

6	СТАРОВ Михайло Юрійович	ГМО-24-1м	Оптимізація форми ківшу малопотужного гідравлічного екскаватору типу зворотна лопата	Кривенко О.Ю. доц., канд.тех.наук
---	-------------------------------	-----------	--	---

ВСТУП

Гірничодобувна та будівельна галузі залишаються одними з ключових секторів економіки, де значну роль відіграють засоби механізації землерийних робіт, зокрема гідравлічні екскаватори. У гірничодобувній промисловості та будівництві виємно-повантажувальні роботи залишаються ключовим процесом, що визначає загальну ефективність і економічність виробництва. Для виконання цих робіт найбільш широко поширені одноковшові і багатоковшові кар'єрні екскаватори. Серед них особливе місце займають гідравлічні екскаватори типу зворотної лопати, що широко застосовуються на етапах вторинної переробки матеріалів, розчистки територій, формування складів корисних копалин та виконання будівельних робіт у стиснутих умовах. Ефективність їхньої роботи значною мірою залежить від конструктивних параметрів робочого обладнання, зокрема — форми ківша, яка безпосередньо впливає на продуктивність, енерговитрати та якість виконання технологічних операцій. У цьому контексті малопотужні гідравлічні екскаватори цього типу, незважаючи на їх відносну компактність і меншу продуктивність у порівнянні з крупними кар'єрними машинами, відіграють надзвичайно важливу роль у виконанні специфічних завдань, де потрібна висока маневреність, точність і економічність.

Малопотужні гідравлічні екскаватори типу «зворотна лопата» (з експлуатаційною масою до 15 тонн) є незамінними на складах добутої корисної копалини, відвалах порід, а також на міських будівельних майданчиках, де вимагається висока маневреність, точність роботи та обмежене навантаження на ґрунт.

Постійне зростання вимог до ефективності та економічності землерийних машин в умовах як відкритих горних робіт, так і будівельного виробництва, незважаючи на важливі досягнення в області машинобудування, висувають завдання підвищення продуктивності та зниження експлуатаційних витрат, які залишаються надзвичайно актуальними, особливо для малопотужних екскаваторів, які часто працюють у різноманітних і зазвичай складних умовах.

У гірничовидобувній промисловості, при відкритому способі розробки покладів корисних копалин, малопотужні екскаватори типу зворотної лопати застосовуються для виконання ряду допоміжних і завершуючих операцій. На відміну від потужних кар'єрних мехлопат, які використовуються для основної виємки, малопотужні машини незамінні, наприклад, на складах добутого корисного іскопаного і на відвалах. Тут вони можуть використовуватися для переміщення, штабелювання, завантаження матеріалів у транспортні засоби в обмеженому просторі, а також для планування та очищення поверхонь. Крім того, ці екскаватори відіграють важливу роль у доробці труднодоступних ділянок забою, які не можуть бути ефективно оброблені крупногабаритною технікою. Вони також необхідні для вирівнювання шляхів переміщення та очищення їх від крупних каменів і осипів, що є критично важливим для запобігання поломок ходового обладнання інших машин і скорочення витрат часу на ці допоміжні операції. Такі роботи безпосередньо впливають на загальну безперебійність і безпеку всього горнотранспортного комплексу. В умовах, що вимагають високої маневреності, наприклад, в стіснених умовах кар'єри, використання більш компактної машини має значні переваги.

У будівельній галузі маломощні гідравлічні екскаватори типу зворотної лопати є універсальними машинами, що застосовуються для широкого спектру земляних і погрузочно-разгрузочних робіт.

Їх здатність розробляти зв'язкові породи I і II категорій без попереднього рихлення, а також породи III, IV і V категорій з частковим або повним рихленням вибухом, робить їх виготовленими на різних будівельних об'єктах. Невеликі габарити і висока маневреність дозволяють використовувати їх у стеснених умовах міської забудови, на невеликих майданчиках або при прокладці комунікацій. Вони ефективно справляються з якісною зачисткою підшви забою, під'їздних автодорог, уборкою негабаритів, що дозволяє підвищити якість виконуваних робіт і скоротити ручну працю. Таким чином, незважаючи на свою «маломочність», ці екскаватори вносять значний вклад у підтримку працездатного стану та підвищення продуктивності на будівельних і гірських підприємствах.

Центральним елементом будь-якого екскаватора, безпосередньо взаємодіючим з гірською масою, є робочий орган – ківш. Його форма і конструктивне виконання мають першорядний вплив на ефективність екскавації, пряму визначаючи такі ключові показники, як питому протидію копанню, ефективність наповнення, швидкість розвантаження, енергозатрати та розмір режущих елементів.

Сучасні ковши механічних лопат мають специфічні конструктивні особливості, такі як задня стенка, зазвичай менша по висоті, ніж передня, а також плоска або циліндрична форма передньої стінки для покращення захвату та заповнення. Для роботи у скельних породах передня стінка може бути більш закругленою, а верхня кромка ковша часто закріплюється литим козирем з високомарганцовистою сталі для підвищення міцності і довговічності. Оптимізація процесу наповнення ковша пряму впливає на тривалість циклу роботи екскаватора, що складається до 30-40% від загального часу. Скорочення цього часу досягається правильним вибором товщини застосування стружки, місця заповнення та індикаторів ваги завантаження, які дозволяють машині контролювати наповнення та виключати перевантаження

Стан зубів і режущих кромок ковшей також має велике значення, так як гострі зуби значно знижуються з протидію копанню і різанню в порівнянні із затупленими. Зуби збільшують питоме навантаження на породу в 2-2,5 рази, полегшуючи її руйнування. Таким чином, форма, геометрія і матеріали режущих елементів ковша є критично важливими факторами, що впливають на продуктивність, розмір і енергоефективність. Необхідність забезпечення високої надійності та довговічності узлов, особливо в умовах динамічних навантажень та абразивного матеріалу, є фундаментальною вимогою. При цьому коефіцієнт екскавації, залежний від категорії порід, безпосередньо відражає складність умов роботи екскаватора

Гідравлічні екскаватори, незважаючи на свої переваги, такі як компактність і висока точність управління, володіють і поруч з недоліками, включаючи чутливість до температурних впливів, можливих забруднень і утечок робочої

рідини, а також складність монтажу і ремонту гідравлічної системи в умовах гірського виробництва. Крім того, відзначається, що характер силового впливу ковша, що включається у «видавлювання» ґрунту з масиву, і невисока ефективність перетворення гідравлічної енергії в механічні, аспекти, що потребують поліпшення. Оптимізація форми ковша може нівелювати ці недоліки, забезпечуючи більш ефективне впровадження в породу і зниження енергії.

Незважаючи на широке поширення малопотужних екскаваторів, питання оптимізації форми їхніх ківшів залишається недостатньо вивченим, особливо з урахуванням специфічних умов експлуатації в гірничій та будівельній галузях. Типові конструкції ківшів, як правило, розробляються за уніфікованими підходами, що не завжди враховують особливості роботи на різних типах ґрунтів, умов завантаження, а також енергетичні параметри малопотужних гідравлічних систем. Це призводить до зниження коефіцієнта наповнення ківша, збільшення опорів копання, підвищених витрат палива та зношування робочого обладнання. У результаті знижується загальна ефективність виконання робіт, що має як технічні, так і економічні наслідки.

В умовах, коли кожен елемент циклу роботи екскаватора знаходиться під пристальним увагою з метою підвищення продуктивності та зниження іздержок, оптимізація форми робочого органу стає не просто бажаною, а необхідною мірою. Це дозволить не тільки збільшити найближчі показники копання і навантаження, але й косвенно повлияти на зниження навантаження на приводні механізми, зменшення кількості деталей і збільшення загального терміну служби машини.

Аналіз наукових досліджень показує, що більшість робіт з оптимізації ківшів екскаваторів зосереджено на великих кар'єрних машинах, тоді як малопотужні моделі отримали менше уваги, хоча їхня частка на ринку постійно зростає. Крім того, існуючі методики розрахунку форми ківша часто базуються на емпіричних залежностях або спрощених моделях взаємодії ківша з ґрунтом, що не дозволяє повною мірою врахувати динаміку процесу копання, реологічні властивості матеріалів та гідромеханічні параметри робочого обладнання. У зв'язку з цим існує нагальна потреба у розробці науково обґрунтованих підходів

до проектування оптимальної форми ківша саме для малопотужних гідравлічних екскаваторів типу «зворотна лопата», які забезпечать підвищення продуктивності, зниження енергоємності та зменшення зносу.

Актуальність теми дослідження полягає в необхідності підвищення ефективності роботи малопотужних гідравлічних екскаваторів шляхом оптимізації геометричної форми їхнього робочого органа — ківша, з урахуванням технологічних умов експлуатації в гірничій та будівельній галузях. З огляду на обмежені потужності гідравлічних систем таких машин, раціональна форма ківша може стати ключовим фактором підвищення їхньої конкурентоспроможності та економічної ефективності.

Таким чином, розробка науково обґрунтованого підходу до оптимізації форми ківша малопотужного гідравлічного екскаватора типу «зворотна лопата» шляхом аналізу впливу геометричних параметрів на процес копання, з метою підвищення продуктивності, енергоефективності та довговічності робочого обладнання при експлуатації на складах корисних копалин, відвалах та будівельних майданчиках є *актуальним науково-технічним завданням*.

Мета роботи — підвищення ефективності роботи малопотужного гідравлічного екскаватора типу «зворотна лопата» за рахунок зниження енерговитрат на копання, збільшення коефіцієнта наповнення ківша та зменшення інтенсивності зносу робочого обладнання шляхом оптимізації геометричної форми ківша на основі аналізу процесу взаємодії робочого органа з ґрунтовим масивом.

Об’єкт дослідження — процес копання ґрунту малопотужним гідравлічним екскаватором типу «зворотна лопата».

Предмет дослідження — вплив геометричних параметрів ківша (форми профілю, кутів зачеплення, радіусу дна, положення осі шарніра прикріплення ківша до стрілки) на енергетичні показники, продуктивність та рівень зносу робочого обладнання під час виконання землерийних операцій.

Задачі дослідження:

1. Дослідження параметрів процесу зачерпування породи ківшем протягом циклу черпання, а саме опору копання ківшем, коефіцієнту заповнення ковша та енергоспоживання на одиницю маси матеріалу під час розробки ківшем з базовим ківшем;
2. Дослідження впливу параметрів ківша на експлуатаційні характеристики з метою визначення найвпливовіших конструктивних параметрів ковша на параметри процесу зачерпування;
3. Оптимізація параметрів ковша , що забезпесує зниження опору копання та енергоспоживання, а також підвищення коефіцієнта заповнення ковша.

1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ГІДРАВЛІЧНИХ ЕКСКАВАТОРІВ

1.1. Аналіз конструкцій гідравлічних екскаваторів

Одноковшові екскаватори є машинами циклічної дії, призначеними для виймання (екскавації) гірничої маси, її переміщення на відносно невеликій відстані та завантаження на транспортні засоби або у відвал.

Гідравлічні екскаватори широко застосовуються в гірничодобувній промисловості для відкритих гірничих робіт та в будівництві для земляних і вантажно-розвантажувальних робіт. Зокрема, екскаватори з невеликою місткістю ковша (0,5–5 м³) або будівельні універсальні екскаватори з ковшами ємністю від 0,15 до 2 м³ можуть використовуватись у стеснених умовах завдяки своїм невеликим габаритам та високій маневреності. Вони є ефективними при розробці невисоких розвалів підірваних гірничих порід та уступів, оскільки їх продуктивність незначно залежить від висоти забою.

Незважаючи на досягнення в галузі створення конструкцій гідравлічних екскаваторів, вони мають певні недоліки, такі як:

- реалізація великих робочих навантажень призводить до збільшення металоемності робочого обладнання;
- через спільну дію головних робочих механізмів та регенерацію гідравлічної енергії "зворотними" гідроциліндрами зростають енерговитрати на екскавацію гірничої маси;
- складність управління ковшем під час впровадження у масив гірської породи через необхідність одночасного регулювання режимних параметрів головних робочих механізмів.

Напрямки розвитку та удосконалення конструкцій гідравлічних екскаваторів включають вдосконалення кінематичних схем робочого обладнання.

Класифікація гідравлічних екскаваторів.

За призначенням одноковшові екскаватори поділяють такі основні групи:

- будівельні та будівельно-кар'єрні (маса 2...250 т, ємність ковша 0,1...6 м³)
 - універсальні машини, за допомогою яких виконують багато будівельних

робіт, можуть бути на гусеничному або пневмоколісному ході та є універсальними (оснащуються змінним робочим обладнанням прямої або зворотної лопати, драглайна, грейфера або крана);

- кар'єрні екскаватори (маса 75...1000 т, ковші 2...20 м³) - в основному для розробки важкого ґрунту в кар'єрах та в гідротехнічному будівництві з навантаженням його на транспортні засоби;
- розкривні екскаватори (маса 170... 13 000 т, ковші 4...160 м³) — для вилучення ґрунтів, що закривають корисні копалини, або на відкритих гірничих роботах та в гідротехнічному будівництві;
- Тунельні та шахтні екскаватори з укороченим робочим обладнанням (маса 16...30 т, ковші 0,5...1 м³) - для роботи під землею при будівництві різних інженерних споруд та розробці корисних копалин.

Індексація одноковшових екскаваторів ґрунтується на розмірній групі машин, що визначається місткістю ковша (для кар'єрних екскаваторів). Наприклад, позначення ЕКГ-5А розшифровується як: Е — екскаватор, К — кар'єрний, Г — гусеничний, 5 — місткість ковша в кубічних метрах, А — індекс модернізації.

За типом приводу (рис 1.1) розрізняють екскаватори з механічним, гідромеханічним, гідравлічним, електричним та змішаним приводами.

Одномоторними називають екскаватори, у яких усі робочі механізми наводяться одним або декількома двигунами, що працюють на один вал.

Багатомоторними називають екскаватори, у яких робочі механізми наводяться кількома двигунами, що незалежно працюють. Багатомоторні екскаватори, у яких кожен робочий механізм наводиться від окремого двигуна, називають екскаваторами з індивідуальним приводом механізмів, а багатомоторні екскаватори, у яких кожен із двигунів надає руху кілька робочих механізмів, — екскаваторами з груповим приводом. У багатомоторному екскаваторі з індивідуально-груповим приводом використовують як індивідуальний, і груповий привод.

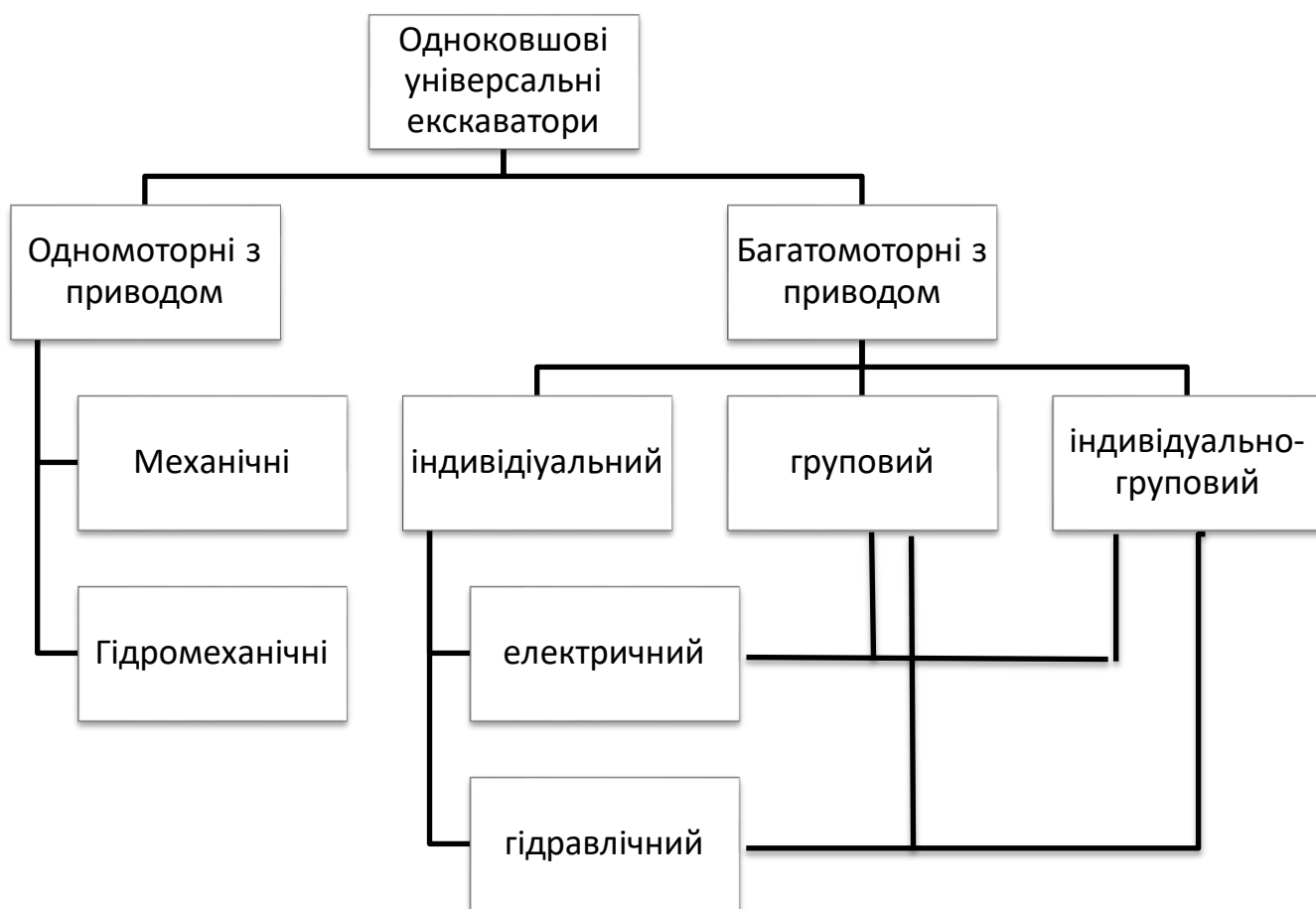


Рис 1.1 - Класифікація екскаваторів за типом приводу

При електричному приводі передача енергії від силової установки механізмам машини проводиться як електричним, так і механічним способом.

У змішаних приводах використовують два чи три типи різних передач. На більшості екскаваторів набули поширення змішані електромеханічні або гідромеханічні приводи.

У механічній трансмісії рух від силової установки передається за допомогою шестеренних, ланцюгових, клинопасових і канатних передач. Ці типи передач нині знаходять дедалі менше застосування на екскаваторах. Набагато частіше застосовують гідравлічний або електричний привід.

Гідравлічні системи управління поділяються на:

- насосні системи – тиск, необхідний для включення робочих механізмів, створюється насосом. Потік робочої рідини направляється за допомогою важелів управління через відповідні розподільні пристрої. Прикладом є

насосна система гідравлічного управління циліндрами перемикання гальм одноковшового екскаватора, де рідина від маслобака нагнітається насосом до гальмівного циліндра механізму ходу та через золотники до циліндрів муфт перемикання гусениць.

- електрогідравлічні системи.
- безнасосна система, що використовується на екскаваторах з ковшами місткістю до 1 м³.

Гідравлічні системи управління з силовими циліндрами характеризуються компактністю, високим ККД, незалежним розташуванням керованих елементів, високою точністю відпрацювання сигналів, швидкодією та можливістю передачі великих потужностей. Однак вони чутливі до температурних впливів, що вимагає застосування різних робочих рідин влітку та взимку, а також підвищуються вимоги до точності виготовлення, що ускладнює монтаж та ремонт гідравлічних систем управління в умовах гірничого виробництва.

За типом ходового пристрою (рис 1.2) екскаватори поділяють на:

- гусеничні;
- пневмоколісні;
- спеціальні шасі
- на базі самохідної машини.

Гусеничні ходові пристрої бувають з мінімально допустимою площею опірної поверхні гусениць (для роботи на ґрунтах з високою несучою здатністю) та зі збільшеною поверхнею гусениць (для роботи на ґрунтах з низькою несучою здатністю).

Пневмоколісним називають екскаватор на колісному ходовому пристрої, який має практично ту саму поворотну частину, що й гусеничний екскаватор.

До екскаваторів на спеціальному шасі належать машини на колісному ходовому пристрої автомобільного типу.

Екскаватор на базі самохідної машини має ходовий пристрій на базі трактора чи автомобіля. У цьому випадку екскаватор називають також навісним.

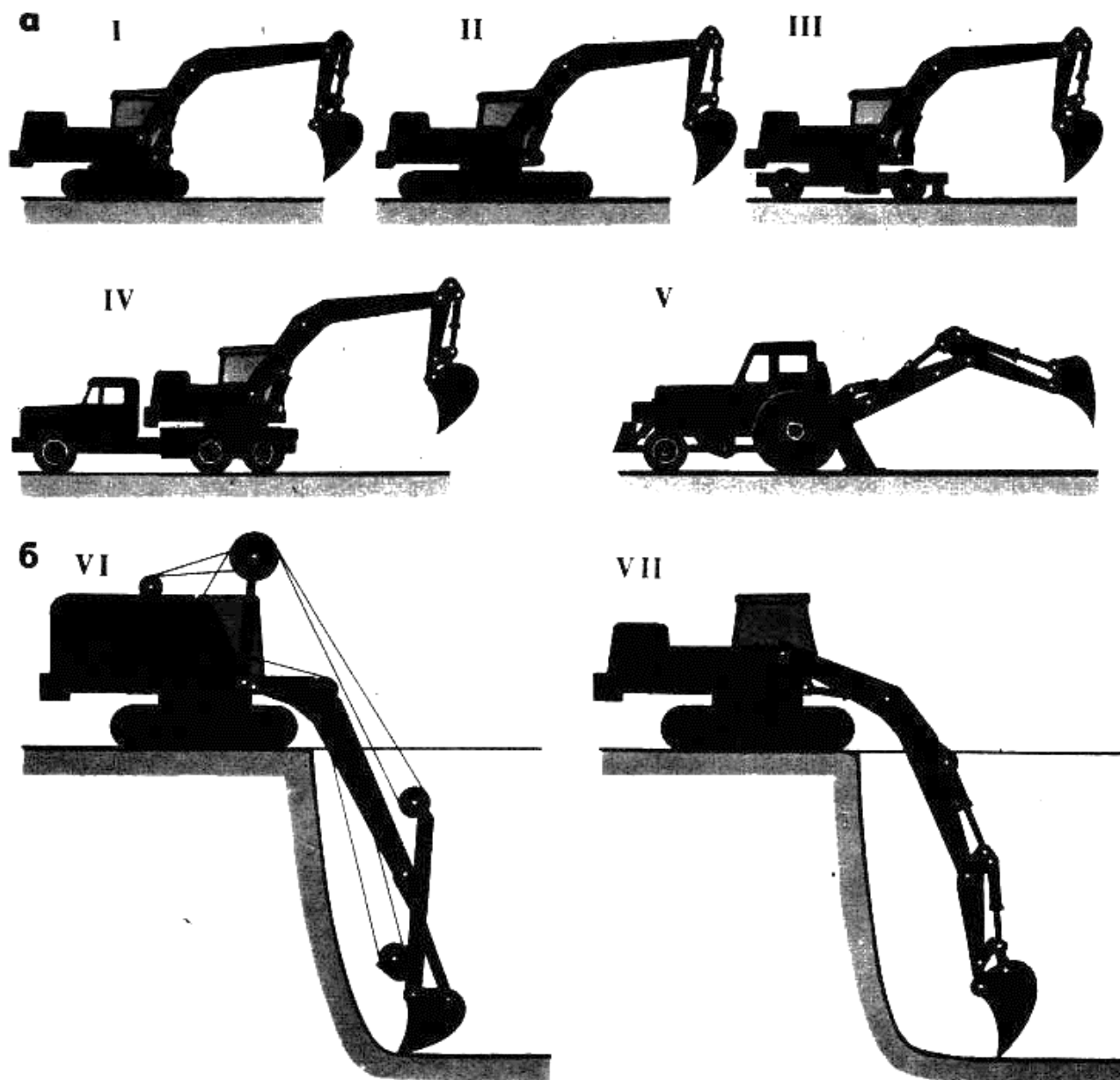


Рис. 1.2 - Класифікація екскаваторів: а - за типом ходового пристрою, б - за підвіскою робочого обладнання; I - гусеничний, II - гусеничний зі збільшеною поверхнею гусениць, III - пневмоколісний, IV - на спеціальному шасі, V - на базі трактора, VI-з гнучкою підвіскою, VII - з жорсткою підвіскою

Екскаватор з механічним приводом характерний лише застосуванням механічних передач.

Якщо механічну трансмісію екскаватора включають гідродинаміческую передачу (переважно гидротрансформатор), такий тип приводу називають гідродинаміческим.

В об'ємному гідроприводі енергія від силової установки передається за допомогою рідини. Первинним споживачем енергії є насоси (один або кілька), що нагнітають рідину під тиском гідромережі до гідродвигунів, від яких рухаються робоче обладнання, робочий орган і механізми екскаватора.

Гідравлічний привод гідроекскаваторів забезпечує передачу потужності від мережевих електродвигунів за допомогою насосних установок до виконавчих гідроциліндрів робочого обладнання. Гідросистема високого тиску (25-30 МПа) може мати автоматичний регулятор потужності двох насосів змінної подачі (до 1750 л/хв) для забезпечення характеристик, близьких до екскаваторних під час копання. Управління робочим обладнанням (ківш, рукоять, стріла) здійснюється за допомогою двох гідравлічних ручних колонок, а управління поворотом і пересуванням — від ногого командоконтролера через золотникові розподільники. При цьому забезпечується одночасне та незалежне управління рухами з плавним регулюванням швидкостей.

Зо можливістю обертання поворотної частини (платформи) екскаватори бувають повноповоротними, тобто з платформами, що обертаються навколо вертикальної осі, на необмежений кут, і неповноповоротними, коли кут обертання обмежений.

Робоче обладнання гідравлічних екскаваторів. Робоче обладнання є виконавчим механізмом екскаватора, його конструкція та кінематика різняться залежно від призначення.

За типом підвіски робочого обладнання (рис 1.3) розрізняють екскаватори з гнучкими елементами (переважно канатами) для утримання та приведення в дію робочого обладнання (гнучка підвіска) і жорсткими елементами — переважно гідравлічними циліндрами (жорстка підвіска).

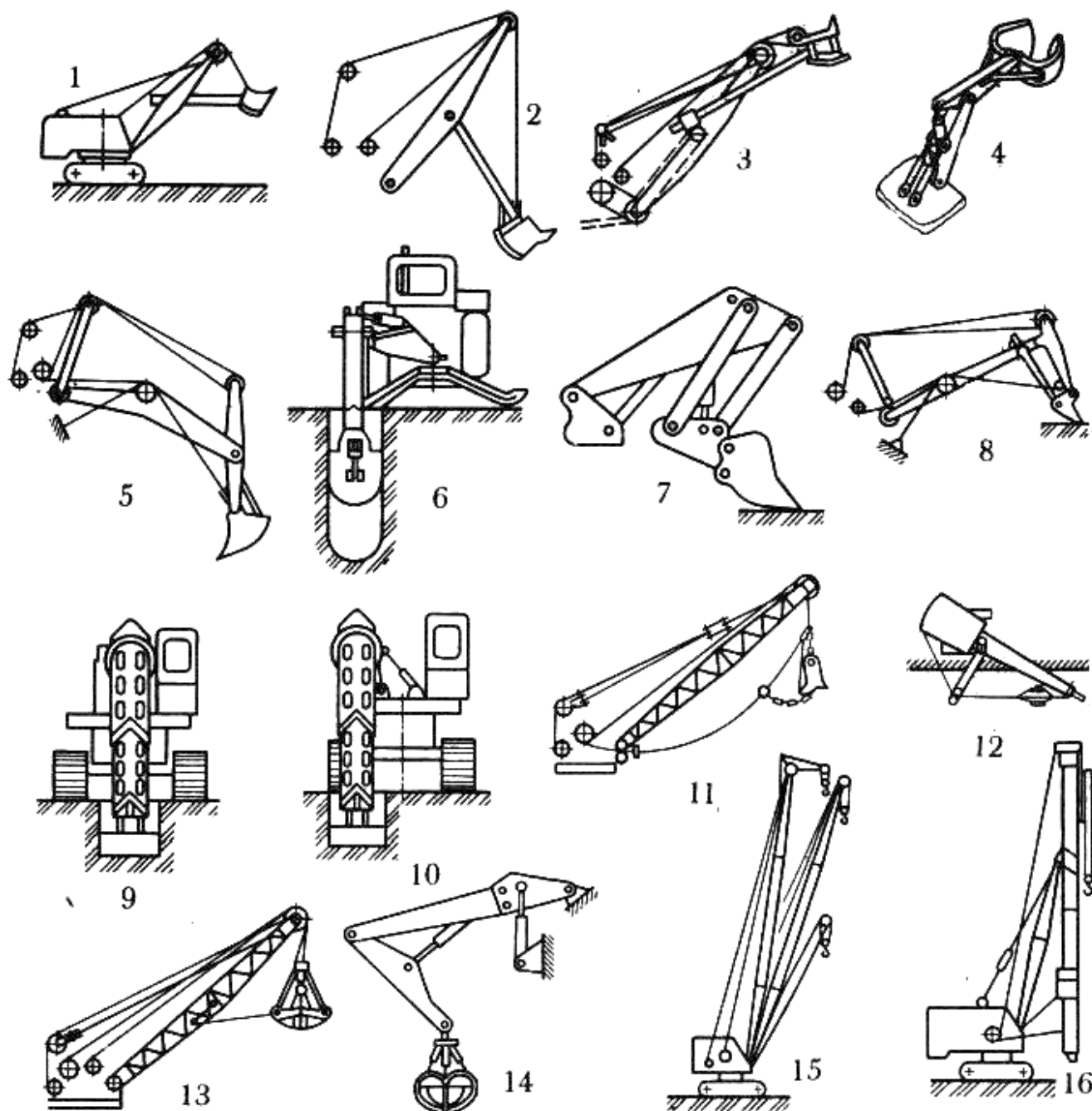


Рис. 1.3 - Основні види та виконання робочого обладнання: 1 — пряма лопата; 2 — маятникова пряма лопата; 3 — напірна пряма лопата; 10 - землерийно-планувальне обладнання з віссю копання, що зміщується, 11 - драглайн, 12 - бічний драглайн, 13 - канатний грейфер, 14 - жорсткий грейфер, 15 - кранове обладнання, 16 - копер

У гідравлічних екскаваторах застосовуються два основні види робочого обладнання:

- пряма лопата (гідравлічна). Призначена для розробки масивів, розташованих вище рівня установки машини, але може черпати і нижче цього рівня на невелику глибину. Гідравлічна пряма лопата з поворотним ковшем складається зі стріли, рукояті та ковша, які повертаються за допомогою гідравлічних циліндрів підйому-опускання стріли, напорі рукояті та повороту ковша. Гідроциліндр ковша може кріпитися як до рукояті, так і до стріли, а також до кутової тяги, шарнірно з'єднаної з тягою ковша. Неподвижною ланкою є поворотна платформа.
- зворотна лопата (гідравлічна). Призначена для розробки ґрунту переважно нижче рівня стоянки екскаватора.

Рукоять служить для передачі на ковш напірного, а на гідравлічних екскаваторах і підйомного зусиль. Залежно від кількості балок розрізняють однобалкові (внутрішні) та двобалкові (зовнішні) рукояті.

Ковші гідравлічних екскаваторів за способом спорожнення поділяються на:

- щелепні ковші. Розвантаження здійснюється відкриттям щелепного створа. Щелепний ківш має задню стінку, з'єднану шарнірами з рукояттю, а щелепа повертається за допомогою двох гідроциліндрів.
- ковші, що розвантажуються перекиданням. Використовуються на зворотних та деяких прямих гідравлічних лопатах.

Для роботи у міцних породах козирки ковшів оснащують зубцями, а самі ковші — розпорками. Передня стінка ковша може мати плоску або циліндричну форму з великим радіусом кривизни для кращого захоплення та ефективного заповнення. Для виготовлення деталей, що піддаються інтенсивному абразивному зносу (зубці, передня кромка ковша), застосовують виливки зі сталі 110Г13Л, що має високу міцність та твердість. Використовуються різні види наконечників (коронок): загального призначення, скельні та клинові, залежно від типу розроблюваних порід.

Пряма лопата розробляє ґрунт вище за рівень стоянки: ківш, укріплений на рукояті, копає в напрямку від екскаватора. Розрізняють маятникові та напірні прямі лопати. У маятнкової прямої лопати ручка робить тільки маятниковий рух

щодо стріли. Пряма напірна лопата оснащена приводним пристроєм для напірного руху рукояті.

Пряма лопата зі стулчастим ковшем 4 на відміну від нероз'ємного ковша може розробляти ґрунт при змиканні стулок ковша, що повертаються в площині перпендикулярної площині повороту рукояті.

Зворотна лопата 5 призначена для розробки ґрунту нижче за рівень стоянки: ківш, укріплений на рукояті, копає в напрямку до екскаватора. Бокову зворотну лопату 6 використовують для роботи в обмежених умовах: ківш копає у вертикальній площині, зміщеній відносно вертикальної осі обертання поворотної платформи або поздовжньої осі базової машини.

Робоче обладнання, яке монтують із вузлів прямої та зворотної лопат, називають універсальною лопатою.

Для навантаження сипких і шматкових матеріалів призначене навантажувальне обладнання з поворотним ковшем, що заповнюється під час його руху від екскаватора.

Для пошарової розробки ґрунту у різних площинах застосовують планувальне обладнання з ковшем або ножем.

Для планувальних робіт використовують також робоче обладнання 9 з робочим органом, укріпленим на стрілі, що змінює при роботі свою довжину і обертається у вертикальній площині щодо поворотної частини екскаватора, а також щодо своєї поздовжньої осі. Таке обладнання називають землерийно-планувальним.

Для роботи в обмежених умовах призначене землерийно-планувальне обладнання з шарнірною опорою стріли, що зміщується під час роботи впоперек поворотної частини.

При великих глибинах копання ґрунт нижче рівня стоянки розробляють драглайном за допомогою ковша, підвішеного на канатах і копаючого у вертикальній площині екскаватора. Канали очищають бічним драглайном з ковшем, підвішеним на канатах і копає під кутом до вертикальної площини стріли.

Вантажні та розвантажувальні операції з сипучими ґрунтами та подрібненими породами, а також копання колодязів з вертикальними стінками, очищення ставків та каналів виконують робочим обладнанням грейфера, забезпеченим захоплюючим ковшем. Ківш грейфера може бути підвішений на канатах і тоді зусилля напору ковша на ґрунт створюється вагою ковша. У гідравлічного екскаватора ківш грейфера шарнірно підвішений до одного з жорстких елементів робочого обладнання, і зусилля напору на ґрунт створюється спеціальним приводним пристроєм.

Для розпушування міцних та мерзлих ґрунтів замість ковша зворотної лопати гідравлічного екскаватора встановлюють гідромолот.

За допомогою кранового обладнання, яке встановлюється на екскаваторах замість землерийного обладнання, виконують перевантажувальні та монтажні роботи.

Для забивання палів на екскаватор встановлюють копер.

Існує понад сорок найменувань змінного робочого обладнання.

Робоче обладнання екскаватора типу «зворотна лопата» складається з трьох основних елементів:

1. Стріла (boom) — жорстко закріплена на поворотній платформі, забезпечує базову опору для руху рукояті та ківша.
2. Рукоять (dipper stick або arm) — з'єднує стрілу з ківшем, здійснює основний рух ківша в процесі копання.
3. Ківш (bucket) — безпосередній робочий орган, призначений для зрізання, захоплення та транспортування ґрунту.

Ківш кріпиться до рукояті за допомогою пальців (пінів) і гідроциліндра відкривання/закривання (гідроциліндра ківша). Кутова взаємодія цих ланок забезпечується гідроциліндрами стріли, рукояті та ківша, що дозволяє точно керувати траєкторією руху різального леза.

Ківші для малопотужних екскаваторів виготовляються з високоміцних сталей і мають різну геометрію залежно від типу ґрунту та характеру робіт. Наприклад:

- універсальні ківші — застосовуються для розробки суглинків, пісків, супісків;
- важкі ківші (heavy-duty) — мають підсилений каркас і різальне лезо, призначені для роботи з твердими, абразивними ґрунтами;
- широкі ківші — для збільшення об'єму за один прохід при роботі з легкими ґрунтами;
- вузькі траншейні ківші — забезпечують високу точність при копанні вузьких траншей.

Крім того, існують спеціальні типи ківшів: грейферні, зубчасті, з гідрозамками, а також ківші з можливістю регулювання кута нахилу (tilt bucket), що розширює технологічні можливості машини.

Однак, незважаючи на наявність різноманітних конструкцій, більшість ківшів для малопотужних екскаваторів розробляються за уніфікованими схемами, які не завжди враховують специфіку роботи в умовах обмеженої потужності гідравлічної системи, особливості ґрунтів чи режими експлуатації на складах чи відвалах. Це призводить до неоптимального розподілу навантажень, підвищеного зносу та зниження продуктивності.

Отже, аналіз конструкцій малопотужних гідравлічних екскаваторів свідчить про їхню високу універсальність та важливу роль у сучасних технологічних процесах. Разом з тим, існує чітка потреба в науково обґрунтованій оптимізації ключового елемента робочого обладнання — ківша, з метою підвищення ефективності експлуатації таких машин у конкретних умовах, зокрема в гірничій та будівельній галузях.

1.2. Аналіз умов експлуатації малопотужних гідравлічних екскаваторів

Ефективність роботи будь-якої землерийної техніки, зокрема малопотужних гідравлічних екскаваторів, значною мірою залежить від умов їхньої експлуатації, до яких відносяться кліматичні чинники, фізико-механічні властивості ґрунтів і

гірських порід, рельєф місцевості, доступність об'єктів робіт та специфіка технологічного процесу. Особливу увагу слід приділити умовам експлуатації на залізородних кар'єрах, де малопотужні екскаватори типу «зворотна лопата» виконують допоміжні та вторинні технологічні операції.

Кліматичні умови. На технічний ресурс обладнання суттєво впливають кліматичні умови, включаючи температуру повітря, силу вітру, опади, вологість та запиленість

Залізородні родовища України та інших країн СНГ, зокрема Кривбас, Білозерське, Курська магнітна аномалія, розташовані в помірному кліматичному поясі з чітко вираженими сезонами. Це означає, що експлуатація техніки відбувається в умовах:

- високі температури у літній період (до $+35-40^{\circ}\text{C}$), що може призводити до перегріву гідравлічної рідини, зниження її в'язкості та збільшення зносу гідрообладнання;
- низькі температури у зимовий період (до -25°C і нижче), що ускладнює запуск двигуна, збільшує в'язкість мастил і гідравлічної рідини, знижує мобільність рухомих з'єднань;
- високої вологості та опадів у весняно-літній період, що призводить до розмокання ґрунтів, підвищення їхньої адгезії до металевих поверхонь ківша та зниження прохідності техніки.

Ці чинники впливають на стабільність роботи гідравлічної системи, довговічність робочого обладнання та загальну продуктивність. Особливо чутливі до кліматичних умов малопотужні екскаватори, оскільки їхні гідравлічні системи мають обмежені ресурси для компенсації температурних коливань і підтримання оптимального тиску.

Сезонне обслуговування включає заміну мастил на зимові сорти та утеплення машин.

Регулярне очищення вузлів та деталей від бруду, зайвого мастила та вологи важливе для своєчасного виявлення тріщин та запобігання потраплянню абразивного пилю до масляних ванн.

При консервації екскаватора вологість повітря не повинна перевищувати 70%, а температура не нижче +15°C

Пневмосистема: Щозмінно необхідно випускати конденсат з повітрозбірника та масловідділювача. Щотижня перевіряється герметичність пневмосистеми.

Гідросистема чутлива до температурних впливів, що вимагає застосування різних робочих рідин у літніх та зимових умовах. Також важливі чистота та відсутність витоків робочої рідини.

Види гірських порід і ґрунтів на залізорудних кар'єрах. На залізорудних кар'єрах малопотужні екскаватори зазвичай не беруть участь у первинній розробці рудного масиву (цю функцію виконують великі кар'єрні екскаватори), але активно використовуються на наступних етапах:

- розробка відвальних порід (вскривних порід);
- перевантаження та сортування добутої руди на складах;
- очищення траншей, підготовка майданчиків для обслуговування обладнання;
- розбирання залізобетонних конструкцій, демонтаж старих споруд.

Найважливішими властивостями гірських порід, що впливають на роботу екскаваторів, є міцність і абразивність порід, що розробляються, а також їх структурні особливості та вологість, проте коефіцієнт міцності порід за шкалою М.М. Протодияконова є ключовим показником.

Гірські породи, з якими працюють малопотужні екскаватори на таких об'єктах, можуть бути різного типу:

1. Слабко зцементовані породи — піски, суглинки, супіски, які утворюють верхні горизонти вскривних порід. Мають невисоку міцність (категорія І–ІІ за класифікацією за трудомісткістю копання), добре наповнюють ківш, але схильні до прилипання у вологому стані;
2. Щебенисті та галєвові породи — часто зустрічаються у відвалах. Мають середню твердість, але високу абразивність, що призводить до інтенсивного зносу різального леза, бокових щок і пальців ківша.

3. Залізисті кварцити та магнетитові руди — основна корисна копалина. Навіть у вигляді дробленої маси на складах такі матеріали характеризуються високою щільністю (до 3,5–4,5 т/м³), твердістю та абразивністю. Копання та навантаження таких матеріалів створює значні навантаження на робоче обладнання, особливо при неправильній геометрії ківша.
4. Замерзлі породи — у зимовий період на відвалах і складах утворюються шари мерзлих матеріалів, які за міцністю можуть досягати категорії IV–V. Їх розробка вимагає підвищених зусиль, що значно перевищує типові можливості малопотужних екскаваторів, якщо форма ківша не оптимізована для ефективного зрізання.
5. Змішані маси — на складах часто утворюються неоднорідні суміші руди, породи, металобрухту, що ускладнює процес копання і вимагає універсальної, але міцної конструкції ківша.

Особливості роботи на складах і відвалах. На складах добутої корисної копалини та відвалах порід малопотужні екскаватори працюють у режимі циклічного навантаження з частими зупинками, зміною напрямку руху та нестабільними умовами контакту ківша з матеріалом. Наприклад:

- при навантаженні транспортних засобів важлива рівномірність наповнення ківша та мінімізація втрат матеріалу;
- при розчистці територій — висока маневреність та можливість точного копання;
- при роботі на високих штабелях — стійкість машини та оптимальна траєкторія руху ківша.

Крім того, у таких умовах часто спостерігається нерівномірний знос робочого обладнання, особливо різального леза, що пов'язано з неоптимальним розподілом контактних напружень між ківшем і масою матеріалу. Це підкреслює важливість правильного вибору геометрії ківша, яка забезпечує не тільки ефективне копання, але й рівномірне навантаження на всі елементи конструкції.

Види порід та роботи (з акцентом на залізорудні кар'єри):

Розглянемо типи робочого обладнання та їх застосування залежно від умов експлуатації.

Прямі напірні лопати (включаючи гідравлічні) призначені для розробки масивів, розташованих вище рівня установки машини, але можуть черпати і трохи нижче для самозаглиблення під час проходження траншей. Вони особливо ефективні для завантаження породи у транспортні засоби. Гідравлічні прямі лопати, наприклад виробництва "Комацу", забезпечують високу силу викиду ковша.

Драглайни використовуються для виїмки порід I-IV категорії фортеці (по ЕНіР) та міцніших після вибухового розпушування. Вони мають перевагу в умовах великих потужностей розтину, низької несучої здатності ґрунтів (наприклад, при роботі на переєкспавації відвалів), а також при нижньому черпанні

Для роботи з міцними та абразивними породами зуби ковшів є змінними. Для екскаваторів середньої та великої потужності їх відливають з високомарганцевої сталі 110Г13Л і наплавляють твердим сплавом для збільшення зносостійкості. Для малопотужних екскаваторів можуть використовуватися високовуглецеві сталі У8. Затуплення зубів збільшує опір копання у 1,5-2 рази. Зуб вважається непридатним, якщо кут його загострення перевищує 60°.

Основними видами руйнувань деталей є поломка, знос та деформація. Зносостійкість - це властивість матеріалу чинити опір зношування. Механічний знос, стирання, зминання, окислення, заїдання та фреттинг-корозія є поширеними проблемами.

У процесі черпання порода створює нерівномірні навантаження на зуби ковша. При роботі з великим висуванням рукояті збільшуються тривалість напору, зношування канатів і механізму напору, а також виникають великі згинальні напруги в рукояті і стрілі. Не рекомендується розбивати ковшем тверді шматки породи

Таким чином, експлуатація малопотужних гідравлічних екскаваторів у кар'єрах, включаючи залізорудні, потребує врахування як суворих кліматичних умов (перепади температур, запиленість, вологість), так і складних гірничо-геологічних факторів (висока міцність та абразивність порід). Це диктує особливі вимоги до міцності робочого обладнання, зносостійкості деталей, надійності гідравлічних та пневматичних систем, а також до своєчасного та якісного технічного обслуговування та застосування спеціалізованих мастильних матеріалів.

Аналіз умов експлуатації малопотужних гідравлічних екскаваторів на залізорудних кар'єрах показує, що вони працюють у складному поєднанні кліматичних, геомеханічних і технологічних чинників. Висока абразивність порід, зміна фізико-механічних властивостей матеріалів, сезонні коливання температур та нестабільні умови роботи на складах і відвалах створюють значні вимоги до конструкції робочого обладнання. У цих умовах форма ківша стає критичним фактором, який впливає на продуктивність, енергоефективність і довговічність техніки. Тому оптимізація геометрії ківша з урахуванням специфіки експлуатації на залізорудних підприємствах є необхідною умовою підвищення ефективності використання малопотужних гідравлічних екскаваторів.

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

Мета роботи — підвищення ефективності роботи малопотужного гідравлічного екскаватора типу «зворотна лопата» за рахунок зниження енерговитрат на копання, збільшення коефіцієнта наповнення ківша та зменшення інтенсивності зносу робочого обладнання шляхом оптимізації геометричної форми ківша на основі аналізу процесу взаємодії робочого органа з ґрунтовим масивом.

Об'єкт дослідження — процес копання ґрунту малопотужним гідравлічним екскаватором типу «зворотна лопата».

Предмет дослідження — вплив геометричних параметрів ківша (форми профілю, кутів зачеплення, радіусу дна, положення осі шарніра прикріплення ківша до стрілки) на енергетичні показники, продуктивність та рівень зносу робочого обладнання під час виконання землерийних операцій.

Задачі дослідження:

4. Дослідження параметрів процесу зачерпування породи ківшем протягом циклу черпання, а саме опору копання ківшем, коефіцієнту заповнення ковша та енергоспоживання на одиницю маси матеріалу під час розробки ківшем з базовим ковшем;
5. Дослідження впливу параметрів ківша на експлуатаційні характеристики з метою визначення найвпливовіших конструктивних параметрів ковша на параметри процесу зачерпування;
6. Оптимізація параметрів ковша, що забезпечує зниження опору копання та енергоспоживання, а також підвищення коефіцієнта заповнення ковша.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ КОВША МАЛОПОТУЖНОГО ЕКСКАВАТОРУ ТИПУ «ЗВОРОТНЯ ЛОПАТА»

2.1. Загальна методика досліджень

Задля досягнення поставленої мети з підвищення ефективності роботи малопотужного гідравлічного екскаватора типу «зворотна лопата» за рахунок зниження енерговитрат на копання, збільшення коефіцієнта наповнення ківша та зменшення інтенсивності зносу робочого обладнання шляхом оптимізації геометричної форми ківша на основі аналізу процесу взаємодії робочого органа з ґрунтовим масивом планується проведення наступних досліджень.

На першому етапі планується проведення дослідження параметрів процесу зачерпування породи ківшем протягом циклу черпання, а саме опору копання ківшем, коефіцієнту заповнення ковша та енергоспоживання на одиницю маси матеріалу під час розробки ківшем. Модель породи будується на основі типових робочих умов у забої. У дослідженні використовується модель гідравлічного екскаватора XCMG XE1200 вагою 120 тонн. Для зменшення обсягу обчислень та підвищення ефективності симуляції, модель екскаватора спрощується шляхом виключення компонентів, таких як гідроциліндри, які не впливають на структурний аналіз ковша, залишаючи тільки частину рами. До якої кріпиться стріла, сама стріла, рукоять ковша, важіль-коромисло, тяга та сам ковш). Траєкторія руху зубів ковша визначається з урахуванням технічної специфікації екскаватору. Процес зачерпування породи під час циклу зачерпування умовно ділиться на чотири стадії. Додатково до опору копання визначаються коефіцієнт заповнення ковша та енергоспоживання на одиницю маси матеріалу під час розробки ківшем.

На наступному етапі проводиться дослідження впливу параметрів ківша на експлуатаційні характеристики з метою визначення найвпливовіших конструктивних параметрів ковша на параметри процесу зачерпування. Формується великий набір геометричних параметрів ковша, які потенційно можуть впливати на експлуатаційні характеристики при циклі зачерпування, я

саме: кут різання, кут горловини, кут розширення, товщина плити провущини, R_1 плити провущини, R_2 плити провущини, товщина підсилювальної плити. Зміна кута різання, кута розширення та кута горловини ковша безпосередньо впливає на його місткість, тому саме ці три параметри було обрано для модифікації. Крім того, ковш з'єднується з рукояттю через провущини, і опір копання передається саме через провущини, що легко може призвести до їх деформації. Отже, конструктивні параметри провущин також було включено як додаткову дослідну змінну.

На останньому етапі проводиться оптимізація визначених раніше найвпливовіших параметрів ковша, що забезпечує зниження опору копання та енергоспоживання, а також підвищення коефіцієнта заповнення ковша. Для кожного чинника вибираються по три рівні. Для планування експерименту з метою зменшення обсягів дослідження обирається план на латинських квадратах..

У результаті проведеного дослідження формуються загальні рекомендації щодо конструктивних параметрів ковша.

2.2. Методика дослідження опору копання ківшем

Гірничі гідравлічні екскаватори широко використовуються у відкритих гірничих роботах завдяки їхнім перевагам — високій продуктивності та простій експлуатації. Робочий процес екскаватора фактично є процесом взаємодії між ковшем екскаватора та матеріалом, що видобувається. Під час земляних робіт опір розкопці формується внаслідок взаємодії ґрунту з ковшем

Опір копанню формується внаслідок взаємодії ґрунту та ковша під час землерийних робіт екскаватора. Опір копанню, як правило, включає:

- опір різанню ґрунту зубами та різальною кромкою ковша;
- опір тертя ґрунту, що тече вздовж основної плити та бічної стінки ковша;
- силу, що виникає внаслідок подолання внутрішнього тертя ґрунту.

Конструктивні параметри ковша та його положення під час заурення у породу безпосередньо впливають на опір копанню та енергоспоживання ковша.

Наразі ковші мають проблеми, пов'язані з високим опором копанню, високим енергоспоживанням та низькими коефіцієнтами наповнення ковша, що значно обмежує ефективність роботи екскаватора.

Шляхом удосконалення конструкції ковша можна зменшити опір копанню ковша та енергоспоживання всієї машини під час роботи з копання. Це також може подовжити термін служби ковша та зменшити капітальні витрати під час виробництва.

Побудова моделі розсипу скельної купи гірської маси здійснюється на основі типових робочих умов, а властивості матеріалу та контактні параметри були отримані шляхом геологічного дослідження.

Властивості матеріалів для гірської маси та ковша, а також контактні параметри між частинками породи та між породою і ковшем, представлені в Табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри модельованих об'єктів

Властивості матеріалу	Гірська порода	Ківш
Коефіцієнт Пуассона	0.41	0.28
Модуль зсуву, МПа	10	206 000
Щільність, кг/м ³	1680	7850
Коефіцієнт відновлення	0.6	0.5
Коефіцієнт статичного тертя	0.39	0.5
Коефіцієнт тертя кочення	0.11	0.05

Для моделі ковша також може використовувалася сталь Q355, що має наступні властивості: модуль пружності $2,06 \cdot 10^{11}$ Па, коефіцієнт Пуассона 0.28, щільність 7850 кг/м³ та межа плинності 355 МПа.

З урахуванням реальної форми частинок матеріалу для моделювання дрібних частинок (розміром < 50 мм) використано модель із окремих сферичних елементів. Додатково створено тривимірні моделі трьох типових форм частинок (Рис 2.1). Розподіл частинок за розмірами для різних типів наведено в Таблиці 2.2.

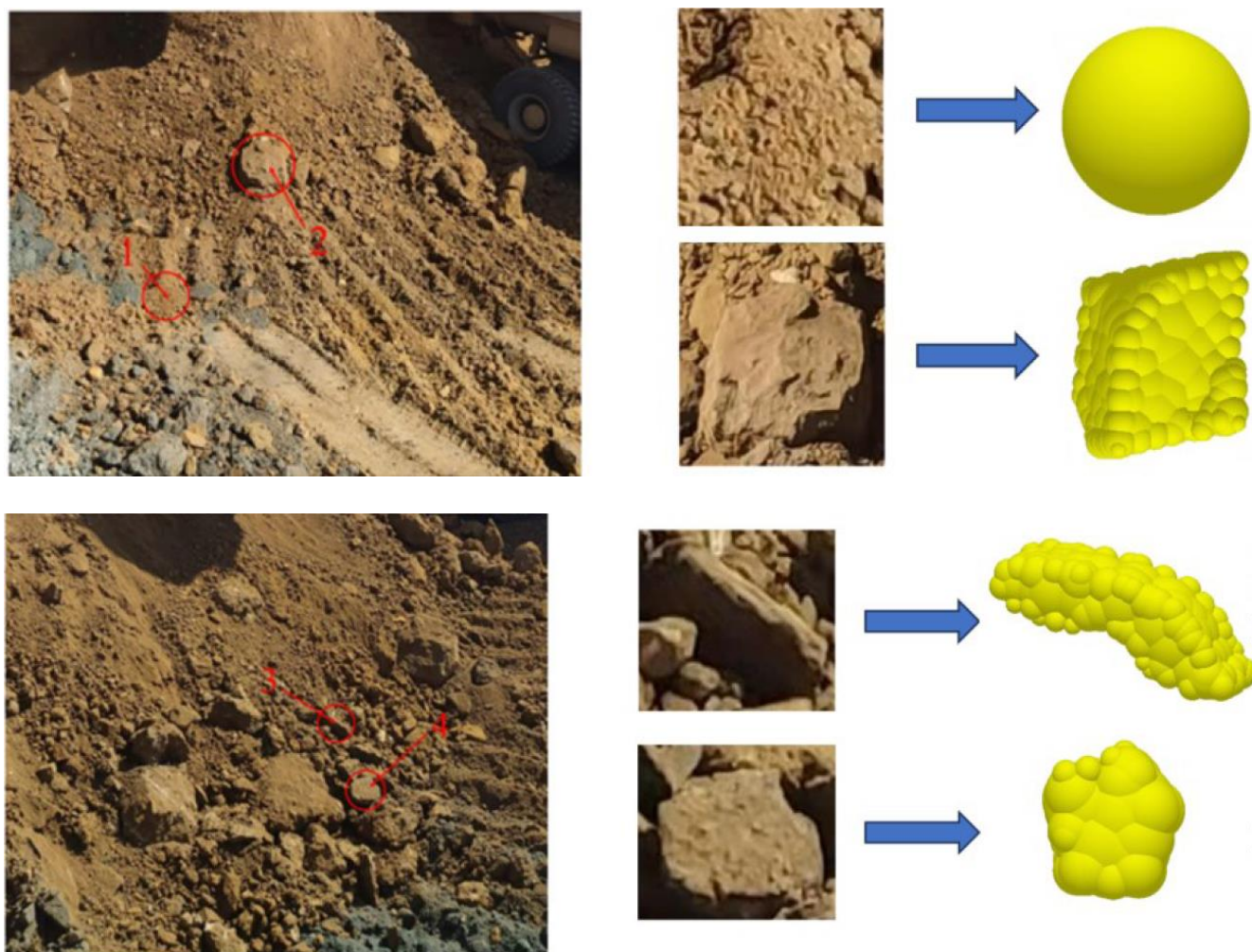


Рис 2.1 - Моделі частинок породи

Під час розробки породи різні частини ковша стикаються з великими частинками породи, що призводить до їхнього подрібнення на дрібніші фракції і викликає знос ковша. Чим більший розмір частинок породи, тим виразніші коливання опору копанню ковша.

Таблиця 2.2 - Розподіл частинок породи за розмірами.

Тип частинок	Частинка 1	Частинка 2	Частинка 3	Частинка 4
Розмір частинок, мм	< 50	50–100	100–200	> 200
Масова частка	70%	15%	10%	5%

У дослідженні використовується модель гідравлічного екскаватора (рис 2.2) XCMG XE1200 вагою 120 тонн.

<https://machmall.en.made-in-china.com/product/QqPEyruYIRiD/China-XCMG-Official-120-Ton-Second-Hand-Mining-Excavator-Xe1200-for-Sale.html>



Рис 2.2 – Экскаватор ХЕ1200

Технічні характеристики

Модель:	XE1200
Тип трансмісії:	Гідравлічна
Місткість ковша:	> 1,5 м³
Макс. висота розкопки:	12 500 мм
Макс. висота розвантаження:	7 990 мм
Макс. глибина розкопки:	8 110 мм
Макс. дальність розкопки:	13 860 мм
Габарити (Д × Ш × В):	14 610 × 5 470 × 6 160 мм
Торгова марка:	XCMG

Серія великих гірничих гідравлічних екскаваторів XE забезпечує достатньо великою зусиллями розкопки та високою швидкістю роботи, що гарантує виняткову експлуатаційну ефективність і економічну вигідність навіть у найважчих гірничих умовах.

Екскаватор оснащено двигуном, що відповідає національному стандарту викидів III стадії. Двигун — з прямим уприскуванням палива, чотиритактний, водяного охолодження, з турбонаддувом і повітряним проміжним охолоджувачем, шестициліндровий — повністю задовольняє вимоги гірничих операцій. Поєднання перевірених, міцних і довговічних компонентів із досконалою технологією виробництва забезпечує підвищену надійність і продуктивність.

Застосування повністю електронно керованого двигуна з низькою частотою обертання та високим обертовим моментом, адаптованого під умови роботи екскаватора, дозволяє збільшити запас моменту на 11% і знизити витрату палива на 9%. Використання вискоефективного роторного гідравлічного двигуна з великим об'ємом збільшує обертовий момент усього агрегату на 8,8%.

Технічні параметри

Основні характеристики

Експлуатаційна маса	кг	115 000
Місткість ковша	м³	7

Потужність двигуна	кВт/об/хв	567/1800
Крутний момент/частота обертання	Н•м/об/хв	346 /1350
Робочий об'єм двигуна	л	23,15

Експлуатаційні характеристики

Швидкість пересування (В/Н)	км/год	3,3 / 2,2
Частота обертання платформи	об/хв	5,1
Подолання підйомів	°	30°
Тиск на ґрунт	кПа	143
Зусилля розкопки ковшем	кН	597
Зусилля рукояті	кН	470
Максимальне тягове зусилля	кН	746

Гідравлічна система

Номінальна подача головного насоса	л/хв	3 × 531
Тиск у головній магістралі	МПа	34,3
Тиск у системі пересування	МПа	34,3
Тиск у системі повороту	МПа	27,8
Тиск у пілотній системі	МПа	3,9

Габаритні розміри

Загальна довжина	мм	14 610
Загальна ширина	мм	5 470
Загальна висота	мм	6 160
Ширина платформи	мм	3 450
Довжина гусениці	мм	6 500
Загальна ширина шасі	мм	4 600
Ширина гусеничної стрічки	мм	700
Довжина опорної поверхні гусениці	мм	5 090
Колія гусениць	мм	3 900
Дорожній просвіт під противагою	мм	1 880
Мінімальний дорожній просвіт	мм	1 070
Мінімальний радіус повороту хвостової частини	мм	4 850

Висота гусеничної стрічки	мм	1 710
---------------------------	----	-------

Робочі параметри

Макс. висота розкопки	мм	12 500
Макс. висота розвантаження	мм	7 990
Макс. глибина розкопки	мм	8 110
Глибина розкопки у горизонтальній площині	мм	7 990
Макс. глибина вертикальної стінки	мм	5 390
Макс. дальність розкопки	мм	13 860

Для зменшення обсягу обчислень та підвищення ефективності симуляції, модель екскаватора була відповідним чином спрощена шляхом виключення компонентів, таких як гідроциліндри, які не впливають на структурний аналіз ковша. Як показано на рис. 2.3 а, імітаційна модель екскаватора складається з таких основних компонентів: корпус (1), стріла (2), рукоять ковша (3), важіль-коромисло (4), тяга (5) та ковш (6). Траєкторію моделювання було визначено з урахуванням реального досвіду експлуатації в різних гірничих умовах, рекомендацій технічного персоналу та особливостей роботи робочого обладнання екскаватора. Крива траєкторії руху зубів ковша, отримана в результаті імітації, наведена на рис. 2.3 б.

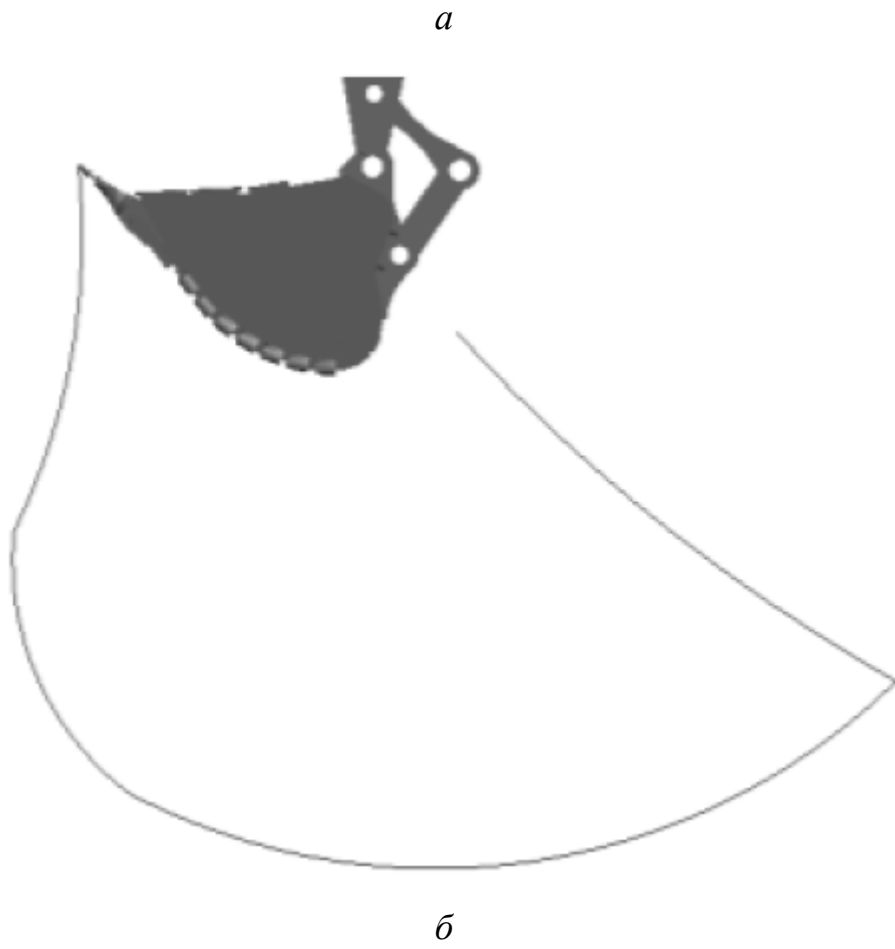
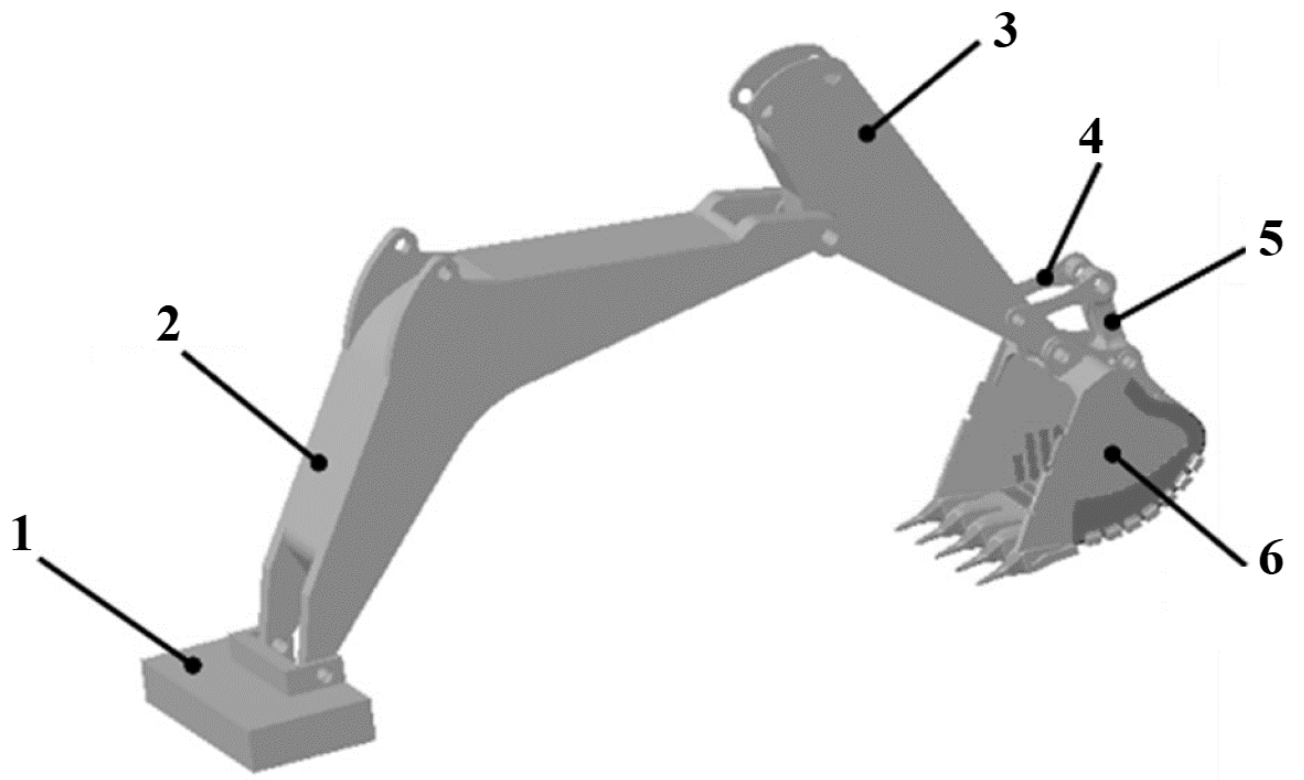


Рис 2.3 - Динамічна модель екскаватора: а - імітаційна модель екскаватора , б - траєкторія руху зубів ковша ; 1 – корпус; 2 - стріла; 3 - рукоять ковша; 4 - важіль-коромисло; 5 - тяга; 6 - ковш.

Властивості матеріалу моделі задано відповідно до табл. 2.1.

У пакеті ESSS Rokky імпортована модель ковша та налаштована порода взаємодіють та отримуються дані про опір розкопці, коефіцієнт заповнення ковша та енергоспоживання під час робочого циклу (рис 2.5.).

Процес розробки можна умовно поділити на чотири чітко виражені стадії:

1. Опускальна фаза (0–1,4 с) — стріла та рукоять ковша опускаються, ковш ще не контактує з матеріалом;
2. Фаза заглиблення та заповнення (1,4–4 с) — ковш починає входити в насип матеріалу і одночасно обертається для заповнення;
3. Фаза обертання ковша навколо рукояті (4–7 с) — рукоять ковша зупиняється, і ковш обертається навколо неї;
4. Підйомна фаза (7–10 с) — стріла та рукоять ковша піднімаються, ковш повністю заповнений матеріалом.



Рис 2.4 – Модель зачерпування породи

Додатково визначаються:

- коефіцієнт заповнення ковша:

$$\varphi = \frac{V_1}{V} \quad (2.1)$$

де φ — коефіцієнт заповнення, V_1 — фактичний об'єм матеріалу, завантаженого ковшом, V — місткість ковша.

- енергоспоживання на одиницю маси матеріалу під час розробки ковшем:

$$E = \int_0^t F_p(t) \cdot v_p dt + \int_0^t F_l(t) \cdot v_l dt \quad (2.2)$$

де E — загальне енергоспоживання, t — тривалість циклу копання, F_p — горизонтальний опір матеріалу ковшу, F_l — вертикальний опір матеріалу ковшу, v_p — горизонтальна швидкість ковша під час копання, v_l — вертикальна швидкість ковша під час копання.

2.3. Методика дослідження впливу параметрів ківша на експлуатаційні характеристики

Метою дослідження є визначення впливу конструктивних параметрів ковша на опір копанню, коефіцієнт заповнення та енергоспоживання.

Варійованими чинниками є наступні конструктивні параметри ковша (рис 2.6, 2.7, табл 2.3): кут різання, кут горловини, кут розширення, товщина плити провушини, R1 плити провушини, R2 плити провушини, товщина підсилювальної плити.

Зміна кута різання, кута розширення та кута горловини ковша безпосередньо впливає на його місткість, тому саме ці три параметри було обрано для модифікації. Крім того, ковш з'єднується з рукояттю через провушини, і опір копання передається саме через провушини, що легко може призвести до їх

деформації. Отже, конструктивні параметри провущин також було включено як додаткову дослідну змінну.

Опір копанню, коефіцієнт заповнення та енергоспоживання визначаються так само, як і у п.2.2.

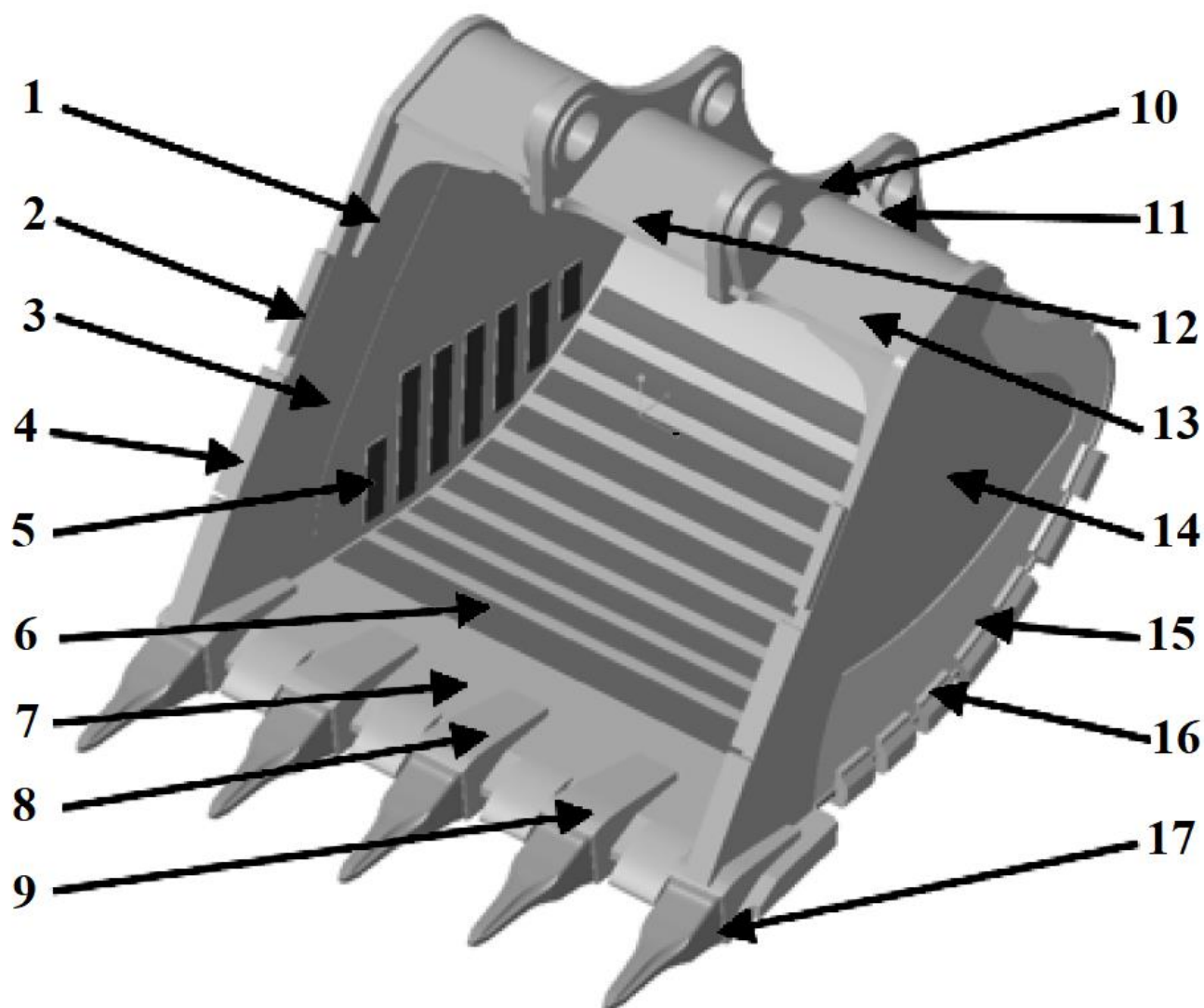


Рис 2.6 - Конструктивні елементи ковша: 1 – підсилюючий кут -; 2 підсилююче ребро; 3 - бічна плита; 4 - бічні зуби; 5 - внутрішня зносостійка плита; 6- зовнішня зносостійка плита; 7 - різальна кромка; 8 - верхня кромка зуба; 9 - корінь зуба; 10 - пластина вуха; 11 – ребро вуха; 12 - гнута плита; 13 - верхня плита; 14 – бічна плита; 15 – бічна зносостійка накладка; 16 – бічна кутова зносостійка накладка; 17 – зуби ковша

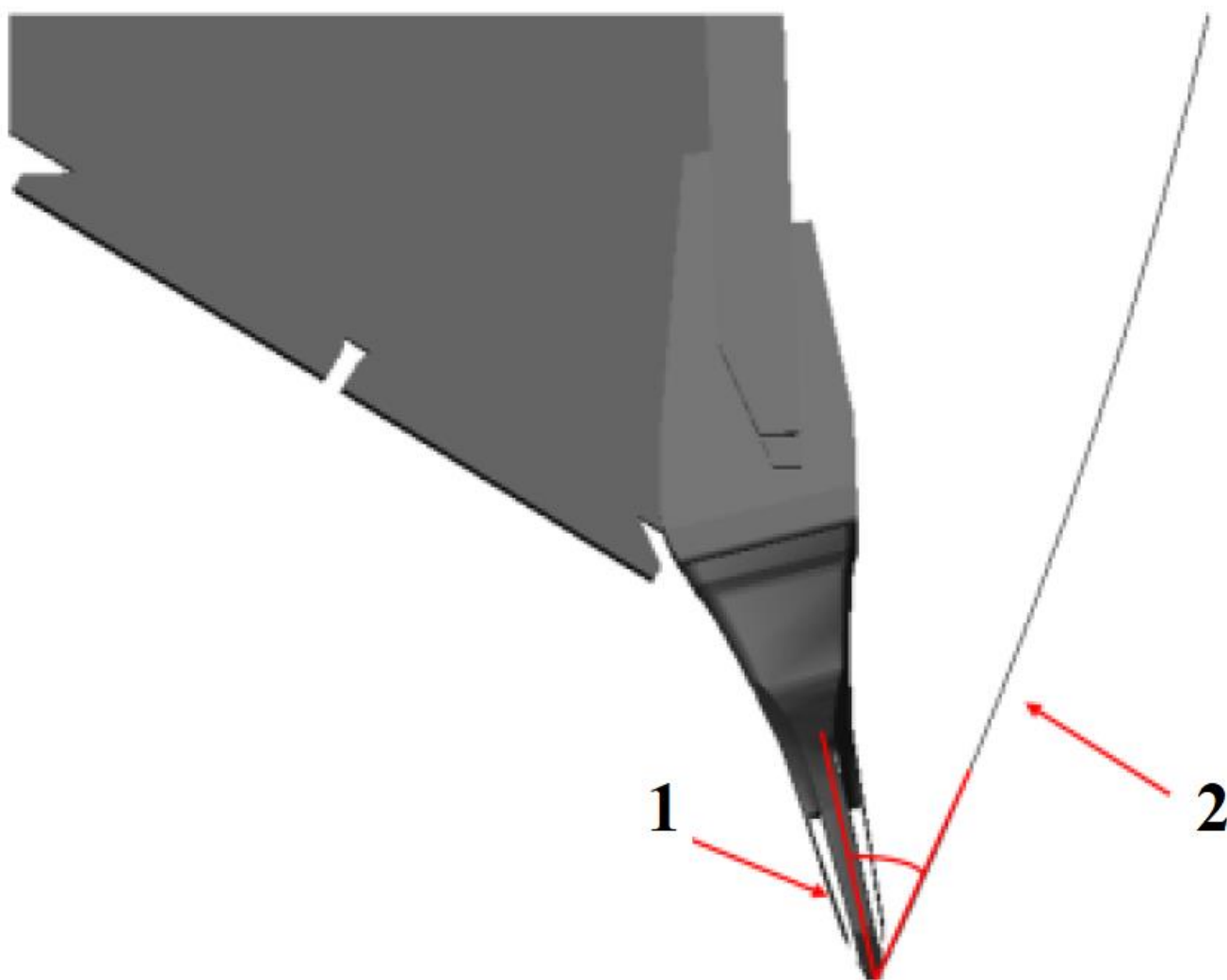


Рис 2.7. - Кут різання ковша: 1 - кут різання ковша; 2 – траєкторія руху зубів ковша

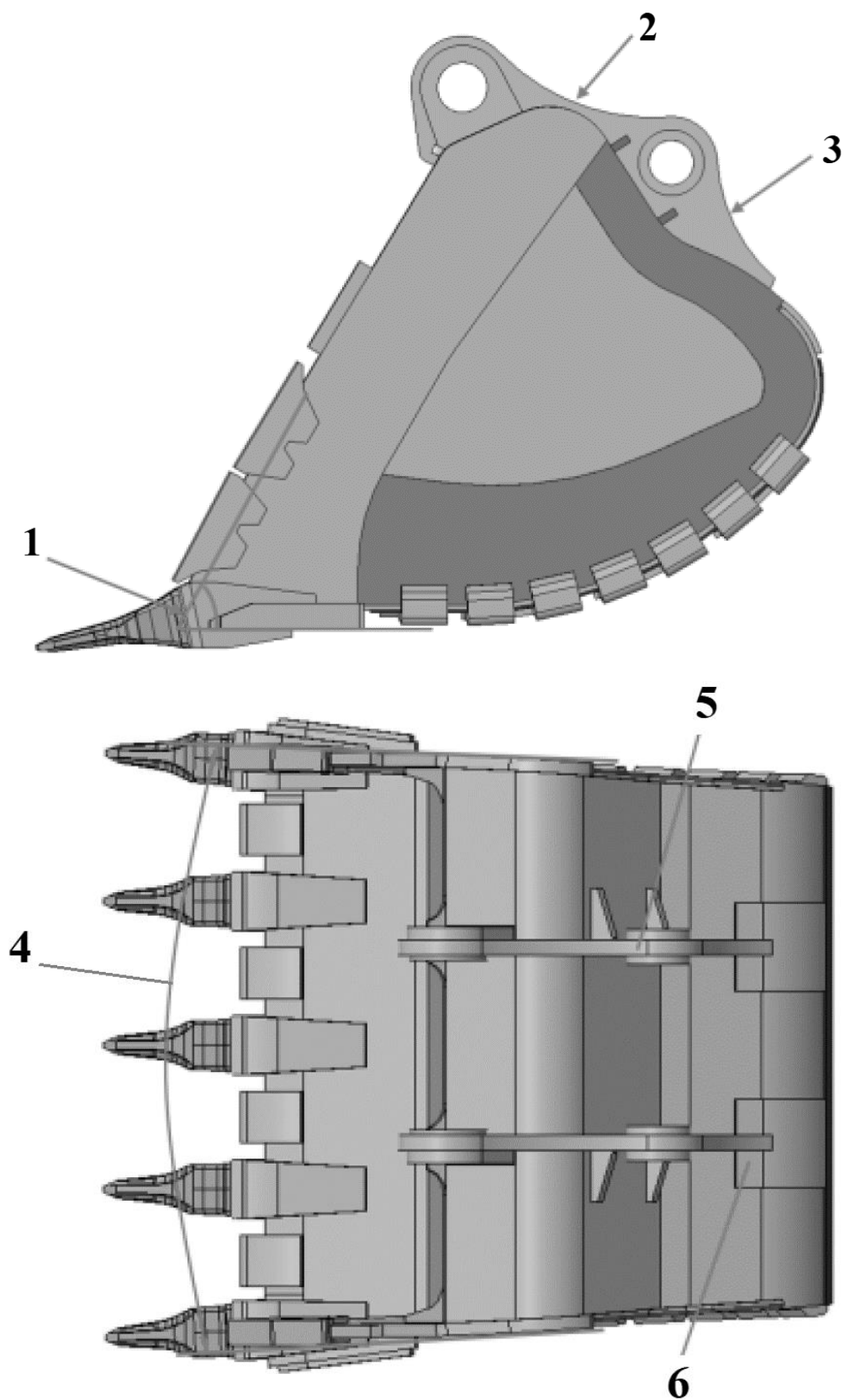


Рис 2.8 – Параметри ковша: 1 – бічний кут горловини ковша; 2 – радіус закруглення R1 плити провущини; 3 – радіус закруглення R2 плити провущини; 4 – кут розширення горловини ковша; 5 - товщина плити провущини; 6 - товщина підсилювальної плити

Таблиця 2.3 – Варійовані конструктивні параметри початкової моделі ковша

Конструктивний параметр ковша	Початкові значення	Варіації параметрів	
Кут різання, град	30	25	35
Кут горловини, град	56,3	50,3	62,3
Кут розширення, град	7,5	5	10
Товщина вушка, мм	60	55	65
R1 вушка, мм	650	620	680
R2 вушка, мм	800	780	820
Товщина підсилювальної плити, мм	22	16	28

|

2.4. Методика оптимізації параметрів ковша

Метою дослідження є оптимізацію конструкції ковша з метою зниження опору копання та енергоспоживання, а також підвищення коефіцієнта заповнення ковша на основі результатів попереднього дослідження, у ході якого було визначено параметри ковша, зміна яких має вплива на опір копання та енергоспоживання.

Як варійовані чинники було обрано чотири основні конструктивні параметри ковша:

- кут різання θ ;
- кут розширення β ;
- ширина ковша D ;
- радіус дуги днища ковша R .

Конструкцію ковша з варійованими чинниками наведено на рис. 2.9.

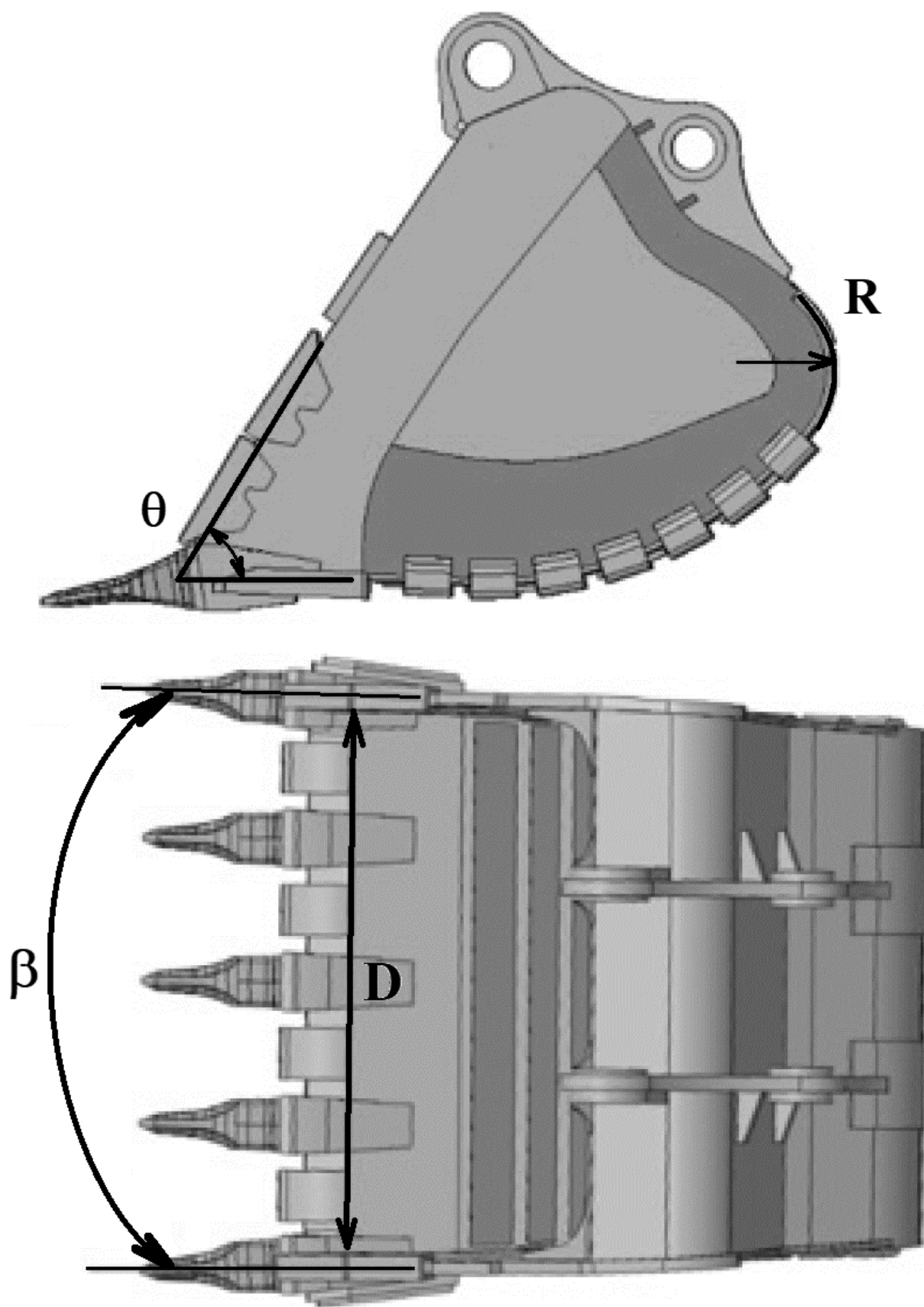


Рис 2.9 – Варійовані параметри ківша

Для кожного чинника було вибрано по три рівні. У разі проведення повного факторного експерименту знадобилося б 81 випробування, що вимагало б значних часових та трудових затрат. Тому для планування експерименту було використано ортогональну таблицю $L_9(3^4)$ (табл. 2.4), що дозволило порівняти експлуатаційні характеристики ковшів із різною конструкцією.

Таблиця 2.4 – Матриця планування експерименту

№	Кут різання θ	Кут розширення β	Ширина ковша D	Радіус дуги днища ковша R
1	62.3	7.6	2192	350
2	62.3	2	2092	330
3	62.3	5	2292	370
4	50	7.6	2092	370
5	50	2	2292	350
6	50	5	2192	330
7	55	7.6	2292	330
8	55	2	2192	370
9	55	5	2092	350

Опір копанню, коефіцієнт заповнення та енергоспоживання визначаються так само, як і у п.2.2.

Висновки до розділу 2

1. У межах дослідження було сформовано комплексну методику оцінювання впливу геометричних параметрів ковша гірничого гідравлічного екскаватора на ефективність процесу копання. Методика поєднує імітаційне моделювання процесу зачерпування, аналіз конструктивних чинників та їх подальшу оптимізацію.
2. На першому етапі розроблено детальну модель взаємодії ковша з ґрунтовим масивом, побудовану на основі реальних геометричних характеристик екскаватора XCMG XE1200 та типових умов роботи у забої. Спрощення моделі було проведено раціонально — вилучено лише ті компоненти, що не впливають на процеси структурної взаємодії та не змінюють механіку зачерпування. Це забезпечило високу швидкість розрахунків без втрати достовірності. Процес копання поділено на чотири стадії, що дозволило детально проаналізувати зміну опору копанню, коефіцієнта заповнення ковша та енергоспоживання впродовж циклу.
3. Другий етап передбачав системне дослідження впливу ключових конструктивних параметрів ковша. Визначено набір геометричних характеристик, які потенційно формують зусилля копання та ефективність заповнення: кут різання, кут горловини, кут розширення, параметри провущин та підсилювальних елементів. Поглиблений аналіз обґрунтував включення саме цих параметрів до факторного простору, адже вони найбільшою мірою визначають місткість ковша, характер течії породи вздовж лобової та бокових поверхонь, а також міцність вузла кріплення.
4. На заключному етапі сформовано оптимізаційну задачу для найвпливовіших параметрів із використанням планування експерименту на основі латинських квадратів. Це дозволило мінімізувати кількість необхідних симуляцій за

умови повного охоплення факторного простору та забезпечило можливість об'єктивного визначення конструктивних рішень, що знижують опір копанню, зменшують енергетичні витрати та підвищують коефіцієнт заповнення ковша.

5. Розроблена методика забезпечує комплексний та об'єктивний підхід до оцінювання роботи ковша, дає змогу виявити домінуючі конструктивні чинники та створює основу для формування практичних рекомендацій щодо раціональної геометрії ковша гірничого гідравлічного екскаватора. Вона також закладає підґрунтя для подальшого впровадження оптимізованих конструкцій, здатних підвищити експлуатаційну ефективність машини та зменшити навантаження на елементи робочого обладнання.

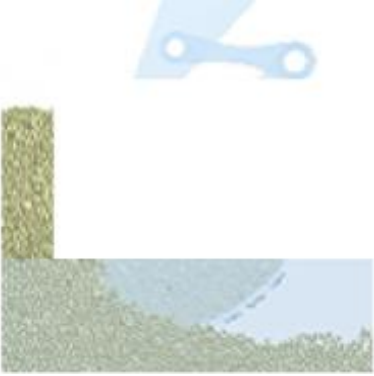
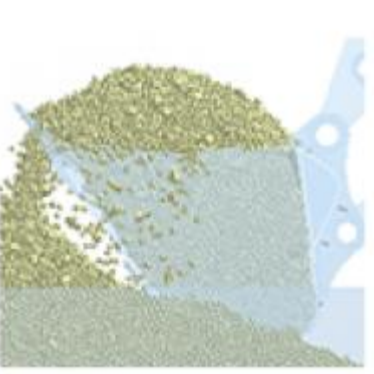
3. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КОВША МАЛОПЛТУЖНИХ ЕКСКАВАТОРІВ ТИПУ «ЗВОРОТНЯ ЛОПАТА»

3.1. Дослідження опору копання ківшем

У результаті проведеного дослідження згідно розробленої методики, отримано дані про опір копанню, коефіцієнт заповнення ковша та енергоспоживання під час робочого циклу. Як показано на Рисунку 6, процес гірничої розробки можна умовно поділити на чотири чітко виражені стадії:

Згідно з розробленою методикою, процес поділено на чотири стадії:

Стадія	Час, с	Опис	Ескіз
1. Опускальна стадія	0–1,4	стріла та рукоять ковша опускаються, ковш ще не контактує з матеріалом, тому опір копанню дорівнює нулю	
2. Стадія заглиблення та заповнення	1,4–4	ковш починає входити в насип матеріалу і одночасно обертається для заповнення. У міру просування розкопки елементи ковша піддаються періодичним ударним навантаженням з боку дискретних частинок матеріалу, і опір розкопці поступово зростає. Максимальне значення опору досягається на 3,1 с, коли ковш повністю заповнюється матеріалом, після чого опір починає зменшуватися	

3. Стадія обертання ковша навколо рукояті	4–7 с	рукоять ковша зупиняється, і ковш обертається навколо неї. Під час цього обертання кутова швидкість ковша спочатку зростає від нуля до сталого значення, а потім залишається сталою. У процесі розгону, через нерівномірний розподіл сили тяжіння матеріалу та інерційних сил, опір розробки неодмінно зростає під дією контактних ударних навантажень. Потім ковш поступово дозаповнюється матеріалом, і опір розкопці знову знижується	
4. Стадія підйому	7–10	стріла та рукоять ковша піднімаються, ковш повністю заповнений матеріалом. У цей момент, через одночасний рух стріли й рукояті, опір розкопці короткочасно різко зростає. Проте незабаром ковш починає відділятися від насипу, контакт із матеріалом зменшується, і опір розкопці продовжує знижуватися. Після повного виходу ковша з насипу матеріалу опір розкопці зводиться лише до сили тяжіння матеріалу, що перебуває в ковші	

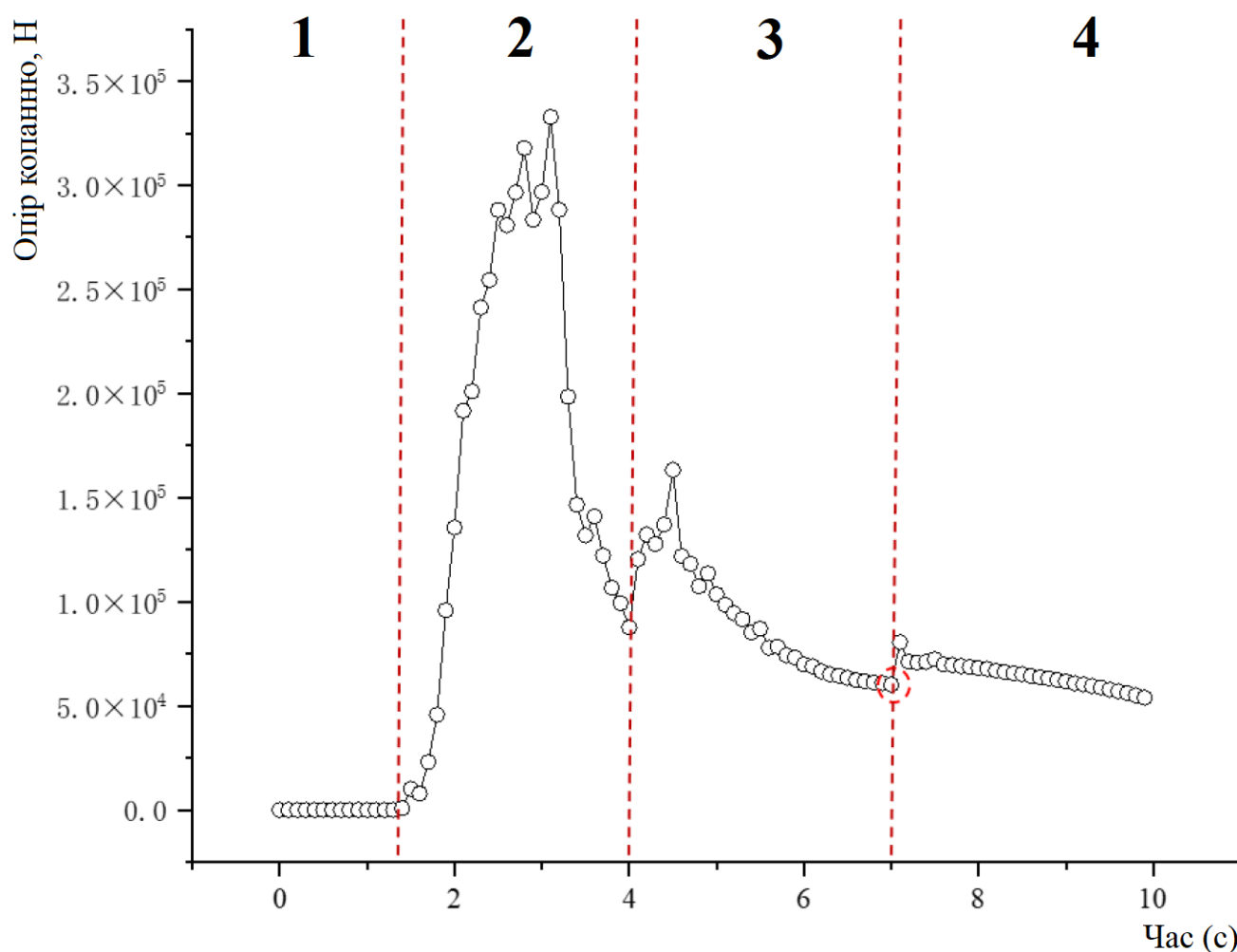


Рис 3.1 – Опір копанню під час циклу зачерпування

Як показано на рис 3.2, значення опору копанню отримувалося для різних компонентів ковша: днища (основної плити), бічних стінок, зубів ковша та різальної кромки.

Загальний опір копанню ківша є сумою опорів усіх його частин. На початковому етапі копання спочатку з матеріалом контактують зуби ковша, а потім — бічні стінки, різальна кромка і днище. У проміжку 0–4 с опір копанню, що припадає на зуби ковша, становить найбільшу частку від загального опору, тоді як внесок інших компонентів ковша є відносно малим.

Із збільшенням глибини заглиблення ковша в насип матеріалу опір копання кожної його частини зростає. Після повного заповнення ковша матеріалом опір копання окремих компонентів поступово зменшується.

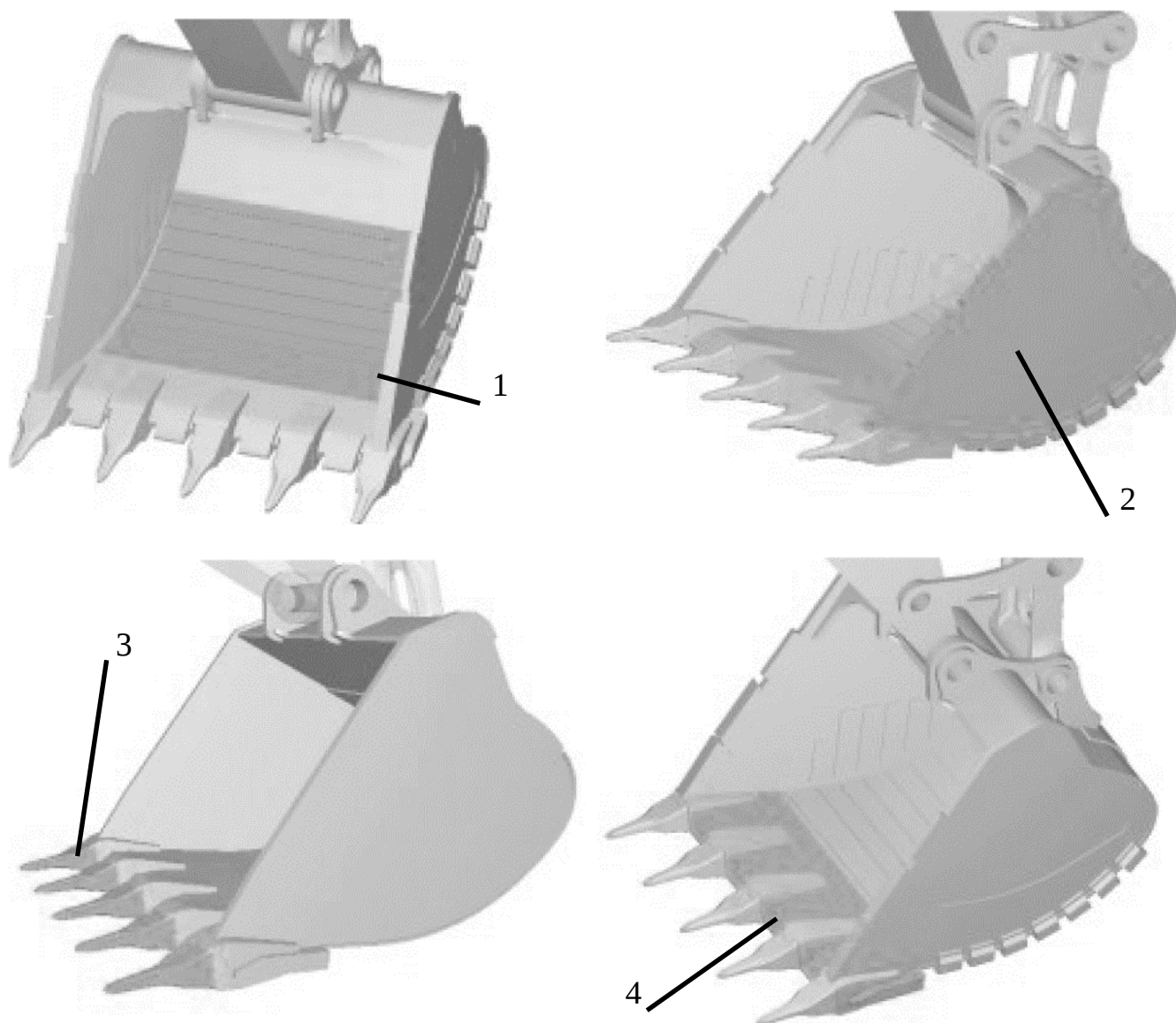


Рис 3.2 – Елементи ковша: 1 - днище (основна плита); 2 – бічна стінка; 3 - зуби ковша; 4 - різальна кромка

Коли ковш повністю видаляється з насипу матеріалу, на нього діє лише сила тяжіння завантаженого матеріалу. У цей момент опір зубів ковша майже дорівнює нулю, а основним навантаженим елементом стає днище — саме воно сприймає найбільший опір.

Як видно з графіку опору копання (рис 3.3), послідовність зменшення опору копання в різних характерних зонах ковша така: зуби ковша → різальна кромка → бічні стінки → днище (основна плита).

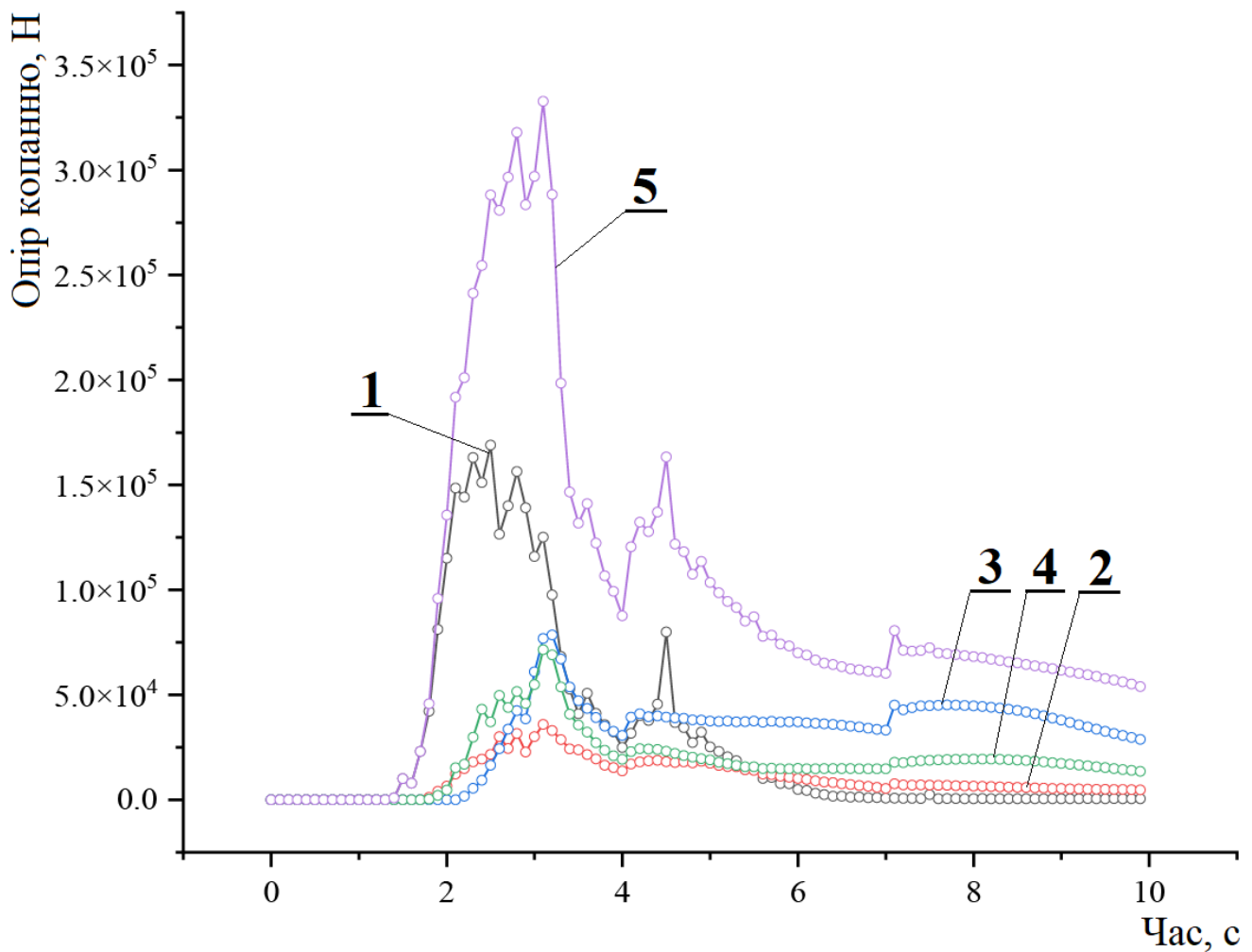


Рис 3.3 – Опір копанню залежно від елементу ковша: 1 – зуби ківша; 2 – задня частина ківша; 3 – днище ківша; 4 – бічна стінка; 5 – різальна кромка

На ранніх стадіях копання опір різання, що виникає на кінці (вістрі) ковша, становить значну частку загального опору розкопці. На пізніших етапах основну навантажувальну функцію виконує днище ковша, оскільки саме воно утримує вагу завантаженого матеріалу. У цей період опір копання становить незначну частку загального опору копання, що свідчить про те, що сила різання є важливою, але не єдиною складовою загального опору копання.

Формула розрахунку коефіцієнта заповнення ковша має вигляд:

$$\eta = \frac{V_1}{V} \quad (3.1)$$

де V_1 — фактичний об'єм завантаження ковша, м^3 ; V — місткість ковша, м^3 .

Формула розрахунку питомого енергоспоживання на одиницю маси матеріалу при розробці ковшем, Дж/кг:

$$E = \frac{\int_0^e Fv dt}{m} \quad (3.2)$$

де F — опір копанню, що виникає під час процесу розробки; v — швидкість руху ковша під час копання, м/с; m — ефективна маса матеріалу в ковші після одного циклу копання, кг.

Місткість ковша гідравлічного екскаватора ХЕ1200 становить 7 м³. На основі проведеного дослідження, маса матеріалу, завантаженого оригінальним ковшем, дорівнює 6426,06 кг. Насипна щільність матеріалу, визначена за результатами геологічного дослідження, складає 1016,7 кг/м³. Отже, коефіцієнт заповнення оригінального ковша становить 90,3 %. Питоме енергоспоживання на одиницю маси матеріалу, дорівнює 413,72 Дж/кг.

3.2. Дослідження впливу параметрів ківша на експлуатаційні характеристики

У результаті проведеного дослідження визначено вплив конструктивних параметрів ковша на опір копанню, коефіцієнт заповнення та енергоспоживання.

Результати наведено на рис 3.4 -

На рис. 3.4 показано залежність опору копання при різних кутах різання. Встановлено, що опір копання зі збільшенням кута різання ковша також відповідно зростає. Коли кут різання досягає 35°, опір розкопці досягає максимального значення. Як видно з рис. 2.7, кут різання — це кут між зубами ковша та напрямком його швидкості. Чим більший кут різання, тим більше матеріалу потрапляє в ковш уздовж фаски різальної кромки, а отже, вищий коефіцієнт заповнення ковша.

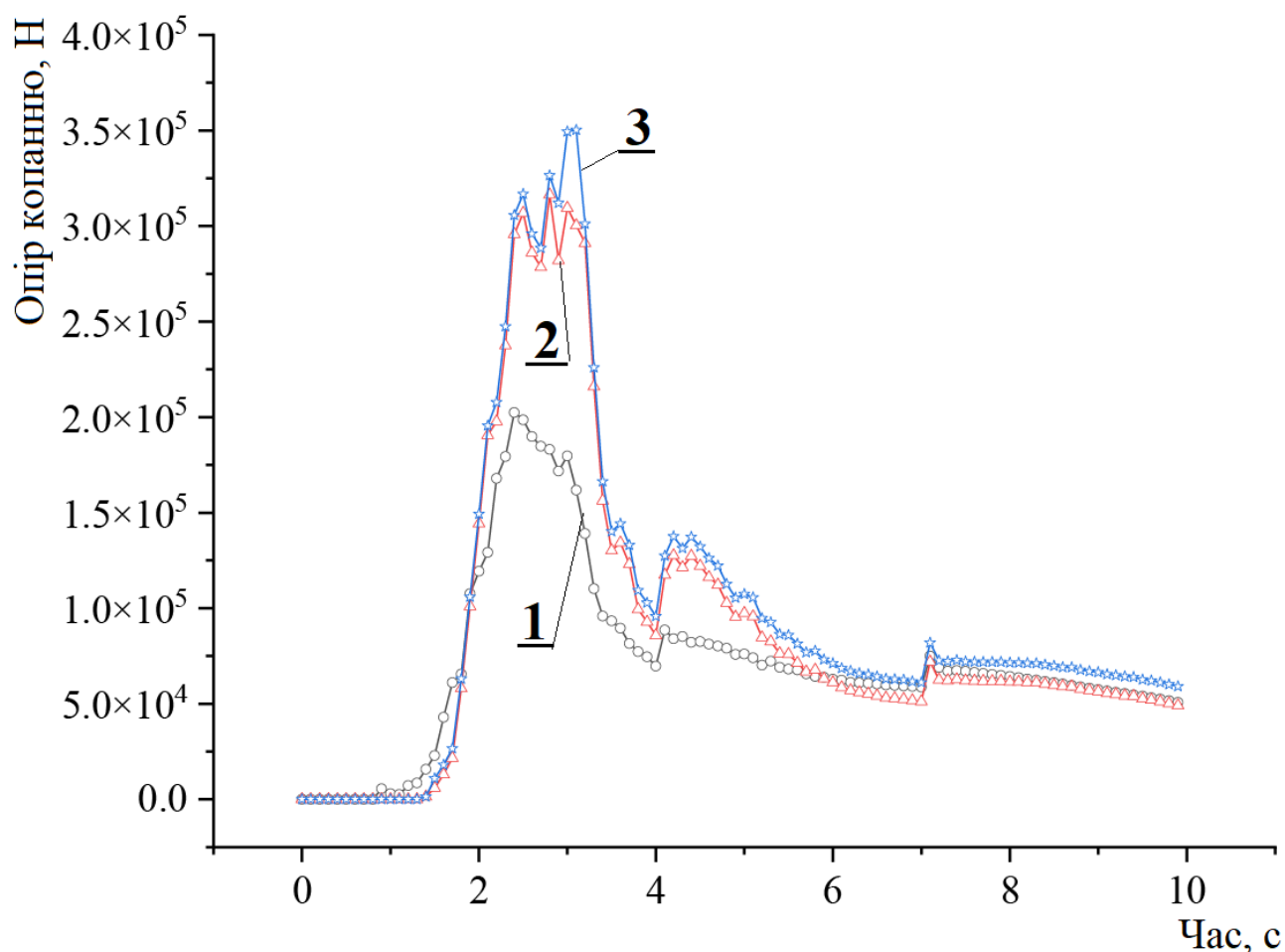


Рис 3.4 – Залежність опору копання від величини кута різання: 1 – кут різання 25 град; 2 – кут різання 30 град; 3 – кут різання 35 град

Як показано на Рис 3.5 коефіцієнт заповнення при різних кутах різання», зміна кута горловини ковша майже не впливає на опір розкопці. З рис 3.6 питоме енергоспоживання при різних кутах різання видно, що при куті різання 35° питоме енергоспоживання на одиницю маси матеріалу під час розробки також досягає найвищого значення.

З рис 3.6 питоме енергоспоживання при різних кутах різання видно, що при куті різання 35° питоме енергоспоживання на одиницю маси матеріалу під час розробки також досягає найвищого значення.

Як показано на рис 3.5 коефіцієнт заповнення при різних кутах різання», зміна кута горловини ковша майже не впливає на опір розкопці.

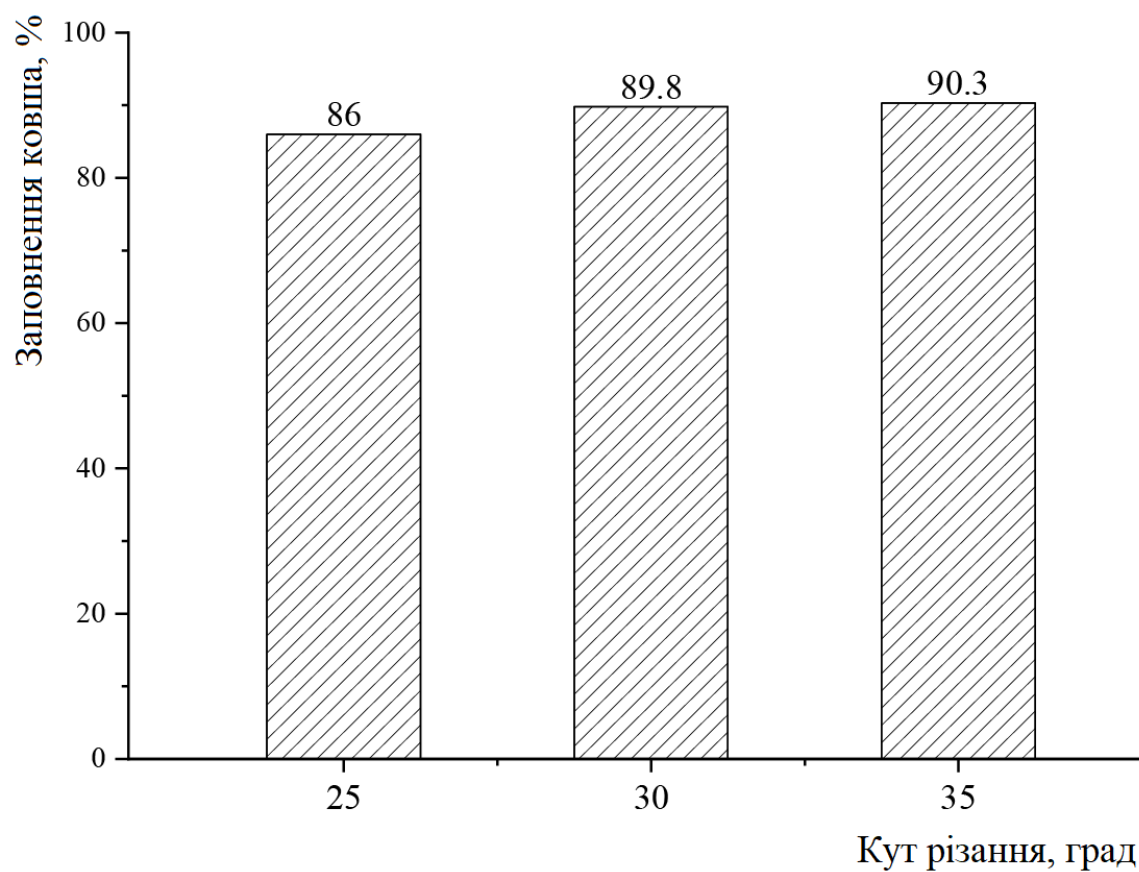


Рис 3.5 – Залежність заповнення ковша від кута різання

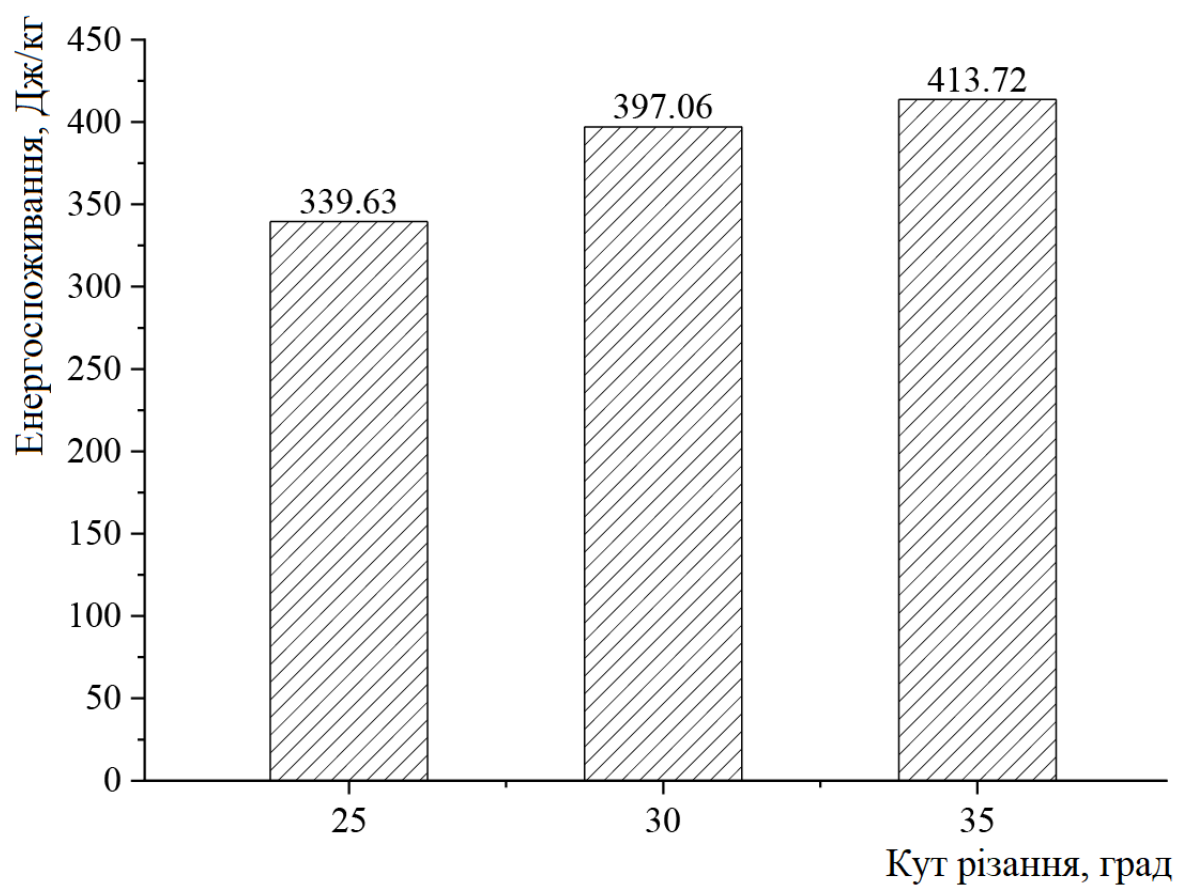


Рис 3.6 – Залежність енергоспоживання від кута різання

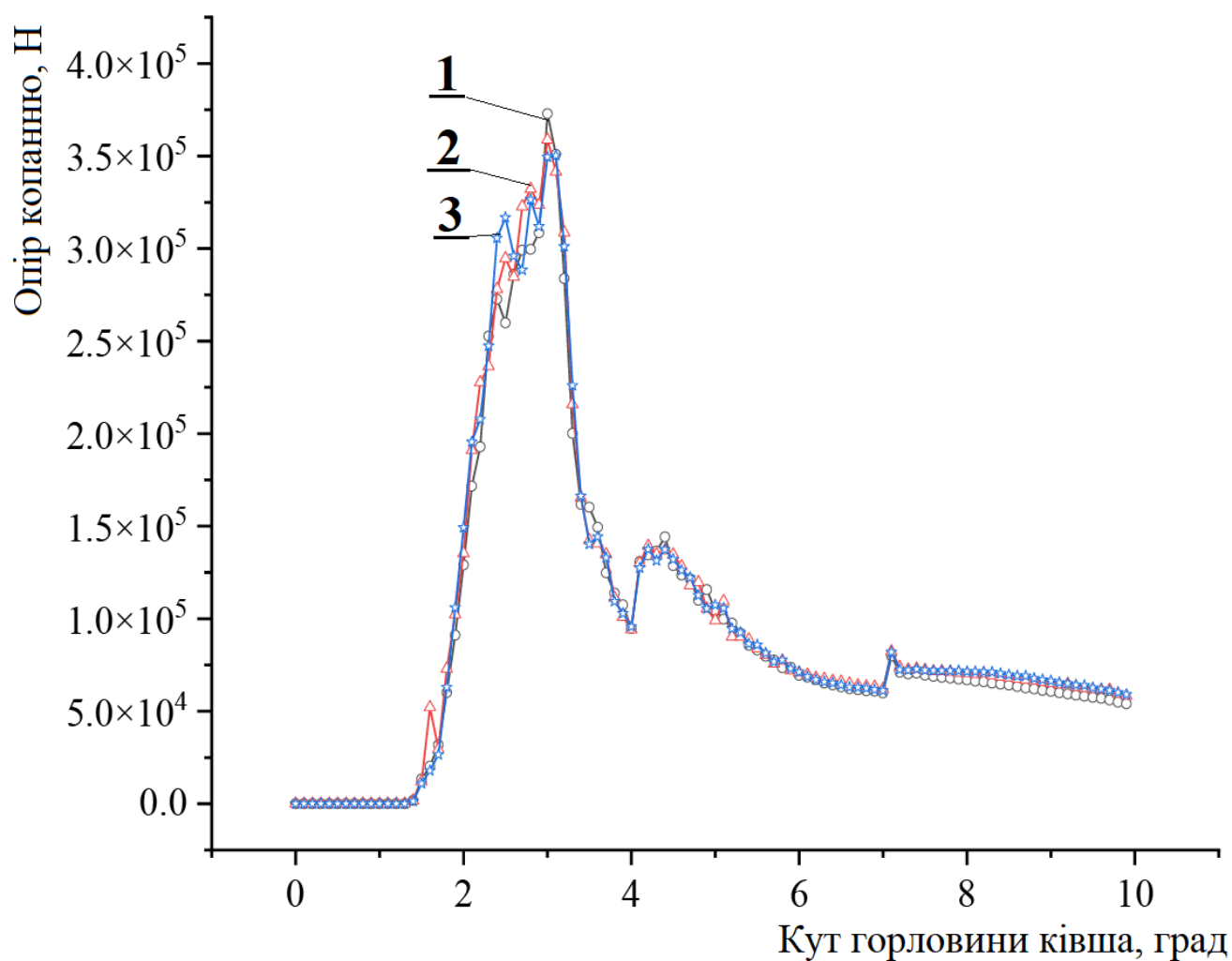


Рис 3.7 - Рис 3.4 – Залежність опору копання від величини кута горловини ківша: 1 – кут горловини 50.3 град; 2 – кут горловини 56.3 град; 3 – кут горловини 62.3 град

З рис 3.8 коефіцієнт заповнення при різних кутах горловини видно, що чим більший кут горловини, тим вищий коефіцієнт заповнення ковша. Коли кут горловини становить 62,3°, коефіцієнт заповнення ковша є максимальним.

Як видно з рис 3.9 питоме енергоспоживання при різних кутах горловини, при куті горловини 62,3° питоме енергоспоживання на одиницю маси розробленого матеріалу є найнижчим.

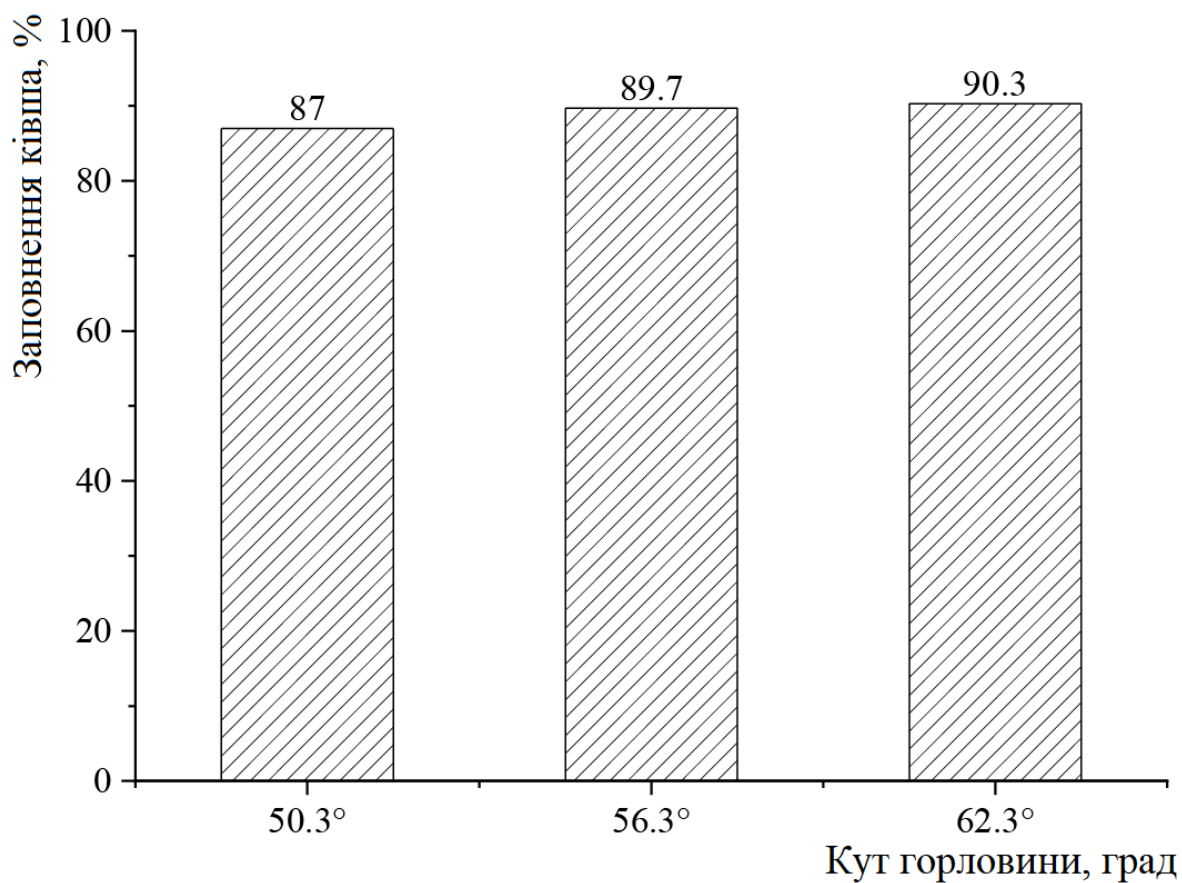


Рис 3.8 – Залежність заповнення ковша від кута горловини

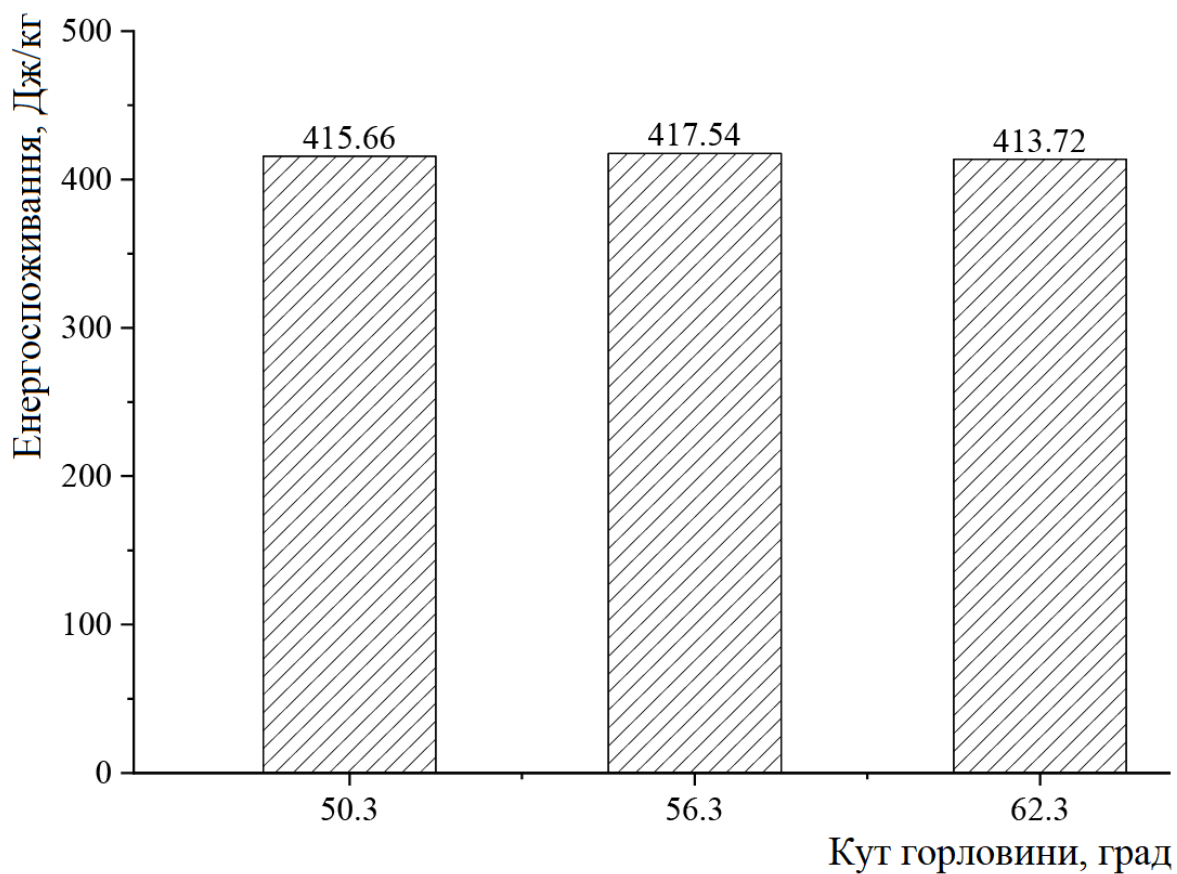


Рис 3.9 – Залежність енергоспоживання від кута горловини

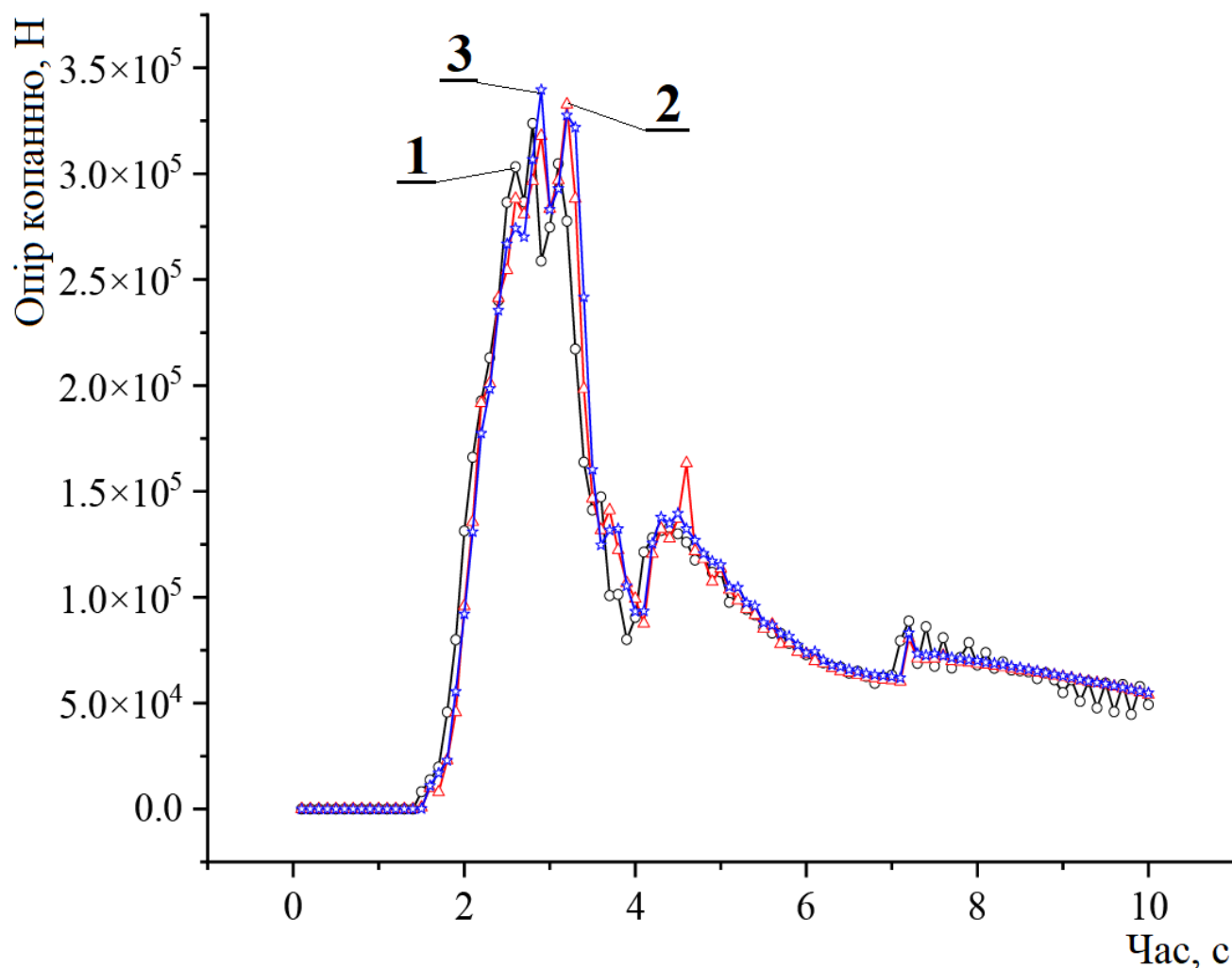


Рис 3.10 – Залежність опору копання від величини кута розширення ківша: 1 – кут горловини 5 град; 2 – кут горловини 7.5 град; 3 – кут горловини 10 град

Отже, з урахуванням опору розкопці, коефіцієнта заповнення та питомого енергоспоживання, збільшення кута горловини ковша дозволяє не лише досягти вищого коефіцієнта заповнення, але й мінімізувати енерговитрати на одиницю маси матеріалу.

З рис 3.10 опір розкопці при різних кутах розширення та рис 3.12 питоме енергоспоживання при різних кутах розширення видно, що зміна кута розширення ковша майже не впливає на опір розкопці, однак суттєво впливає на коефіцієнт заповнення. Чим більший кут розширення, тим більша маса матеріалу розробляється ковшем.

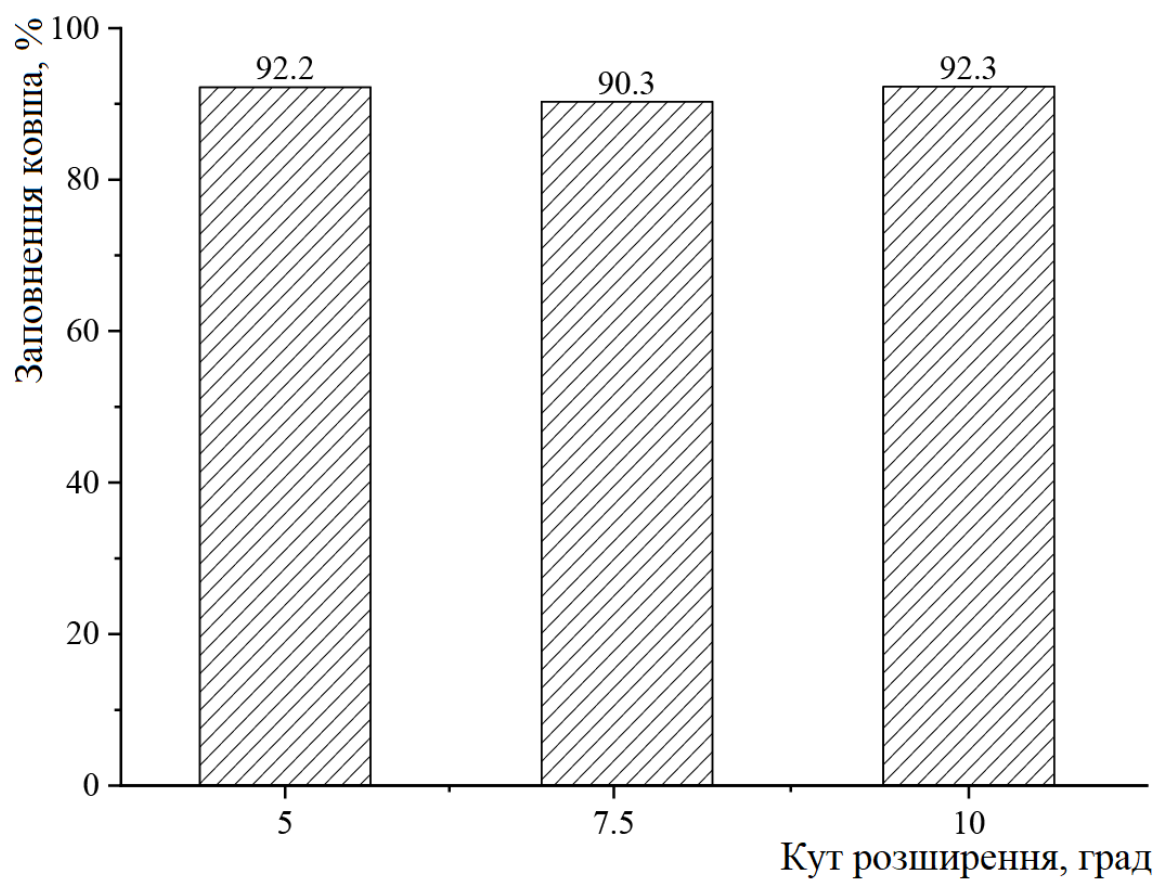


Рис 3.11 – Залежність заповнення ковша від кута розширення

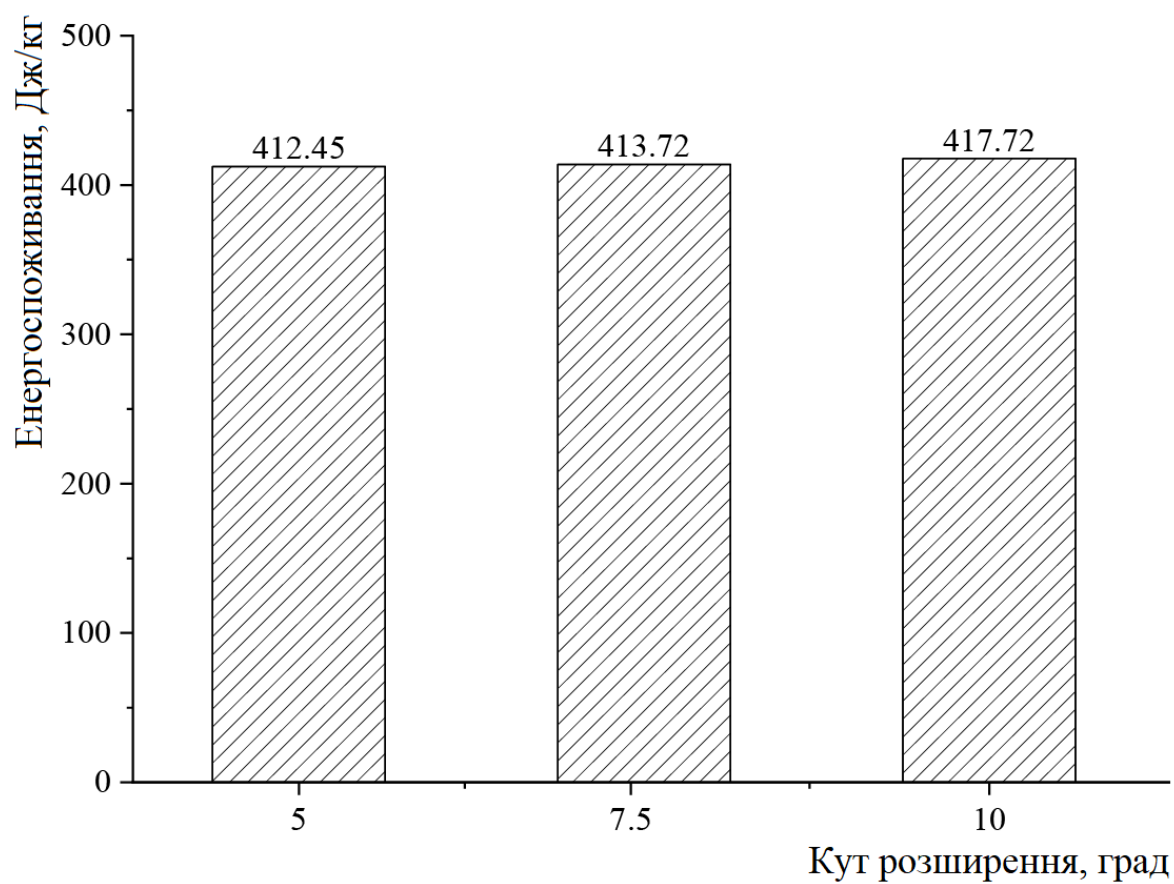


Рис 3.12 – Залежність енергоспоживання від кута горловини

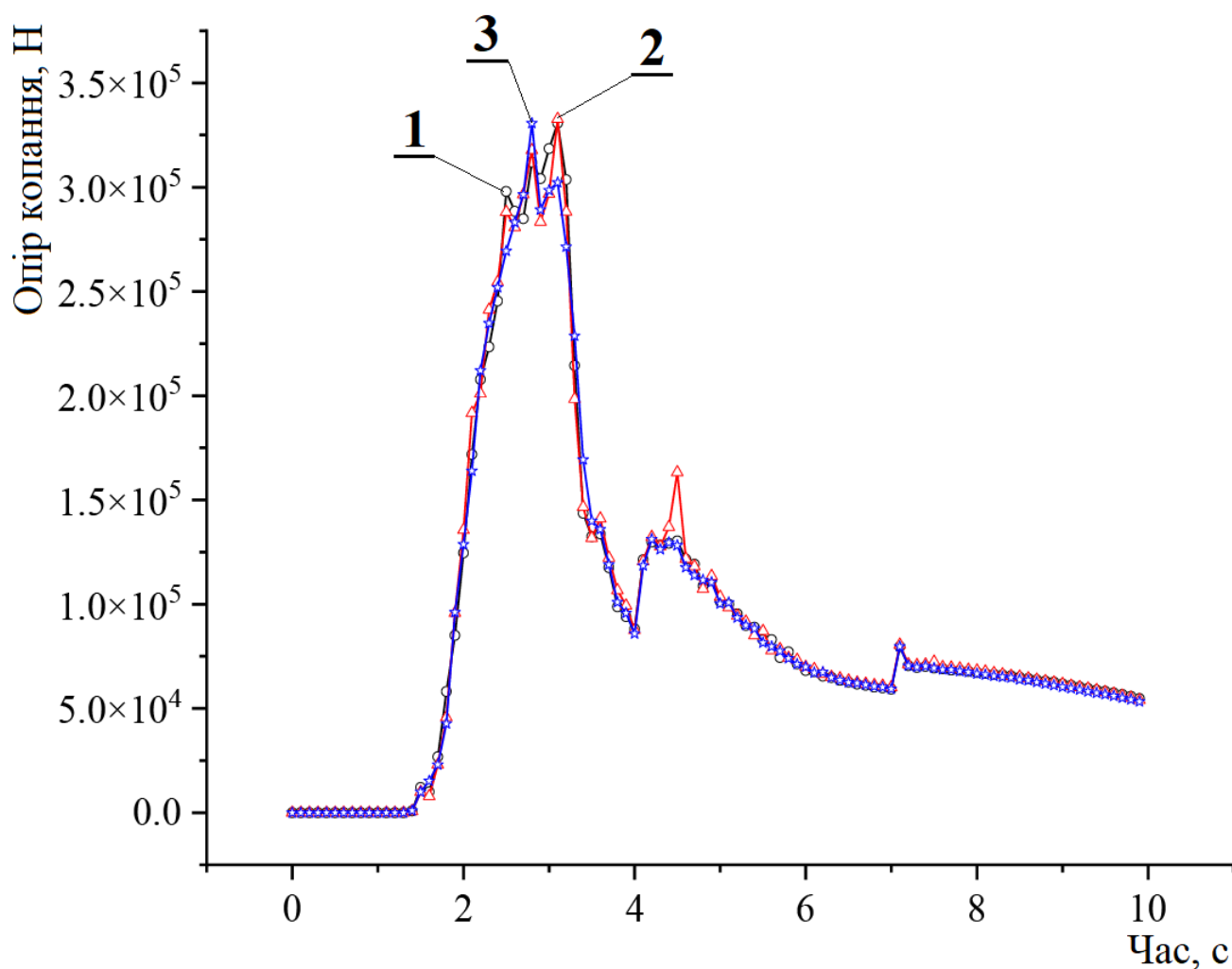


Рис 3.13 – Залежність опору копання від величини товщини пластини провушини:
 1 – товщина пластини провушини 55 мм; 2 – товщина пластини провушини 60 мм;
 3 – товщина пластини провушини 65 мм

Проте одночасно збільшується й місткість ковша, тому коефіцієнт заповнення не має чітко вираженої залежності від кута розширення.

Як показано на рис 3.12 питоме енергоспоживання при різних кутах розширення, найвище питоме енергоспоживання спостерігається при куті розширення 10°.

На рис 3.1 видно, що протягом усього процесу розкопки вушка ковша безпосередньо не контактують із матеріалом, а зміна конструктивних параметрів вушок не змінює місця шарнірного з'єднання між рукояттю та ковшем. Отже, траєкторія руху ковша та кінематичні параметри залишаються незмінними.

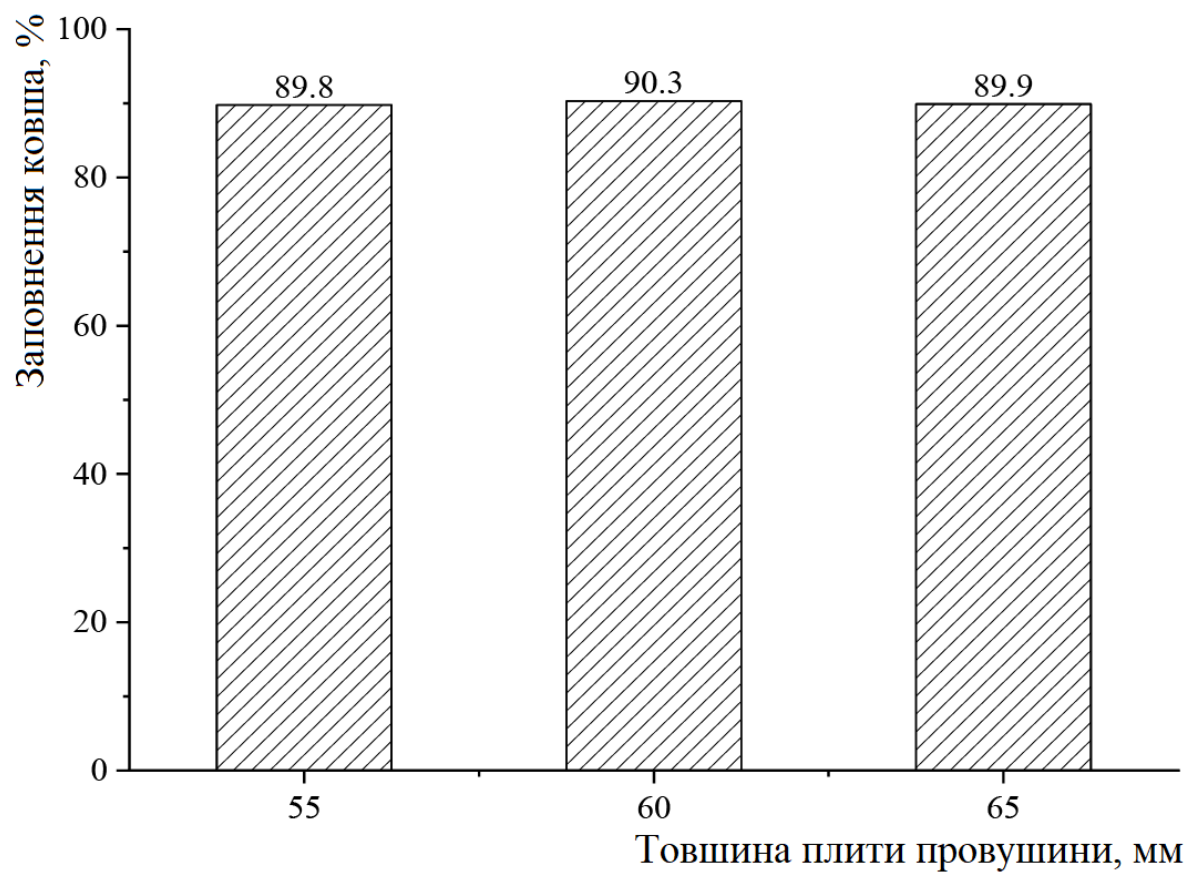


Рис 3.14 – Залежність заповнення ковша від товщини плити провущини

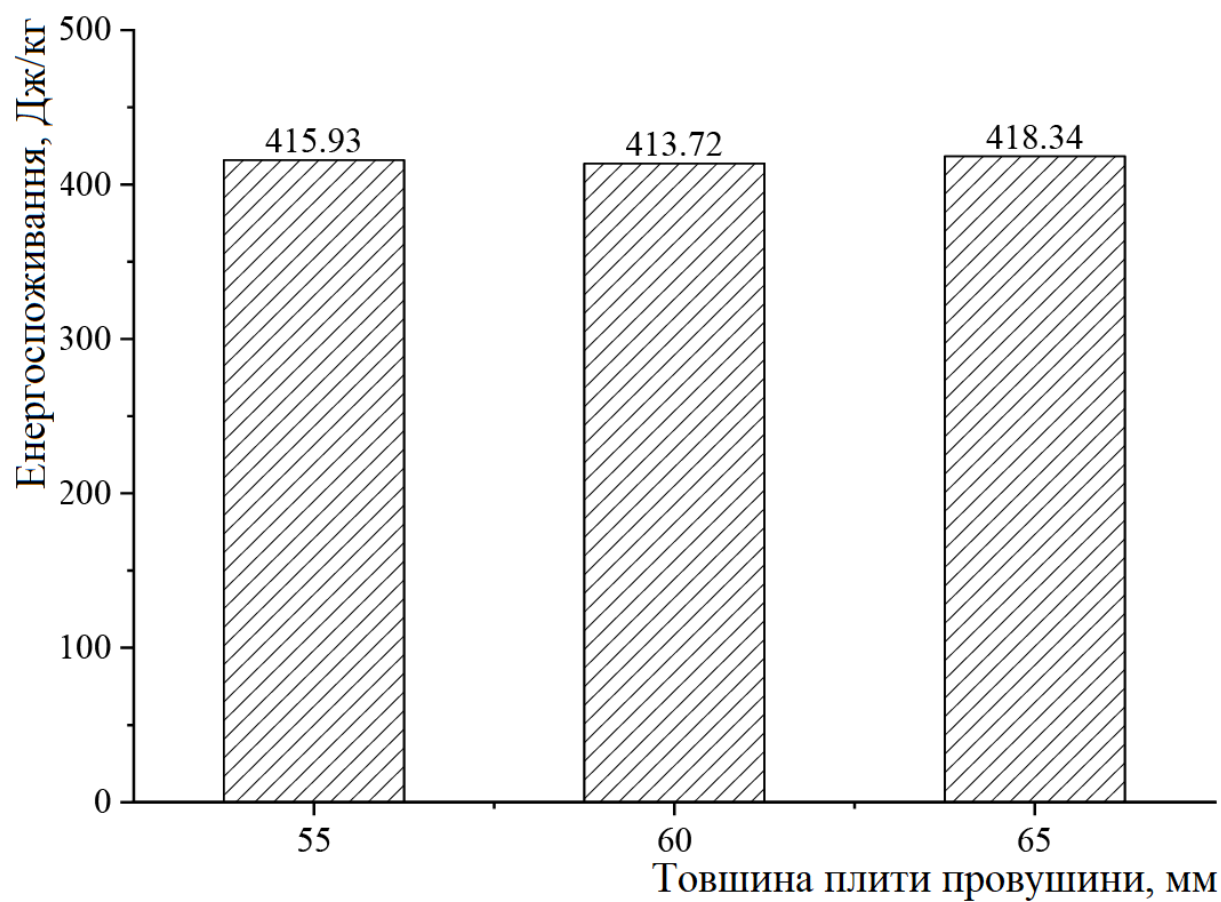


Рис 3.15 – Залежність енергоспоживання від товщини плити провущини

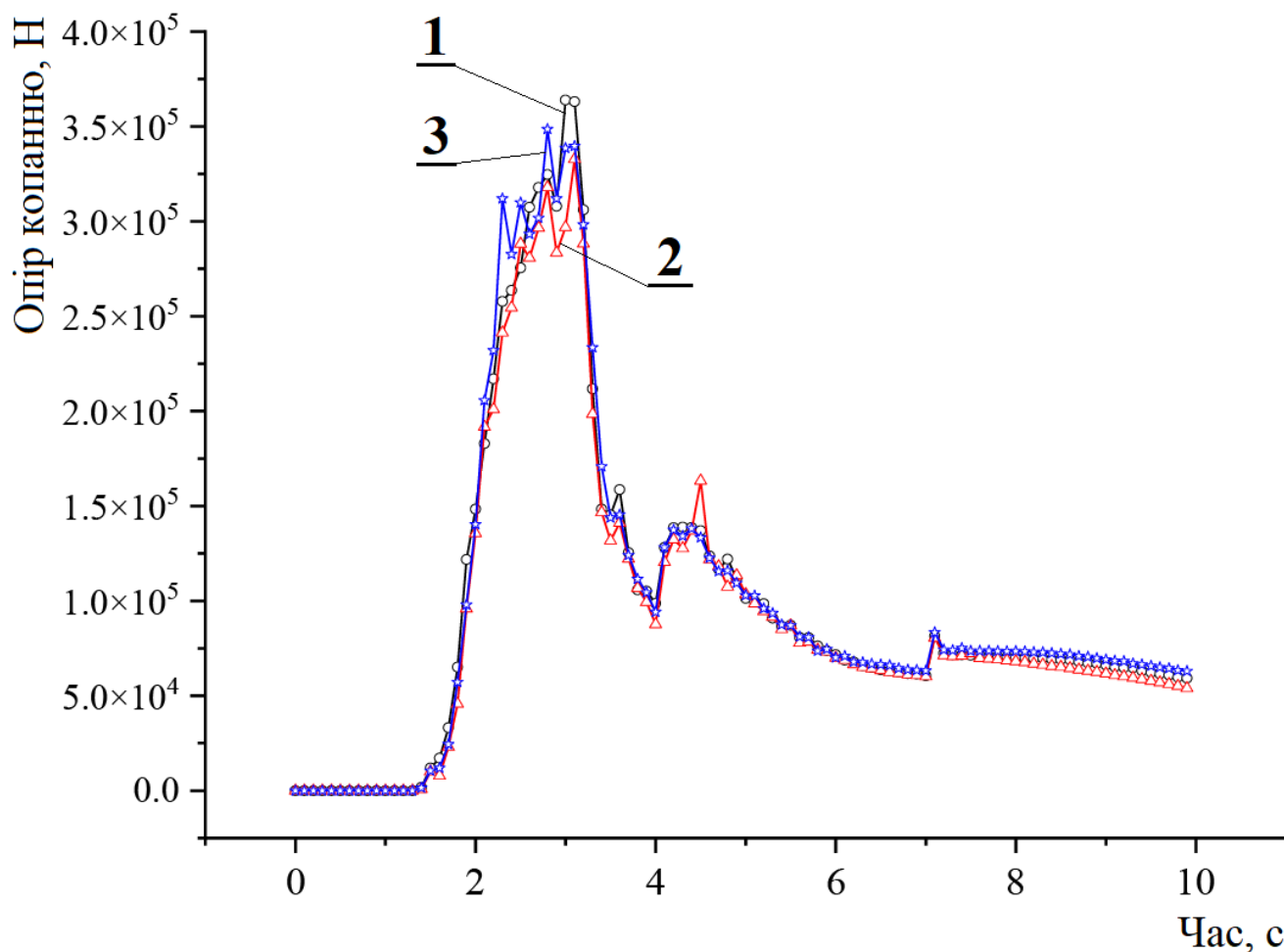


Рис 3.16 – Залежність опору копанню від величини радіусу скруглення плити R1: 1 – радіус скруглення плити R1 780 мм; 2 – радіус скруглення плити R1 800 мм; 3 – радіус скруглення плити R1 820 мм

Аналізуючи рисунки від рис 3.14 опір копанню при різних товщині провущини до рис 3.24 питоме енергоспоживання при різних товщині підсилювальної плити, можна зробити висновок, що зміна конструктивних параметрів провущини ковша майже не впливає на коефіцієнт заповнення, опір розкопці та енергоспоживання. Незначні відмінності в отриманих результатах пояснюються систематичною похибкою програмного забезпечення для моделювання.

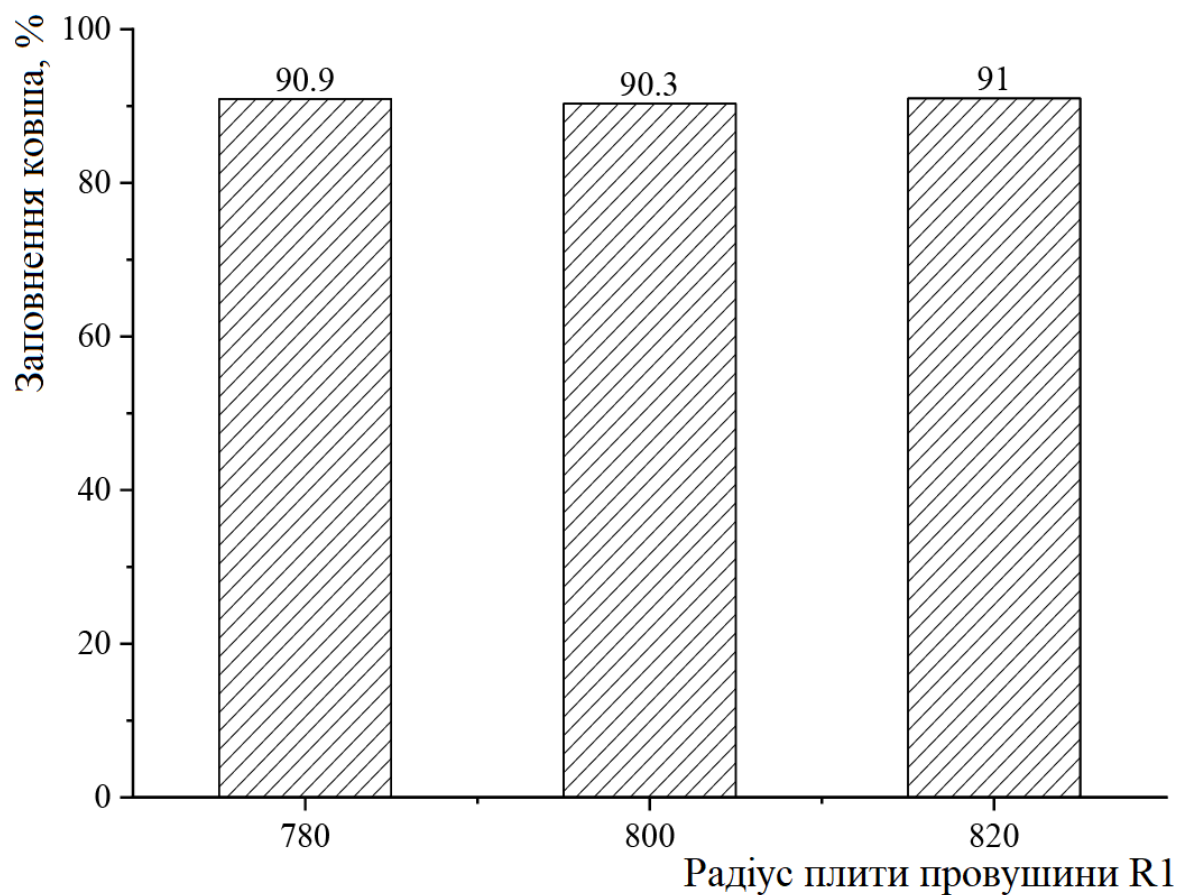


Рис 3.17 – Залежність заповнення ковша від радіусу скруглення плити R1

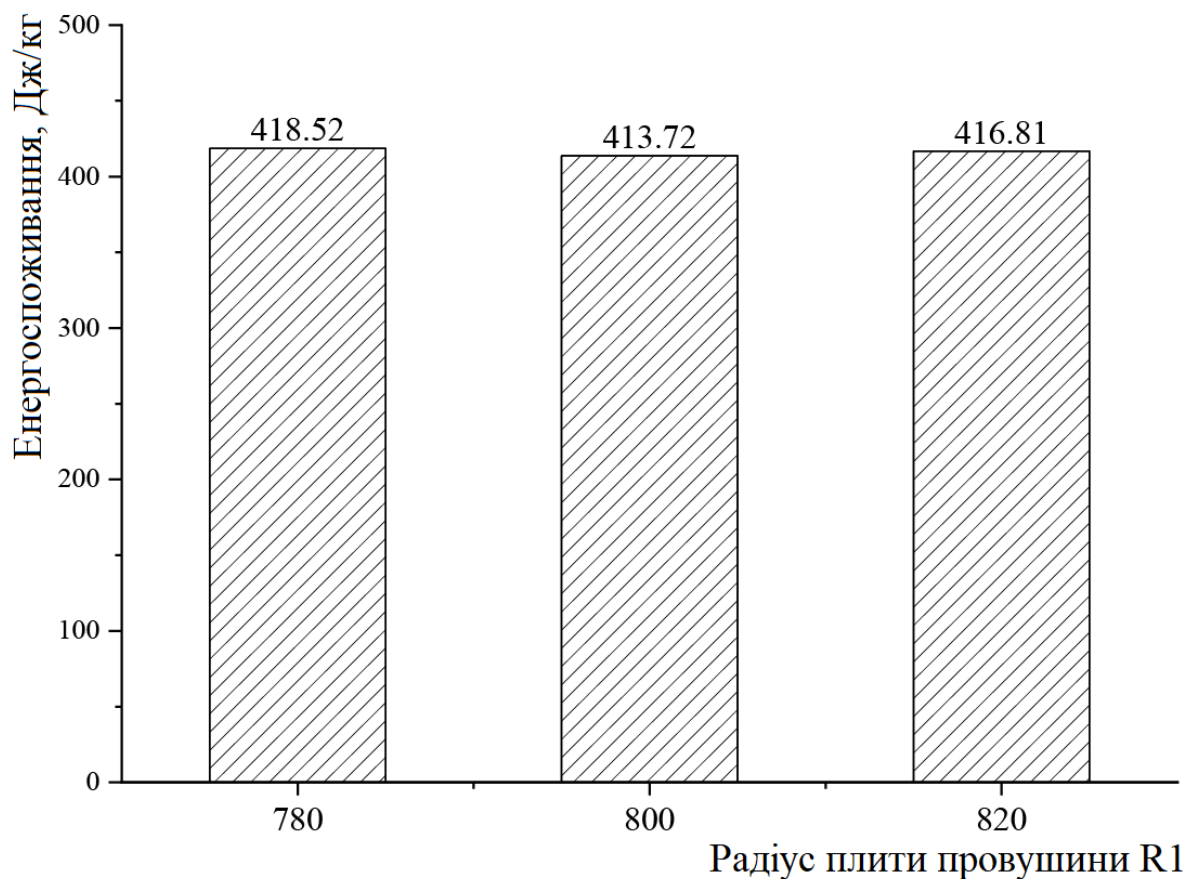


Рис 3.18 – Залежність енергоспоживання від радіусу скруглення плити R1

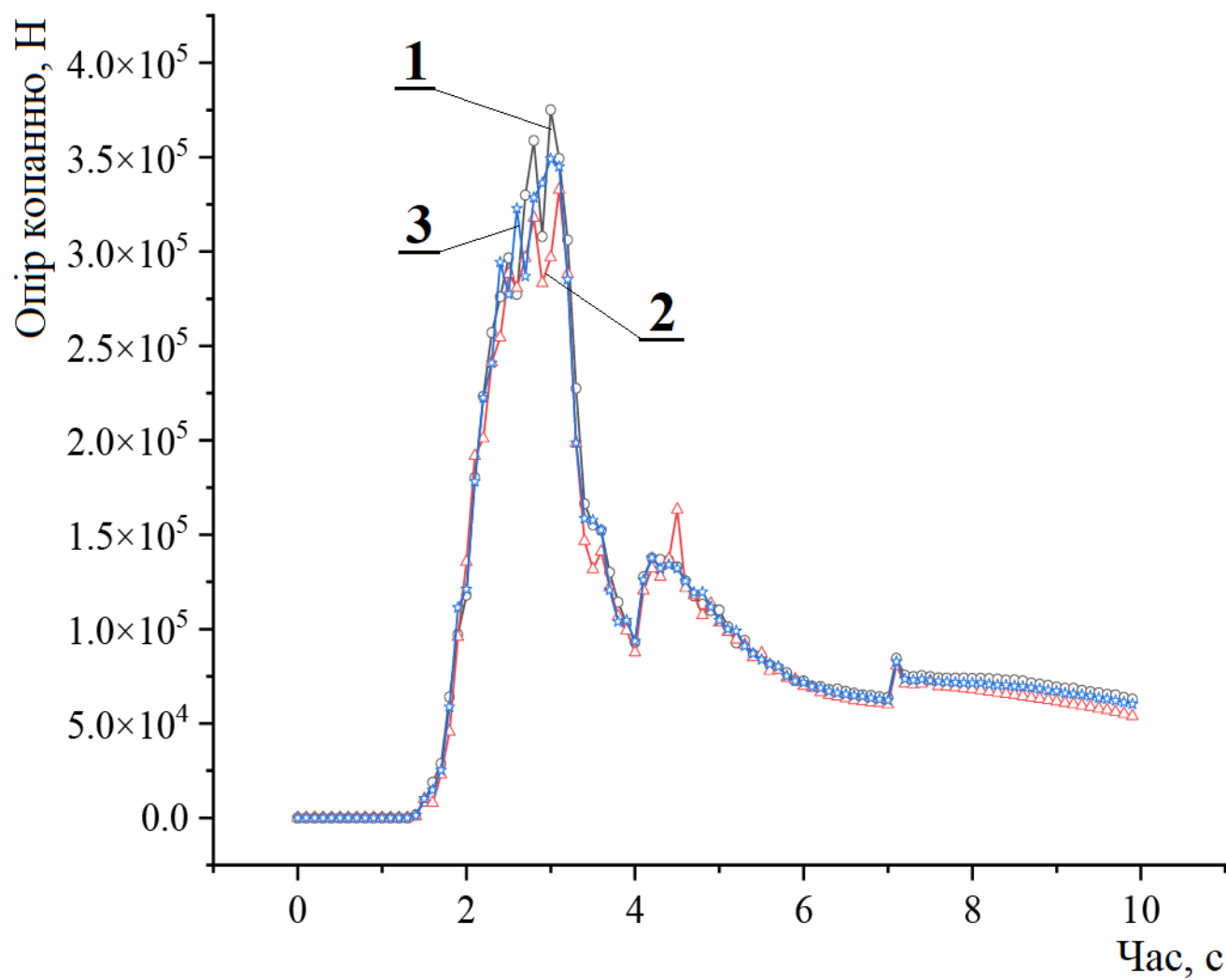


Рис 3.19 – Залежність опору копання від величини радіусу скруглення плити R2: 1 – кут горловини 620 мм; 2 – кут горловини 650 мм; 3 – кут горловини 680 мм

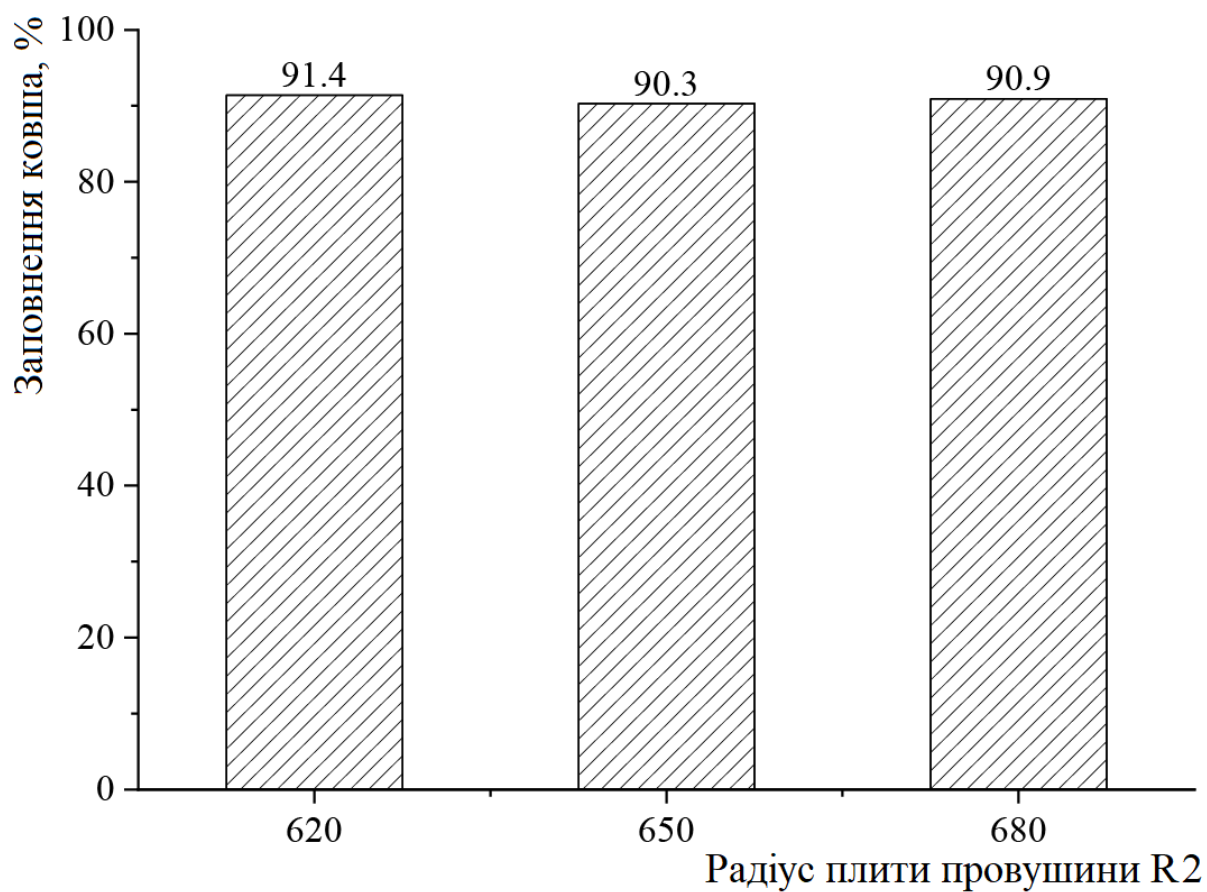


Рис 3.20 – Залежність заповнення ковша від радіусу скруглення плити R2

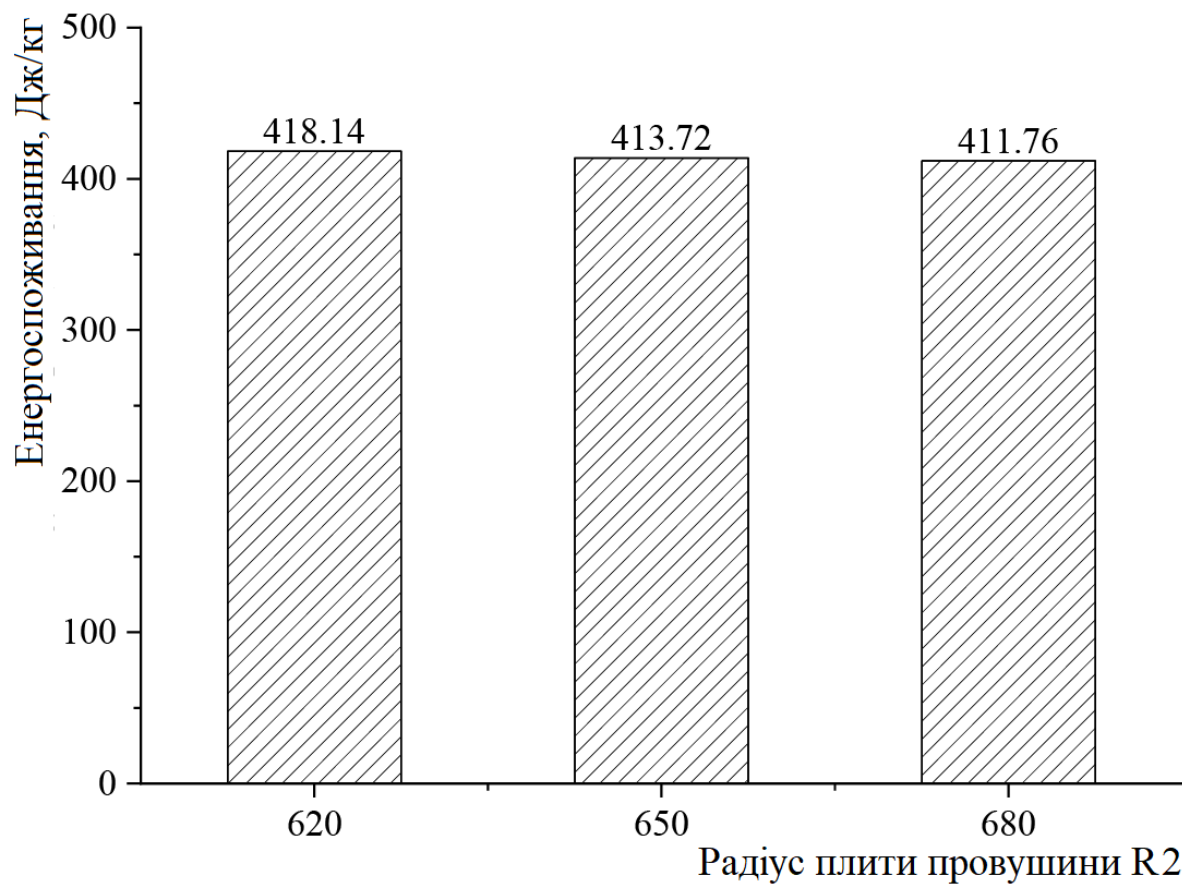


Рис 3.21 – Залежність енергоспоживання від радіусу скруглення плити R2

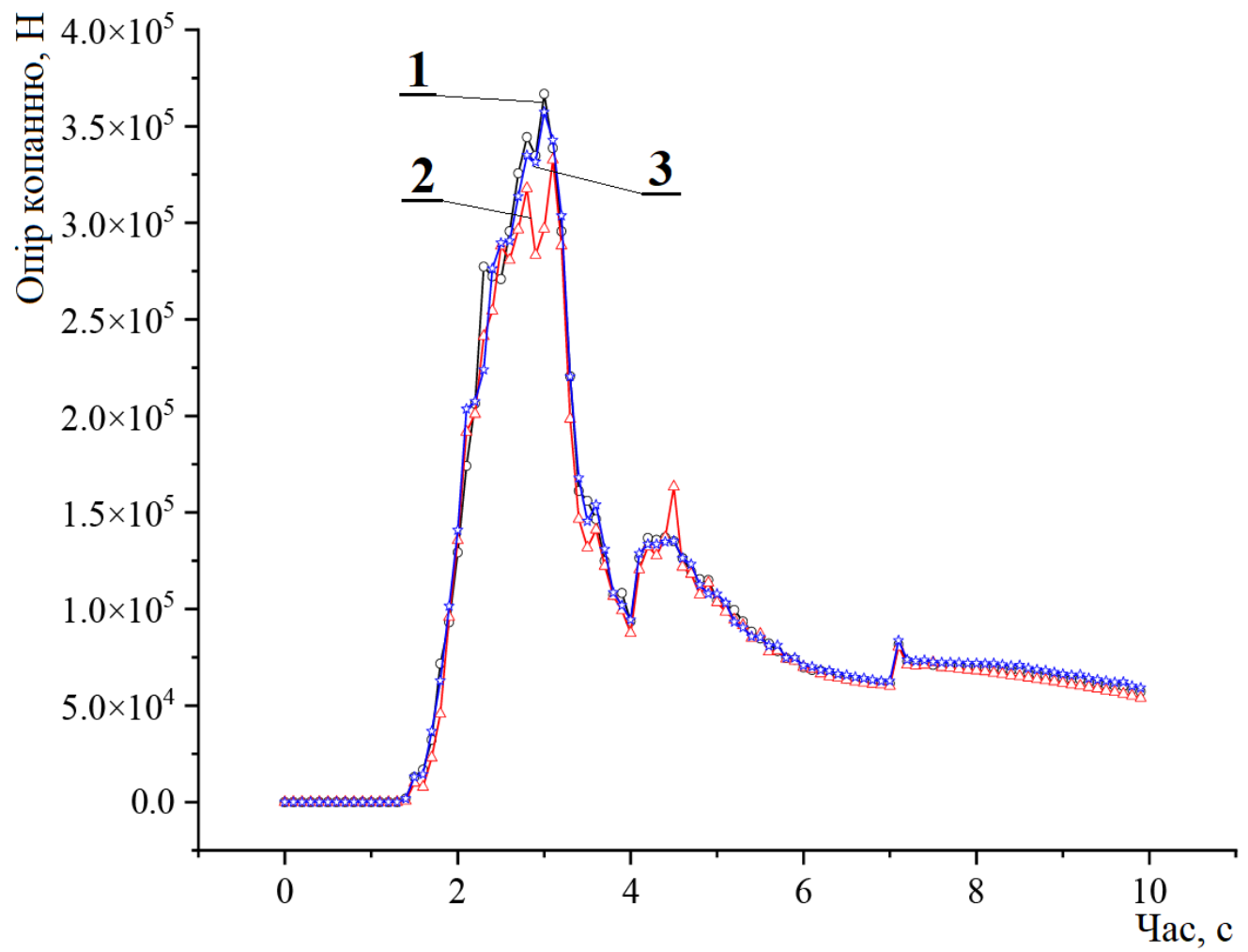


Рис 3.22 – Залежність опору копанню від величини товщини підсилювальної плити: 1 – товщина підсилювальної плити 16 мм; 2 – товщина підсилювальної плити 22 мм; 3 – товщина підсилювальної плити 28 мм

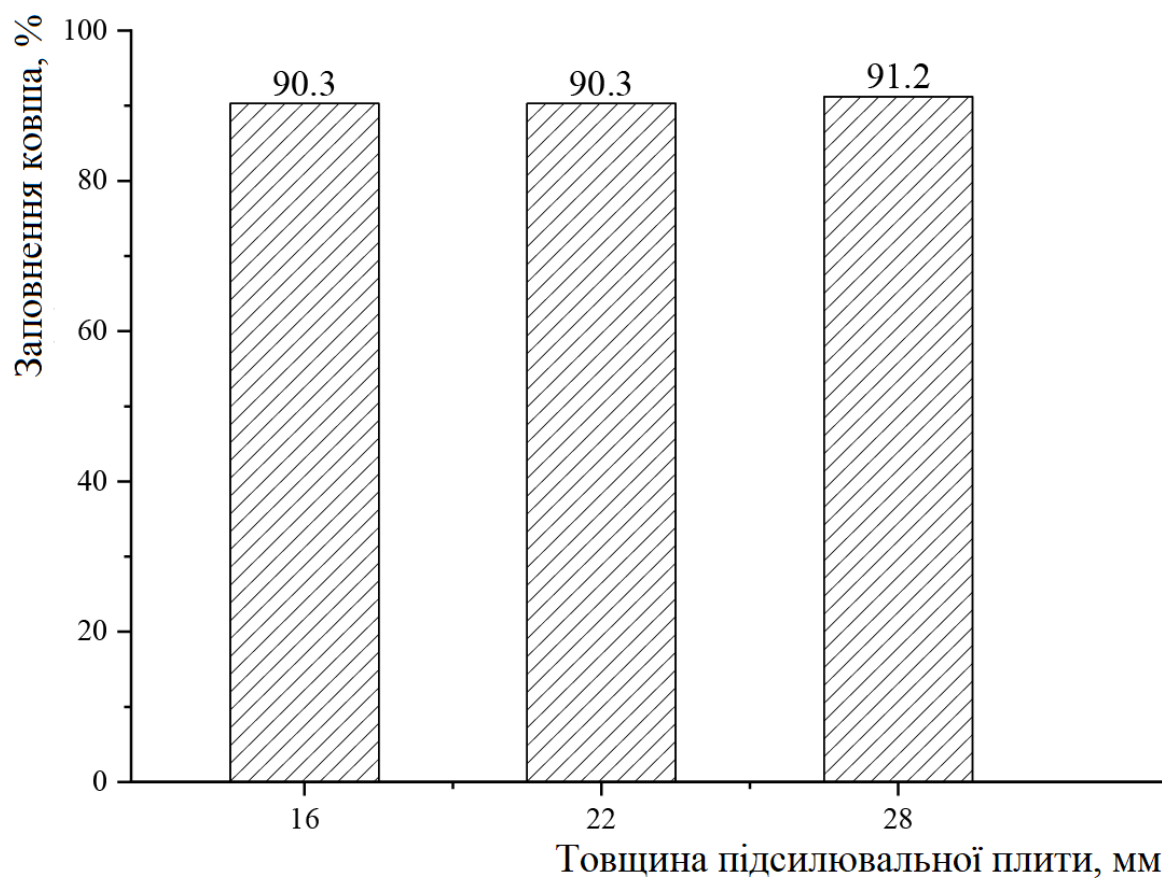


Рис 3.23 – Залежність заповнення ковша від товщини підсилювальної плити

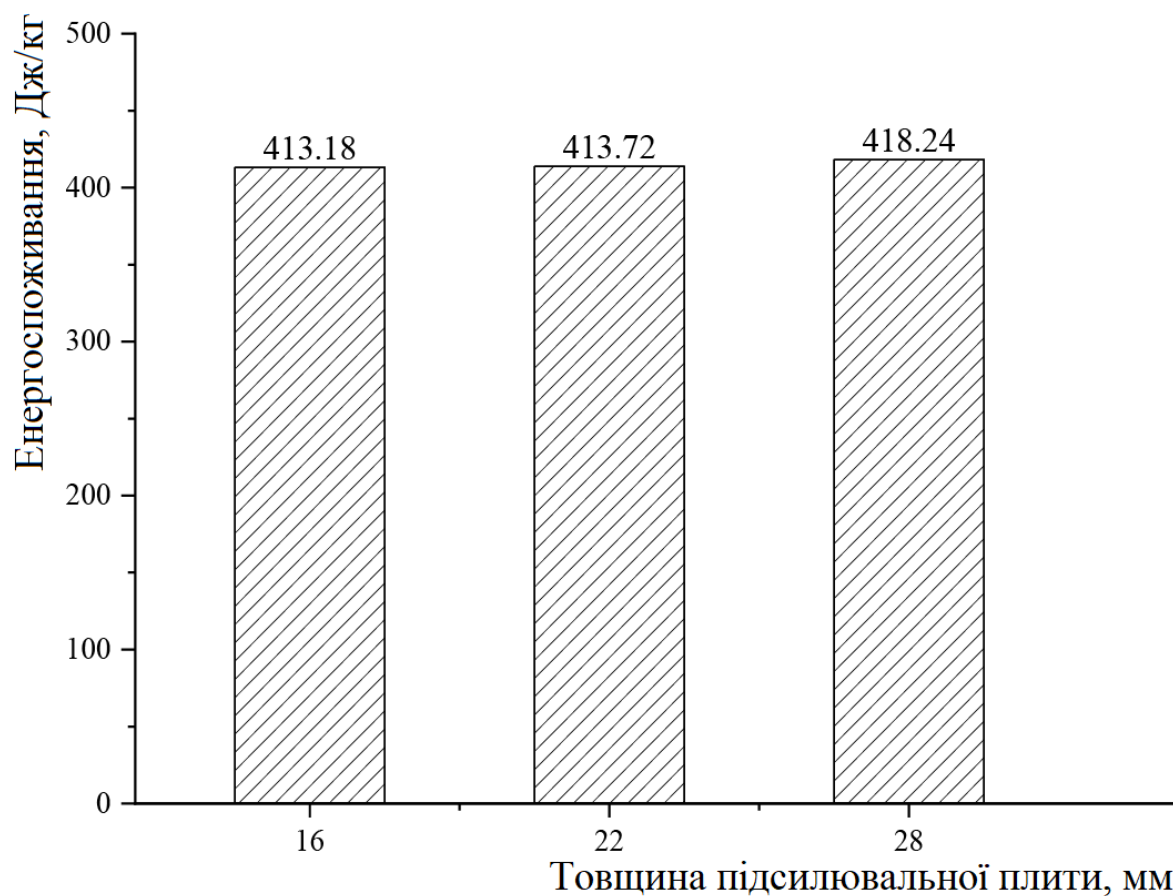


Рис 3.24 – Залежність енергоспоживання від товщини підсилювальної плити

3.3. Дослідження оптимізації параметрів ковша

На основі плану експерименту досліджено вплив конструкції ковша на його експлуатаційні характеристики, а саме опір копанню, заповнення ковша та енергоспоживання.

Як і у попередніх дослідженнях, весь процес розкопки можна поділити на чотири стадії:

- 0–2 с: стріла опускається, ковш ще не контактує з гірською породою — опір розкопці дорівнює нулю;
- 2–4 с: ковш починає контакт з породою і повинен подолати адгезію між частинками. Зі збільшенням глибини заглиблення ковша в насип опір розкопці зростає. Коли більша частина об'єму ковша заповнюється породою, опір починає зменшуватися.
- 4–6 с: рукоять ковша зупиняється, а ковш обертається навколо неї. Порода в ковші має високу рідкісність, що викликає ударні навантаження на його стінки, що призводить до значних коливань опору розкопці. Однак загальна тенденція — поступове зменшення опору.
- 6–10 с: стріла піднімається, ковш повністю заповнений породою. На початку цієї фази через одночасний рух стріли та рукояті спостерігаються коливання опору. Потім ковш починає відділятися від насипу, контакт з породою зменшується, і опір розкопці безперервно знижується. Після повного виходу ковша з насипу на нього діє лише сила тяжіння матеріалу, що залишився в ковші. Невелика кількість породи випадає — це призводить до незначного зменшення опору, але загальна тенденція залишається стабільною.

На рис 3.25 показано порівняння опору копання для різних комбінацій конструктивних параметрів ковша.

Встановлення, що мінімальний опір копанню спостерігається при комбінації 7 (табл 2.4),

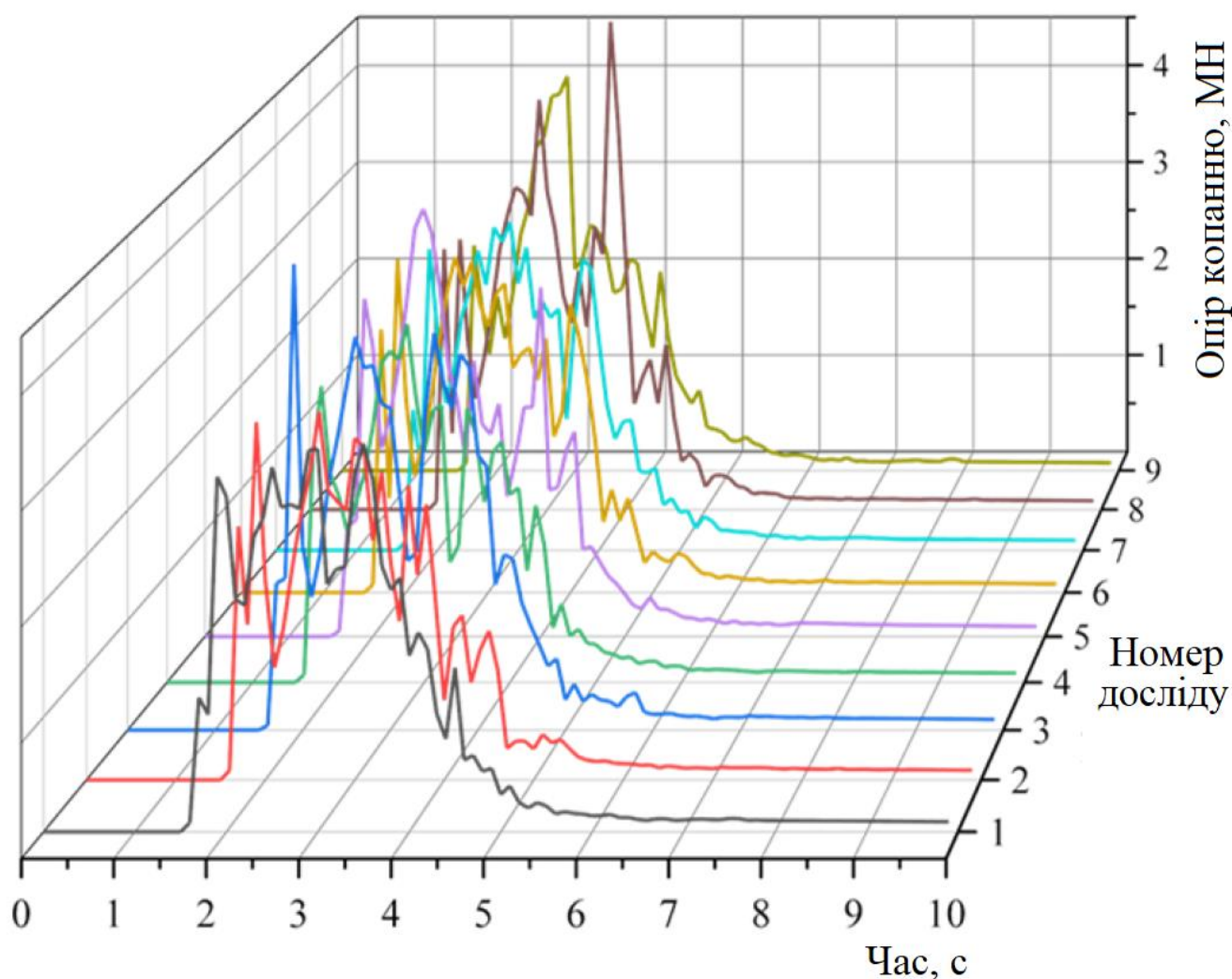


Рис 3.25 – Залежність опору копання від комбінації конструктивних параметрів

На рис 3.26 наведено порівняння енергоспоживання на одиницю маси гірської породи та коефіцієнта заповнення ковша для різних комбінацій рівнів конструктивних параметрів. У поєднанні з даними про опір розкопці для кожного набору параметрів було вибрано такі комбінації конструкції ковша, які забезпечують оптимальну експлуатаційну продуктивність (низький опір розкопці та енергоспоживання, високий коефіцієнт заповнення) за різних геологічних умов:

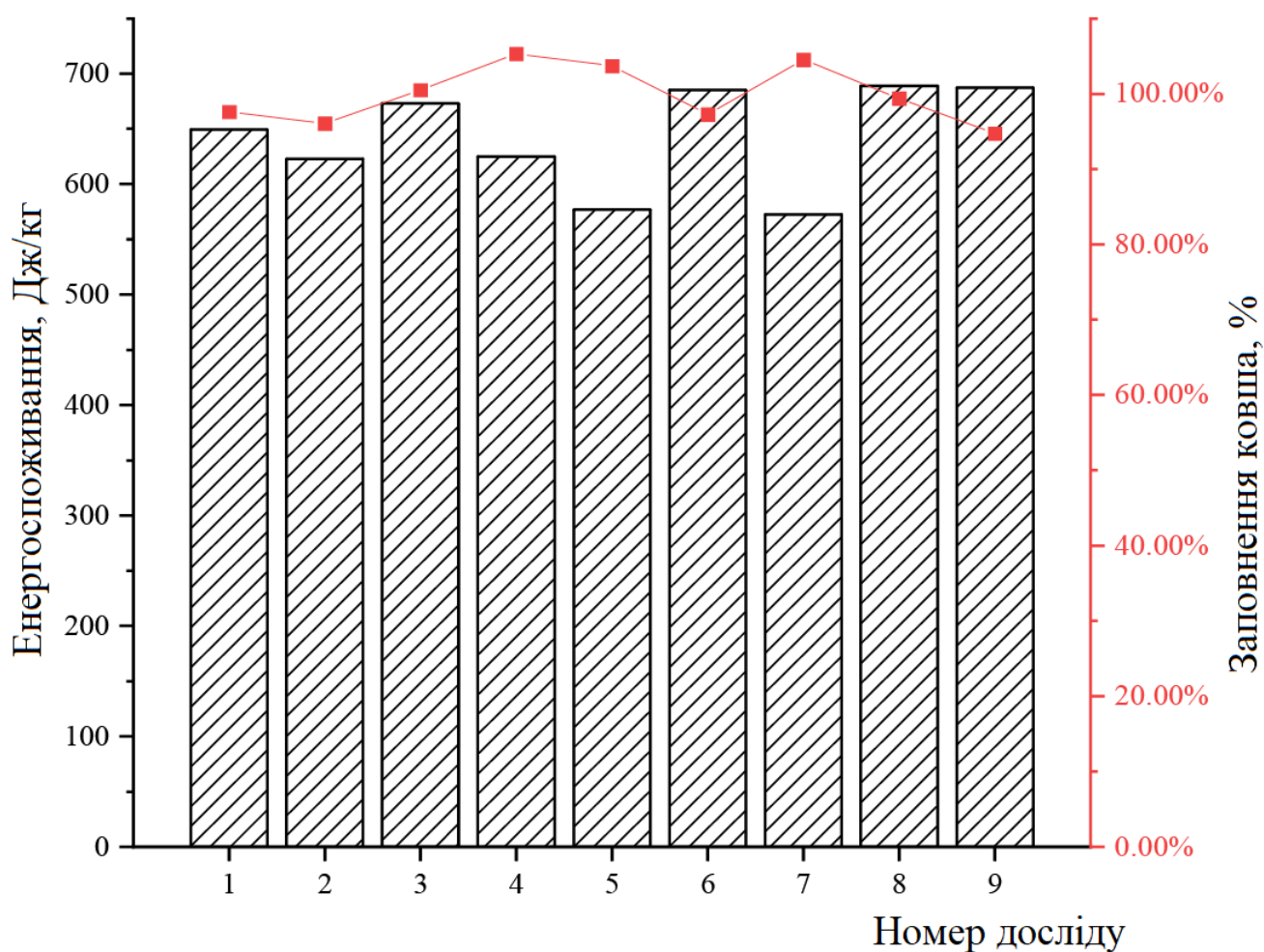


Рис 3.26 - Порівняння енергоспоживання на одиницю маси гірської породи та коефіцієнта заповнення ковша для різних комбінацій рівнів конструктивних параметрів.

Оптимальні комбінації конструктивних параметрів ковша були визначені на основі комплексної оцінки його експлуатаційної продуктивності (опір копання, енергоспоживання, коефіцієнт заповнення), як показано в Таблиці 3,2.

Таблиця 3.2 - Конструктивні комбінації параметрів оптимізованих моделей ковша за різних геологічних умов

Параметри	Базові	Оптимальні
Кут різання θ	62,3	55
Кут розширення β	7,6	7,6
Ширина ковша D	2192	2292
Радіус дуги днища ковша R	350	330
Зміна коефіцієнту заповнення, %		2,41% зб
Зміна енергоспоживання, %		16,74% зм
Зміна опору копання, %		20,16% зм

Примітка: зб — збільшення, зм — зменшення.

Висновки до розділу 3

1. У результаті проведеного дослідження встановлено закономірності формування опору копанню, коефіцієнта заповнення ковша та питомого енергоспоживання гідравлічного екскаватора XE1200 під час робочого циклу, а також визначено вплив конструктивних параметрів ковша на його експлуатаційні характеристики.
2. Проаналізовано повний робочий цикл копання, який складається з чотирьох характерних стадій. Виявлено, що максимальний опір копанню виникає у фазі активного заглиблення та заповнення ковша (1,4–4 с), коли на елементи ковша діють ударні та контактні навантаження з боку дискретних частинок породи. Після завершення заповнення ковша опір поступово зменшується й у фазі підйому зводиться переважно до ваги завантаженого матеріалу.
3. Встановлено розподіл внеску елементів ковша у загальний опір копанню. Найбільша частка опору на ранніх етапах припадає на зуби ковша, які першими взаємодіють із породою. У міру заглиблення збільшується роль різальної кромки та бічних стінок, а після виходу ковша з насипу основне навантаження сприймає днище ковша, що утримує масу матеріалу. Це

свідчить про різну функціональну участь елементів ковша в різні етапи циклу.

4. Розраховано коефіцієнт заповнення ковша, який для базової конструкції становить 90,3 %, що забезпечується фактичним завантаженням 6426,06 кг за місткості 7 м³ при насипній щільності 1016,7 кг/м³. Питоме енергоспоживання при цьому дорівнює 413,72 Дж/кг, що є характерним значенням для заданих умов розробки.
5. Аналіз впливу конструктивних параметрів ковша показав, що найбільше на експлуатаційні характеристики впливають кут різання та кут горловини ковша. Зі збільшенням кута різання до 35° зростають як опір копанню, так і питоме енергоспоживання. Разом з тим збільшується коефіцієнт заповнення, що пов'язано з інтенсивнішим надходженням матеріалу вздовж різальної кромки. Таким чином, надмірне збільшення кута різання не є доцільним через різке зростання енерговитрат.
6. Встановлено, що збільшення кута горловини ковша до 62,3° забезпечує максимальний коефіцієнт заповнення та водночас знижує питоме енергоспоживання. Отже, цей параметр має вирішальне значення для оптимізації маси матеріалу, який потрапляє у ковш, та підвищення енергоефективності процесу.
7. Зміна кута розширення ковша незначно впливає на опір копанню, однак суттєво позначається на масі завантаженого матеріалу. При цьому коефіцієнт заповнення не має однозначної тенденції, оскільки разом зі збільшенням завантаження зростає й власна місткість ковша. Питоме енергоспоживання зростає при куті розширення 10°, що свідчить про недоцільність надмірного збільшення цього параметра.

8. Дослідження впливу параметрів провущини ковша (товщина пластини, товщина підсилювальної плити, радіуси скруглення) показало, що геометрія підвіски практично не впливає на опір копанню, коефіцієнт заповнення та енергоспоживання. Це пояснюється тим, що провущини не взаємодіють із породою і не змінюють траєкторію руху ковша.
9. Проведена оптимізація конструктивних параметрів, виконана за методикою планування експерименту, дала змогу визначити комбінацію параметрів, що забезпечує мінімальний опір копанню та раціональне енергоспоживання при високому коефіцієнті заповнення. Встановлено, що оптимальна комбінація параметрів (комбінація 7 за даними таблиці 2.4) забезпечує найкраще співвідношення продуктивності до витрат енергії, а отже є найбільш ефективною у заданих геологічних умовах.
10. Таким чином, результати дослідження підтверджують значний вплив конструктивної геометрії ковша на енергоефективність процесу розробки гірських порід. Найважливішими параметрами для оптимізації є кут різання та кут горловини ковша. Водночас параметри провущини мають другорядне значення. Отримані висновки можуть бути використані для подальшого вдосконалення конструкції ковша екскаватора з метою підвищення продуктивності та зниження енергетичних витрат.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання, що полягає у підвищенні продуктивності, енергоефективності та довговічності робочого обладнання малопотужного гідравлічного екскаватора типу «зворотна лопата» при експлуатації на складах корисних копалин, відвалах та будівельних майданчиках шляхом аналізу впливу та оптимізації геометричних параметрів на процес копання.

1. У межах дослідження було сформовано комплексну методику оцінювання впливу геометричних параметрів ковша гірничого гідравлічного екскаватора на ефективність процесу копання. Методика поєднує імітаційне моделювання процесу зачерпування, аналіз конструктивних чинників та їх подальшу оптимізацію.
2. На першому етапі розроблено детальну модель взаємодії ковша з ґрунтовим масивом, побудовану на основі реальних геометричних характеристик екскаватора XCMG XE1200 та типових умов роботи у забої. Спрощення моделі було проведено раціонально — вилучено лише ті компоненти, що не впливають на процеси структурної взаємодії та не змінюють механіку зачерпування. Це забезпечило високу швидкість розрахунків без втрати достовірності. Процес копання поділено на чотири стадії, що дозволило детально проаналізувати зміну опору копанню, коефіцієнта заповнення ковша та енергоспоживання впродовж циклу.
3. Другий етап передбачав системне дослідження впливу ключових конструктивних параметрів ковша. Визначено набір геометричних характеристик, які потенційно формують зусилля копання та ефективність заповнення: кут різання, кут горловини, кут розширення, параметри провущин та підсилювальних елементів. Поглиблений аналіз обґрунтував включення саме цих параметрів до факторного простору, адже вони найбільшою мірою визначають місткість ковша, характер течії породи вздовж лобової та бокових поверхонь, а також міцність вузла кріплення.

4. На заключному етапі сформовано оптимізаційну задачу для найвпливовіших параметрів із використанням планування експерименту на основі латинських квадратів. Це дозволило мінімізувати кількість необхідних симуляцій за умови повного охоплення факторного простору та забезпечило можливість об'єктивного визначення конструктивних рішень, що знижують опір копанню, зменшують енергетичні витрати та підвищують коефіцієнт заповнення ковша.
5. Розроблена методика забезпечує комплексний та об'єктивний підхід до оцінювання роботи ковша, дає змогу виявити домінуючі конструктивні чинники та створює основу для формування практичних рекомендацій щодо раціональної геометрії ковша гірничого гідравлічного екскаватора. Вона також закладає підґрунтя для подальшого впровадження оптимізованих конструкцій, здатних підвищити експлуатаційну ефективність машини та зменшити навантаження на елементи робочого обладнання.
6. У результаті проведеного дослідження встановлено закономірності формування опору копанню, коефіцієнта заповнення ковша та питомого енергоспоживання гідравлічного екскаватора ХЕ1200 під час робочого циклу, а також визначено вплив конструктивних параметрів ковша на його експлуатаційні характеристики.
7. Проаналізовано повний робочий цикл копання, який складається з чотирьох характерних стадій. Виявлено, що максимальний опір копанню виникає у фазі активного заглиблення та заповнення ковша (1,4–4 с), коли на елементи ковша діють ударні та контактні навантаження з боку дискретних частинок породи. Після завершення заповнення ковша опір поступово зменшується й у фазі підйому зводиться переважно до ваги завантаженого матеріалу.
8. Встановлено розподіл внеску елементів ковша у загальний опір копанню. Найбільша частка опору на ранніх етапах припадає на зуби ковша, які першими взаємодіють із породою. У міру заглиблення збільшується роль різальної кромки та бічних стінок, а після виходу ковша з насипу основне навантаження сприймає днище ковша, що утримує масу матеріалу. Це

свідчить про різну функціональну участь елементів ковша в різні етапи циклу.

9. Розраховано коефіцієнт заповнення ковша, який для базової конструкції становить 90,3 %, що забезпечується фактичним завантаженням 6426,06 кг за місткості 7 м³ при насипній щільності 1016,7 кг/м³. Питоме енергоспоживання при цьому дорівнює 413,72 Дж/кг, що є характерним значенням для заданих умов розробки.
10. Аналіз впливу конструктивних параметрів ковша показав, що найбільше на експлуатаційні характеристики впливають кут різання та кут горловини ковша. Зі збільшенням кута різання до 35° зростають як опір копанню, так і питоме енергоспоживання. Разом з тим збільшується коефіцієнт заповнення, що пов'язано з інтенсивнішим надходженням матеріалу вздовж різальної кромки. Таким чином, надмірне збільшення кута різання не є доцільним через різке зростання енерговитрат.
11. Встановлено, що збільшення кута горловини ковша до 62,3° забезпечує максимальний коефіцієнт заповнення та водночас знижує питоме енергоспоживання. Отже, цей параметр має вирішальне значення для оптимізації маси матеріалу, який потрапляє у ковш, та підвищення енергоефективності процесу.
12. Зміна кута розширення ковша незначно впливає на опір копанню, однак суттєво позначається на масі завантаженого матеріалу. При цьому коефіцієнт заповнення не має однозначної тенденції, оскільки разом зі збільшенням завантаження зростає й власна місткість ковша. Питоме енергоспоживання зростає при куті розширення 10°, що свідчить про недоцільність надмірного збільшення цього параметра.
13. Дослідження впливу параметрів провусини ковша (товщина пластини, товщина підсилювальної плити, радіуси скруглення) показало, що геометрія підвіски практично не впливає на опір копанню, коефіцієнт заповнення та енергоспоживання. Це пояснюється тим, що провусини не взаємодіють із породою і не змінюють траєкторію руху ковша.

14. Проведена оптимізація конструктивних параметрів, виконана за методикою планування експерименту, дала змогу визначити комбінацію параметрів, що забезпечує мінімальний опір копанню та раціональне енергоспоживання при високому коефіцієнті заповнення. Встановлено, що оптимальна комбінація параметрів (комбінація 7 за даними таблиці 2.4) забезпечує найкраще співвідношення продуктивності до витрат енергії, а отже є найбільш ефективною у заданих геологічних умовах.
15. Таким чином, результати дослідження підтверджують значний вплив конструктивної геометрії ковша на енергоефективність процесу розробки гірських порід. Найважливішими параметрами для оптимізації є кут різання та кут горловини ковша. Водночас параметри провушини мають другорядне значення. Отримані висновки можуть бути використані для подальшого вдосконалення конструкції ковша екскаватора з метою підвищення продуктивності та зниження енергетичних витрат.