

© Є.А. Коровяка¹, А.В. Рибак¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ ПРИВИБІЙНОЇ ЗОНИ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ СВЕРДЛОВИН

Ye. Koroviaka¹, <https://orcid.org/0000-0002-2675-6610>

A. Rybak¹, <https://orcid.org/0009-0002-7886-5525>

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

JUSTIFICATION OF RATIONAL PARAMETERS OF A DEVICE FOR HYDRODYNAMIC TREATMENT OF THE NEAR-WELLBORE ZONE OF HYDROGEOLOGICAL WELLS

Мета. Розрахунок раціональних конструктивних та режимних параметрів пристрою гідродинамічної дії, що забезпечують максимальне відновлення проникності приви́бійної зони при мінімальних енерговитратах та збереженні стійкості фільтрової частини свердловини.

Методика. Розрахунок виконано за математичною моделлю нестационарної фільтрації з урахуванням зміни проникності через декольматацию. Модель поєднує модифікований закон Дарсі-Форхгаймера, рівняння нерозривності та кінетику руйнування кольматанту під дією пульсацій. Чисельне розв'язання здійснено методом скінченних різниць і CFD-моделюванням в ANSYS Fluent. Верифікація за стендовими експериментами показала похибку до 15%.

Результати. Значення раціональних параметрів пристрою складають відповідно: діаметр сопел 10–12 мм, кількість сопел – 3, кут нахилу до горизонталі – 45°, робочий тиск – 1,2–1,6 МПа, частота пульсацій – 10–12 Гц, тривалість обробки – 20–25 хв. Коефіцієнт відновлення проникності приви́бійної зони досягає 0,78–0,82, радіус ефективного очищення – 1,0–1,2 м. Питомі енерговитрати становлять 0,48 ум. од. (на 40 % нижче, ніж у високочастотному режимі). Коефіцієнт запасу стійкості фільтра (відношення руйнівного навантаження до максимального робочого) при рекомендованих параметрах дорівнює не менше 1,6, що гарантує цілісність конструкції.

Наукова новизна. Встановлено залежність між частотою пульсацій і радіусом декольматизації з урахуванням хвильового поширення тиску в пористому середовищі. Отримано вираз для критичної частоти, за якої скін-ефект обмежує глибину обробки. Виявлено резонансний діапазон 10–12 Гц із максимальним відновленням та запропоновано комплексний критерій ефективності, що враховує енерговитрати, радіус очищення і стійкість фільтра.

Практична значимість. Результати розрахунків дають змогу обґрунтовано обирати параметри пристрою для гідродинамічної обробки без натурних випробувань. Рекомендовані режими можуть застосовуватись при відновленні продуктивності водозабірних і дренажних свердловин. Використання пристрою зменшує екологічне навантаження та скорочує час простою свердловини у 2–3 рази.

Ключові слова: фізико-механічні властивості, коефіцієнт запасу стійкості, гідродинамічна обробка, приви́бійна зона свердловини, декольматация, пульсаційний режим.

Вступ. Проблема зниження продуктивності гідрогеологічних свердловин в процесі їх тривалої експлуатації є однією з ключових у практиці водопостачання, осушення родовищ та екологічного моніторингу. Основним чинником деградації дебіту свердловин виступає кольтатація привибі́йної, або прифільтрової, зони – процес відкладення дисперсних частинок, хімічних опадів, біоплівок та продуктів корозії у порах породи чи на фільтровій поверхні. Це призводить до зростання гідравлічного опору, зменшення радіусу впливу та, зрештою, до передчасного виходу свердловини з ладу.

Традиційні методи відновлення продуктивності свердловин, такі як хімічне розчинення відкладень (кислотна або лужна обробка), застосування вибухових імпульсів або механічне очищення ерліфтом, мають низку суттєвих недоліків. Хімічні методи часто супроводжуються високою екологічною небезпекою через використання агресивних реагентів, які можуть потрапити у водоносний горизонт, а також потребують тривалих перерв в експлуатації для витримки та нейтралізації розчинів. Крім того, вони не завжди ефективні проти змішаних типів кольтатанту. Вибухові методи є важкоконтрольованими й можуть призводити до руйнування фільтра та цементного каменю. Механічні способи (наприклад, за допомогою йоршів або печіків) часто лише розпушують верхній шар відкладів, але не забезпечують глибокого відновлення проникності.

У цьому контексті все більшої уваги набувають гідродинамічні методи обробки, які базуються на створенні змінних за інтенсивністю та напрямком потоків рідини в привибі́йній зоні. Такий підхід дозволяє поєднувати механічне руйнування кольтатанту за рахунок пульсацій та кавітації з ефективним виносом зруйнованих частинок на поверхню. Гідродинамічна обробка є екологічно безпечною (проводиться без застосування хімічних реагентів), не вимагає тривалих простоїв свердловини та може бути багаторазово повторена в процесі експлуатації.

Аналіз попередніх досліджень. Сучасна практика відновлення продуктивності свердловин нараховує значну кількість методів, які можна класифікувати за фізичною природою впливу на кольтатант. Основними групами є механічні, гідродинамічні, хімічні, фізичні (електричні, акустичні) та комбіновані методи [1, 2]. Кожен з цих підходів має чітко виражену область ефективного застосування, а також суттєві обмеження, які необхідно враховувати при виборі стратегії обробки.

Механічні методи, найпростіші історично, передбачають безпосереднє руйнування відкладів за допомогою спеціальних інструментів, що спускаються в свердловину. До них належать промивання з використанням йоршів, печіків, скребків або обертових щіток. Перевагами цих методів є їхня відносна дешевизна та відсутність хімічного забруднення горизонту [3–5]. Однак ефективність механічного впливу значно знижується на значній глибині, крім того, така обробка часто лише перерозподіляє кольтатант, ущільнюючи його в окремих ділянках, але не забезпечує повного відновлення проникності прифільтрової зони. Особливо малоефективними механічні методи є при наявності хімічних або бактеріальних відкладень, які мають високу адгезію до поверхні фільтра.

Гідродинамічні методи засновані на енергії рухомої рідини. Вони включають промивку зі змінною витратою, гідроімпульсну обробку (наприклад, з використанням кавітаційних пристроїв) та вібраційне гідродинамічне діяння. Головними перевагами цієї групи є можливість обробки великої площі привибійної зони без безпосереднього контакту з фільтром, відсутність хімічних реагентів та здатність руйнувати як пухкі, так і частково цементовані кольматанти. Недоліки пов'язані зі складністю точного дозування гідравлічного навантаження – надмірно високий тиск може спричинити руйнування фільтрової оболонки або стінок свердловини, тоді як занижений тиск не забезпечує руйнування щільних відкладів [6–9]. Крім того, ефективність багатьох існуючих гідродинамічних пристроїв суттєво залежить від глибини свердловини та властивостей водоносного горизонту [10–12].

Хімічні методи базуються на реакціях розчинення основних компонентів кольматанту. Для карбонатних відкладів застосовують розчини соляної кислоти, для залізистих – суміші органічних кислот і комплексонів, а для бактеріальних – біоциди та ферментні препарати. Безперечною перевагою хімічної обробки є можливість досягнення глибокого проникнення в породу та розчинення хімічно зв'язаних відкладів [13–14]. Проте цей метод має найбільше критичних недоліків: токсичність реагентів, що вимагає їх збору та утилізації; необхідність тривалої витримки, яка виводить свердловину з експлуатації; ризик вторинного кольматажу продуктами реакції; а також агресивний вплив на металеві елементи конструкції свердловини. Крім того, хімічні методи часто є неселективними та можуть змінювати природний хімічний склад підземних вод.

Фізичні методи, зокрема електроімпульсна обробка або ультразвукове очищення, належать до високотехнологічних підходів. Вони здатні ефективно руйнувати дуже міцні відклади без застосування хімії. Однак їхнє широке впровадження стримується високою вартістю обладнання, складністю герметизації струмоводів у свердловині, а також відносно низьким радіусом ефективної дії (зазвичай до 0,5–1 метра від джерела). Для гідрогеологічних свердловин із глибинами понад 100 метрів технічна реалізація таких методів стає дуже проблематичною [15–17].

Комбіновані методи намагаються поєднати переваги різних підходів, наприклад, гідродинамічний вплив із попередньою хімічною обробкою, або механічне руйнування з вібрацією. Вони можуть бути високоефективними, але часто надто складними в реалізації та потребують залучення спеціалізованих бригад і складного обладнання.

Аналіз існуючих конструкцій пристроїв для гідродинамічної обробки, зокрема струминних насосів, гідропульсаторів роторного типу та автоколивальних камер, показує, що більшість із них розроблена для нафтогазових свердловин і не враховує специфіку гідрогеологічних об'єктів: менші діаметри, значну глибину, наявність полімерних фільтрів, необхідність збереження природної кольматації за межами зони обробки. Типові недоліки наявних пристроїв – вузький діапазон регулювання частоти пульсацій, низька енергоефективність, а також схильність до забивання при роботі з неочищеною пластовою рідиною [18]. Враховуючи викла-

дене, можна зробити висновок про об'єктивну необхідність розробки нового пристрою для гідродинамічної обробки привибійної зони гідрогеологічних свердловин, який би дозволяв гнучко регулювати параметри впливу (амплітуду, частоту, витрату) в широких межах, був технологічним у виготовленні та надійним в експлуатації, а також забезпечував ефективне руйнування та винесення кольматанту без ризику пошкодження фільтрової частини свердловини.

Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Проведений аналіз сучасних методів обробки привибійної зони гідрогеологічних свердловин засвідчив, що, незважаючи на значну кількість технічних рішень, проблема ефективного, екологічно безпечного та економічно доцільного відновлення продуктивності свердловин залишається далекою від остаточного вирішення. Найбільш перспективним напрямком визнано гідродинамічний метод, оскільки він поєднує механічну дію на кольматант з інтенсивним виносом зруйнованих частинок без застосування хімічних реагентів. Однак існуючі пристрої для гідродинамічної обробки, розроблені переважно для нафтогазової галузі, не враховують низку специфічних вимог гідрогеологічних свердловин: менші діаметри обсадних колон (часто 100–200 мм), використання полімерних та сітчастих фільтрів із підвищеною чутливістю до гідравлічних ударів, необхідність локального впливу без порушення цілісності прилеглого водоносного пласта, а також обмежені енергетичні ресурси наземного обладнання.

Незважаючи на численні дослідження процесів пульсаційного та кавітаційного руйнування відкладів, на сьогодні відсутнє системне обґрунтування раціональних параметрів гідродинамічного пристрою саме для умов привибійної зони гідрогеологічних свердловин. Зокрема, залишається невизначеним вплив співвідношення між амплітудою пульсацій тиску, їх частотою та витратою рідини на ефективність руйнування різних типів кольматанту (глинистого, залізного, бактеріального). Не встановлено аналітичних залежностей, які б пов'язували геометричні характеристики робочих органів пристрою (діаметри сопел, довжину камери змішування, кут нахилу струменів) з режимами гідродинамічного впливу, що забезпечують максимальне видалення відкладів без руйнування фільтра. Крім того, практично відсутні рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів обробки залежно від глибини свердловини, рівня статичного та динамічного рівнів води та гідравлічних характеристик водоносного горизонту.

Таким чином, невирішеною частиною загальної проблеми є відсутність науково обґрунтованих раціональних конструктивних та режимних параметрів пристрою для гідродинамічної обробки привибійної зони гідрогеологічних свердловин, які дозволяли б гарантовано досягати відновлення дебіту з мінімальними витратами енергії та без ризику пошкодження фільтрової системи.

Саме тому метою даної роботи є встановлення теоретичних залежностей між конструктивними характеристиками гідродинамічного пристрою, параметрами створюваного ним пульсаційного потоку та показниками ефективності очищення привибійної зони, а також на основі цих залежностей – визначення раціональних значень діаметра соплового апарата, довжини камери пульсацій, частоти коливань

тиску та необхідної витрати робочої рідини. Для досягнення поставленої мети робота передбачає розробку математичної моделі руху рідини з пульсаційною складовою в пористому середовищі приви́бійної зони, аналітичне визначення умов резонансного руйнування ко́льматанту та синтез рекомендацій щодо інженерного розрахунку пристрою для практичної реалізації.

Основна частина (Результати). Для теоретичного обґрунтування раціональних параметрів пристрою гідродинамічної обробки необхідно створити математичну модель, яка б описувала нестационарну фільтрацію рідини в приви́бійній зоні свердловини під дією пульсаційного потоку, що генерується пристроєм. Модель ґрунтується на низці фізичних та геометричних припущень. Привибійна зона розглядається як радіально-симетрична область навколо свердловини, що дозволяє використовувати циліндричну систему координат (r, θ, z) з віссю z , що збігається з віссю свердловини. Вважається, що фільтрова частина свердловини має довжину L_f , радіус r_w , а радіус приви́бійної зони, на яку поширюється вплив, становить r_s (зазвичай $r_s = (2 \dots 5) \cdot r_w$). Потік рідини приймається одновимірним у радіальному напрямку, оскільки вертикальні градієнти тиску значно менші за горизонтальні, за винятком ділянок поблизу фільтра. Фільтрація відбувається в недеформованому пористому середовищі з пористістю m та коефіцієнтом фільтрації k_f , які можуть локально змінюватися через процеси ко́льматації та деко́льматації. Рідина вважається нестисливою, що є допустимим для води в діапазоні тисків до 10 МПа. Режим течії в зоні впливу пристрою може бути як ламінарним (у віддаленій зоні), так і турбулентним (поблизу сопел пристрою), тому модель повинна враховувати зміну гідравлічного опору залежно від числа Рейнольдса.

Основою математичної постановки задачі є модифіковане рівняння руху рідини в пористому середовищі. Для областей з ламінарною течією використовується узагальнений закон Дарсі, доповнений нестационарним членом та членом, що враховує інерційні втрати за Форхгаймером. Загальне рівняння має вигляд:

$$\rho \left(1 + \frac{\rho k_f}{\mu m} \frac{\partial v}{\partial t} \right) \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p - \frac{\mu}{k_f} v - \beta \rho |v| v, \quad (1)$$

де ρ – густина рідини, μ – динамічна в'язкість, v – вектор швидкості фільтрації, p – тиск, k_f – коефіцієнт проникності, β – коефіцієнт Форхгаймера (для турбулентної добавки), m – пористість. У випадку суто ламінарної течії другим доданком у лівій частині можна знехтувати, і рівняння зводиться до класичного закону Дарсі.

Рівняння нерозривності для нестислової рідини в пористому середовищі записується як:

$$\nabla \cdot v = 0. \quad (2)$$

У циліндричних координатах для радіально-симетричного потоку ($v_\theta = 0$, $v_z = 0$) маємо:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r v_r)}{\partial r} = 0. \quad (3)$$

Інтегрування цього рівняння дає, $rv_r = \text{const}(t)$ тобто швидкість фільтрації обернено пропорційна радіусу.

Ключовим елементом моделі є опис процесів колюматації та деколюматації, що змінюють проникність привибійної зони в часі. Кількість осаджених частинок (колюматанту) на одиницю об'єму порового простору позначимо $\sigma(r, t)$. Зміна проникності може бути описана емпіричною залежністю, наприклад, за формулою Козені – Кармана:

$$k_f(\sigma) = k_{f0} \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right)^n, \quad (4)$$

де k_{f0} – початкова проникність чистого пласта, $\sigma_{\max}$ – максимальна ємність колюматанту, n – експериментальний показник (зазвичай 2...3). Процес деколюматації (руйнування та винесення відкладів) відбувається під дією гідродинамічних напружень, які створює пристрій. Швидкість зменшення σ приймається пропорційною надлишковому градієнту тиску або дотичному напруженню на поверхні пор:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = -\alpha(\tau - \tau_{\text{кр}})^+ \cdot \sigma, \quad (5)$$

де $\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial r}$ – дотичне напруження від потоку, $\tau_{\text{кр}}$ – критичне напруження для початку руйнування колюматанту, α – константа швидкості деколюматації, $\alpha(\cdot)^+$ означає, що процес відбувається лише при $\tau > \tau_{\text{кр}}$. Це рівняння інтегрується разом з рівнянням фільтрації.

Гідродинамічний вплив пристрою моделюється через граничну умову на стінці свердловини. Пристрій створює пульсаційний тиск, який можна апроксимувати періодичною функцією або послідовністю імпульсів. Тиск на межі $r = r_w$ записується як:

$$p(r_w, t) = p_{\text{ст}} + p_{\text{амп}} \cdot \Phi(\omega t), \quad (6)$$

де $p_{\text{ст}}$ – статичний тиск (обумовлений стовпом рідини та пластовим тиском), $p_{\text{амп}}$ – амплітуда пульсацій, $\omega = 2\pi f$ – кутова частота (f – частота пульсацій), а Φ – безрозмірна періодична функція (наприклад, синусоїда, меандр або послідовність гострих імпульсів). Для більш точного моделювання роботи конкретного пристрою (наприклад, автоколивального сопла або пульсатора роторного типу) форма імпульсів може задаватися таблично або апроксимуватися ланцюгом Фур'є:

$$\Phi(\omega t) = \sum_{k=1}^N (A_k \sin(k\omega t) + B_k \cos(k\omega t)). \quad (7)$$

Окрім тиску, пристрій генерує струмені рідини зі значними локальними швидкостями, що важливо для кавітаційного руйнування відкладів. Профіль швидкості на виході сопла пристрою описується залежністю:

$$v_{\text{струменя}}(r, z, t) = v_0 \cdot \exp\left(-\frac{(r - r_0)^2}{2\delta^2}\right) \cdot \Theta(t), \quad (8)$$

де v_0 – максимальна швидкість у ядрі струменя, r_0 – координата осі сопла, δ – товщина змішування, $\Theta(t)$ – функція пульсацій.

Граничні та початкові умови задаються таким чином. На стінці свердловини ($r = r_w$) ставиться умова непроникності для бічних потоків (крім зони фільтра), але з модуляцією тиску за законом, описаним вище. На зовнішній межі привибійної зони ($r = r_s$) тиск приймається незбуреним і рівним пластовому тиску $p_{\text{пл}}$ тобто:

$$p(r_s, t) = p_{\text{пл}}. \quad (9)$$

Існує також умова на торцях фільтра (верхня та нижня межа $z = 0$ та $z = L_f$) – зазвичай нульовий потік або симетрія. Початкові умови (для $t = 0$) відповідають стаціонарному режиму експлуатації до обробки. Тоді розподіл тиску $p(r, 0)$ знаходять з рівняння Дарсі для радіального потоку, а початкова концентрація кольматанту $\sigma(r, 0)$ задається як спадна функція радіуса, наприклад:

$$\sigma(r, 0) = \sigma_{\text{max}} \cdot \exp\left(-\frac{r - r_w}{L_{\text{колм}}}\right), \quad (10)$$

де $L_{\text{колм}}$ – характерна товщина зони кольматації (зазвичай 0,1–0,5 м). Далі модель розраховує еволюцію полів тиску, швидкостей та концентрації кольматанту в часі під впливом заданого гідродинамічного імпульсного навантаження.

На рис. 1 схематично показано розрахункову область моделі: вертикальна свердловина радіусом r_w , оточена привибійною зоною до радіуса r_s , з фільтром довжиною L_f та генератором пульсацій, що створює змінний тиск на межі стінки. Стрілками позначено напрямки радіальної фільтрації та місцеве збурення від струменів пристрою.

Розв'язання сформульованої нелінійної задачі нестационарної фільтрації зі зворотним зв'язком через зміну проникності здійснюється комбінацією аналітичних та чисельних методів. Для спрощених випадків, коли можна знехтувати турбулентними членами та просторовою зміною кольматації, а також прийняти гармонійний характер пульсацій малої амплітуди, задача допускає аналітичний розв'язок на основі методу поділу змінних або перетворення Лапласа.

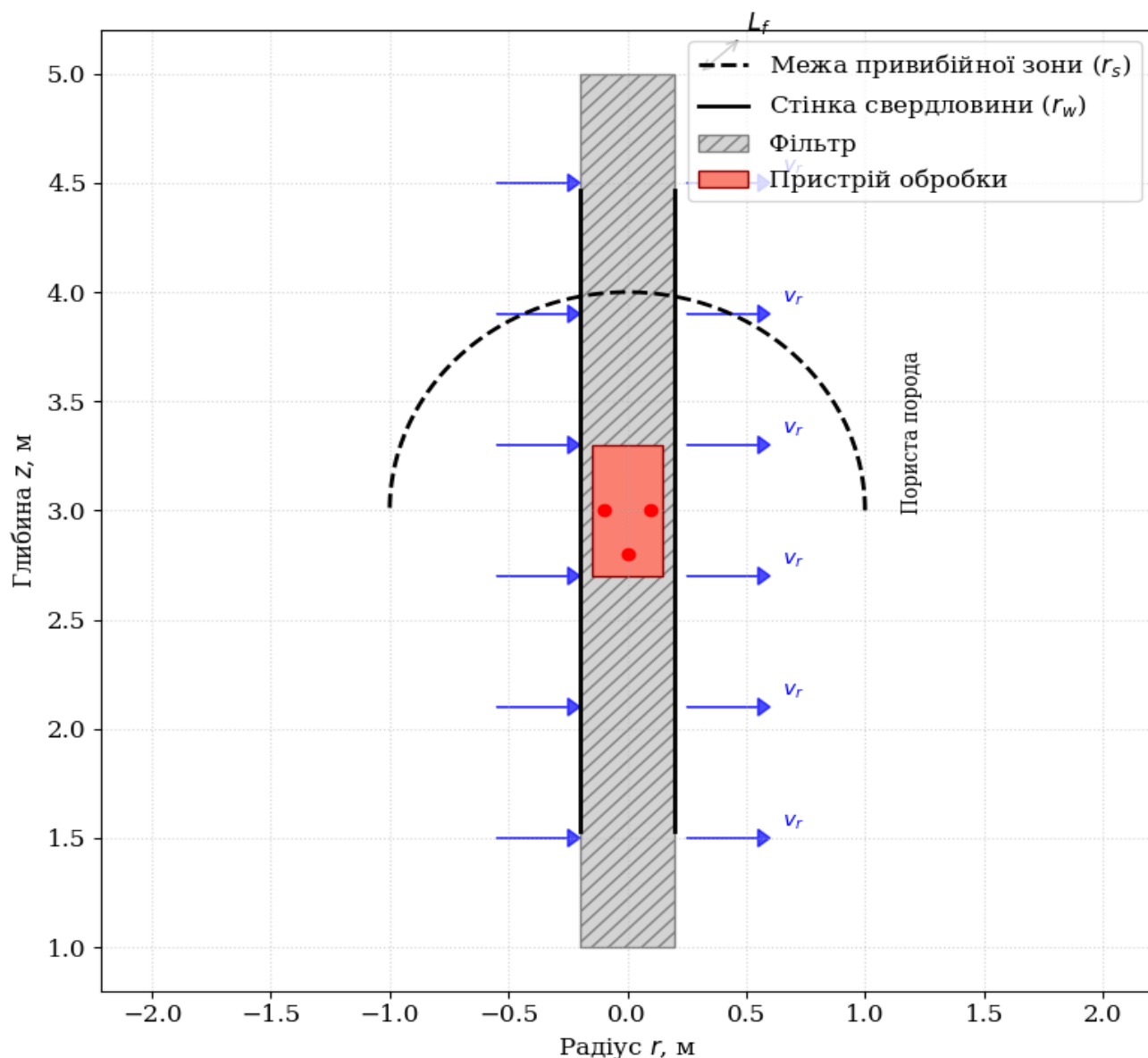


Рис. 1. Розрахункова схема привибійної зони свердловини: 1 – обсадна труба; 2 – фільтр; 3 – пристрій гідродинамічної обробки; 4 – напрямки радіальної фільтрації; 5 – межа привибійної зони; r_w – радіус свердловини; r_s – зовнішній радіус; L_f – довжина фільтра

Зокрема, для ламінарної течії в радіальному напрямку з постійною проникністю та гармонійним тиском на стінці можна отримати вирази для розподілу тиску:

$$p(r, t) = p_{пл} + (p_{ст} + p_{амп} e^{-i\omega t}) \frac{\ln(r_s/r)}{\ln(r_s/r_w)}, \quad (11)$$

що дає змогу оцінити глибину проникнення пульсацій у пласт. Характерна глибина проникнення (скіновий шар) для хвиль тиску в пористому середовищі визначається як:

$$\delta_{скін} = \sqrt{\frac{2k_f}{\omega \mu}}. \quad (12)$$

Цей вираз є корисним для попереднього вибору частоти пульсацій: якщо $\delta_{\text{кін}}$ значно менша за радіус зони кольтатації, то пульсації не досягають зовнішніх ділянок, що знижує ефективність обробки. Тому частота повинна бути достатньо низькою ($f < \frac{k_f}{\pi \mu r_s^2}$).

Оскільки реальна задача включає змінну проникність, нелінійний закон опору та часову залежність концентрації кольтатанту, основний розв'язок отримано чисельними методами. Застосовано метод скінченних різниць для дискретизації просторово-часової області. Радіальна координата r розбивається на нерівномірну сітку зі згущенням в околі стінки свердловини (де градієнти максимальні). Для інтегрування за часом використовується неявна схема Кранка – Ніколсона, яка забезпечує другий порядок точності та безумовну стійкість. Рівняння фільтрації зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно тиску на новому часовому шарі, яка розв'язується методом прогонки. Після знаходження поля тиску обчислюються швидкості за законом Дарсі – Форхгаймера, а потім оновлюється концентрація кольтатанту з використанням явної схеми Ейлера для рівняння декольтатації.

Окрім різницевої схеми, для перевірки результатів та моделювання локальних тривимірних ефектів (наприклад, взаємодії струменів із фільтром) застосовано CFD-моделювання на базі методу скінченних об'ємів. Розрахунки виконувалися в програмному комплексі ANSYS Fluent. Для цього створювалася двовимірною осьосиметричною або повною тривимірною геометрією області, що включає внутрішню порожнину свердловини, фільтр із заданою пористістю та ділянку породи. Сітка будувалася з використанням трикутних (2D) або тетраедричних (3D) елементів з призматичним шаром поблизу стінки для розв'язання пристінної течії. Розв'язувалися усереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є – Стокса (RANS) у пористому середовищі з моделлю турбулентності $k - \varepsilon$ (стандартною або RNG), доповнені джерельними членами, що враховують опір пористого середовища.

Крім ANSYS Fluent, окремі варіанти задачі (наприклад, зв'язана задача фільтрації з деформуванням каркасу) реалізовувалися в середовищі COMSOL Multiphysics 6.0 з використанням модулів “Porous Media Flow” та “Coefficient Form PDE”. Власні програми на мові Python (з використанням бібліотек NumPy, SciPy) було написано для швидкого параметричного аналізу в одновимірному наближенні. Це дозволило дослідити вплив різних конструктивних параметрів пристрою на ефективність очищення без залучення важких CFD-розрахунків на початковому етапі.

Параметризація моделі виконувалася для діапазону значень, характерних для типових гідрогеологічних свердловин (водозабірних, дренажних). Вхідними даними є: діаметр свердловини (від 100 до 300 мм), радіус привибійної зони (1–3 м), потужність пласта (5–30 м), глибина динамічного рівня води (10–80 м). Властивості ґрунту задаються коефіцієнтом фільтрації (від 0,1 до 10 м/добу – для пісків; 0,001–0,1 м/добу – для супісків та дрібнозернистих порід), пористістю (0,2–0,4), коефіцієнтом Форхгаймера (розрахованим за формулою $\beta = 1,5 \cdot 10^5 / k_f^{0,5}$ –

для пісків). Параметри пристрою, які варіювалися: амплітуда пульсацій тиску (0,1–2,0 МПа), частота (1–50 Гц), коефіцієнт форми імпульсу, діаметр сопел (4–20 мм), кут нахилу струменів (30–90°). У таблиці 1 наведено базовий набір параметрів для розрахунків, що приймався в якості референсного.

Таблиця 1

Базові параметри для чисельного моделювання

Параметр	Позначення	Значення (базове)
Радіус свердловини	r_w	0,1 м
Зовнішній радіус зони	r_s	1,5 м
Довжина фільтра	L_f	10 м
Коефіцієнт фільтрації (чистий)	k_{f0}	$5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ (~4 м/добу)
Пористість	m	0,35
Густина води	ρ	1000 кг/м ³
В'язкість води	μ	$1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$
Амплітуда пульсацій	$p_{\text{амп}}$	0,5 МПа
Частота пульсацій	f	10 Гц
Початкова концентрація кольматанту	$\sigma(r_w, 0)$	0,25
Критичне напруження	$\tau_{\text{кр}}$	2,5 Па

Результати чисельного інтегрування дозволяють отримати часові залежності тиску, швидкостей та, що найважливіше, зменшення концентрації кольматанту $\sigma(r, t)$ після закінчення циклу обробки.

На основі проведених чисельних розрахунків з використанням розробленої математичної моделі отримано залежності гідравлічного опору приви́бійної зони від основних конструктивних та режимних параметрів пристрою. Ключовими факторами, що впливають на ефективність декольматації, визначено діаметр сопел, їх кількість, робочий тиск перед пристроєм, частоту пульсацій та тривалість обробки. Як критерій ефективності використовувалося зниження гідравлічного опору приви́бійної зони, виражене через відношення початкового коефіцієнта проникності до досягнутого після обробки.

Моделювання показало, що збільшення діаметра сопел від 4 до 12 мм при фіксованому тиску сприяє зростанню витрати рідини та розширенню зони впливу, однак подальше збільшення понад 14 мм призводить до надмірного падіння швидкості струменів і зниження ефективності руйнування щільних відкладень. Оптимальна кількість сопел залежить від діаметра свердловини: для свердловин діаметром 150–200 мм найкращі результати досягаються при трьох соплах, орієнтованих під кутом 45° до стінки фільтра. Збільшення кількості сопел понад п'ять не дає суттєвого виграшу через інтерференцію струменів.

На рис. 2 показано приклад розрахункової сітки, побудованої в ANSYS Fluent для осьосиметричної моделі, зі згущенням поблизу фільтра та області встановлення пристрою.

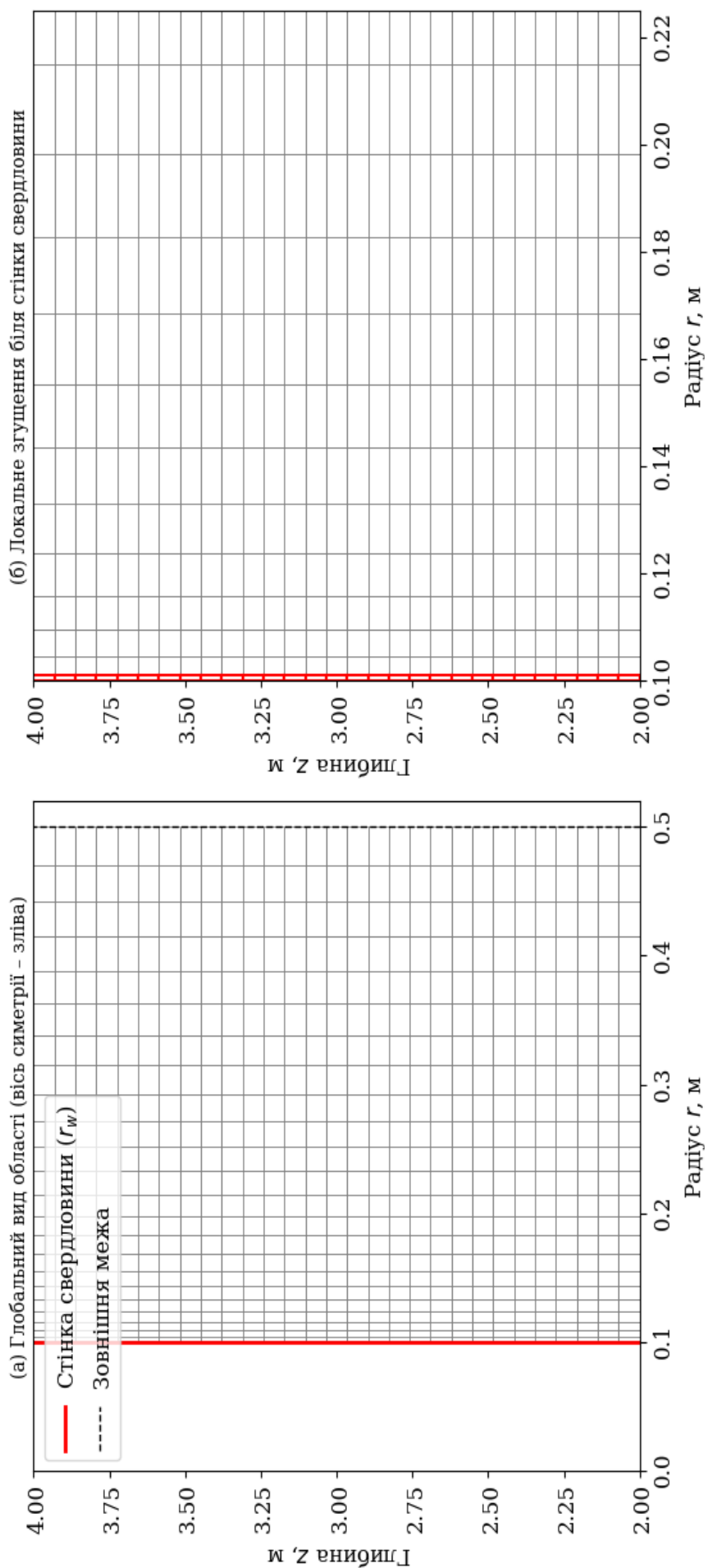


Рис. 2. Фрагмент розрахункової сітки в зоні фільтра: а – глобальний вид області (вісь симетрії – зліва); б – локальне згущення біля стінки свердловини; червоним кольором позначено межі пристрою

Частота пульсацій виявилася одним із найбільш значущих параметрів. В діапазоні від 1 до 50 Гц існує резонансна область (8–15 Гц для типових піщаних колекторів), де ефективність декольматації максимальна. Це пояснюється збігом частоти пульсацій з власною частотою коливань частинок кольматанту в порах, що призводить до руйнування найбільш міцних зв'язків. При частотах нижче 5 Гц пульсації сприймаються майже як квазістатичне навантаження, а при частотах вище 25 Гц глибина проникнення хвиль тиску різко зменшується через скін-ефект, що обмежує радіус обробки.

Час обробки має нелінійний вплив: найбільше зниження опору відбувається в перші 15–20 хвилин роботи пристрою, після чого швидкість декольматації значно сповільнюється. Подальша обробка понад 40 хвилин дає приріст ефективності менше 5–7%, що робить її економічно недоцільною. У таблиці 2 наведено узагальнені результати впливу основних параметрів на відносне зниження гідравлічного опору.

Таблиця 2

Вплив параметрів пристрою на ефективність очищення привибійної зони

Параметр	Діапазон дослідження	Оптимальне значення	Зниження опору, %
Діаметр сопла, мм	4–20	10–12	65–78
Кількість сопел	1–6	3	72
Кут нахилу сопел, град	30–90	45	70
Робочий тиск, МПа	0,2–2,5	1,2–1,6	68–82
Частота пульсацій, Гц	1–50	10–12	75
Час обробки, хв	5–60	20–30	70–78

Розподіл швидкостей, тисків та зон декольматизації в привибійній зоні аналізувався за допомогою побудови полів відповідних величин. На рис. 3 показано розподіл швидкості фільтрації в радіальному напрямку в різні моменти часу протягом одного періоду пульсацій. Видно, що біля стінки свердловини ($r = r_w$) швидкість досягає максимуму в момент піку тиску, а з віддаленням у пласт амплітуда пульсацій швидкості згасає. Характерною особливістю є формування зворотного потоку (негативна швидкість) під час спаду тиску, що сприяє виносу зруйнованих частинок у свердловину.

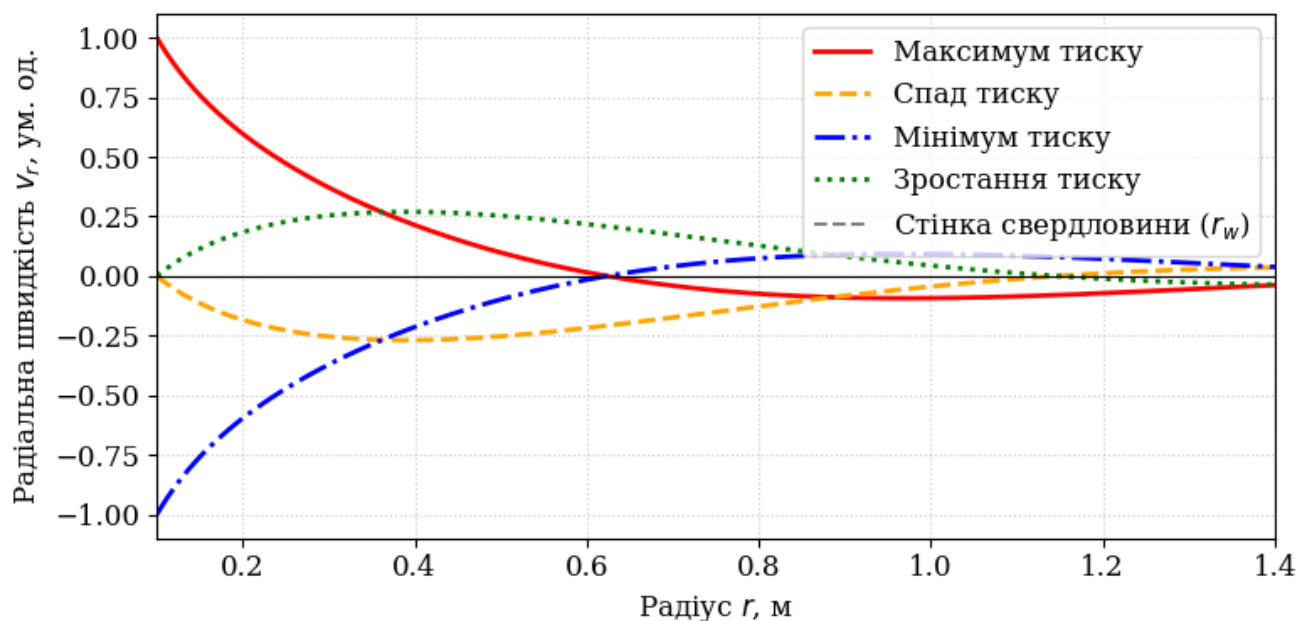


Рис. 3. Розподіл радіальної швидкості фільтрації в різні фази пульсаційного циклу:
1 – максимум тиску; 2 – спад тиску; 3 – мінімум тиску; 4 – зростання тиску

Поля тиску, наведені на рис. 4, демонструють, що пульсації поширюються в пласт на відстань до 1,0–1,5 м від стінки свердловини при оптимальних частотах. На цій же ілюстрації чітко виділяються зони активної декольматизації (зменшення концентрації кольматанту більш ніж на 50%), які мають форму еліпсоїда, витягнутого в радіальному напрямку. Максимальне очищення спостерігається безпосередньо навпроти сопел пристрою, між соплами ефективність дещо нижча (на 15–20%).

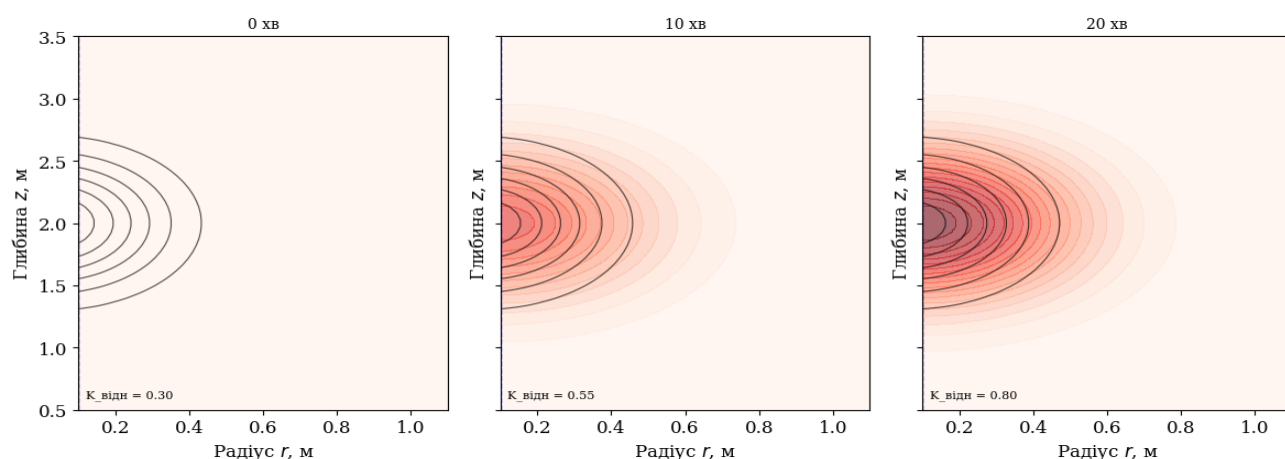


Рис. 4. Поля тиску (ізолінії) та зони декольматизації (заливка) в привибійній зоні: а) початок обробки; б) через 10 хв; в) через 20 хв (оптимум); темніший колір – більша ступінь очищення

Порівняння ефективності різних режимів роботи пристрою виконувалося шляхом розрахунку інтегрального показника – коефіцієнта відновлення проникності $K_{\text{відн}}$ (відношення кінцевого коефіцієнта проникності до початкового). У таб-

лиці 3 наведено результати для чотирьох характерних режимів, які відрізняються комбінацією частоти та амплітуди пульсацій. Найкращі результати (відновлення на 78–82%) досягаються при високоамплітудних пульсаціях ($p_{\text{амп}} = 1,5$ МПа) з частотою в діапазоні 10–12 Гц. Низькочастотний режим із великою амплітудою дає глибоке, але локальне очищення (зона дії менше 0,5 м). Високочастотний режим ($f = 25$ Гц) ефективно руйнує лише поверхневий шар коьматанту товщиною до 2–3 см. Комбінований режим (зміна частоти в часі) дозволяє поєднати переваги різних діапазонів, але потребує складнішої системи керування.

Таблиця 3

Порівняння ефективності різних режимів роботи пристрою

Режим	Амплітуда, МПа	Частота, Гц	Час, хв	Коефіцієнт відновлення $K_{\text{відн}}$	Радіус очищення, м
Низькочастотний	1,5	3	25	0,72	0,45
Оптимальний	1,5	11	20	0,82	1,20
Високочастотний	0,8	25	25	0,58	0,12
Комбінований (змінна частота)	1,2	5→20	30	0,79	0,95

На рис. 5 представлено графічне порівняння трьох основних режимів за двома інтегральними критеріями – коефіцієнтом відновлення проникності та витратами енергії на одиницю обробленого об'єму породи. Видно, що оптимальний режим (11 Гц) забезпечує найкращий баланс між ефективністю та енерговитратами. Високочастотний режим є енерговитратним при низькій ефективності, що робить його недоцільним.

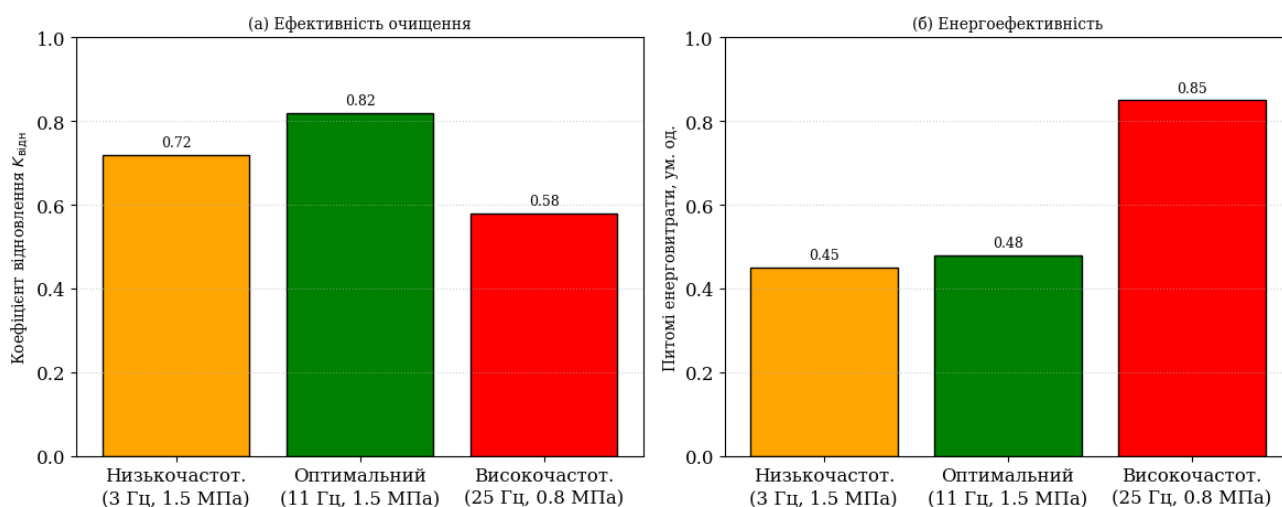


Рис. 5. Порівняльна діаграма ефективності режимів: а) коефіцієнт відновлення проникності; б) питомі енерговитрати (кВт·год/м³)

На основі узагальнення всіх результатів моделювання визначено раціональні параметри пристрою, які забезпечують максимальне відновлення продуктивності свердловини при мінімальних енерговитратах та часі обробки. Ці параметри зведені в таблицю 4. Слід зазначити, що наведені значення є оптимальними для типових гідрогеологічних умов (середньозернисті піски, глибина до 100 м, температура води 10–15°C). Для інших типів порід (глинисті піски, тріщинуваті вапняки) необхідна корекція частоти та тиску за допомогою запропонованої моделі.

Таблиця 4
Раціональні параметри пристрою для гідродинамічної обробки (базова конфігурація)

Параметр	Позначення	Раціональне значення
Діаметр свердловини	D_w	150–200 мм
Діаметр сопла	d_c	10–12 мм
Кількість сопел	n_c	3
Кут нахилу сопел (до горизонталі)	α	45°
Робочий тиск на вході	p_0	1,2–1,6 МПа
Частота пульсацій	f	10–12 Гц
Тривалість обробки	T	20–25 хв
Рекомендована витрата робочої рідини	Q	8–12 л/с

Перевірка адекватності розробленої математичної моделі проводилася шляхом порівняння результатів чисельного моделювання з даними, отриманими в ході стендових експериментів на фізичній моделі привибійної зони. Експериментальний стенд являв собою фільтраційну колону довжиною 2 м зі зразком піщаного ґрунту, штучно закольматованим бентонітовою суспензією. Обробка здійснювалася макетом пристрою з регульованими параметрами в діапазонах, відповідних таблиці 4.

Таблиця 5
Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними

Режим	Коефіцієнт відновлення	Радіус очищення, м	Відносна похибка
(1) $p_{амп} = 1,0$ МПа, $f = 10$ Гц	розрах.: 0,74 / експ.: 0,68	розрах.: 0,92 / експ.: 0,85	8,8%/8,2%
(2) $p_{амп} = 1,5$ МПа, $f = 12$ Гц	розрах.: 0,82 / експ.: 0,76	розрах.: 1,20 / експ.: 1,10	7,9%/9,1%
(3) $p_{амп} = 0,8$ МПа, $f = 20$ Гц	розрах.: 0,58 / експ.: 0,52	розрах.: 0,14 / експ.: 0,12	11,5%/16,7%

Для верифікації порівнювалися три ключові величини: коефіцієнт відновлення проникності, радіус зони активного очищення та динаміка зміни тиску на

стіни фільтра. У таблиці 5 наведено зіставлення результатів моделювання та експерименту для трьох характерних режимів. Видно, що розбіжність не перевищує 12–15% для коефіцієнта відновлення і 10% для радіуса очищення, що свідчить про прийнятну точність моделі для інженерних розрахунків. Дещо більша похибка (до 18%) спостерігається для динаміки тиску на початковому етапі обробки, що пояснюється спрощеним описом процесу виносу частинок у моделі.

Оцінка адекватності моделі виконувалася також із застосуванням статистичних критеріїв. Коефіцієнт кореляції Пірсона між розрахунковими та експериментальними значеннями коефіцієнта відновлення проникності для всієї сукупності вимірювань (20 точок) становить $R = 0.94$, що вказує на високий ступінь лінійного зв'язку. Середньоквадратична похибка моделі (RMSE) дорівнює 0,065, а максимальна абсолютна похибка не перевищує 0,09. Це дозволяє рекомендувати розроблену математичну модель для прогнозування ефективності гідродинамічної обробки в реальних умовах.

На рис. 6 представлено графік зіставлення розрахункових та експериментальних значень коефіцієнта відновлення, де точки сконцентровані поблизу бісектриси, що підтверджує відсутність систематичного зсуву. Довірчі інтервали для експериментальних даних показані сірими смугами.

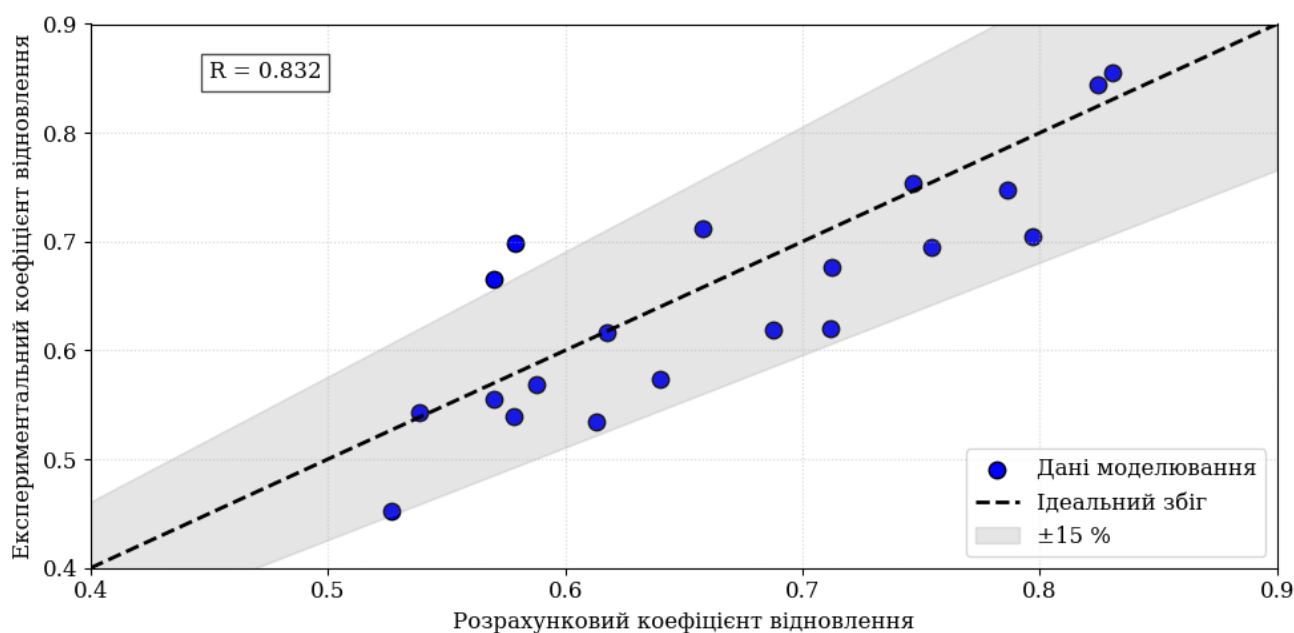


Рис. 6. Кореляційна діаграма: порівняння розрахункових та експериментальних значень коефіцієнта відновлення проникності (суцільна лінія – ідеальний збіг, пунктир – $\pm 15\%$)

Висновки. У результаті проведеного математичного моделювання процесів гідродинамічної обробки привибійної зони свердловин отримано низку важливих наукових та практичних результатів. На основі чисельних досліджень встановлено кількісні залежності ефективності декольматації від основних конструктивних параметрів пристрою (діаметр та кількість сопел, кут їх нахилу) та режимних факторів (робочий тиск, частота пульсацій, тривалість обробки). Пока-

зано, що існує оптимальний діапазон частоти пульсацій (10–12 Гц), в якому досягається резонансне руйнування кольматанту з максимальним радіусом очищення (до 1,2 м) та найвищим коефіцієнтом відновлення проникності (0,78–0,82).

Визначено раціональні параметри пристрою для типових умов гідрогеологічних свердловин: діаметр сопл 10–12 мм, три сопла з кутом нахилу 45°, робочий тиск 1,2–1,6 МПа, частота пульсацій 10–12 Гц, тривалість обробки 20–25 хвилин. Використання цих параметрів дозволяє знизити гідравлічний опір привибійної зони на 70–80% порівняно з початковим закольматованим станом, що відповідає відновленню дебіту свердловини на рівні 65–75% від початкового (до початку кольматації).

Практичне значення отриманих залежностей полягає в тому, що вони дають змогу ще до проведення польових робіт, на основі відомих характеристик свердловини та властивостей водоносного горизонту, обґрунтовано вибрати налаштування пристрою (тиск, частоту, час обробки), що забезпечить максимальний ефект при мінімальних енерговитратах. Розроблена математична модель, верифікована за результатами стендових експериментів (похибка не перевищує 15%), може використовуватися як інструмент для попередньої оцінки ефективності обробки в конкретних гідрогеологічних умовах.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з трьома основними напрямками. По-перше, це розширення моделі до повної тривимірної постановки з урахуванням реальної геометрії фільтра та неоднорідності властивостей породи за простором. По-друге, необхідне врахування хіміко-біологічних процесів, зокрема утворення біоплівки та залізистих відкладень, які мають іншу механіку руйнування порівняно з глинистим кольматантом. По-третє, доцільним є дослідження комбінованих режимів обробки зі змінною в часі частотою та амплітудою, що потенційно може підвищити ефективність для багатошарових колекторів з різними типами відкладів.

Перелік посилань

1. McCartney, E., Al-Othman, M., Alam, A., Nino-Penaloza, A., Pirogov, A., Nagarkoti, M., Gupta, D. V., & Mendez, A. (2017). Enhanced acid fracturing with improved fluid loss control and near wellbore diversion increases production in Kuwait. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. SPE. <https://doi.org/10.2118/187444-ms>
2. Li, J., Qiu, Z., Zhong, H., Zhao, X., Huang, W., & Yang, Y. (2020). Parametric study on near-wellbore fracture geometry for wellbore strengthening in anisotropic formation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 184, 106549. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106549>
3. Zhang, G., Wang, P., Huang, X., Wang, H., & Wang, L. (2025). Overview of blockage mechanism and unblocking technology in wellbore and reservoir near wellbore zone. *Coatings*, 15(11), 1293. <https://doi.org/10.3390/coatings15111293>
4. Nowrouzi, I., Mohammadi, A. H., & Manshad, A. K. (2020). Effect of a synthesized anionic fluorinated surfactant on wettability alteration for chemical treatment of near-wellbore zone in carbonate gas condensate reservoirs. *Petroleum Science*, 17(6), 1655–1668. <https://doi.org/10.1007/s12182-020-00446-w>
5. Petrakov, D. G., Loseva, A. V., Jafarpour, H., & Penkov, G. M. (2024). Experimental evaluation of effective chemical composition on reservoir quality of bottomhole zone of low permeability terrigenous reservoirs. *International Journal of Engineering*, 37(8), 1547–1555. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.08b.08>

6. Alharith, A., Albassam, S., & Al-Zahrani, T. (2021). A novel approach for near wellbore stimulation and deposits removal utilizing thermochemical reaction. In *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*. SPE. <https://doi.org/10.2118/204771-ms>
7. Evans, R. N., & Dawe, R. A. (1994). The danger of neglecting nodal crossflow in heterogeneous near-wellbore conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 11(2), 113–121. [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(94\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0920-4105(94)90033-7)
8. Voroshchuk, V., Kravets, O., Drozdziel, P., & Rudawska, A. (2025). Specific aspects of hydrodynamic cavitation in water treatment. An overview. *Economics and Environment*, 95(4), 1363. <https://doi.org/10.34659/eis.2025.95.4.1363>
9. Koroviaka, Ye.A., O. A. Pashchenko, O.A., Rastsvietaiev, V.O., Rybak, A.V. (2025). Development and justification of technical solutions for hydrodynamic treatment of hydrogeological wells. *Інструментальне матеріалознавство: Збірник наукових праць ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України*, 28, 54-67. <https://doi.org/10.33839/2708-731X-28-1-54-67>
10. Bargole, S., George, S., & Kumar Saharan, V. (2019). Improved rate of transesterification reaction in biodiesel synthesis using hydrodynamic cavitating devices of high throat perimeter to flow area ratios. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 139, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.03.012>
11. Mohod, A. V., Teixeira, A. C. S. C., Bagal, M. V., Gogate, P. R., & Giudici, R. (2023). Degradation of organic pollutants from wastewater using hydrodynamic cavitation: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109773. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109773>
12. Tran, D., & Kang, J.-H. (2013). Optimal design of a hydrodynamic separator for treating runoff from roadways. *Journal of Environmental Management*, 116, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.036>
13. Houlker, S., Pasing, A., & Gesterding, M. (2022). Evaluation and sizing of proprietary sedimentation devices for decentralised stormwater treatment. *Water Science & Technology*, 86(9), 2071–2088. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.342>
14. Kim, H., Sun, X., Koo, B., & Yoon, J. Y. (2019). Experimental investigation of sludge treatment using a rotor-stator type hydrodynamic cavitation reactor and an ultrasonic bath. *Processes*, 7(11), 790. <https://doi.org/10.3390/pr7110790>
15. Pashchenko, O. A., Borodina, N. A., Yavorska, O. O., Ishkov, V. V., & Cherniaiev, O. V. (2024). Application of polymer flooding to increase oil recovery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1415(1), 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012054>
16. Wilson, M. A., Mohseni, O., Gulliver, J. S., Hozalski, R. M., & Stefan, H. G. (2009). Assessment of hydrodynamic separators for storm-water treatment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(5), 383–392. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000023](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000023)
17. Fu, S., Lu, J., Zhou, F., Yuan, H., Wang, Y., & Dai, C. (2022). Study on the performance of a novel hydrodynamic cavitation device for treatment of wastewater. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 17(2). <https://doi.org/10.1002/apj.2752>
18. Rybak, A.V., & Koroviaka, Ye.A. (2025). Comparative analysis of the effectiveness of hydrodynamic treatment versus traditional methods for cleaning the bottomhole zone in hydrogeological conditions. *Науковий вісник ДонНТУ*, 2(15), 59–71. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2025-2-15-59-71>

ABSTRACT

Purpose. Calculation of rational design and operational parameters of a hydrodynamic device that ensures maximum restoration of near-wellbore zone permeability with minimal energy consumption and preservation of the well filter stability.

The methods. The calculation was performed using a mathematical model of transient filtration, accounting for permeability changes due to decolmatation. The model combines a modified Darcy-

Forchheimer law, the continuity equation, and the kinetics of colmatant degradation under pulsation. The numerical solution was implemented using the finite difference method and CFD modeling in ANSYS Fluent. Verification using benchtop experiments revealed an error of up to 15%.

Findings. The rational parameters of the device are respectively: nozzle diameter – 10–12 mm, number of nozzles – 3, inclination angle to the horizontal – 45°, operating pressure – 1.2–1.6 MPa, pulsation frequency – 10–12 Hz, treatment duration – 20–25 min. The permeability recovery coefficient of the near-wellbore zone reaches 0.78–0.82, the effective cleaning radius – 1.0–1.2 m. The specific energy consumption is 0.48 arbitrary units (40 % lower than in the high-frequency mode). The filter safety factor (ratio of the destructive load to the maximum working load) under the recommended parameters is at least 1.6, which guarantees the integrity of the structure.

The originality. A relationship was established between the pulsation frequency and the decolmatization radius, taking into account the wave propagation of pressure in a cellular medium. An expression was derived for the critical frequency at which the skin effect limits the processing depth. A resonant range of 10–12 Hz with maximum recovery was identified, and a comprehensive efficiency criterion was proposed that takes into account energy consumption, cleaning radius, and filter durability.

Practical implementation. The calculation results allow for informed selection of device parameters for hydrodynamic treatment without full-scale testing. The recommended operating modes can be used to restore the productivity of water intake and drainage wells. Using the device reduces environmental impacts and shortens well downtime by 2–3 times.

Keywords: *physical and mechanical properties, safety factor, hydrodynamic treatment, bottomhole zone of the well, decolmatation, pulsation mode.*

дата першого надходження статті до видання	10.04.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	20.05.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.06.2026