



## ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.15587/2706-5448.2026.360402

**ВЕРИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МАСОВОЇ ВИТРАТИ ВОЛОГИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ БЕТОНОЗМІШУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК** (стор. 6–11)

Левченко О. П., Коробко Б. О., Івахно О. В., Рубель В. П.

Об'єктом дослідження є математична модель масової витрати вологих сипких матеріалів (піску будівельного) у системах живлення бетонозмішувальних установок (БЗУ). Предметом дослідження є процес верифікації зазначеної математичної моделі в умовах реального виробництва.

Проблема, що вирішувалася, полягає у критичній нестабільності масової витрати при використанні натурального промитого піску. Підвищена вологість (6–10%) змінює масовий режим течії на воронковий та провокує утворення склепінь над розвантажувальним отвором. Коефіцієнт варіації дозування за таких умов сягає 12–25%, що у 4–8 разів перевищує державний норматив точності.

Верифікацію математичної моделі виконано за результатами промислових випробувань на реальній БЗУ продуктивністю 60 м<sup>3</sup>/год, спроектованій та введеної у дію авторами, та діючій дотепер. Вони підтверджують, що встановлення активного розпушувача з частотою обертання  $\omega_{пр} \geq 2,5 \cdot \omega_{кр}$  повністю вирішує проблему стабілізації дозування у всьому діапазоні виробничих вологостей. Встановлено порогові частоти його обертання залежно від вологості (зокрема, 87 об/хв для 6%). Побудована тривимірна поверхня відгуку доводить: для гарантованої похибки дозування  $\leq 3\%$  робоча швидкість розпушувача має у 2,5 рази перевищувати порогову. Дотримання цього режиму знижує фактичну варіацію до 1,8%. Також статистично описано математичну модель масової витрати ( $R^2 = 0,963$ ) і визначено емпіричні коефіцієнти: опору штиря в матеріалі (1,12) та ефективності механізму (2,8).

Отриманий ефект пояснюється штучним стрибкоподібним переведенням матеріалу з воронкового назад у масовий режим течії. За досягнення критичної швидкості обертання штирів інтенсивно руйнуються капілярні зв'язки між зернами, при цьому знижують ефективний кут внутрішнього тертя та повністю ліквідують застійні зони в бункері. Усе це миттєво відновлює стабільне безперервне гравітаційне витікання.

На практиці результати застосовуються для інженерного розрахунку систем живлення бетонозмішувальних установок і для суміжних галузей.

**Ключові слова:** бетонозмішувальна установка, розпушувач, вологий пісок, стабілізація дозування, математична модель, верифікація.

## МЕХАНІКА

DOI: 10.15587/2706-5448.2026.353663

**ГЛИБШЕ РОЗУМІННЯ ПОВЕДІНКИ ПЕРЕМІШУВАННЯ ҐРУНТУ ПІД ВПЛИВОМ СТАРІННЯ ШЛЯХОМ ПОРІВНЯННЯ ПРОГНОЗНОГО ПІДХОДУ ТА ПРАКТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ** (стор. 12–18)

Farouk Menari, Sabah Moussaoui, Mourad Belgasmia, Khelifa Abbeche

Об'єктом цього дослідження є поведінка колони змішування ґрунту.

Проблема, яку має на меті вирішити це дослідження, полягає в кращому розумінні поведінки ґрунтових сумішей під впливом циклів зволоження-висихання (старіння) та їх впливу на міцність на стиск без обмеження.

Дослідження складається з параметричного лабораторного (експериментального) дослідження з приготуванням різних сумішей, що містять різний відсоток дрібних частинок, цементу та водоцементних (В/Ц) співвідношень. Було досліджено вісім різних рецептур: еталонну рецептуру, три рецептури з 25% дрібних частинок та різним дозуванням цементу, три рецептури з 10% дрібних частинок та дві з 5% дрібних частинок. Для відстеження розвитку цих результатів було використано еталонний зразок. Ця варіація складу суміші дозволяє спостерігати вплив розподілу розмірів частинок, вмісту глини та вмісту цементу на відносну міцність призм на стиск без обмеження. Результати показують, що відносна міцність призм на стиск зменшується приблизно на 41% між 3 та 24 циклами, незалежно від вмісту цементу. Він збільшується на 18–25% зі збільшенням вмісту цементу для всіх рецептур, але зменшується приблизно на 23% зі збільшенням вмісту дрібних частинок. Це дослідження дозволило запропонувати рівняння для прогнозування зміни відносної міцності на стиск як функції часу, кількості циклів зволоження-сушіння, вмісту цементу та вмісту дрібних частинок. Різні отримані результати підкреслюють вплив вмісту дрібних частинок та цементу на продуктивність та довговічність колон для змішування ґрунту, а також підкреслюють важливість проведення ретельного параметричного дослідження в лабораторії для сприяння ефективному та економічному проектуванню цих колон.

**Ключові слова:** дрібні частинки, змішування ґрунту, довговічність, пошкодження, цикл старіння, міцність на стиск, дозування цементу.

## МЕТАЛУРГІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.15587/2706-5448.2026.362711

**РОЗРОБКА ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ СФЕРОЇДИЗУЮЧОГО ВІДПАЛУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ СФЕРОЇДИЗАЦІЇ ЦЕМЕНТИТУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ** (стор. 19–26)

Швачич Г. Г., Соболенко М. О., Іващенко В. П., Манько Т. А., Мороз Б. І., Мещеряков А. І.

Об'єктом дослідження є процес сфероїдизації цементиту низьковуглецевої сталі 20Г2Р під час термічної обробки, зокрема сфероїдируючого відпалу. Особлива увага у проведенні досліджень приділяється впливу вихідного структурного стану сталі, температурних режимів і способів нагріву на формування мікроструктури заготовки.

Традиційні способи сфероїдируючого відпалу характеризуються значною тривалістю режиму, яка досягає більше 10 годин та, у зв'язку з цим, енергетичними витратами, що обмежує ефективність технологічного процесу. Особливо це стосується низьковуглецевих сталей із відносно слабким термодинамічним стимулом сфероїдизації.

Проблематика досліджень полягає у необхідності скорочення тривалості сфероїдируючого відпалу сталі та зниження енергетичних витрат при одночасному забезпеченні рівномірного розподілу глобул цементиту у феритній матриці.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробленні швидкісних режимів сфероїдизуючого відпалу сталі 20Г2Р із використанням вихідної феритно-бейнітної структури та неізотермічної витримки з підвищенням температури, на відміну від відомих досліджень, які базуються на тривалих ізотермічних витримках. Показано, що загальна тривалість сфероїдизуючого відпалу низьковуглецевих сталей суттєво залежить від вихідного структурного стану заготовки. Встановлено, що перехід від феритно-перлітного до феритно-бейнітного вихідного структурного стану забезпечує скорочення тривалості сфероїдизації цементиту з 1500–1800 с до 200–450 с.

Вивчено особливості інтенсифікації сфероїдизуючого відпалу низьковуглецевих сталей та встановлено вплив зміни значень термодинамічного та кінетичного чинників під час структурного перетворення. Доведена ефективність використання неізотермічної витримки з підвищенням температури у певному інтервалі температур та оптимізації параметрів сфероїдизуючої обробки.

Практична значущість отриманих результатів полягає у впровадженні розроблених швидкісних режимів сфероїдизуючого відпалу низьковуглецевої сталі 20Г2Р для виробництва бунтового підкату та дроту діаметром 6,0–20,0 мм. Отримані структурні стани заготовок забезпечують необхідний комплекс властивостей для подальшого виготовлення металовиробів методом холодної висадки, зокрема виробів складної конфігурації. Запропоновані підходи повністю придатні та відповідають вимогам за технологічними та механічними властивостями заготовок для виготовлення металовиробів методом холодної висадки.

**Ключові слова:** сфероїдизація, термодинаміка, кінетика, структурні перетворення, неізотермічна витримка, мікроструктура, моделювання процесів.

## ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

DOI: 10.15587/2706-5448.2026.364282

### ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА ГЕОМЕХАНІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ГЛИБОКИХ КАР'ЄРІВ РЕГЕНЕРАТИВНИМИ КОНВЕЄРАМИ У КРИВОМУ РОЗІ (стор. 27–33)

Болотніков А. В., Романенко А. О., Бровко Д. В., Перегудов В. В., Кривенко Ю. Ю., Романенко О. В.

Об'єктом дослідження є технологічний процес переміщення гірничої маси під час закриття глибоких кар'єрів. Цей процес передбачає транспортування розкритих порід у зовнішні відвали на денній поверхні під час активної розробки, з подальшою рекультивацією шляхом внутрішнього відвалоутворення. На етапі рекультивації гірнична маса переміщується зі зовнішніх відвалів у вироблений простір за допомогою регенеративних конвеєрних систем. Головна проблема, що потребує вирішення, полягає у зниженні енергоємності таких природоохоронних робіт без втрати геомеханічної стійкості укусу відвалу. Традиційні способи транспортування базуються на використанні пального, що призводить до високих викидів вуглецю та значних експлуатаційних витрат. Цей екологічний та фінансовий тягар змушує шукати рішення для утилізації гравітаційної потенційної енергії гірничої маси, що переміщується.

Дослідження поєднує аналіз граничної рівноваги для оцінки стійкості укусів із чисельним моделюванням взаємопов'язаного енерго-геомеханічного балансу. Щоб точно визначити точки прикладання сили тяжіння для кожного об'єму породи, застосовано покровову вертикальну дискретизацію уступів у поєднанні з методом геометричних центроїдів.

Моделювання системи рекультивації, розробленої для кар'єру завглибшки 500 метрів у Криворізькому регіоні України, доведено, що регенеративні конвеєри здатні акумулювати до 542,36 млн кВт·год енергії (1,24–1,34 кВт·год/м<sup>3</sup>). Розрахунками виявлено технологічний зазор у 6,9% від теоретичної межі. Метод центроїда забезпечив нульову математичну похибку, тоді як метод бісекції площі занизив енергетичний потенціал на 11,7%.

Отримані результати пропонують практичну основу для розробки проектів рекультивації та декарбонізації на глибоких кар'єрах. Завдяки впровадженню запатентованого технологічного рішення (Патент України № 158796), підприємства отримують можливість перетворити стандартні екологічні заходи на прямий енергогенеруючий актив, що працює на користь бізнесу.

**Ключові слова:** рекультивація, кар'єр, конвеєр, регенерація, геомеханіка, енергоефективність, відвалоутворення, рекуперация, декарбонізація, моделювання.

DOI: 10.15587/2706-5448.2026.363907

### УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ ДВОХ ГІДРОДИНАМІЧНО ІЗОЛЮВАНИХ РІЗНОПРОНИКНИХ ПЛАСТІВ В УМОВАХ СПІЛЬНОЇ РОЗРОБКИ ЄДИНОЮ СІТКОЮ СВЕРДЛОВИН (стор. 34–42)

Кондрат Р. М., Матійшин А. І.

Об'єктом дослідження є фільтраційні процеси, що спостерігаються в ході спільної розробки єдиною сіткою свердловин двох гідродинамічно ізолюваних різнопроникних пластів. Предметом дослідження є взаємодія різнопроникних, гідродинамічно ізолюваних пластів (верхнього низькопроникного  $k_1$  та нижнього високопроникного  $k_2$ ) у процесі розробки двошарового родовища за наявності непроникної перетинки між пластами.

У дослідженні вирішувалась проблема впливу співвідношення проникностей на кінцеві значення дебітів газу, пластового тиску, коефіцієнтів газовилучення та тривалості розробки родовища.

Робота спрямована на дослідження особливостей вилучення газу з двох різнопроникних пластів з непроникною перетинкою, які розробляються єдиною сіткою свердловин.

У ході дослідження визначено вплив співвідношення проникностей пластів ( $n = k_2/k_1$ ) двошарового родовища на кінцевий коефіцієнт газовилучення. Встановлено, що із збільшенням значення  $n$  високопроникний пласт виснажується інтенсивніше та швидше відключається з розробки. Так, на завершальній стадії розробки за  $n = 10$  у високопроникному пласті пластовий тиск дорівнює 3,00 МПа, а у низькопроникному пласті – 4,77 МПа. Коефіцієнт газовилучення для низькопроникного пласта за  $n = 10$  становить лише 83,94%, а для високопроникного пласта – 90,11%. Підвищення газовилучення можна досягти шляхом переведення свердловин на одночасно-роздільну експлуатацію на певній стадії розробки, проведенням оброблень привибійних зон низькопроникних пластів.

Отримані результати ефективно можуть бути використані при спільній розробці двох гідродинамічно ізолюваних різнопроникних пластів за спільної розробки єдиною сіткою свердловин. Це дозволяє підвищити коефіцієнт газовилучення та ефективність дорозробки двох різнопроникних пластів з непроникною перетинкою.

**Ключові слова:** родовище, моделювання, проникність, коефіцієнт газовилучення, пластовий тиск, дебіт газу, непроникна перетинка.

DOI: 10.15587/2706-5448.2026.363759

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ СИНТЕЗУ ТА ДИСОЦІАЦІЇ ГАЗОВИХ ГІДРАТІВ У ГАЗОПРОВОДІ ПІД ДІЄЮ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ (стор. 43–49)**

Подоляк Т. М., Дмитренко В. І.

Об'єктом дослідження є тепломасообмінні процеси, які відбуваються на поверхні гранули газогідрату, який рухається в газопроводі.

В дослідженні вирішувалась проблема нафтогазової галузі – боротьба з утворенням газових гідратів (ГГ) у системах видобутку та транспортування вуглеводнів. Запропоновано перспективний підхід до інтенсифікації дисоціації гідратів шляхом застосування надвисокочастотного електромагнітного випромінювання. Особливості отриманих результатів полягають у розробці математичної моделі, в якій об'єднано два процеси синтезу та дисоціації газових гідратів з урахуванням гідродинамічних процесів у трубопроводі. Головними відмінностями запропонованої математичної моделі є: одночасне урахування двох взаємопротилежних процесів синтезу та дисоціації газогідрату на поверхні гранули; ці процеси відбуваються під час руху газогідратної гранули усередині газопроводу; розігрів гранули газогідрату відбувається внаслідок поглинання нею прямого та відбитого багатомодового надвисокочастотного електромагнітного випромінювання.

Отримано комплексну апроксимаційну залежність для визначення необхідної потужності випромінювача  $P_w = 124C_{gh}/R^{1.7}$ , яка дозволяє оперативно розраховувати необхідну мінімальну потужність магнетрона для боротьби з гідратоутворенням.

Встановлено, що для руйнування частинок малих розмірів (<0,01 мм), навіть якщо їх концентрація низька (0,01–0,02%), потрібен випромінювач порівняно великої потужності (3–5 кВт). Теж саме спостерігалось у разі накопичення ГГ до великих концентрацій (>0,1%) при розмірі частинок 0,05–0,1 мм. Тому найбільш вигідною стратегією боротьби з накопиченням ГГ є його активна руйнація при досягненні розмірів 0,02–0,05 мм, які не шкодять перебігу основного технологічного процесу.

Отримані залежності є основою для вдосконалення технологій підготовки газу в умовах гідратоутворення шляхом використання енергії надвисокочастотного випромінювання.

**Ключові слова:** газові гідрати, надвисокочастотне електромагнітне випромінювання, дисоціація, математичне моделювання, газопровід, енергоефективність, тепловий баланс.

**ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ПРОМИСЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА**

DOI: 10.15587/2706-5448.2026.358836

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПЕРЕНЕСЕННЯ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОНІВ У ПРИСТРОЯХ ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХУ ІЗ ЗАМКНУТИМ ДРЕЙФОМ ЕЛЕКТРОНІВ (стор. 50–55)**

Shahram Roshanpour

Об'єктом дослідження є фізичний процес перенесення енергії електронів у пристроях електричного руху із замкнутим дрейфом електронів. До таких пристроїв належать іонізаційні камери плазмо-іонних двигунів, двигуни на ефекті Холла, геліконні двигуни, а також джерела високочастотної плазми, іонів та електронів, у яких довжина вільного пробігу при зіткненнях електронів є невеликою порівняно з шириною каналу. Це означає, що функцію розподілу швидкостей електронів не можна розглядати як функцію Максвелла.

Висоту потенційного бар'єру в прикордонному біполярному шарі та середню енергію електронів, що виходять із плазми, слід розраховувати за кінетичною моделлю. Наявність потенційного бар'єру також означає, що в переносі маси та енергії беруть участь лише електрони, енергія яких перевищує висоту бар'єру. Отже, класична модель, яка охоплює весь спектр, у цьому випадку не застосовується.

Це означає, що результати дослідження повинні бути застосовані до об'єкта, що дозволить вдосконалити його, тобто процес перенесення енергії електронів має бути описаний за допомогою виразу, отриманого в ході цього дослідження.

У цій роботі зазначена проблема, що вирішується за допомогою засобів компромісної кінетично-флюїдної моделі, що враховує наявність факторів ізотропії розподілу проекцій швидкості електронів. Показано, що виведення маси та енергії з плазми здійснюється виключно електронами у вузькому спектральному діапазоні, що становить приблизно половину електронної температури. Рівняння нульового та першого кутових моментів функції розподілу записано з наближеним позначенням радіально-азимутальної складової другого кутового моменту як тензора другого рангу. Показано, що відношення щільності потоків енергії та маси в об'ємі майже дорівнює такому на межі з біполярним шаром, що дозволяє замкнути систему рівнянь математичної моделі процесів в електричних русійних пристроях із замкнутим дрейфом електронів. Отримані результати можуть бути застосовані у випадку дозвукowego потоку електронів, що є типовим для плазми всіх типів електричних двигунів.

**Ключові слова:** дрейф закритих електронів, потенційний бар'єр, функція розподілу швидкостей, потік електронів за масою та енергією.