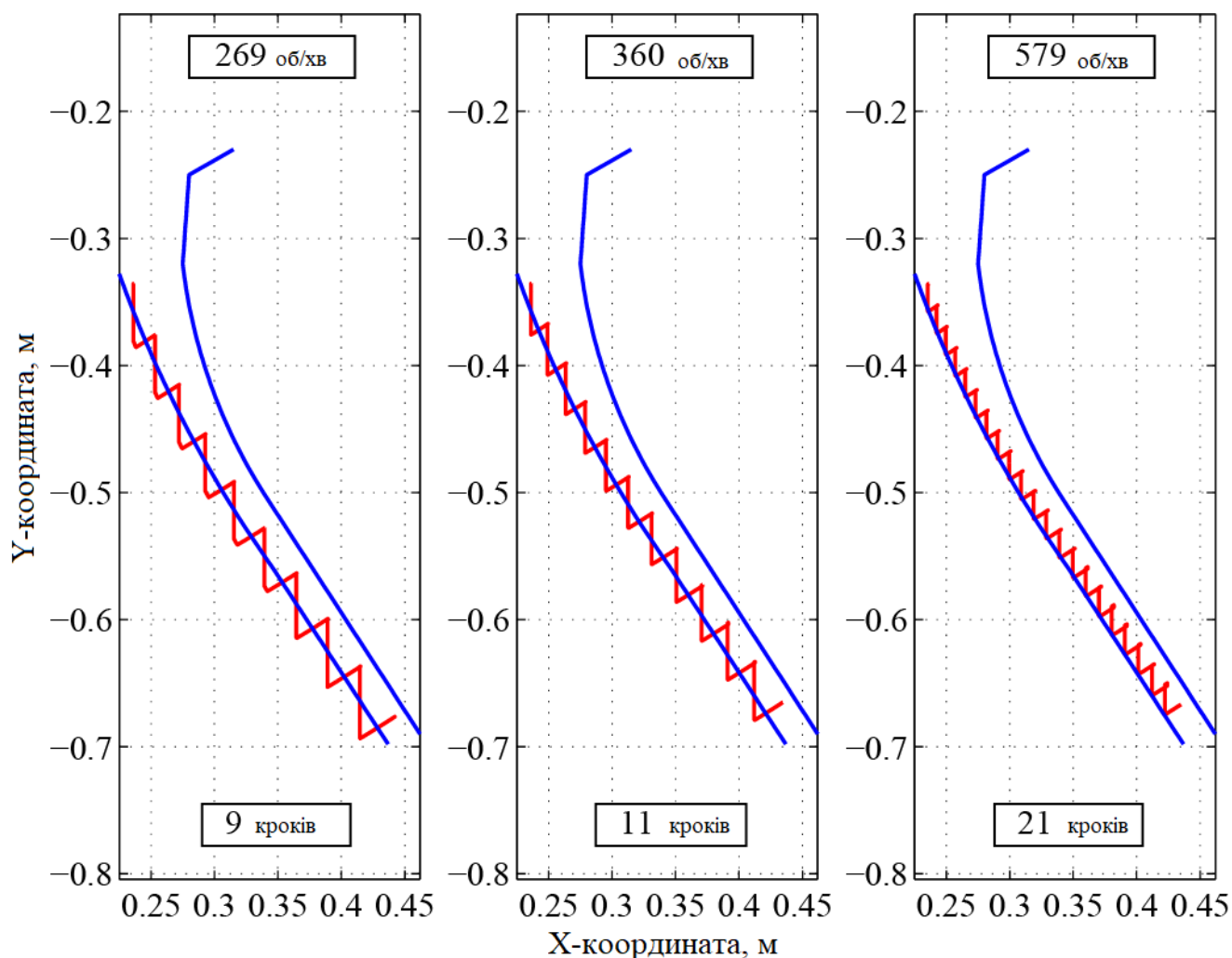


Рис 2.23 - Повторювані штрихи показують, як частинка транспортується через камеру дробарки.

При збільшенні ексцентричної швидкості збільшується кількість зон дроблення. Профіль конусів показаний у нейтральному положенні.

За допомогою моделювання визначаються так звані зони роздавлювання. Зона дроблення відповідає об'єму матеріалу, який подрібнюється, коли ексцентриситет головного вала повертається на одне коло. Межі зони дроблення задаються мантиєю і увігнутими поверхнями разом з лініями, перпендикулярними до поверхні мантиї. Ці лінії перетинають початкову та кінцеву точки змодельованого шляху для кожного етапу дроблення. Коли місце розташування цих зон у просторі та часі відоме, модуль геометрії надасть усі геометричні дані, необхідні для розрахунків зменшення розміру.

Розподіл швидкостей. Поєднання механізмів потоку та інших припущень призведе до розподілу швидкості, який має ексцентричний кут (або час) як незалежний параметр. Розподіл швидкостей буде залежати від ексцентричної швидкості. Це, у свою чергу, відобразить активні механізми потоку. Деякі теоретичні розподіли швидкостей, що відповідають різним ексцентричним швидкостям, показані на малюнку

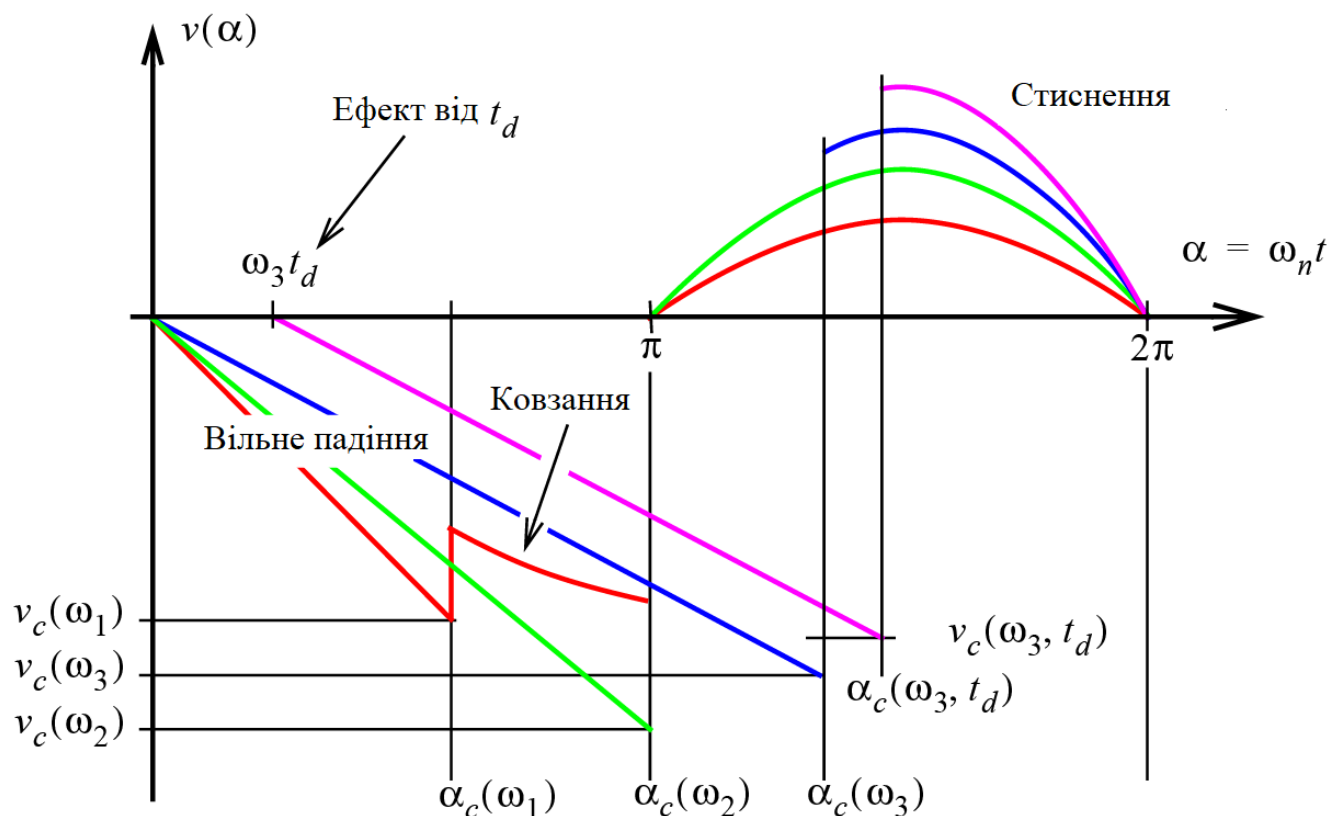


Рис 2.24 - Розподіл швидкості як функція кута ексцентриситету α , з ексцентричною швидкістю як параметром ($\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$)

Введемо коротку витримку часу t_d . Протягом цього періоду часу частинка не рухається відносно поверхні мантиї. Час затримки забезпечує можливість обробки кормового матеріалу з різним вмістом вологи.

Як тільки швидкості всіх частинок у горизонтальному поперечному перерізі відомі, можна обчислити ємність. під час моделювання ми будемо моделювати повний цикл дроблення частинки, який починається з стану спокою на рівні дроселя. Рівень дроселя визначається як рівень, на якому площа горизонтального поперечного перерізу має свій мінімум. Тоді ми апроксимуємо поле швидкостей на рівні дроселя розподілом швидкості частинки. Це спрощення навряд чи матиме серйозний вплив, оскільки загальна відстань падіння за цикл досить мала (менше 60 мм на низьких швидкостях).

Потужність розраховується шляхом інтегрування поля масової витрати по горизонтальному поперечному перерізу камери дроблення. Теоретично вертикальний рівень, на якому здійснюється інтеграція, можна вибрати довільно. Природним вибором є рівень, на якому площа перетину мінімальна. Для більшості дробарок цей рівень буде визначений як точка дроселю, яка контролює потужність дробарки. Горизонтальний поперечний розріз камери дроблення показаний на рис 2.25.

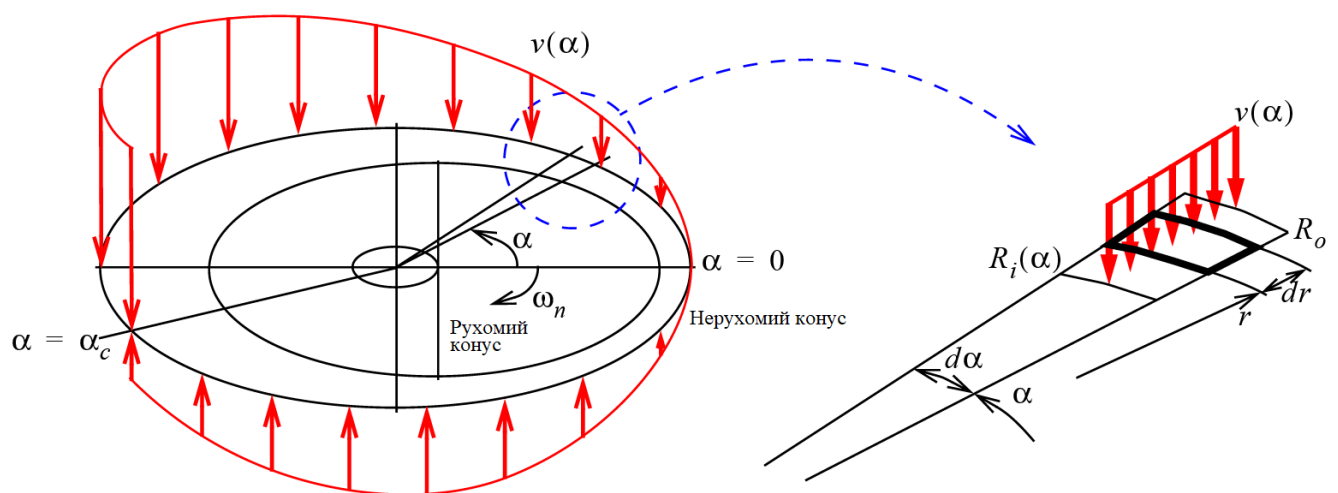


Рис 2.25 - Горизонтальний переріз камери дроблення

Потік маси в напрямку вниз буде

$$Q_{\text{вниз}} = \int_0^{\alpha_c} \int_{R_i(\alpha)}^{R_o} \rho v(\alpha) r dr d\alpha = \frac{1}{2} \int_0^{\alpha_c} \rho (R_o^2 - R_i^2(\alpha)) v(\alpha) d\alpha \quad (2.22)$$

$$R_{i,\min} \leq R_i \leq R_{i,\max} \quad (2.23)$$

Радіус $R(\alpha)$ — це радіус, з якого виходить частинка зі швидкістю $v(\alpha)$.
Насипну щільність заповнювача позначають ρ .

У напрямку вгору нам доведеться розділити масовий потік на два, оскільки частинки, що контактують з увігнутою поверхнею, матимуть нульову вертикальну швидкість.

$$Q_{\text{вгору}} = \frac{1}{2} \int_{\alpha_c}^{2\pi} \int_{R_i(\alpha)}^{R_o} \rho v(\alpha) r dr d\alpha = \frac{1}{4} \int_{\alpha_c}^{2\pi} \rho (R_o^2 - R_i^2(\alpha)) v(\alpha) d\alpha \quad (2.24)$$

Тоді загальна продуктивність розраховується як

$$Q = \eta (Q_{\text{вниз}} - Q_{\text{вгору}}) \quad (2.25)$$

Тут ми вводимо об'ємний коефіцієнт наповнення η . Цей параметр дорівнює або менше одиниці залежно від того, наскільки добре досягнуто заповнення зони дроблення.

Поки що ми припускали, що швидкість однакова для всіх точок у радіальному напрямку під час руху вниз, дивіться рис 2.26. Це наближення першого порядку. Більш загальним підходом було б припустити деякий розподіл швидкості в радіальному напрямку.

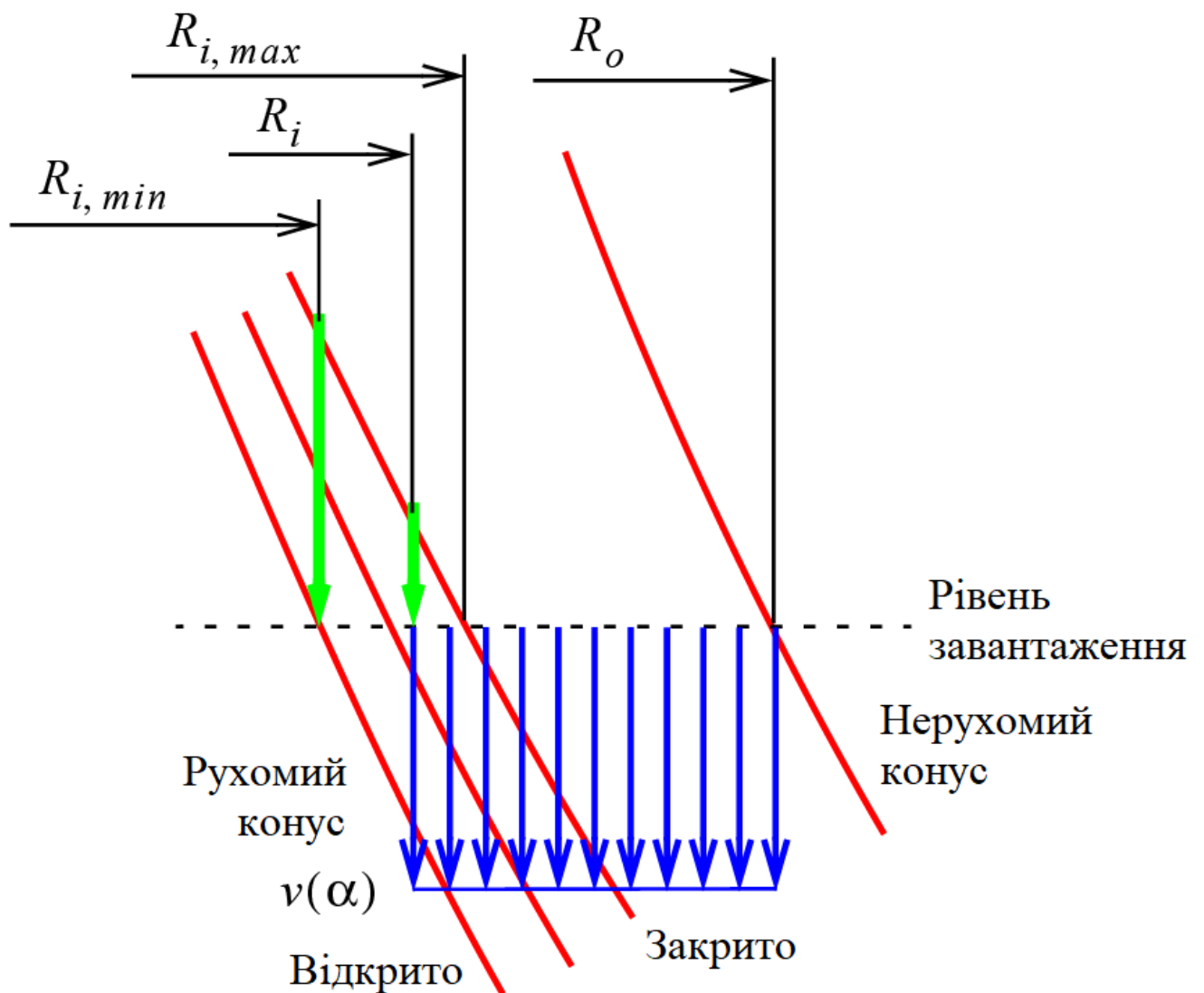


Рис 2.26 - Передбачуваний розподіл швидкості для вертикального поперечного перерізу

2.2.6. Взаємодія між потоком породи та зменшенням розміру

Модель потоку передбачає розташування та ефективні коефіцієнти стиснення зон дроблення. Поки що не відбулося жодної взаємодії між дробаркою та гірським матеріалом щодо зменшення розміру.

Математична взаємодія між моделлю потоку та зменшення розміру містить проблему пошуку рішення, яке передбачає розподіл розмірів після кожного етапу дроблення та яке також відповідає заявленим умовам.

Безперервність маси. Безперервність маси повинна зберігатися між усіма зонами дроблення і в будь-який момент часу. Пропускна здатність у напрямку вниз $Q_{\text{вниз}}$ може бути досягнута шляхом множення швидкості обертання n ексцентриситету на питому масову витрату m_i . Питома масова витрата дорівнює насипній щільності заповнювача ρ_i , помноженій на об'єм зони V_i . Збереження безперервності означає, що величина питомої масової витрати є постійною для всіх зон. Було визнано необхідним ввести об'ємний коефіцієнт наповнення $\eta_{v,i}$. Значення цього параметра відображає, наскільки використовується обсяг доступної зони.

$$Q = m_i n = \eta_{v,i} \rho_i V_i n \quad (2.26)$$

Хоча вираз для пропускної здатності досить простий, все ж досить складно визначити значення питомої масової витрати через те, що ми не знаємо значення об'ємного коефіцієнта наповнення. Питома масова витрата не може бути безпосередньо розрахована через залежність між насипною щільністю та розподілом за розміром. Тому необхідна ітеративна та рекурсивна процедура обчислення.

Об'ємний коефіцієнт наповнення. Коефіцієнт об'ємного заповнення $\eta_{v,i}$ описує, до якої міри заповнюється об'єм доступної зони. Значення $\eta_{v,i}$ змінюється від зони до зони. Якби можна було визначити коефіцієнт заповнення вхідної зони, можна було б також розрахувати питому масову витрату. Тоді можна було б розрахувати відповідне значення η_v для інших зон. Питома масова витрата, звичайно, залишається постійною між зонами дроблення. Інакше безперервність маси не збереглася б.

Об'ємний коефіцієнт наповнення залежить від кількох факторів. На це впливає конструкція вхідного отвору дробарки, реологія вихідного матеріалу, розподіл розмірів (особливо відносно вхідного отвору), вміст вологи тощо. Значення коефіцієнта заповнення є мірою того, скільки повітря є в агрегат гірської породи, який потрібно подрібнити. Для досліджуваного застосування було виявлено, що значення η_v значно нижче одиниці. Можливість зменшення

положення закритої сторони дробарки визначається величиною η_v . Низьке значення η_v відповідає великій частці повітря, що, у свою чергу, допускає відносно невелике значення CSS закритої сторони.

Якщо умови подачі були змінені таким чином, щоб збільшити коефіцієнт заповнення, теоретично потужність дробарки зростає б. З іншого боку, якщо подачу вхідної зони зробити більш ефективною, щільність упаковки може бути перевищена на якомусь етапі. Таким чином, потрібно було б збільшити налаштування закритої сторони, що призвело б до зменшення загального розміру. Це явище спостерігалось в діючих дробарках і не завжди є бажаним ефектом.

Передбачається, що невеликі зміни налаштування закритої сторони не впливають на коефіцієнт заповнення вхідної зони. Таким чином, результати випробувань для дробарки, що працює на межі ущільнення, можна використовувати для калібрування коефіцієнта заповнення для вхідної зони. Під час моделювання з різними налаштуваннями закритої сторони значення h_v підтримувалося постійним незалежно від налаштування закритої сторони. Якщо немає повномасштабних випробувань для розрахунку об'ємного коефіцієнта наповнення, вхідний отвір камери дроблення необхідно детально змоделювати.

Напрямок взаємозалежності між параметрами, які беруть участь у прогнозуванні зменшення розміру, показано на рис. 2.27. Щільність матеріалу, що надходить у першу зону, відома, оскільки вона дорівнює об'ємній щільності нестиснутого p_1 і матеріалу, що надходить. З усіх зон дроблення лише одна зона може контролювати кінцеву потужність. Щоб знайти цю зону, необхідна схема обчислення рекурсивного типу.

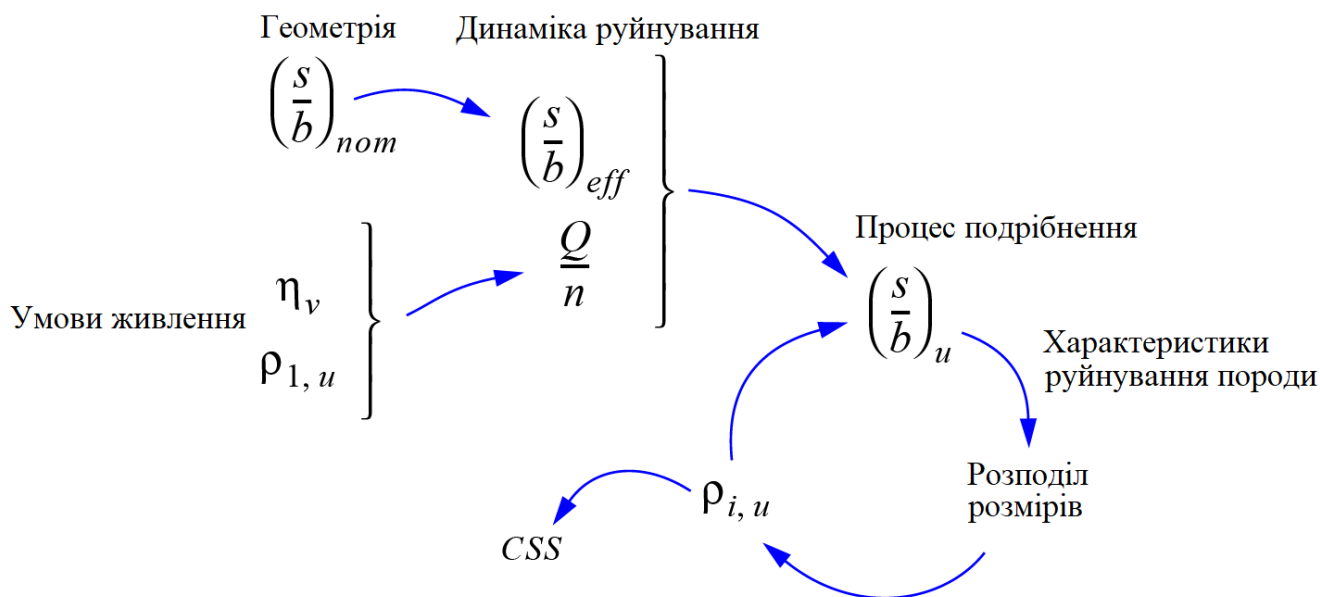


Рис. 2.27 - Напрямок взаємозалежності для циклу зменшення розміру.

Умова, яку необхідно виконати, щоб уникнути ущільнення, полягає в тому, що щільність після кожного етапу стиснення повинна бути нижчою за щільність твердої речовини ρ_s .

$$\rho_{i, \text{стисн.}} < \rho_s \quad (2.27)$$

Максимально можливий ступінь стиснення досягається, коли все повітря стискається з агрегатної системи. Пакування буде уникано, якщо виконується така умова:

$$\left(\frac{s}{b}\right)_u < \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_s}\right) \quad (2.28)$$

Стан упаковки необхідно перевіряти для кожної зони дроблення. Якщо умова виконується, розрахунок може продовжуватися зі зменшенням розміру, а потім продовжуватися з наступною зоною. Якщо умова порушується, значення коефіцієнта об'ємного наповнення необхідно зменшити, і починати все спочатку з зони номер один. Процедура розрахунку показана на рис 2.28.

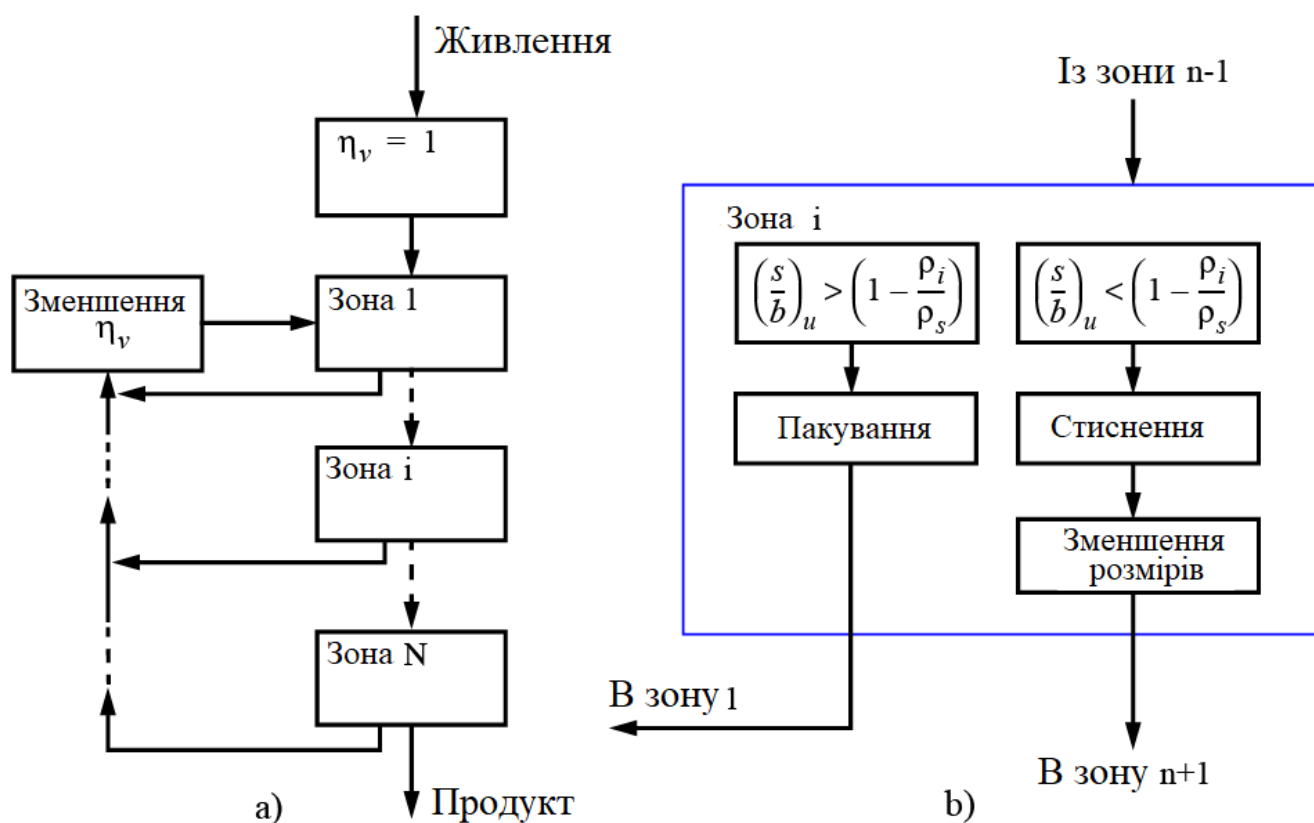


Рис 2.28 - Ітеративна та рекурсивна процедура обчислення, що використовується для визначення об'ємного коефіцієнта наповнення.

Використаний коефіцієнт стиснення. Завдяки об'ємному коефіцієнту наповнення лише частина загального номінального ходу буде використана для зменшення розміру. Частина ефективного ходу буде працювати як холостий хід. Зменшення розміру не може розпочатися, доки не буде досягнуто щільність нестиснутого заповнювача.

Номінальний ступінь стиснення $(s/b)_{nom}$ наведено з геометричного аналізу камери дроблення на основі проектних креслень. Ефективний ступінь стиснення $(s/b)_{eff}$ відповідає коефіцієнту, який можна використовувати після розгляду динаміки дробарки. Використаний коефіцієнт стиснення $(s/b)_u$ менший за ефективний коефіцієнт і є результатом безперервності маси та таких вимог, як упаковка. Таким чином, співвідношення між номінальним, ефективним і використаним ступенем стиснення є:

$$\left(\frac{s}{b}\right)_u < \left(\frac{s}{b}\right)_{eff} < \left(\frac{s}{b}\right)_{nom} \quad (2.29)$$

На рис 2.29 показано схематичне зображення зони дроблення. Після врахування такту холостого ходу s_t можна розрахувати коефіцієнт використаного стиснення $(s/b)_u$.

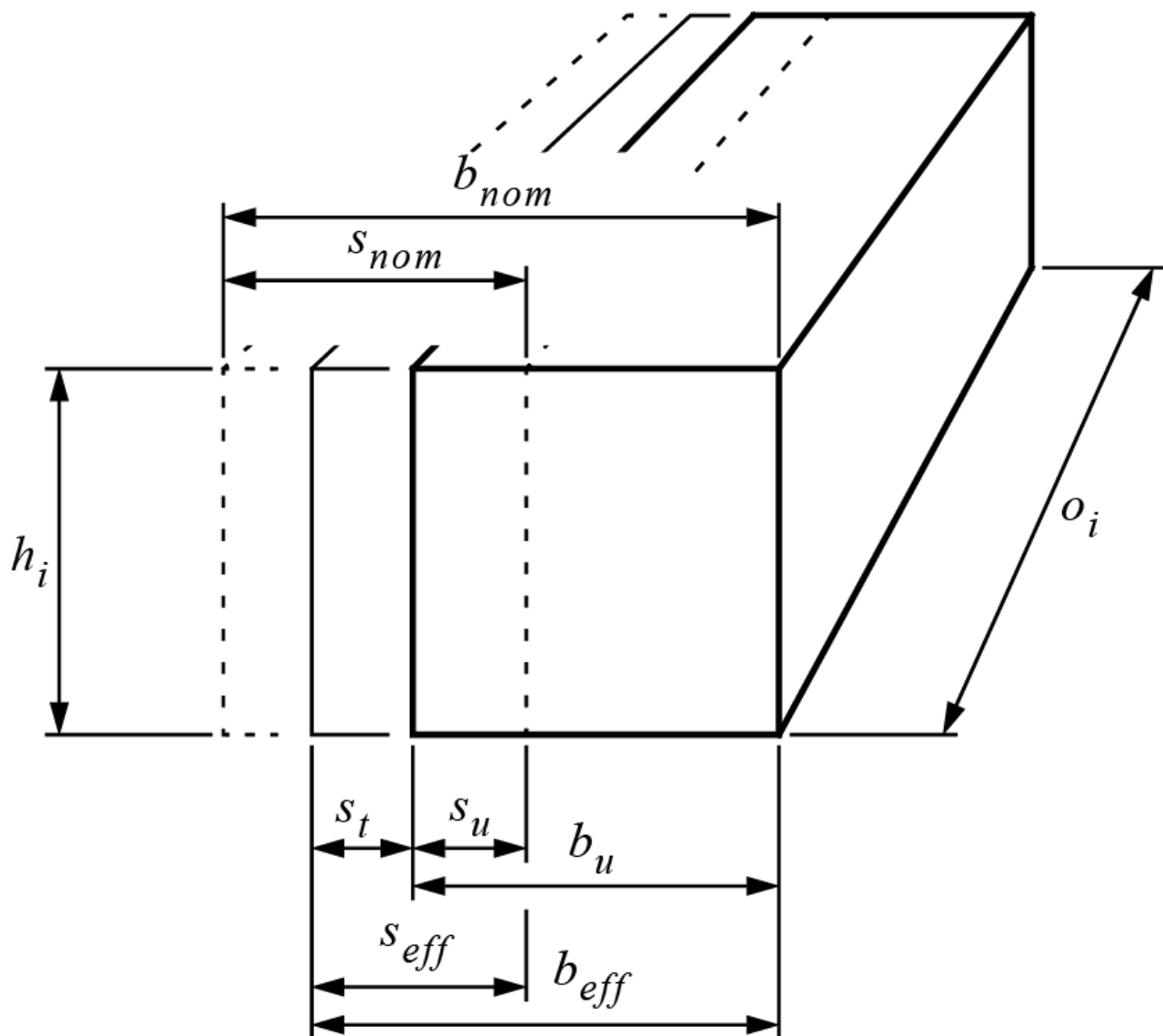


Рис 2.29 - Схематичне зображення зони дроблення.

Використану товщину шару можна розрахувати за питомою масовою витратою Q/n , густиною ρ_i , висотою зони дроблення h_i і окружністю зони o_i

$$b_u = \frac{Q}{n} \cdot \frac{1}{\rho_i} \cdot \frac{1}{h_i o_i} = \frac{\eta_{v,1} \rho_1 V_1}{\rho_i} \cdot \frac{1}{h_i (2\pi R_i)} \quad (2.30)$$

Потім можна розрахувати використаний хід:

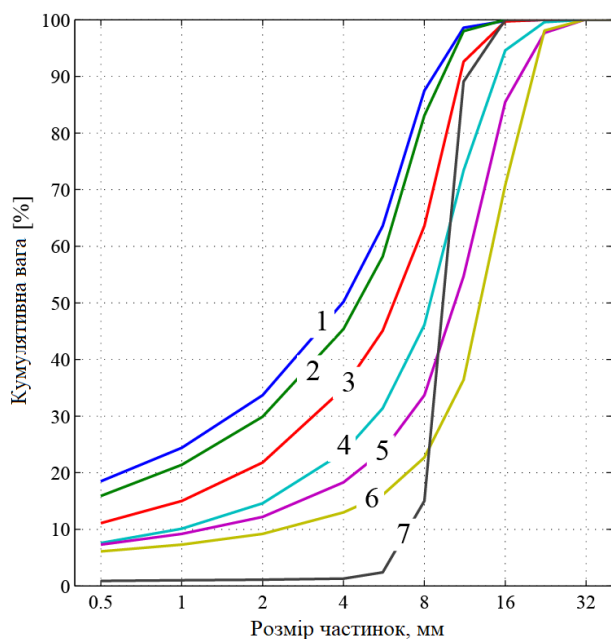
$$s_u = s_{eff} - b_{eff} + b_u \quad (2.31)$$

Нарешті, коефіцієнт використаного стиснення отримується як співвідношення між використаним ходом і товщиною ліжка:

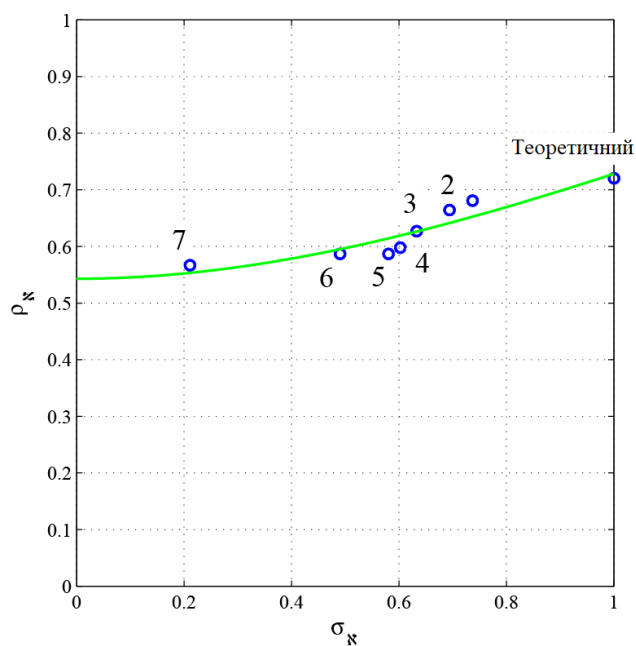
$$\left(\frac{s}{b}\right)_u = \frac{s_u}{b_u} \quad (2.32)$$

Співвідношення між об'ємною щільністю та розподілом розмірів. Для розрахунків необхідна модель, яка пов'язує ширину розподілу за розміром із об'ємною щільністю нестисненого заповнювача, оскільки щільність буде відрізнятися між зонами дроблення. Розроблена модель щільності була відкалібрована з використанням результатів повномасштабних випробувань на розчавлення, дивіться рис 2.30 а. Щоб зробити модель розподілу за розміром незалежною від конкретного типу породи, була введена нормалізована щільність ρ_N . Нормована щільність досягається шляхом ділення об'ємної щільності нестиснутого заповнювача ρ , отриманого в результаті випробувань, на тверду щільність матеріалу породи ρ_s . Вимірне співвідношення між нормалізованим розподілом розмірів і нормалізованою щільністю показано на малюнку рис 2.30 б.

$$\rho_N = \frac{\rho}{\rho_s} \quad (2.33)$$



а



б

Рис 2.30. а) Розподіл розмірів продукту, який використовується для калібрування моделі щільності для гнейсу. б) Нормована щільність як функція нормованої ширини розподілу за розміром.

Використання типових розподілів розмірів, отриманих із повномасштабних випробувань, означає, що модель дійсна в регіоні, який представляє практичний інтерес. Однак під час симуляції зменшення розміру було виявлено, що можна досягти ширшого розподілу розміру, ніж ті, що були отримані в результаті повномасштабних випробувань. З цієї причини було введено теоретичну точку $\sigma_N = 1$, що відповідає максимально широкому розподілу розмірів.

Припускається, що співвідношення між ρ_N і σ_N

$$\rho_N = D_1 \sigma_N^3 + D_2 \sigma_N^2 + \rho_{N,mono} \quad (2.34)$$

Константа $\rho_{N,mono}$ відповідає нормалізованій щільності агрегату з дуже вузьким розподілом за розміром, тобто монорозмірним розподілом $\sigma_N = 0$. Після підгонки рівняння (2.34) до результатів випробувань були досягнуті наступні значення параметрів

$$\rho_{N,mono} = 0,54284; D_1 = -0,062277; D_2 = 0,24758$$

Режими обмеження та розриву. Обмежені умови необхідні, якщо має відбутися міжчасткове руйнування під час стиснення шару частинок. Шар часток може бути повністю або частково обмеженим. Якщо обмеження взагалі не досягнуто, тоді може статися лише розрив однієї частинки.

Для умов дросельного живлення вхідна зона разом із зонами до та включно з дросельною зоною буде подаватися дроселем і, отже, також обмежена. Це означає, що відбувається міжчастковий розрив. руйнування окремої частинки також відбуватиметься для частинок, розмір яких перевищує локальне закрите налаштування розміру. Для зон дроблення нижче зони дроселю збільшення об'єму робить малоімовірним утворення обмежених шарів частинок. Тому передбачається, що в цих зонах відбудеться розрив лише однієї частинки.

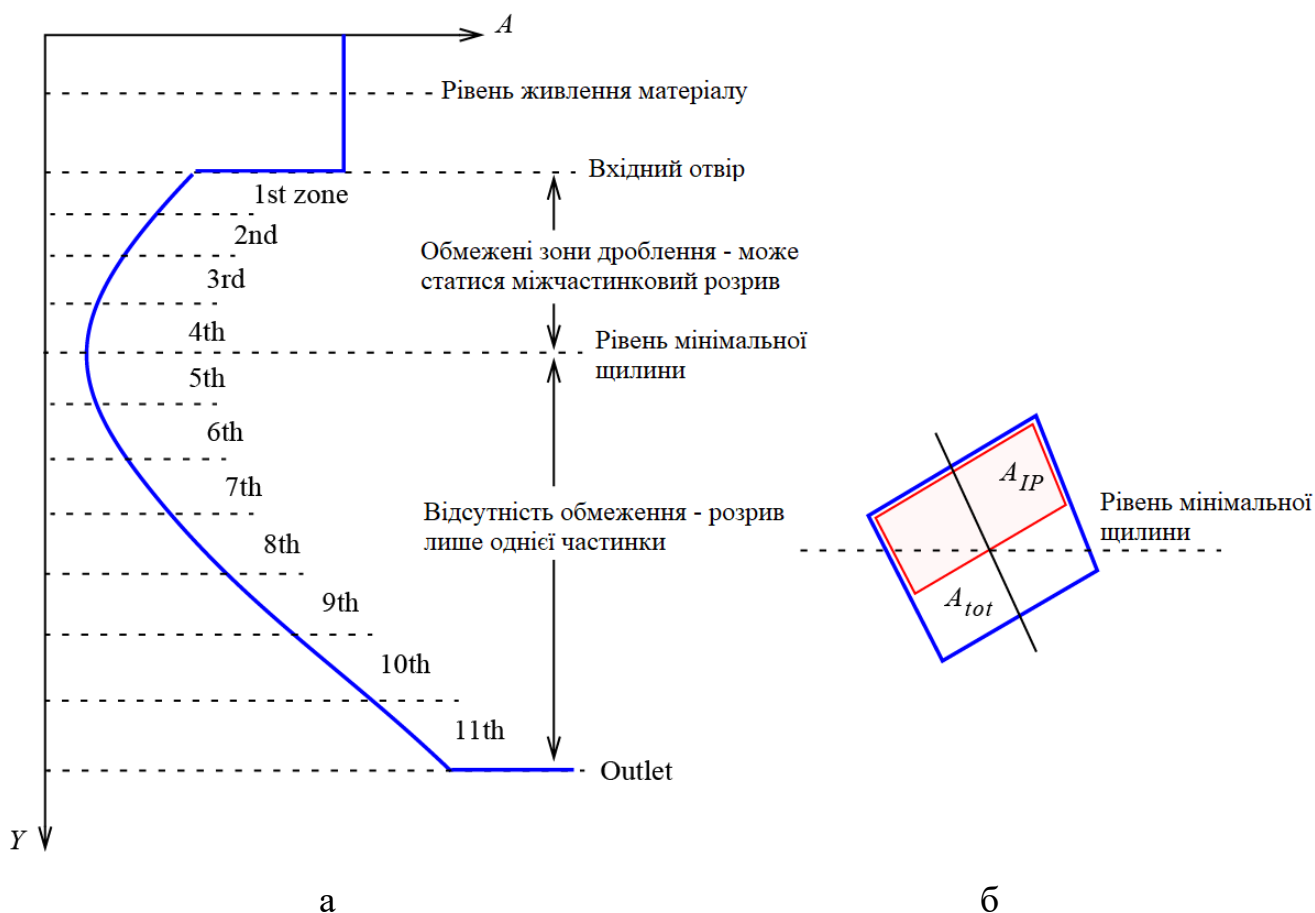


Рис 2.31 - а) Загальний вигляд площі горизонтального перерізу дробарки, б) Зона дроблення, яка перерізана дросельною планкою.

Значні пропорції міжчастинкового руйнування в найнижчих зонах були б можливими лише за умов, коли матеріал тече в каналах. Цей тип потоку здається дуже мало ймовірним, що означає, що утворення шарів частинок є рідкісним явищем і, отже, відбувається дуже незначне розрив між частинками.

Кількість зон дроблення не обов'язково повинна бути цілим числом. Якщо рівень дроселя проходить через зону дроблення, міжчастинкове руйнування досягається лише у верхній частині зони дроблення, а окремі частинки – у нижній частині, див. Рис 2.31 б. Величина міжчасткового руйнування ξ_{IP} приймається рівною відношенню площі верхньої частини до загальної площі зони дроблення.

$$\xi_{IP} = \frac{A_{IP}}{A_{tot}} \quad (2.35)$$

Розподіл продукту за розміром, що спадає з частково обмеженої зони, буде сумішшю частинок, що походять від міжчастинкового розпаду та розпаду окремих частинок:

$$p = \xi_{IP} p_{IP} + (1 - \xi_{IP}) p_{sp} \quad (2.36)$$

Регульоване живлення. Протягом багатьох років для опису умов живлення для конусної дробарки було створено ідіоматичний вислів «дросельна подача». Дробарка з дросельним живленням — це дробарка з вхідним отвором, повністю покритим вихідним матеріалом. Загальноприйнята думка полягає в тому, що умови дросельної подачі є життєво важливими для досягнення міжчастинкового руйнування, яке, у свою чергу, є режимом руйнування, який визначає хорошу форму частинок.

Загальним рішенням для досягнення дросельної подачі є використання невеликого бункера на верхній частині дробарки.

Рівень подаваного матеріалу підтримується між верхньою та нижньою межею за допомогою певного контрольного пристрою. Цей тип рішення за своєю суттю передбачає, що на умови подачі не впливає тиск, який чинить об'єм матеріалу над входом (пор. тиск у рідинах). Є приклади, коли рівень поверхні матеріалу в бункері впливає на параметри дроблення, що призводить до змін у кінцевому продукті.

Дросельна подача необхідна для досягнення стабільної (стаціонарної) подачі на вхід дробарки. Стабільна подача гарантує мінімальні зміни кінцевого продукту. Однак визначення умов живлення через дросель може бути недостатнім для досягнення належних умов живлення. Тиск, який чинить сипкий матеріал у бункері на верхній частині дробарки, впливатиме на об'ємний коефіцієнт заповнення, а також на обмеження першої зони дроблення. Також можуть знадобитися вимоги до кормового матеріалу.

Модель форми частинки для руйнування одиночної частинки. З точки зору моделювання, існує велика різниця між міжчастковим і одночастинковим руйнуванням щодо розміру частинок. У розрахунках усі частинки розглядатимуться незалежно від форми, як якщо б вони були одновимірними. Для вирішення проблеми форми необхідна модель форми, яка описує розподіл зміни геометрії.

Проблема виникає, коли моделювання порівнюється з результатами

просіювання. Дотепер моделювання дроблення є одновимірним, тоді як просіювання є двовимірним методом. Очевидно, що для порівняння моделювання з просіюванням потрібна додаткова ретельність.

Для міжчастинкового руйнування локальна замкнута сторона, тобто відстань між мантиєю та увігнутою частиною, завжди більша за розмір частинки. Частинки, що утворюються в результаті міжчасткового розпаду, не матимуть геометричного калібрування з точки зору розміру частинок. За визначенням, у разі руйнування одиночної частинки, локальне налаштування закритої сторони завжди менше, ніж розмір частинки. Частинка буде контактувати як з рухомим конусом, так і з увігнутою. Таким чином отриманий продукт калібрується дробаркою.

Насправді на виході з дробарки завжди є деяка кількість завищеного розміру матеріалу порівняно з налаштуванням закритої сторони. Незначна кількість цього матеріалу може походити із зони дроблення, розташованої на відстані перед камерою дроблення. Велика частина надмірного розміру пояснюється тим фактом, що режим руйнування однієї частинки генерує частинки неправильної форми. Така частинка може мати найменший розмір t , який калібрується локальним положенням закритої сторони дробарки, у той час як вона також має ширину d , яка може бути значно більшою, див. Рис 2.32. Під час просіювання така частинка виглядатиме як частинка розміру d , тоді як під час моделювання його розглядали як частинку розміру t .

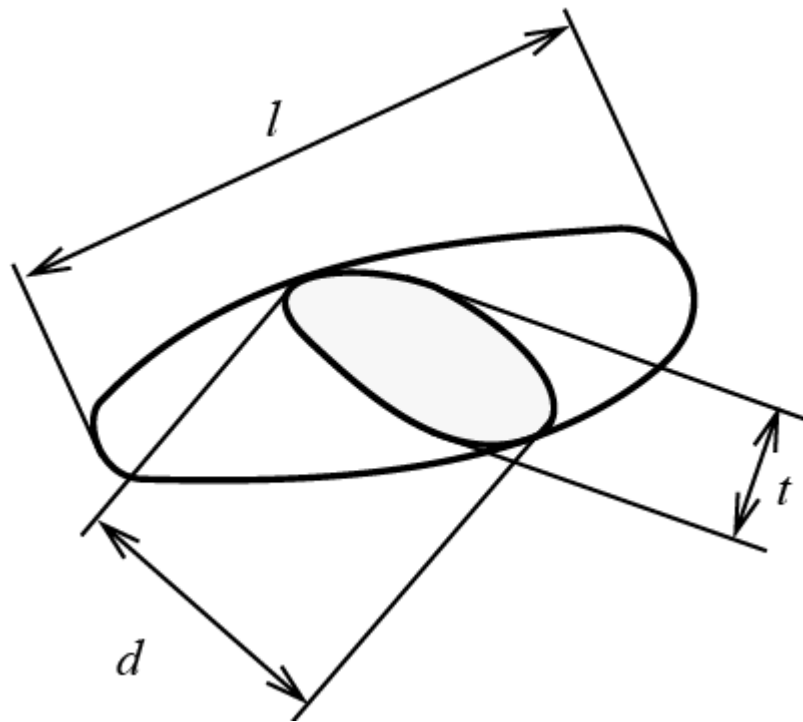


Рис 2.32 - Витягнута частинка, де $t < d < l$.

Одним зі способів усунення проблеми було б провести випробування на руйнування окремої частинки. Тоді функція руйнування, що описує руйнування окремої частинки, буде досягнута шляхом лабораторного просіювання. Частинки великого розміру, що мають форму промаку, будуть включені у функцію руйнування. У цій роботі передбачається використовувати функцію руйнування, отриману в результаті випробувань на розчавлення міжчастковим стисненням. Оскільки ці випробування є суто міжчастковими, потрібна модель, здатна оцінити матеріал великого розміру. Тут передбачається, що частка γ частинок, розбитих в одночастинковому режимі, подовжена. Крім того, передбачається, що геометрія цих пластівчастих частинок може бути апроксимована співвідношенням між шириною частинки d і товщиною t , яке позначається λ .

$$\lambda = \frac{d}{t} \quad (26)$$

Порушення окремої частинки відбудеться, якщо товщина частинки буде більшою за локальне налаштування закритої сторони.

$$t = \frac{d}{\lambda} > CSS_{local} = b - s \quad (27)$$

Ця умова дійсна для номінальної, ефективної та використаної товщини шару та ходу.

Крім того, коефіцієнт стиснення, до якого стискається частинка розміром d , становить

$$s_{s, \text{single}} = 1 - \frac{\lambda(b-s)}{d} \quad (28)$$

Значення параметрів у обраній моделі форми частинок $\lambda = 2$ і $\gamma = 0,5$. Вираз тепер складається з двох частин, одна для пластівчастих, а інша для нешаруватих кубічних частинок.

$$p_{i+1} = \gamma \left\{ \left[B_i^{\text{inter}} S_i + (I - S_i) \right] M_i^{\text{inter, flaky}} + B_i^{\text{inter, flaky}} M_i^{\text{inter, flaky}} \right\} p_i + \\ + (1 - \gamma) \left\{ \left[B_i^{\text{inter}} S_i + (I - S_i) \right] M_i^{\text{inter}} + B_i^{\text{single}} M_i^{\text{single}} \right\} p_i \quad (29)$$

2.3. Комп'ютерна модель конусної дробарки для проведення дослідження

Компютерна модель конусної дробарки середнього дроблення будується задля проведення подальшого дослідження впливу геометрії дробильної камери на продуктивність дробарки.

Модель конусної дробарки включає спрощені твердотільні моделі нерухомого та рухомого конусів. Причому рухомий конус побудовано разом зі стаканом. Така спрощена форма моделі дозволить прискорити розрахунки.

Комп'ютерна модель дробарки будується у САПР SolidWorks (рис 2.3), потім експортується у Rocky DEM для подальшого дослідження.

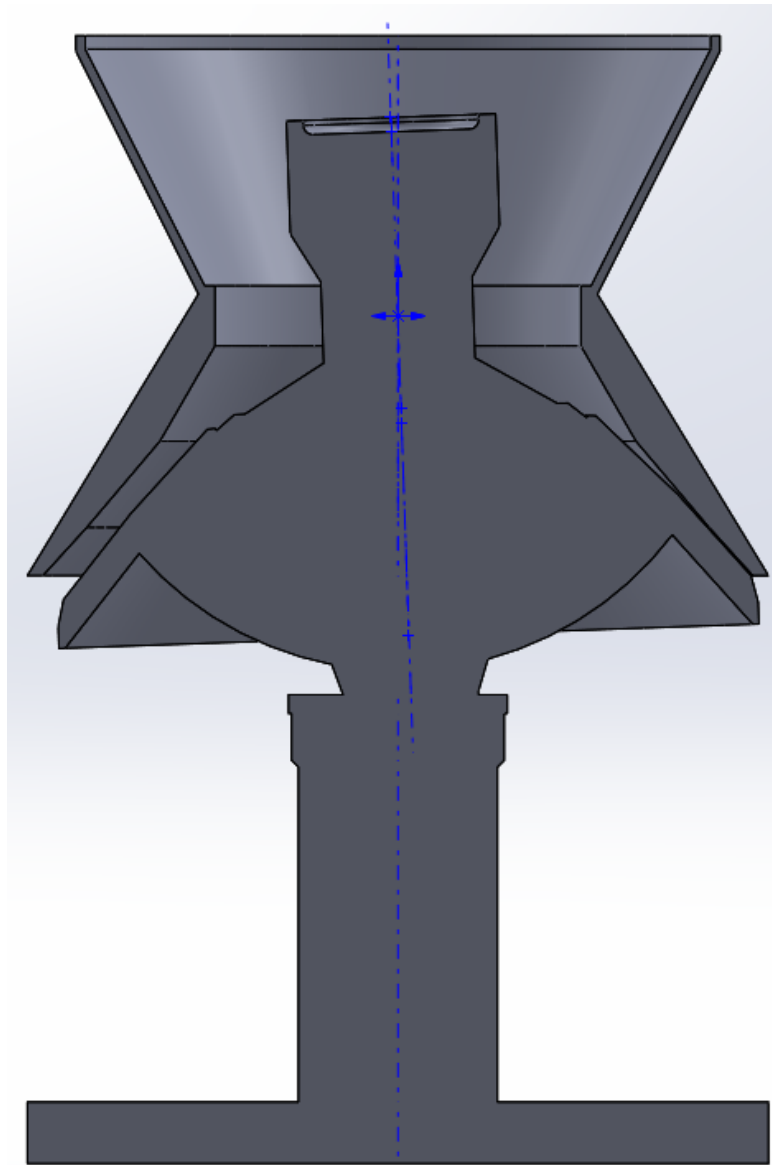


Рис 2.3 – Спрощена модель конусної дробарки

Створення дослідження у Rocky DEM simulation

1. Після запуску Rocky DEM і створення нового проекту, у розділі Modules встановлюємо збирання статистики щодо зіткнення тіл у моделі (рис 2.4).

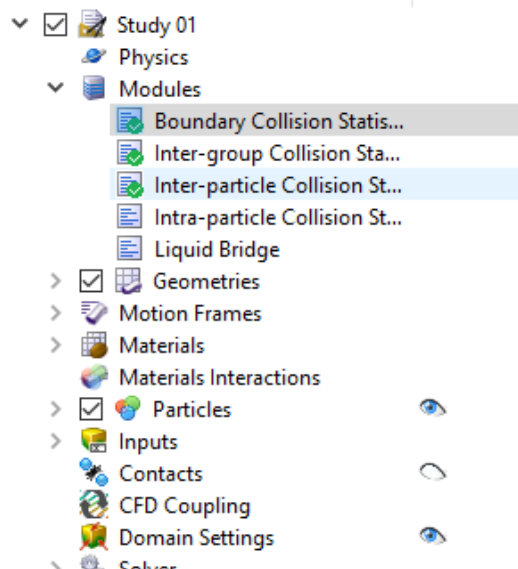


Рис 2.4 - Розділ Modules

Робимо відмітки навпроти пунктів щодо збирання даних зіткнення частинок матеріалу з поверхнями моделі та зіткнення часток між собою (рис 2.5).

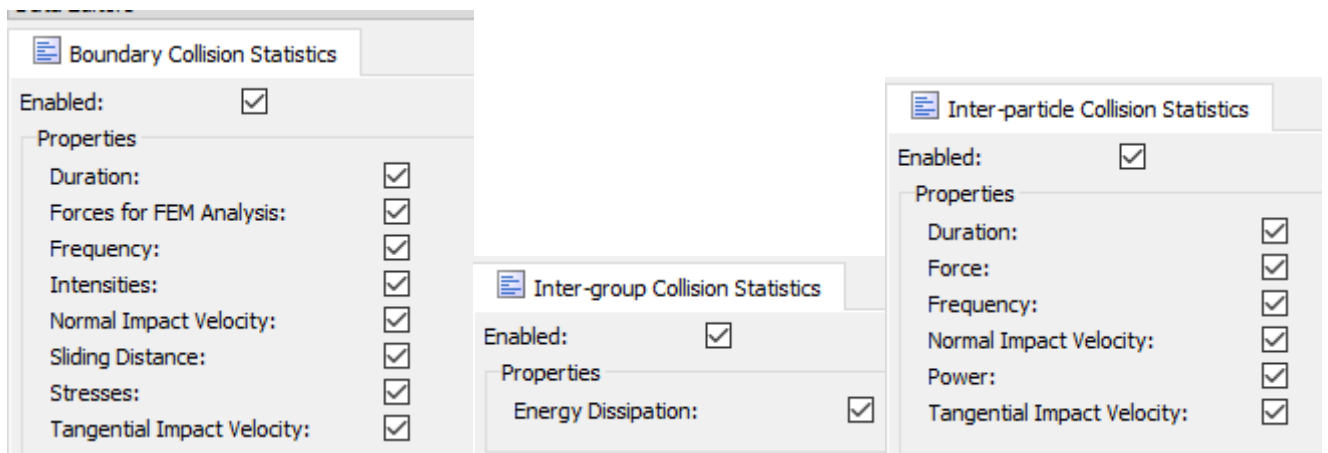


Рис 2.5 - Розділ Modules

- У розділі Geometries завантажуюємо спрощену модель конусної дробарки, побудовану у SolidWorks. Додатково створюємо зону завантаження у формі кола над завантажувальною воронкою (рис 2.6). У налаштуваннях на вкладці Simulation Configuration встановлюємо час завантаження матеріалу з 0 по 0,5 с симуляції.

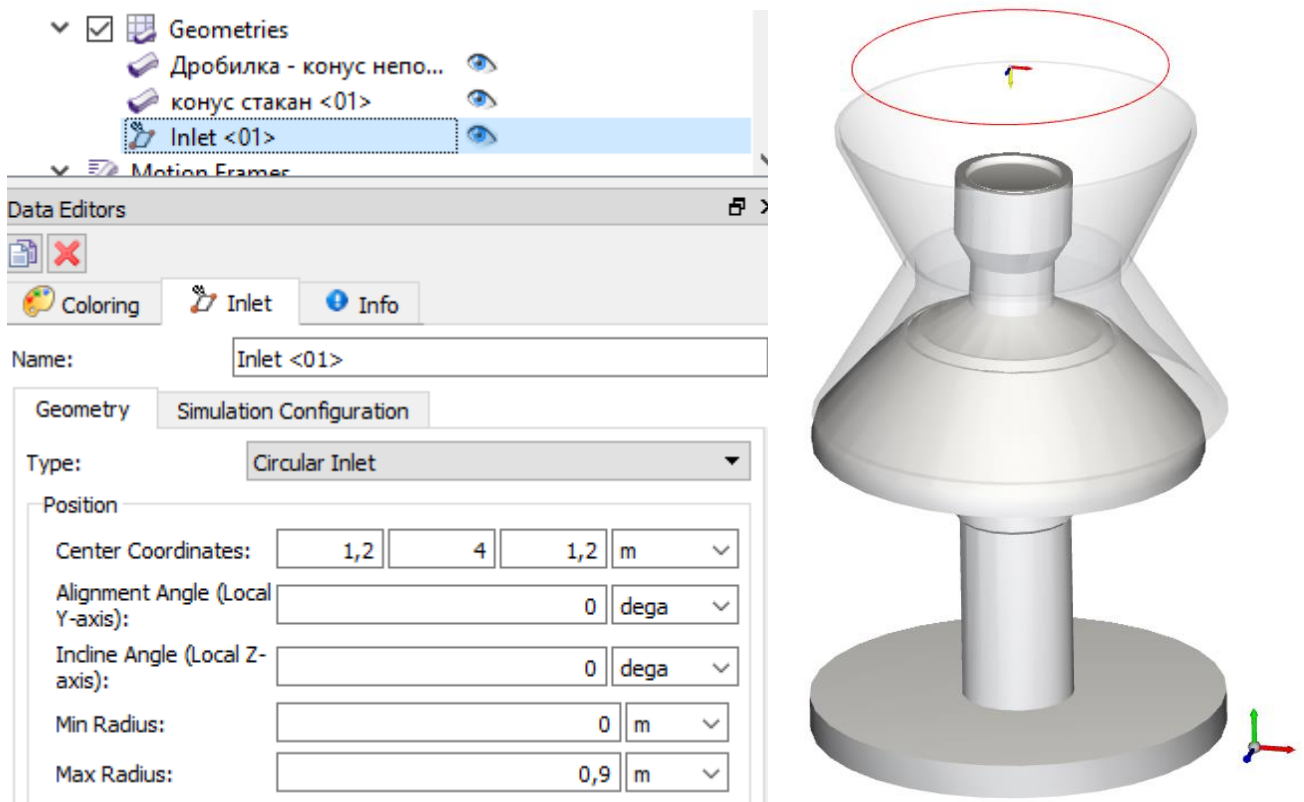


Рис 2.6 - Задання зони завантаження

3. У розділі Motion Frames задаємо наступні налаштування руху конуса дробарки (рис 2.7):

- Motions – Type (тип руху) –Rotation (обертання);
- Initial Angular Velocity (початкова кутова швидкість) - 240 об/хв відносно осі Y;
- Relative position (початкова позиція осі обертання) –за координатами XYZ.

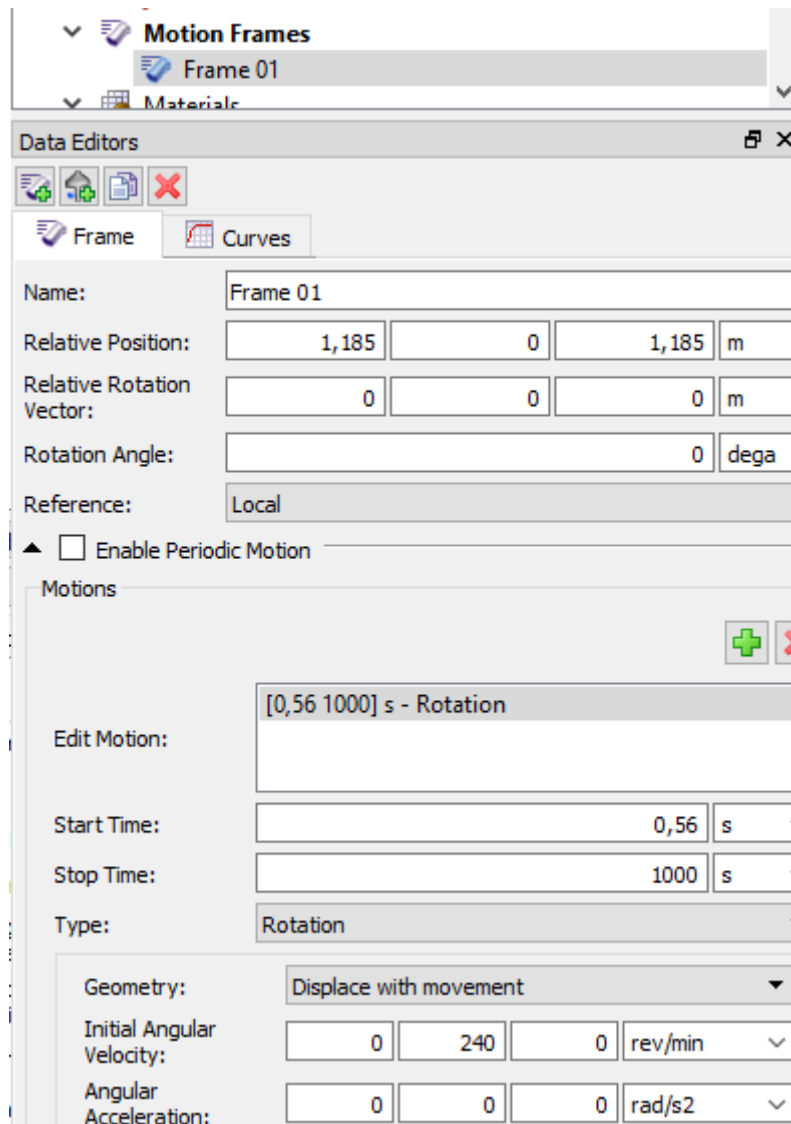


Рис 2.7 - Розділ Motion Frames

- У розділі Materials визначаємо матеріали – сталь для конусів та залізна руда для частинок породи (рис 2.8).

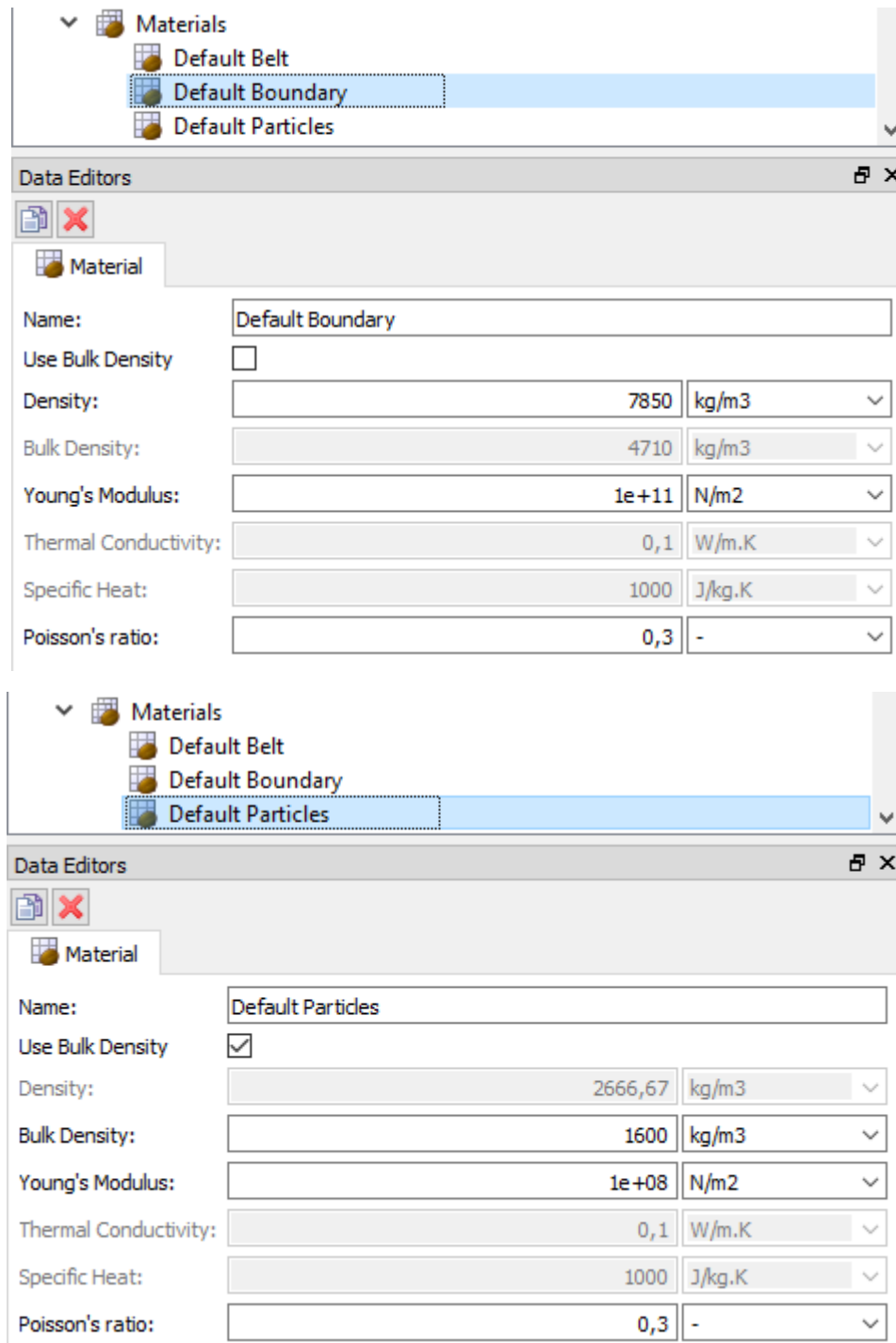


Рис 2.8 - Розділ Materials

- У розділі Particles задаємо частинки породи з формою – polyhedron з розмірами 40 мм (рис 2.9).

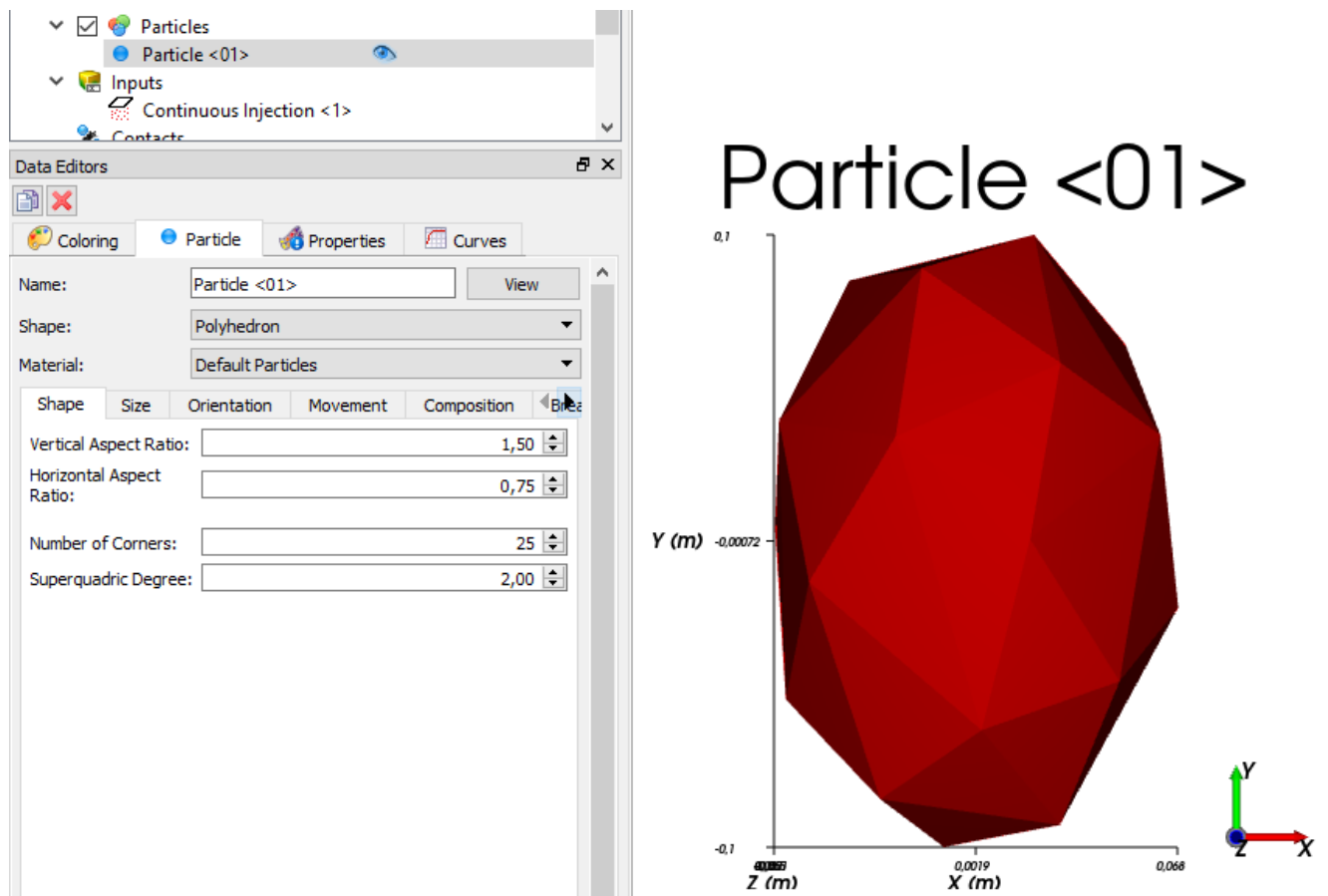


Рис 2.9 - Розділ Particles

6. У розділ Inputs визначаємо витрата матеріалу у живленні (рис 2.10)

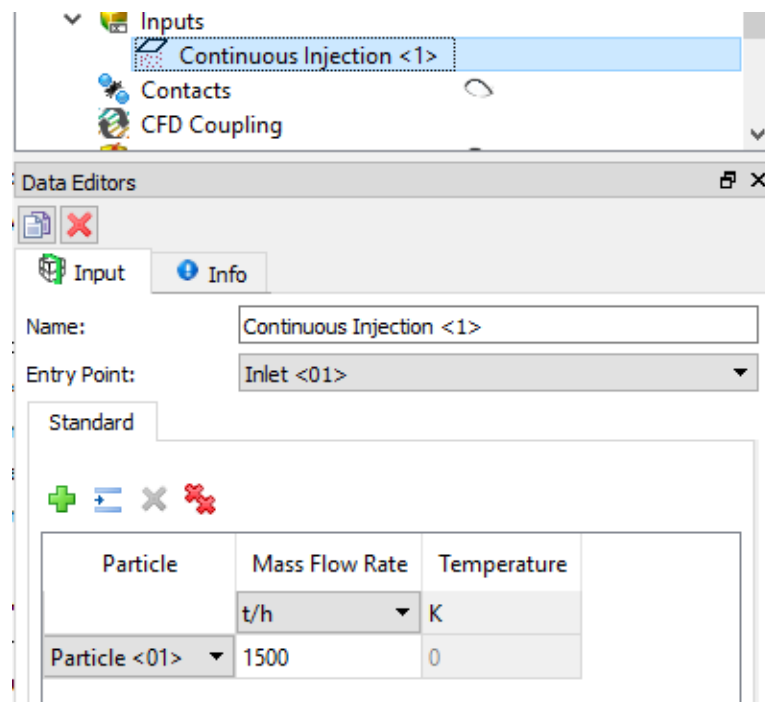


Рис 2.10 - Розділ Inputs

7. У розділі Solver встановлюємо час розрахунку 5 с., частоту кадрів за секунду – 33.3 (рис 2.11).

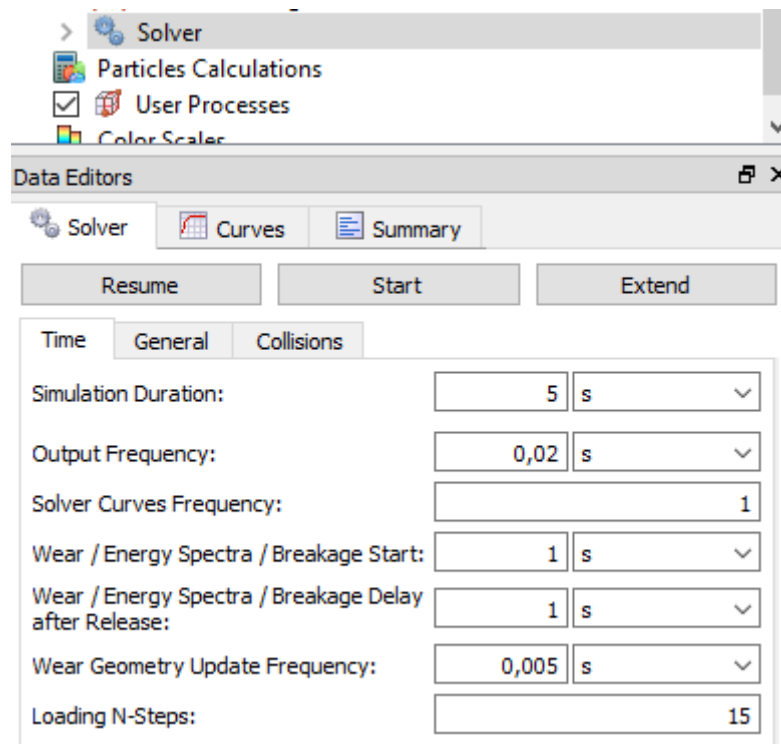


Рис 2.11 - Розділ Solver

У результаті розрахунку записуються для кожного дослідження час перероблення завантаженого матеріалу (рис 2.12).



Рис 2.12 – Результати розрахунку

Висновки до розділу 2

4. Розроблено загальну методику подальшого дослідження, що дозволяє досягти поставленої мети роботи покращити режим роботи інерційних грохотів за рахунок обґрунтування раціональних експлуатаційних параметрів;
5. Розроблено метод розрахунку з модульною структурою на основі дедуктивної моделі дробарки. Представлена модель є комплексним аналітичним інструментом для прогнозування продуктивності конусної дробарки та забезпечує детальне розуміння того, як і де досягається зменшення розміру в конусній дробарці. Модель здатна встановити пряму залежність між параметрами конструкції дробарки, поведінкою дроблення породи та продуктивністю дробарки. Модель можна використовувати як інструмент моделювання для допомоги в процесі проектування конусних дробарок. Потім можна вивчити будь-який довільний дизайн.
6. У моделі дробарки є лише два параметри, які невідомі та потребують налаштування. Параметр часу затримки t_d використовується для компенсації змінного вмісту вологи. Коефіцієнт об'ємного наповнення η_v визначається шляхом ітераційних розрахунків, у яких перевіряються критерії упаковки.
7. Розроблено модель потоку матеріалу, що забезпечує фундаментальне розуміння механізмів потоку, що виникають у конусній дробарці. Вільне падіння є переважаючим механізмом потоку при типових швидкостях обертання конуса.
8. Розроблено модель продуктивності конусної дробарки, що дає виробникам можливість індивідуально виготовляти камери дроблення. З огляду на три основні фактори в якості конструктивних міркувань можна синтезувати нові геометрії дробильної камери для досягнення бажаної поведінки дробарки. Бажані значення основних факторів, у свою чергу, досягаються шляхом вибору правильних значень конструктивних і експлуатаційних параметрів. Потенціал для вдосконалення є високим і, отже, також представляє великий інтерес для галузі. Покращене розуміння процесу зменшення розміру також

визначає можливість синтезу відомих концепцій дробарки.

9. Розроблено модель зменшення розміру, яка базується на законах механіки та основних співвідношеннях щодо характеристик руйнування породи. Загальний процес зменшення розміру є результатом кількох наступних подій дроблення. Стосовно моделі процесу важливою властивістю є те, що вона повинна бути чітко фізично визначена. Це гарантується моделюванням дроблення в конусній дробарці як повторюваного процесу. Кожна подія дроблення моделюється за допомогою функції відбору та руйнування. Зовнішній вигляд функцій відбору та руйнування залежить від матеріалу породи та може бути отриманий шляхом лабораторних випробувань.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ КОНУСНОЇ ДРОБАРКИ

3.1. Результати моделювання та експерименти

Для перевірки моделей потоку дробарки та зменшення розміру було проведено повномасштабні випробування в реалістичних робочих умовах. Під час випробувань було змінено як ексцентричну швидкість, так і налаштування закритої сторони.

Обчислені результати рідко бувають точними, але якщо різниця між обчисленим результатом і реальною поведінкою системи досить мала, помилка не має значення. Якщо існує неприйнятна різниця, також необхідно визначити походження помилки.

Помилки моделювання виникають, якщо існує різниця між фізичною системою та математичною моделлю.

Корм і продукт у процесі зменшення розміру описуються розподілом розміру. Ці розподіли є кумулятивними функціями лінійного розміру частинок. Використання лінійного розміру є, можливо, простим і зручним описом, але воно нічого не говорить про форму частинок. Лінійний розмір визначається ситовим аналізом. Тоді розмір частинки менший за ширину квадратного отвору, через який частинка може пройти, і більший за ширину, через яку вона не може пройти. Окремі частинки, яким присвоєно певний розмір за результатами ситового аналізу, можуть мати абсолютно різні форми і, отже, також, ймовірно, будуть по-різному поводитися під час руйнування.

Також є втрата точності при перетворенні даних ситового аналізу у вектор частоти, який використовується для характеристики вихідного матеріалу, що надходить у процес відновлення. Таким чином, апроксимація безперервного розподілу дискретним вектором призведе до помилки дискретизації, яка була очевидною під час роботи з цим проектом.

У моделюванні часова затримка t_d була встановлена на 0,01 секунди. Змодельоване вертикальне положення частинки, починаючи з рівня дроселя,

показано на рис 3.1. Переважаючим механізмом потоку є вільне падіння. Ковзання відбувається тільки при малій ексцентричній швидкості. Загальна пройдена відстань у вертикальному напрямку зменшується зі збільшенням ексцентричної швидкості. Одне зауваження: якщо номінальний хід має бути повністю використаний, вибрана ексцентрична швидкість має бути трохи нижче 300 об/хв.

Розподіл швидкостей показано на рис 3.2. Чітко видно вплив постійної затримки часу на швидкість. Швидкості вгору значні порівняно з низхідними. Однак перед порівнянням висхідні швидкості слід розділити на коефіцієнт два, оскільки швидкості на увігнутій поверхні мають нульову швидкість. На рис. 3.3 швидкості показано на полярному графіку. Тут чітко показано, як використовуються ексцентричні кути. Для найнижчої швидкості номінальний хід використовується повністю, тоді як для найвищої використовується лише половина номінального ходу.

За допомогою багаторазового моделювання можна показати, як частинка транспортується через камеру дробарки. Оскільки переважаючим механізмом потоку є вільне падіння, це моделювання дасть нам найшвидший можливий шлях, яким може рухатися частинка. Результуючий шлях повторного моделювання показаний на рис 3.4. Для заданої ексцентричної швидкості висота зон дроблення, здається, істотно не змінюється. Зі збільшенням ексцентричної швидкості збільшується число зон дроблення. Ефективна товщина шару і хід зменшуються, коли ексцентрична швидкість збільшується.

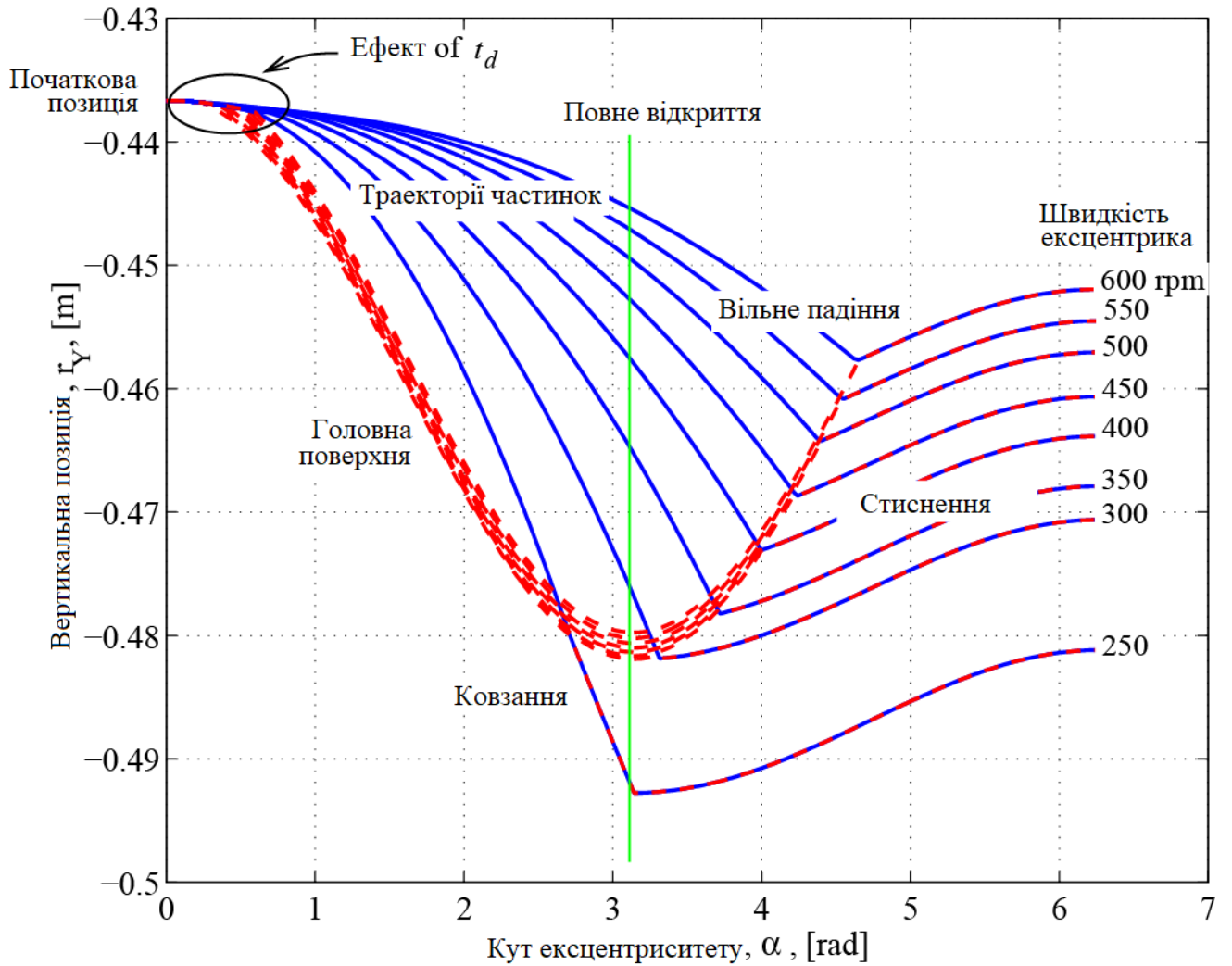


Рис 3.1 - Змодельоване вертикальне положення частинки під різними ексцентричними кутами. Для досліджуваної дробарки переважачим механізмом потоку є вільне падіння ($t_d = 0,01$ с).

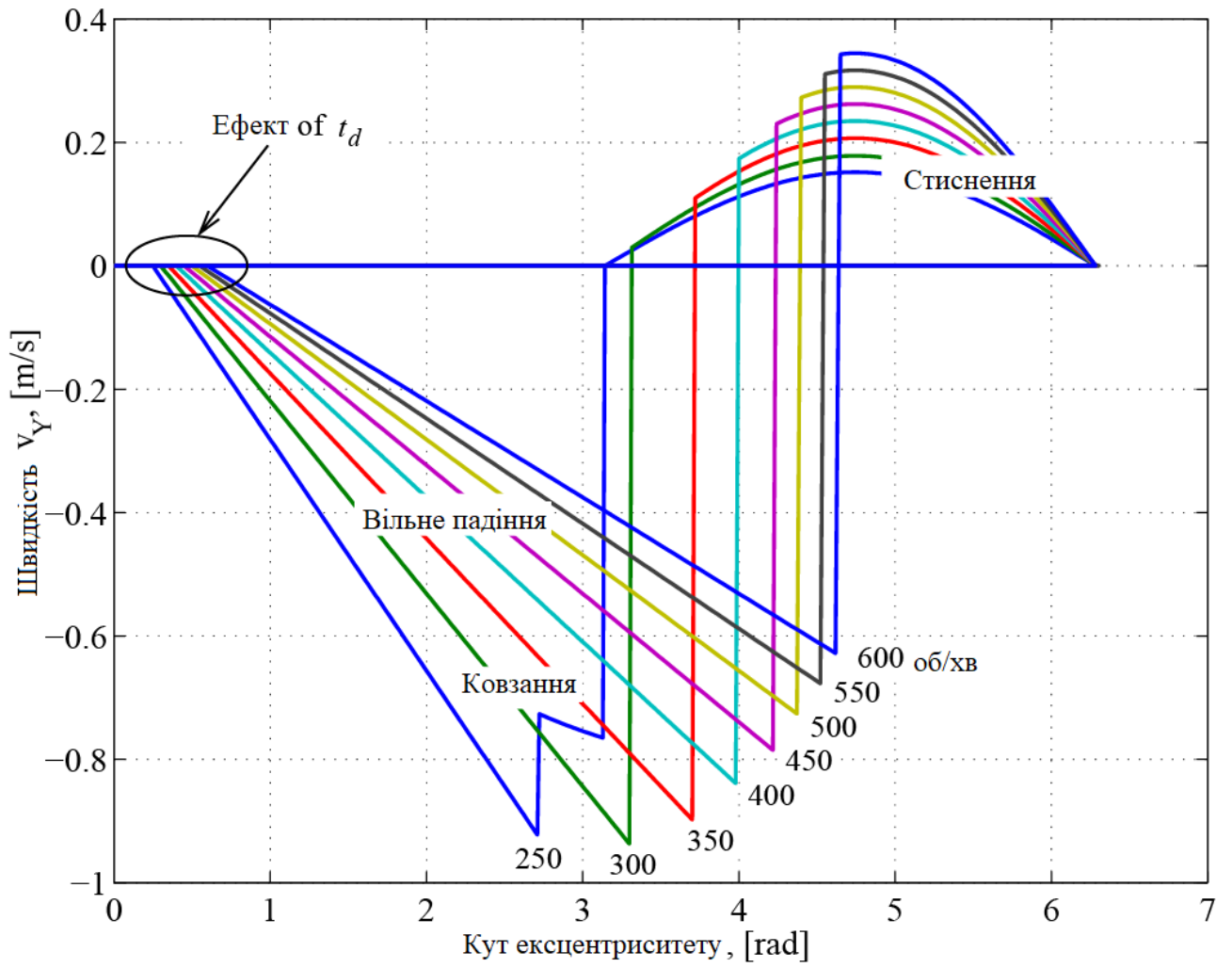


Рис 3.2 - Розподіл швидкостей у вертикальному напрямку на рівні штуцера ($t_d = 0,01$ с).

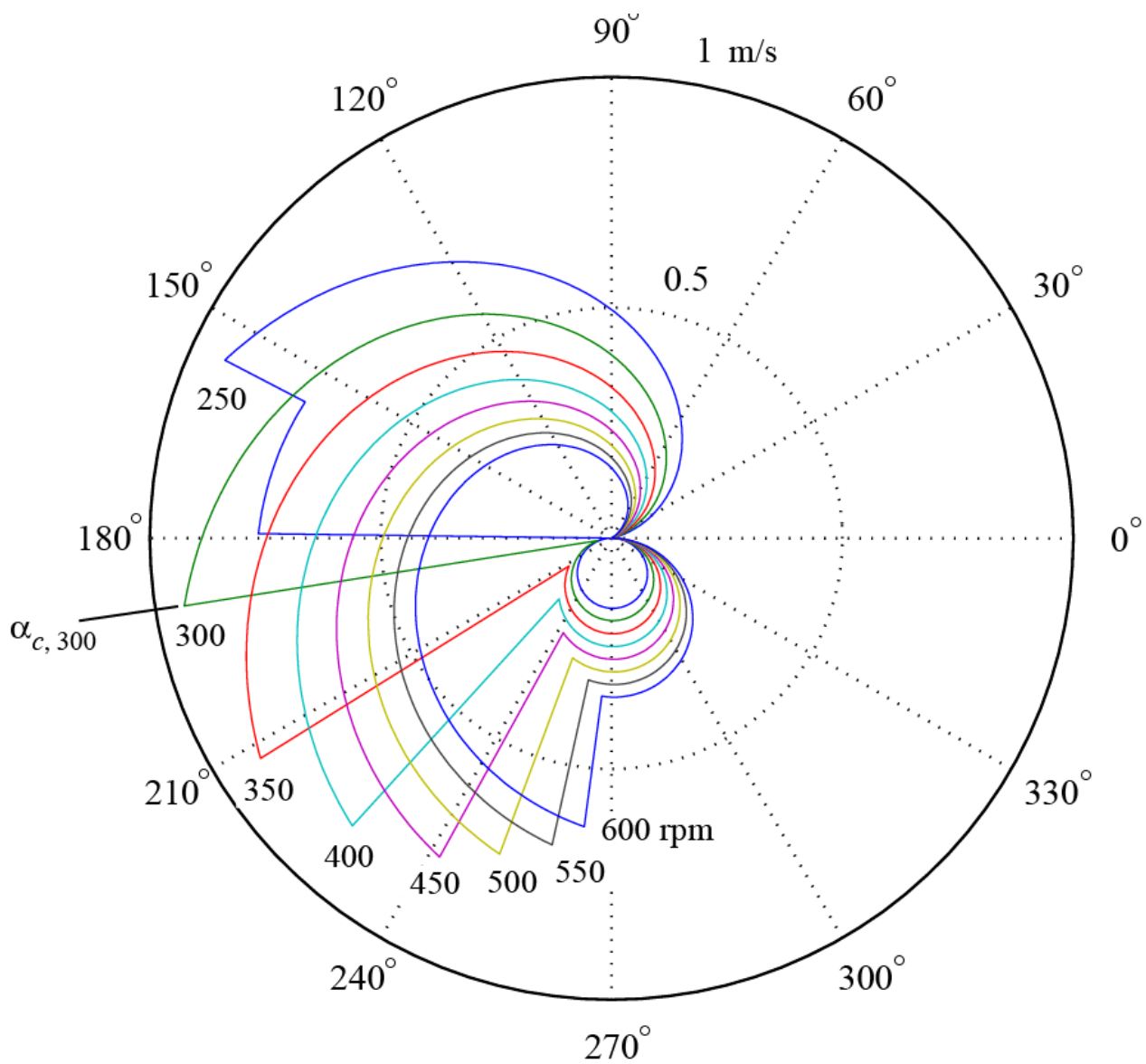


Рис 3.3 - Полярний графік, що показує величину розподілу швидкості у вертикальному напрямку на рівні штуцера ($t_d = 0,01$ с).

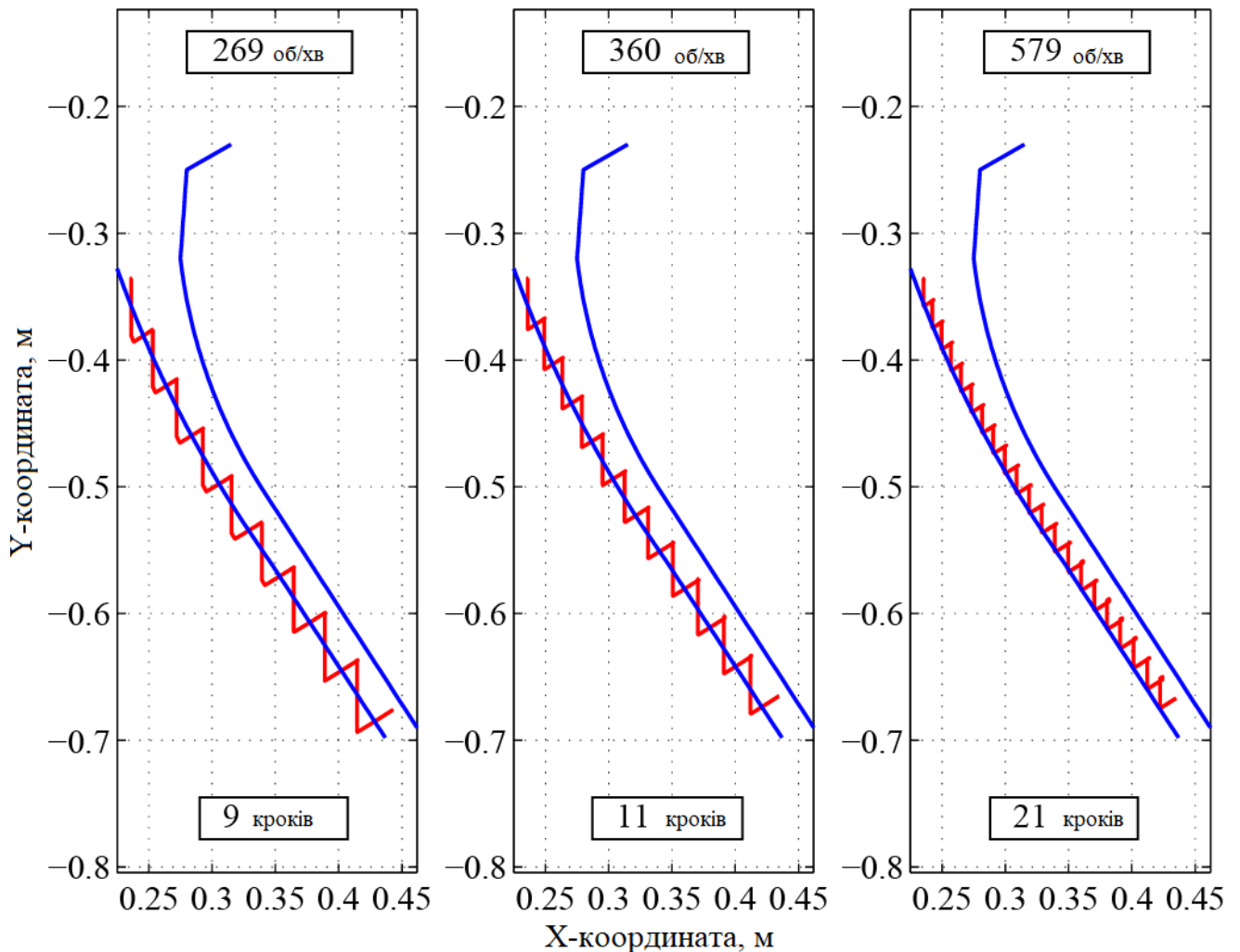


Рис 3.4. - Моделювання показує, як частинка транспортується через камеру дробарки. При збільшенні ексцентричної швидкості збільшується кількість зон дроблення.

Зменшення розміру. Тести розподілу за розміром проводилися одночасно з тестами потоку. Моделювання розпочалося з калібрування об'ємного коефіцієнта наповнення η_v . З повномасштабних випробувань було виявлено, що упаковка відбулася при налаштуванні закритої сторони 7,2 мм. Коефіцієнт об'ємного заповнення вхідної зони був визначений як 0,70 для цього випадку. Для моделювання η_v вважалось постійним незалежно від налаштування закритої сторони.

Змодельовані результати разом із вимірним розподілом подачі та продукту за розміром для трьох різних ексцентричних швидкостей і для двох різних налаштувань закритої сторони показані на рис 3.5. Ті самі випадки, але більш

детально, з розподілом за розміром після кожної події зменшення, показано на рис 3.6. Відповідні коефіцієнти стиснення показані на рис 3.7.

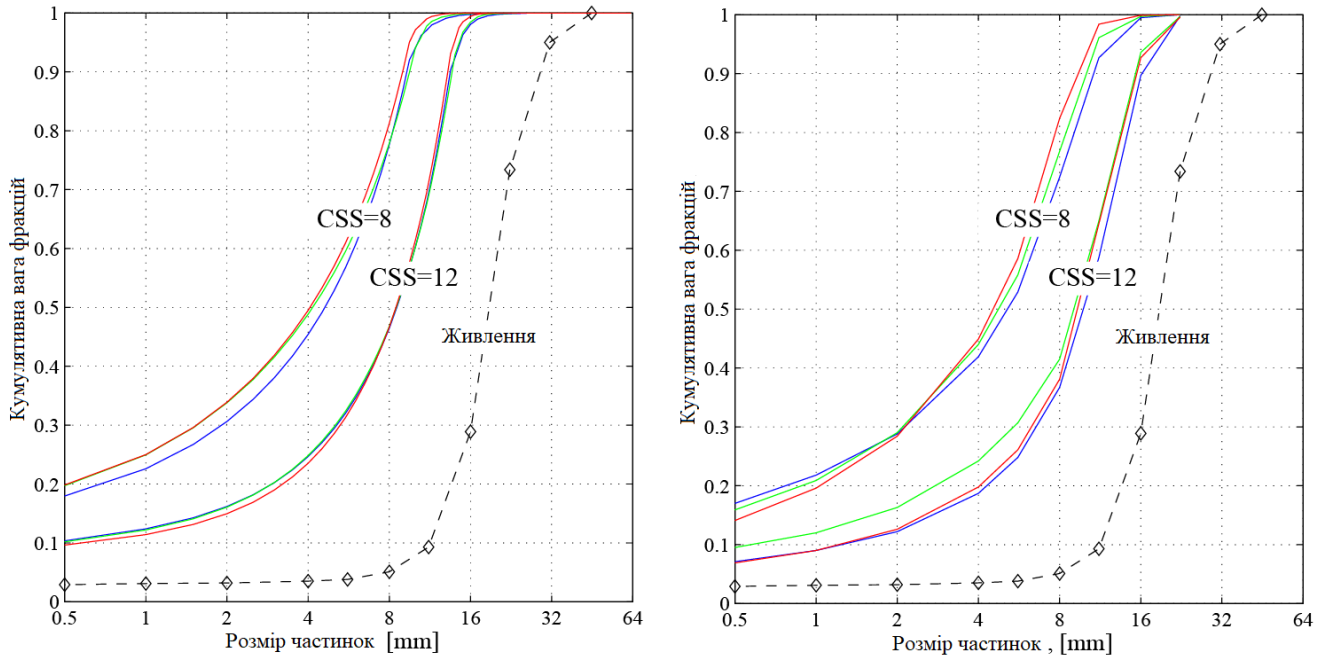
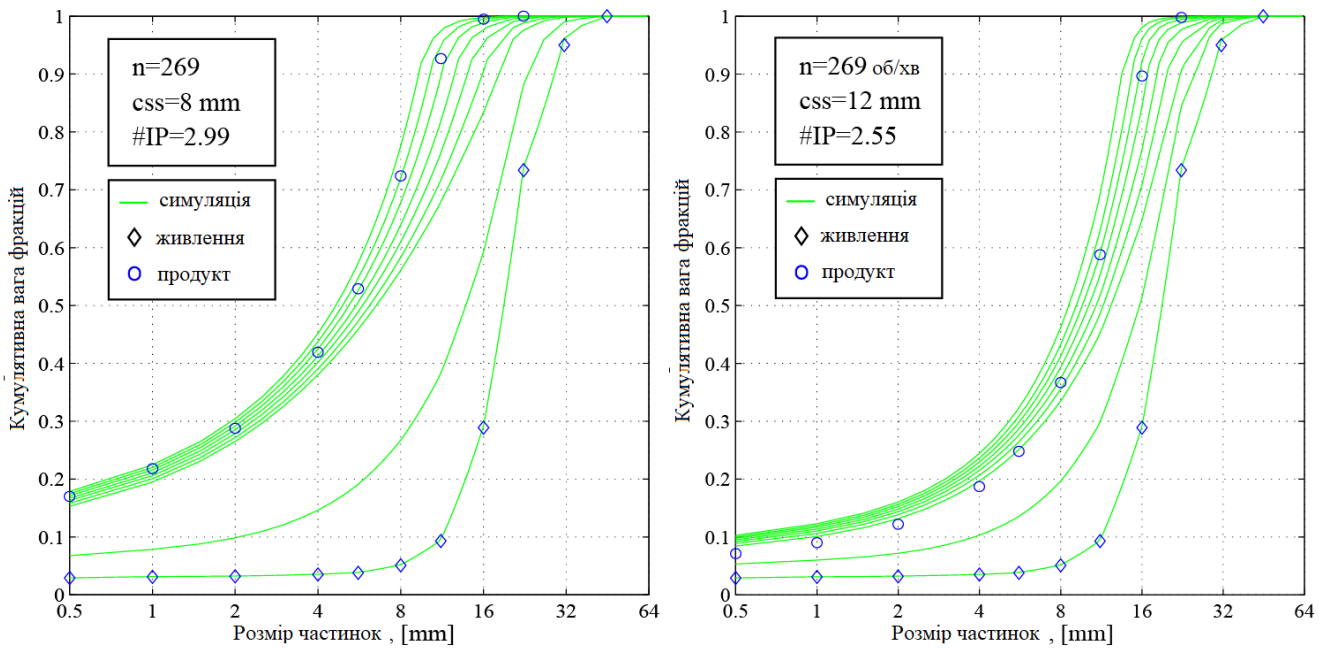


Рис 3.5 - а) Результати моделювання для трьох різних ексцентричних швидкостей і двох різних CSS. б) Натурні випробування.



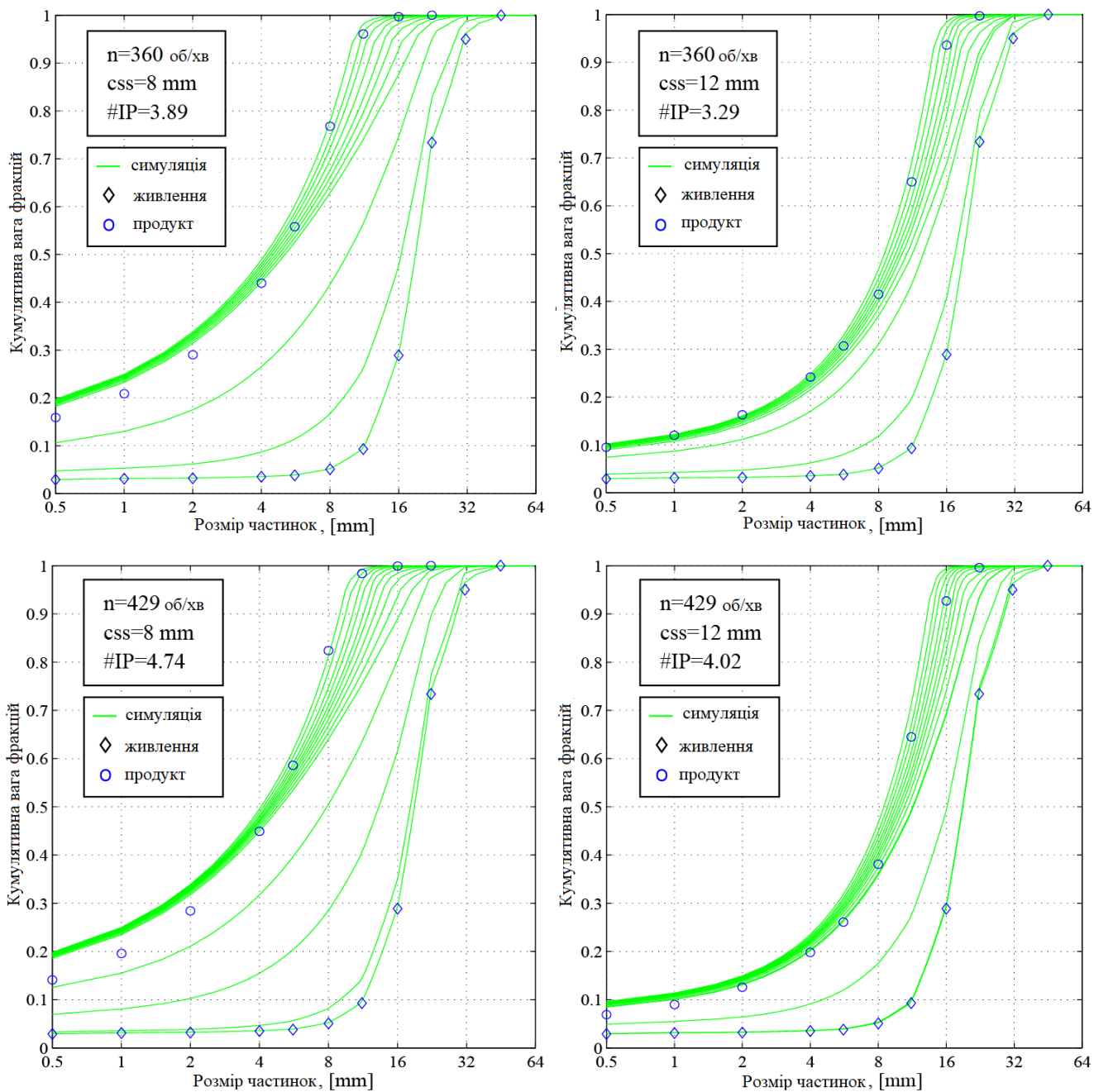
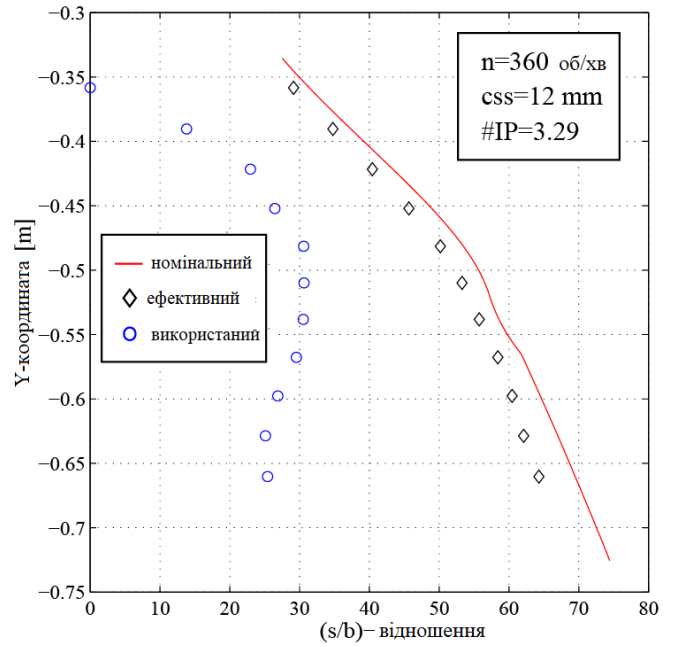
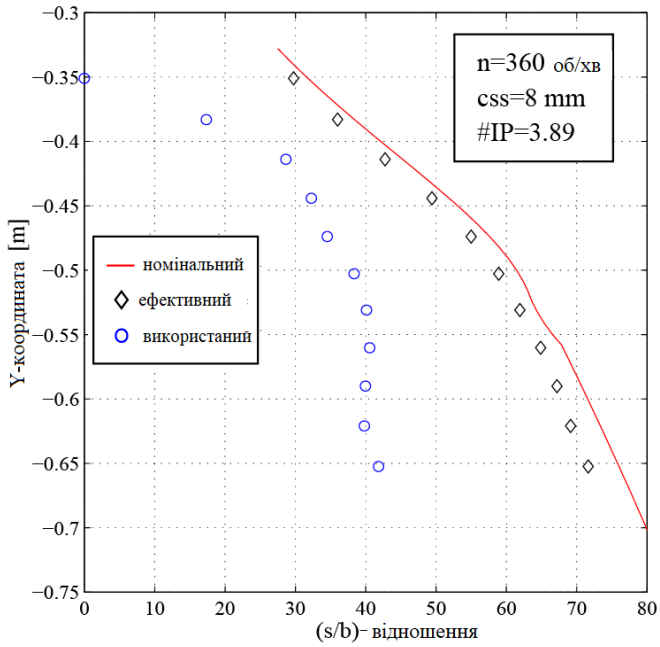
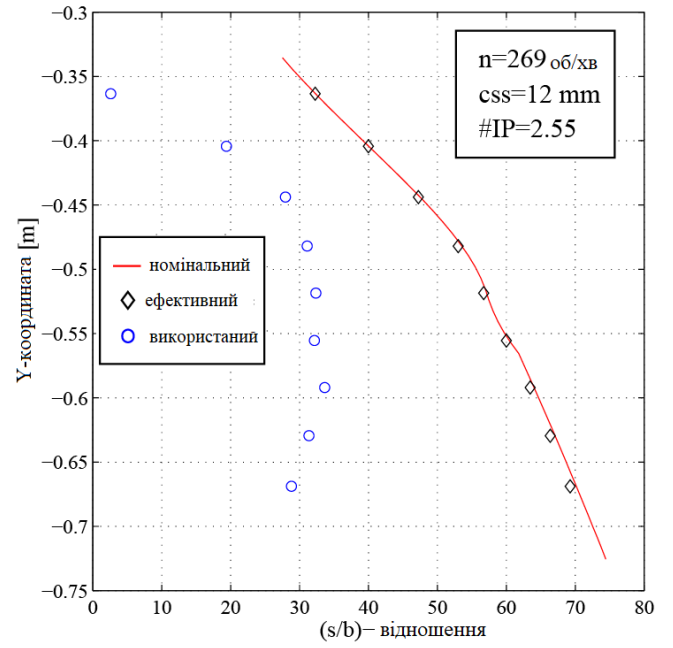
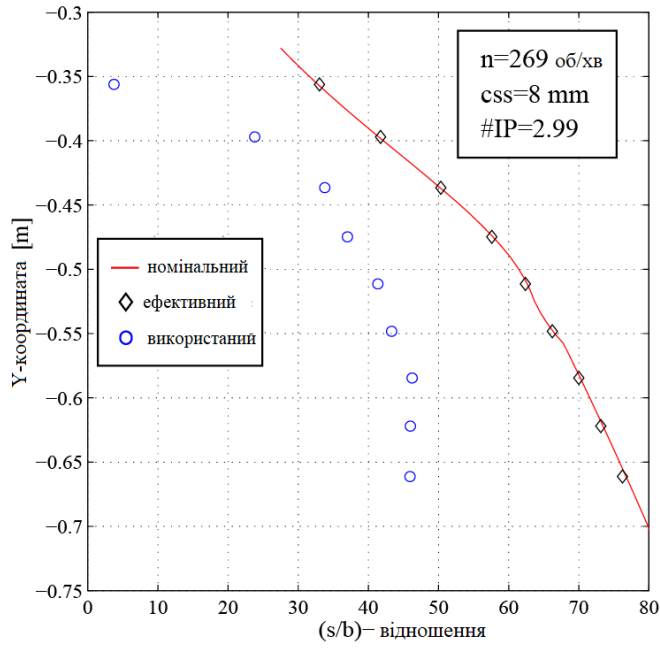


Рис 3.6 - Змодельований розподіл розмірів після кожного кроку зменшення



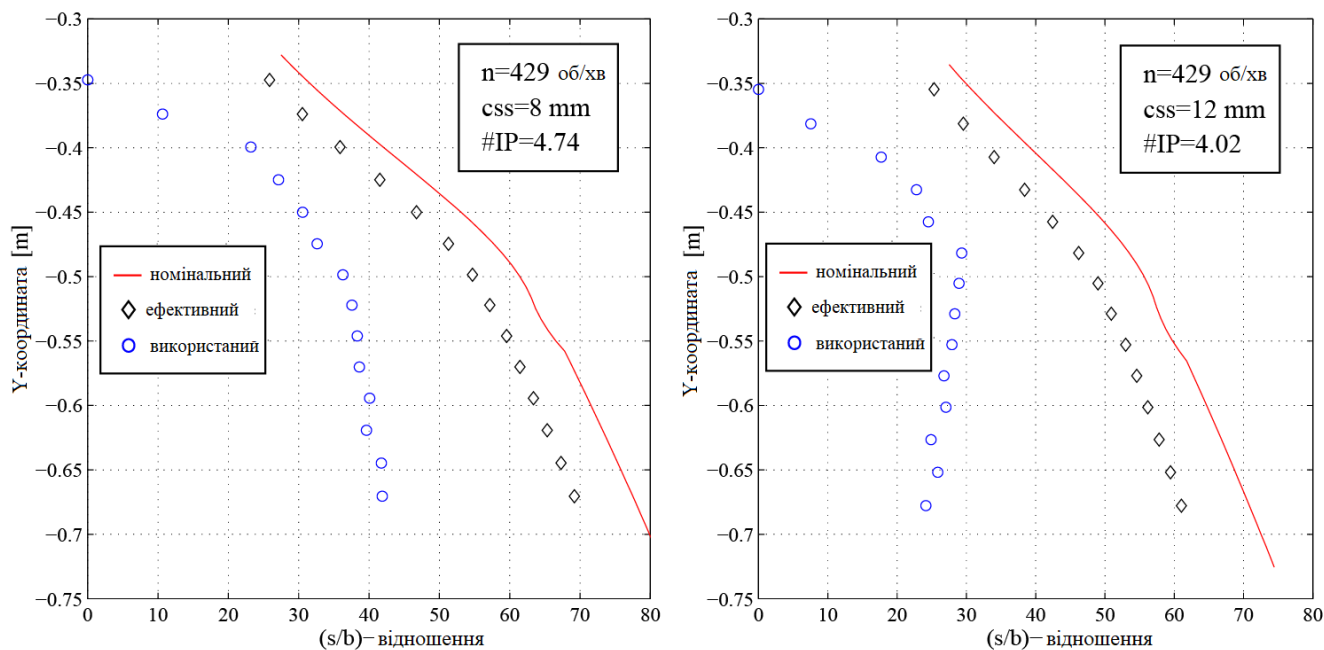


Рис 3.7 - Коефіцієнти стиснення при різних налаштуваннях і швидкостях, отримані в результаті моделювання

Реакція моделі на зміни закритого боку дуже добре відповідає повномасштабним випробуванням. Кількість міжчасткових зон дроблення (#IP) зменшується, коли налаштування закритої сторони збільшується. Це є наслідком висхідного руху рівня дреселя зі збільшенням CSS. Ефект сильно залежить від конкретної конструкції і тому не обов'язково є загальною поведінкою для конусних дробарок. Найважливішим ефектом, пов'язаним зі збільшенням CSS, є зменшення коефіцієнта стиснення. Коли ступінь стиснення зменшується, загальне зменшення розміру також зменшується. Цей ефект очевидний, але ніколи раніше не був доведений цим типом моделювання. Сукупним ефектом зменшення кількості зон дроблення та ступеня стиснення є загальне зменшення розміру.

Реакція моделі при зміні ексцентричної швидкості дуже цікава, але її важко інтерпретувати. Через відносно невелику різницю в загальному зменшенні розміру як для моделювання, так і для повномасштабних випробувань, важко зробити кількісні висновки, порівнюючи лише розподіл розміру для кінцевого продукту, див. рис 3.5. Однак, вивчаючи, як еволюціонує розподіл розміру від кожної події розгрому виявляються значні відмінності. При збільшенні ексцентричної швидкості значно збільшується кількість міжчасткових зон здавлення. Одночасно,

ступінь стиснення зменшується як динамічний ефект збільшення швидкості. За цих умов чудово, що такі невеликі відмінності досягаються як для моделювання, так і для повномасштабних тестів. Пояснення, мабуть, криється в розташуванні рівня дроселя. Якщо рівень дроселя розташований на виході з камери дроблення, слід очікувати більш виражену залежність від ексцентричної швидкості.

Основна частина загального зменшення розміру досягається за рахунок міжчасткового руйнування. У всіх досліджених випадках кількість подій міжчастинкових розривів відносно мала. Типове число становить від 2,5 до 4,5.

Після зон міжчасткового розпаду і вниз до вихідного отвору режим розриву є чисто одиночним. Тут матеріал головним чином калібрується дробаркою, і кінцеве зменшення розміру є відносно невеликим у цій області. Кількість подій дроблення окремих частинок становить від 6 до 10.

З точки зору ефективності зменшення, частина камери дроблення над рівнем дроселя є більш ефективною порівняно з нижньою частиною. Зона калібрування зазвичай визначається як частина камери над вихідним отвором, де мантия профілю та увігнуті поверхні майже паралельні. Часто стверджують, що зона калібрування визначає форму частинок. Ця зона розташована нижче точки дроселю, тому режим руйнування є одночастинковим. Невідповідний дизайн зони калібрування може мати руйнівний вплив на форму частинок.

Більш ретельна перевірка відповідності між результатами моделювання та повномасштабними випробуваннями показує систематичне надмірне прогнозування загального зменшення розміру для моделювання. Ймовірно, це ефект, який виникає в припущенні, що зони, де відбувається міжчастковий розрив, є повністю обмеженими. Якщо ступінь обмеження нижчий, значення функцій відбору та розриву зменшаться, а отже, і загальне зменшення розміру.

Якщо проводити багаторазове моделювання зменшення розміру з різними значеннями одного або кількох параметрів, буде отримано продуктивність дробарки. На рис 3.8а показано розподіл розмірів для різної закритої сторони. Відповідна карта продуктивності дробарки показана на рис 3.8 б.

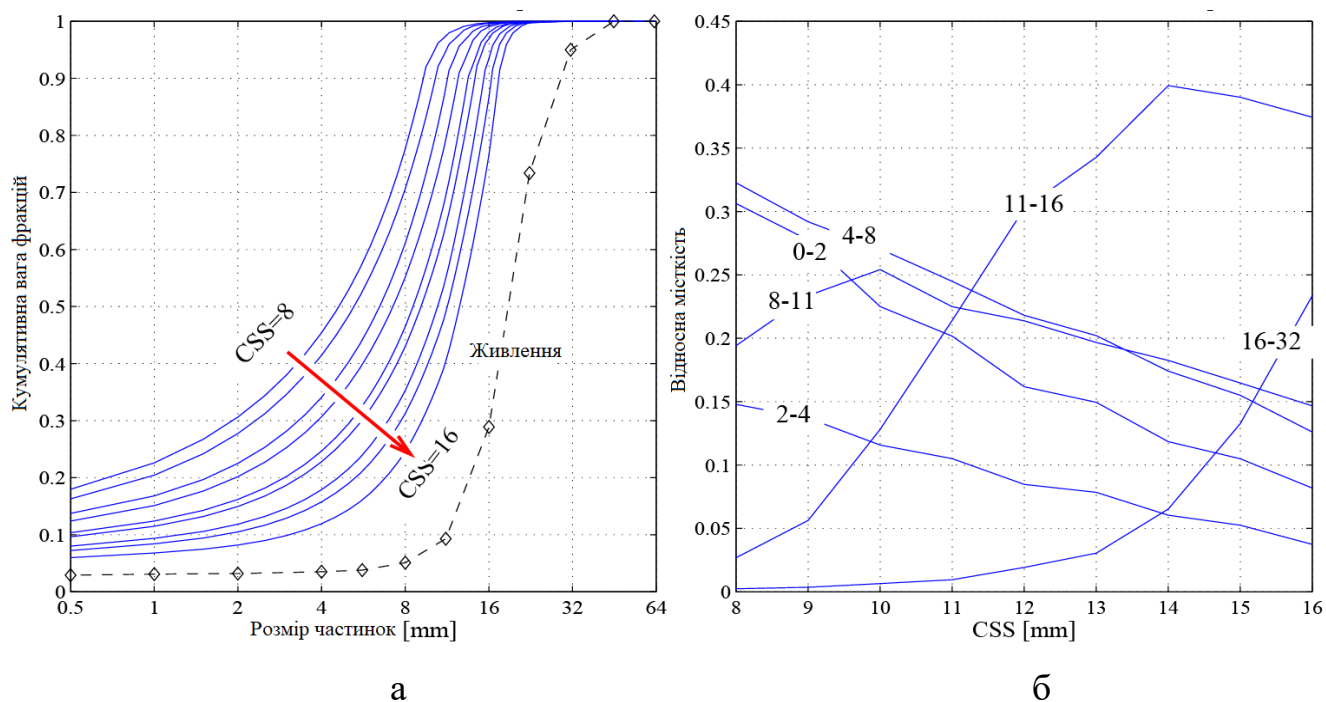


Рис 3.8 - а) Змодельований розподіл продукту за розміром при ексцентричній швидкості 269 об/хв. CSS змінюється з кроком 1 мм від 8 до 16 мм. б) Змодельована карта продуктивності дробарки для ексцентричної швидкості 269 об/хв.

Для порівняння результати повномасштабних випробувань показані на рис 3.9. Подібність між моделюванням і результатами випробувань переконлива. Якісна узгодженість особливо хороша з точки зору розташування максимальних відносних потужностей разом із тенденціями різних фракцій.

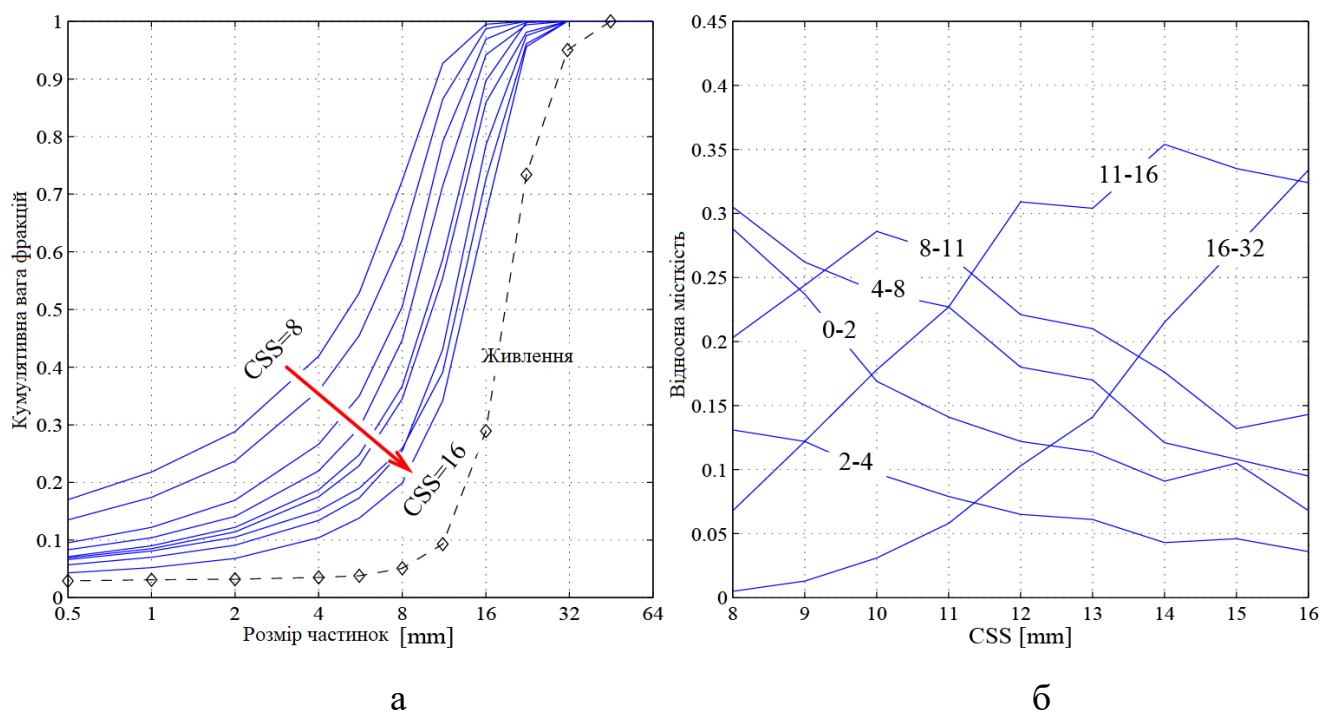


Рис 3.9 - а) Розподіл продукту за розмірами з натурних випробувань при ексцентричній швидкості 269 об/хв. CSS змінюється з кроком 1 мм від 8 до 16 мм. б) Карта продуктивності дробарки з повномасштабних випробувань при ексцентричній швидкості 269 об/хв.

Шляхом інтегрування розподілу швидкості, помноженого на коефіцієнт об'ємного наповнення та щільність, отримують загальну пропускну здатність для різних ексцентричних швидкостей. Змодельована ємність разом із виміряною показана на рис 3.10. Моделювання проводилося з часовою затримкою, встановленою на 0,01 секунди, і з коефіцієнтом заповнення, встановленим на 0,70, як у моделюванні зменшення розміру.

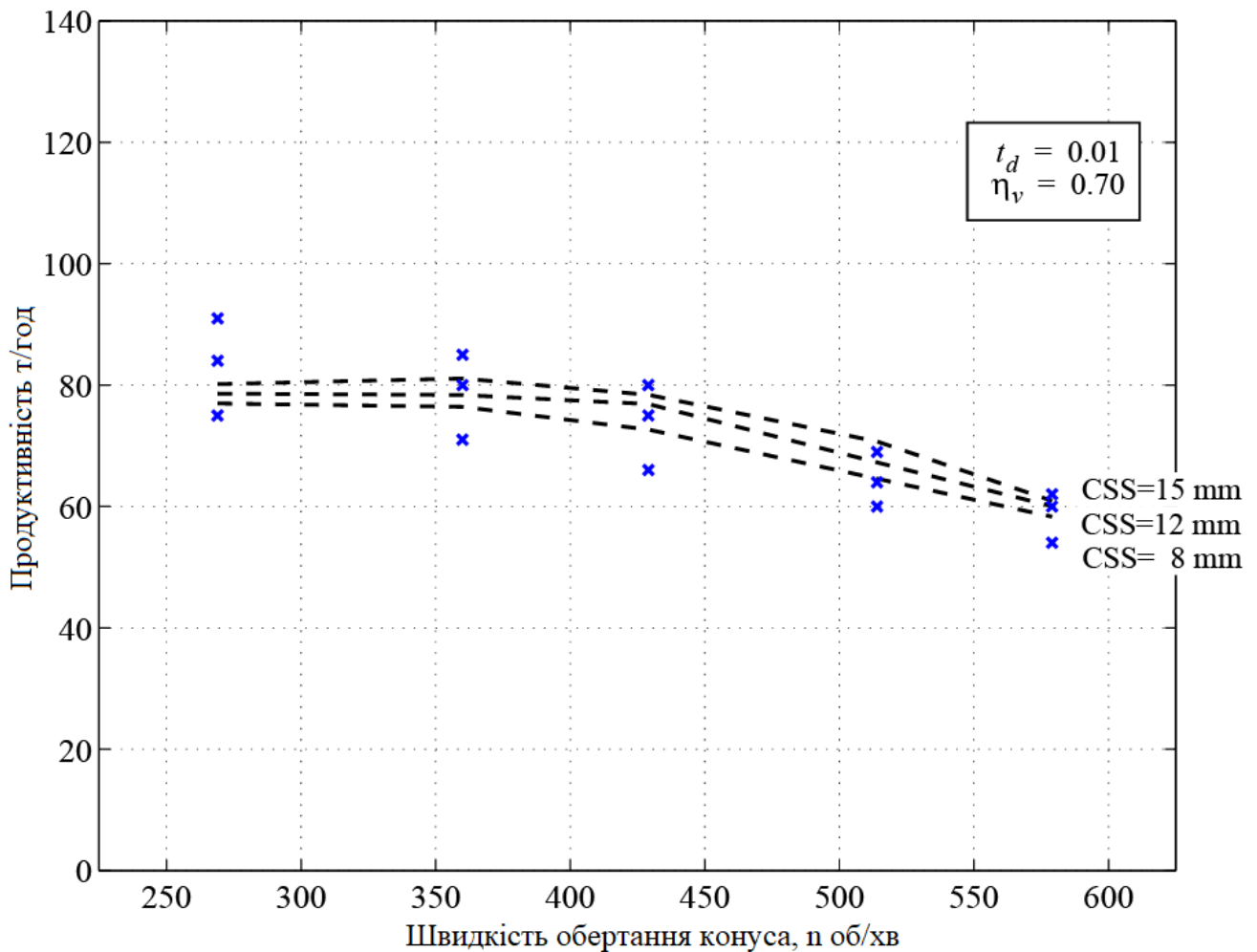


Рис 3.10 - Змодельована продуктивність (лінії) порівняно з повномасштабними випробуваннями (мітки x). Змодельовані потужності розраховуються для трьох різних CSS при тих самих ексцентричних швидкостях, що й у повномасштабних тестах (269, 360, 429, 514 і 579 об/хв).

Ємності оцінювалися на рівні дроселя. Коефіцієнт об'ємного заповнення вхідної зони підтримувався постійним між моделюваннями. Це означає, що коефіцієнт заповнення на рівні дроселя буде змінюватися, оскільки щільність змінюється в залежності від розподілу за розміром матеріалу, що надходить на цей рівень.

3.2. Рекомендації щодо конструкцій конусних дробарок

Ідентифіковано три основні фактори, які сприяють процесу зменшення

розміру, що відбувається в конусній дробарці, а саме. режими поломки, кількість зон роздавлювання і ступінь стиснення. Ці основні фактори дають можливість для фундаментального та детального розуміння того, як працює конусна дробарка. На фактори впливають як конструктивні, так і робочі параметри. Будь-яке проектування слід оцінювати за трьома основними факторами.

Міжчастинкове руйнування визначає форму частинок, тоді як руйнування окремої частинки є найбільш енергоефективним [6]. Якщо за кількома зонами дроблення між частинками слідує зона калібрування, настійно рекомендується, щоб ця зона була паралельною або трохи розбіжною. у такий спосіб мінімізується ймовірність утворення подовжених часток нерівної форми поблизу вихідного отвору дробарки.

Кількість зон дроблення регулюється висотою дробарки та швидкістю ексцентрика. Дробарку, яка має зону дроселя відносно високо в камері, ймовірно, можна вкоротити знизу за допомогою кількох зон дроблення без будь-яких значних втрат у загальному зменшенні розміру.

Для дробарки з дросельною зоною біля виходу з камери перші міжчасткові зони дроблення матимуть дуже незначний вплив на зменшення розміру. У цих зонах співвідношення (s/b) настільки низьке, що значення функції вибору наблизатиметься до нуля і, отже, не сприятиме жодному зменшенню розміру.

Ступінь стиснення в основному контролюється профілями камери, динамікою дробарки та об'ємним коефіцієнтом наповнення. Разом ці фактори призводять до коефіцієнта використаного стиснення (s/b)_ц. У свою чергу, використовуваний ступінь стиснення визначає значення відбору та руйнування.

З огляду на підхід у цій роботі, поведінка руйнування гірських матеріалів є сильно нелінійною. Для матеріалу гнейсу та діабазу, комбінована поведінка відбору та руйнування є очевидно нелінійною,. Ймовірно, що існує «найкращий спосіб» досягти бажаного зменшення розміру. Цей спосіб можна сформулювати як стратегію зменшення розміру. Стратегія зменшення розміру включає оптимальний вибір співвідношення (s/b), кількості подій дроблення та режимів руйнування.

Оптимальне зменшення розміру можна знайти за допомогою ітераційних

обчислень, у яких використовуються функції відбору та поломки. Стратегія зменшення розміру досягається за допомогою дробарки, як показано на малюнку 40. Для даної концепції дробарки, напр. конусної дробарки, існуватимуть теоретичні обмеження, які можна досягти. У випадку, коли концепція дробарки обмежує стратегію зменшення розміру, буде потенціал для інновацій. На основі стратегії можуть бути синтезовані нові типи дробарок.

Висновки до розділу 3

1. Встановлено три основні фактори, які сприяють процесу зменшення розміру шматків породи, що відбувається в конусній дробарці: режими руйнування, кількість зон роздавлювання та ступінь стиснення. На них впливають конструкція, властивості породи, швидкості обертання рухомого конуса, налаштування закритої сторони та розподілу породи за розміром. Основні фактори дають можливість для фундаментального та детального розуміння того, як працює конусна дробарка. Будь-яке проектування слід оцінювати за цими трьома основними факторами.
2. Для визначення раціональних параметрів конусної дробарки потрібно створити карту продуктивності дробарки, яка описує, як вихід продукту з дробарки змінюється залежно від параметрів машини. Застосовуючи критерії оптимізації до карти продуктивності дробарки, можна знайти найкращі робочі умови.
3. Встановлено, що залежність продуктивності конусної дробарки середнього дроблення від швидкості обертання рухомого конуса є квадратичною та обернено пропорційною, причому стандартні швидкості обертання рухомого

конуса, обрані виробниками дробарок, не повністю використовують номінальний хід конусу.

4. Встановлено, що існує значний потік матеріалу вгору через ефект підйому. Цей висхідний потік матеріалу зменшує загальну ємність, і його не можна ігнорувати. Такий же ефект необхідний для горизонтального (радіального) транспортування матеріалу від входу до виходу дробильної камери.
5. У конусній дробарці можна досягти двох різних режимів дроблення. Критерієм, що визначає, де діє режим обриву, є розташування рівня дроселя. Домінуючим режимом руйнування вище рівня дроселя є міжчастинкове руйнування, тоді як нижче цього рівня досягається здебільшого одночасткове руйнування.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання, що полягає в покращенні режиму роботи конусних дробарок середнього дроблення за допомогою математичної моделі для розрахунку продуктивності конусної дробарки та прогнозування масового відсотка за крупністю.

1. Розроблено загальну методику подальшого дослідження, що дозволяє досягти поставленої мети роботи покращити режим роботи інерційних грохотів за рахунок обґрунтування раціональних експлуатаційних параметрів;
2. Розроблено метод розрахунку з модульною структурою на основі дедуктивної моделі дробарки. Представлена модель є комплексним аналітичним інструментом для прогнозування продуктивності конусної дробарки та забезпечує детальне розуміння того, як і де досягається зменшення розміру в конусній дробарці. Модель здатна встановити пряму залежність між параметрами конструкції дробарки, поведінкою дроблення породи та продуктивністю дробарки. Модель можна використовувати як інструмент моделювання для допомоги в процесі проектування конусних дробарок. Потім можна вивчити будь-який довільний дизайн.
3. У моделі дробарки є лише два параметри, які невідомі та потребують налаштування. Параметр часу затримки t_d використовується для компенсації змінного вмісту вологи. Коефіцієнт об'ємного наповнення η_v визначається шляхом ітераційних розрахунків, у яких перевіряються критерії упаковки.
4. Розроблено модель потоку матеріалу, що забезпечує фундаментальне розуміння механізмів потоку, що виникають у конусній дробарці. Вільне падіння є переважаючим механізмом потоку при типових швидкостях обертання конуса.
5. Розроблено модель продуктивності конусної дробарки, що дає виробникам можливість індивідуально виготовляти камери дроблення. З огляду на три основні фактори в якості конструктивних міркувань можна синтезувати нові геометрії дробильної камери для досягнення бажаної поведінки дробарки.

Бажані значення основних факторів, у свою чергу, досягаються шляхом вибору правильних значень конструктивних і експлуатаційних параметрів. Потенціал для вдосконалення є високим і, отже, також представляє великий інтерес для галузі. Покращене розуміння процесу зменшення розміру також визначає можливість синтезу відомих концепцій дробарки.

6. Розроблено модель зменшення розміру, яка базується на законах механіки та основних співвідношеннях щодо характеристик руйнування породи. Загальний процес зменшення розміру є результатом кількох наступних подій дроблення. Стосовно моделі процесу важливою властивістю є те, що вона повинна бути чітко фізично визначена. Це гарантується моделюванням дроблення в конусній дробарці як повторюваного процесу. Кожна подія дроблення моделюється за допомогою функції відбору та руйнування. Зовнішній вигляд функцій відбору та руйнування залежить від матеріалу породи та може бути отриманий шляхом лабораторних випробувань.
7. Встановлено три основні фактори, які сприяють процесу зменшення розміру шматків породи, що відбувається в конусній дробарці: режими руйнування, кількість зон роздавлювання та ступінь стиснення. На них впливають конструкція, властивості породи, швидкості обертання рухомого конуса, налаштування закритої сторони та розподілу породи за розміром. Основні фактори дають можливість для фундаментального та детального розуміння того, як працює конусна дробарка. Будь-яке проектування слід оцінювати за цими трьома основними факторами.
8. Для визначення раціональних параметрів конусної дробарки потрібно створити карту продуктивності дробарки, яка описує, як вихід продукту з дробарки змінюється залежно від параметрів машини. Застосовуючи критерії оптимізації до карти продуктивності дробарки, можна знайти найкращі робочі умови.
9. Встановлено, що залежність продуктивності конусної дробарки середнього дроблення від швидкості обертання рухомого конуса є квадратичною та обернено пропорційною, причому стандартні швидкості обертання рухомого

конуса, обрані виробниками дробарок, не повністю використовують номінальний хід конусу.

10. Встановлено, що існує значний потік матеріалу вгору через ефект підйому. Цей висхідний потік матеріалу зменшує загальну ємність, і його не можна ігнорувати. Такий же ефект необхідний для горизонтального (радіального) транспортування матеріалу від входу до виходу дробильної камери.
11. У конусній дробарці можна досягти двох різних режимів дроблення. Критерієм, що визначає, де діє режим обриву, є розташування рівня дроселя. Домінуючим режимом руйнування вище рівня дроселя є міжчастинкове руйнування, тоді як нижче цього рівня досягається здебільшого одночасткове руйнування.