УДК 622.24.051.5:628.54

Обґрунтування раціональних параметрів вібросит для вібраційного сепарування бурових промивальних рідин

Войта М.О., *ORCID ID 0009-0001-4801-0406, voita.my.o@nmu.one;*
Пащенко О.А., *ORCID ID 0000-0003-3296-996X, pashchenko.o.a@nmu.one;*
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

Розроблено напіваналітичну модель вібраційного сепарування бурових промивальних рідин: фільтрація неньютонівської рідини за Дарсі–Форхгеймером і Гершелем–Балклі, лагранжів рух частинок з адгезійно-капілярними силами та кінетика деградації пропускної здатності сітки. За 62 валідними дослідами перехід від лінійної до криволінійної траєкторії підвищує початкову пропускну здатність Q_0 на 8–14 л/(хв·м²). Робочий режим – K = 7,0 g, φ = 45–90°. На сітці API 200 для чотирьох типів розчинів отримано Q_0 = 109–167 л/(хв·м²), у масштабі площі стенда 1810–2770 л/(хв·м²), d_{50} = 59–78 мкм і вміст твердої фази 3,3–6,1% об. при вході 10% об. Промислові випробування дали приріст питомої пропускної здатності 10%, зниження d_{50} на 9%, скорочення простоїв на 59% і замін сіток на 20%.

Ключові слова: надрокористування, бурові промивальні рідини, вібросито, вібраційне сепарування, математична модель, раціональні параметри.

Justification of rational parameters of shale shakers for vibrational separation of drilling fluids

Voita Mykhailo, *ORCID ID 0009-0001-4801-0406, voita.my.o@nmu.one;*
Pashchenko Oleksandr, *ORCID ID 0000-0003-3296-996X, pashchenko.o.a@nmu.one;*
Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

A semi-analytical model of vibrational separation of drilling fluids is developed: non-Newtonian filtration by Darcy–Forchheimer and Herschel–Bulkley, Lagrangian particle motion with adhesion–capillary forces, and screen-throughput degradation kinetics. In 62 valid runs, a change from a linear to a curvilinear trajectory increases the initial throughput Q_0 by 8–14 L/(min·m²). The working mode is K = 7.0 g, φ = 45–90°. On an API 200 screen, four fluid types gave Q_0 = 109–167 L/(min·m²), 1810–2770 L/(min·m²) on the bench area scale, d_{50} = 59–78 μm and an outlet solids content of 3.3–6.1% vol. at 10% vol. inlet. Field trials showed a 10% gain in specific throughput, a 9% decrease in d_{50}, a 59% cut in downtime and a 20% cut in screen changes.

Keywords: subsoil use, state expert appraisal, geological and economic assessment.

Вступ. Сучасне буріння нафтогазових свердловин висуває жорсткіші вимоги до стабільності промивальної рідини: від винесення вибуреної породи й охолодження долота до збереження колектора і гідравлічного керування свердловиною. Ці функції залежать від утримання вмісту твердої фази після первинного очищення на рівні близько 4–5% об. Перший ступінь – вібросито – приймає 100% циркулюючого потоку (типово 2500–4500 л/хв) і відділяє основну частку шламу крупніше 100–150 мкм [1, 2].

Ключовим етапом у системі очищення є перший ступінь – вібросито. Воно приймає 100% циркулюючого потоку (типово 2500–4500 л/хв) і відповідає за відділення основної частки шламу крупністю понад 100–150 мкм [1, 2]. Проте обмежувальним явищем залишається швидка деградація пропускної здатності вібросит: вже за 30–90 хв відкрита площа осередків може зменшитися на 50–80% через залипання (blinding) і заклинювання (pegging). Наслідком цього стає байпасування потоку або вимушений перехід на грубіші сітки, що призводить до накопичення твердої фази в розчині до 8–12% об. Заводські режими сучасних вібросит (Derrick Hyperpool, Mongoose PRO, King Cobra Venom) потребують узгодження з реологічними та адгезійними властивостями конкретного розчину [3–5].

Існуючі моделі вібраційного грохочення – від кінетичних до CFD–DEM – мають суттєві обмеження: вони описують переважно сухий грохот або вимагають надто важких чисельних розрахунків, що ускладнює їх використання для оперативного інженерного добору оптимального режиму роботи обладнання [6].

Основний матеріал. Метою роботи є обґрунтування раціональних параметрів вібросит (частоти, амплітуди, траєкторії, сітки) для основних типів бурових розчинів на основі напіваналітичної моделі, а також стендових і промислових даних.

Для кількісного опису процесу розроблено комплексну напіваналітичну модель, яка поєднує гідродинамічний опис фільтрації рідинної фази через осередки сітки з лагранжевим траєкторним аналізом руху твердих частинок. Модель прогнозує пропускну здатність $Q(t)$, граничний розмір сепарації d_{50}, ефективність $E(d_p)$ та кінетику деградації осередків.

Фільтрацію рідинної фази крізь сітку описано законом Дарсі–Форхгеймера, доповненим вібраційним членом:

$$\vec{v}_f = -\frac{k}{\mu_{eff}}\nabla P - \beta_F \rho \left|\vec{v}_f\right| \vec{v}_f + \rho A\omega^2 \sin(\omega t), \tag{1}$$

Де k – проникність сітки за Козені–Карманом; μ_{eff} – ефективна в'язкість; β_F – інерційний коефіцієнт Форхгеймера; A – амплітуда (половина розмаху); ω – кутова частота; ρ – густина розчину.

Реологію бурового розчину описано моделлю Гершеля–Балклі:

$$\tau = \tau_0 K_{HB} \dot{\gamma}^n, \tag{2}$$

де τ_0 – граничне напруження зсуву; K_{HB} – консистенція; n – індекс течії; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву. Ефективну в'язкість визначають як $\mu_{\text{eff}} = \tau/\dot{\gamma}$, що дозволяє врахувати зміну реології в тонкому шарі над сіткою.

Рух окремої частинки діаметром d_p розглянуто через другий закон Ньютона:

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{F}_{drag} + \vec{F}_{press} + \vec{F}_{grav,eff} + \vec{F}_{adh} + \vec{F}_{cap}, \tag{3}$$

де $\vec{F}_{drag}$ – сила гідродинамічного опору; $\vec{F}_{press}$ – сила тиску; $\vec{F}_{grav,eff}$ – ефективна гравітація з поправкою на вібраційне прискорення; $\vec{F}_{adh}$ – адгезійна сила за моделлю Джонсона–Кендалла–Робертса (JKR); $\vec{F}_{cap}$ – капілярна сила рідкого містка.

Капілярна складова визначається за формулою:

$$F_{cap} = \frac{4\pi r_p \sigma \cos\theta}{1 + h_a / r_p}, \tag{4}$$

де $r_p = d_p / 2$ – радіус частинки; σ – поверхневий натяг; θ – кут змочування; h_a – зазор між частинкою та дротом сітки.

Деградацію пропускної здатності сітки в часі описано експоненційною залежністю:

$$Q(t) = Q_0 \exp\left(-a m_{dep}^{\beta}\right), \beta \in [0{,}85; 1{,}15], \tag{5}$$

де m_{dep} – поверхнева маса відкладень, кг/м²; α – коефіцієнт деградації, м²/кг (за результатами дослідів становить 0,76–2,48 м²/кг); β – показник нелінійності. Цей коефіцієнт враховує вплив поверхневого натягу, кута змочування, граничного напруження зсуву та розміру осередку, що дозволяє переносити його між розчинами різного типу. Кут нахилу сітки позначено α_c.

Амплітуду при заданій частоті визначають з умови збереження вібраційного числа на робочому рівні:

$$A = \frac{Kg}{(2\pi f)^2}, \tag{6}$$

що дає A=2,22 мм при 28 Гц, A=1,93 мм мм при 30 Гц і A=1,70 мм при 32 Гц.

Послідовність розрахунку наведено на рисунку 1.

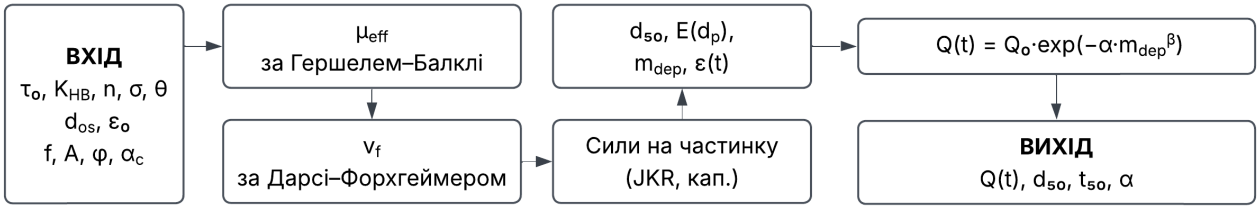


Рис. 1. Блок-схема алгоритму напіваналітичної моделі

Вхід: тип розчину (реологічні параметри, поверхневий натяг, кут змочування), параметри сітки (розмір осередку, початкова пористість), режим вібрації (частота, амплітуда, кут еліпса, кут нахилу).

Далі визначають ефективну в'язкість за моделлю Гершеля–Балклі, швидкість фільтрації за законом Дарсі–Форхгеймера, сили, що діють на частинку, та поверхневу масу відкладень. Завершується розрахунок визначенням граничного розміру сепарації, ефективності відділення фракцій, пропускної здатності в часі та часу стабільної роботи сітки.

Стенд забезпечує лінійну, еліптичну та кругову траєкторії вібрації, амплітуду 0–6 мм, частоту 0–50 Гц і кут нахилу сітки від −15° до +15°. До статистичної обробки увійшли 62 досліди за 20 режимами (для КПР – 39 дослідів, для НДП і ПГР – по 9, для ІЕР – 5). Параметри досліджуваних розчинів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-хімічні параметри досліджуваних розчинів

Параметр	НДП	ПГР	КПР	ІЕР
Основа	вода	вода	вода + KCl	дизпаливо + вода
Густина, кг/м³	1020–1050	1080–1120	1100–1150	1200–1400
Пластична в'язкість, мПа·с	18–25	25–35	20–30	30–50
Граничне напруження зсуву (10 хв), Па	5–8	10–18	8–14	12–25
Поверхневий натяг, мН/м	45–55	55–65	40–50	25–35

При фіксованому режимі (частота 30 Гц, амплітуда 1,90 мм, кут еліпса 45°, вібраційне число 7,0 g, калійно-полімерний розчин) зменшення розміру осередку сітки з 74 до 53 мкм знижує граничний розмір сепарації з 68 до 52 мкм і час стабільної роботи з 16,6 до 13,6 хв (таблиця 2). За регресійною залежністю, побудованою на всьому масиві дослідів, перехід із 53 на 74 мкм підвищує початкову пропускну здатність на 17,3 ± 8,0 л/(хв·м²) ($p = 0{,}036$) і збільшує граничний розмір сепарації на 17,5 ± 1,8 мкм ($p < 0{,}001$).

Таблиця 2

Вплив розміру осередку сітки (КПР, K = 7,0 g, φ = 45°)

API mesh	Розмір осередку, мкм	Q_0, л/(хв·м²)	d_{50}, мкм	t_{50}, хв	α, м²/кг
200	74	137	68	16,6	1,18
270	53	135	52	13,6	1,58

Для калійно-полімерного розчину еліптична траєкторія знижує вміст твердої фази в очищеному розчині до 4,5% об. проти 5,1% об. на лінійній траєкторії; кругова траєкторія дає 4,9% об. (таблиця 3). За пропускною здатністю криволінійна траєкторія перевершує лінійну: еліптична додає 13,6 л/(хв·м²), кругова – 8,3 л/(хв·м²). Тому робочим класом прийнято кут еліпса в діапазоні 45–90°. На досліджених рівнях вібраційного числа 5,5; 7,0 і 8,5 g кожен додатковий g знижує вміст твердої фази на 0,23 ± 0,07% об. ($p = 0{,}003$) і граничний розмір сепарації на 1,5 ± 0,5 мкм ($p = 0{,}003$). Робочою точкою прийнято 7,0 g. Амплітуду при заданій частоті визначають з умови

збереження вібраційного числа на рівні 7,0 g, що дає 2,22 мм при 28 Гц, 1,93 мм при 30 Гц і 1,70 мм при 32 Гц.

Таблиця 3

Вміст твердої фази,% об., для калійно-полімерного розчину (K = 7,0 g; вміст на вході 10% об.)

Тип розчину	Лінійна, φ = 0°	Еліптична, φ = 45°	Кругова, φ = 90°
Калійно-полімерний	5,1	4,5	4,9

Таблиця 4

Робочі параметри вібраційного сепарування (сітка API 200)

Параметр	НДП	КПР	ПГР	ІЕР
Частота, Гц	32	30	30	28
Амплітуда, мм	1,70	1,93	1,93	2,22
Вібраційне число, g	7,0	7,0	7,0	7,0
Кут еліпса, град	45	45	45–90	45–90
Q_0 стенда, л/(хв·м²)	167	137	115	109
$Q_0 \cdot k_m$, $k_m = 16,6$	2770	2270	1910	1810
t_{50}, хв	21,7	16,6	17,3	11,3
d_{50}, мкм	59	68	75	78
Вміст твердого,% об.	3,3	4,6	4,6	6,1

Тут $k_m = 16,6$ – коефіцієнт площі стенда (0,045 м²), який використовується лише для приведення лабораторних даних до промислового масштабу, а не є виміряною промисловою величиною. Найвищі показники забезпечує полімерний недисперсний розчин: початкова пропускна здатність 167 л/(хв·м²), граничний розмір сепарації 59 мкм, вміст твердої фази 3,3% об. Для інвертно-емульсійного розчину ці показники становлять відповідно 109 л/(хв·м²), 78 мкм і 6,1% об. Різниця між крайніми типами розчинів – близько 53% за пропускною здатністю і майже вдвічі за вмістом твердої фази в очищеному розчині.

На навчальному вузлі (12 дослідів, сітка API 200) перехід від базового режиму (частота 28 Гц, амплітуда 2,5 мм, лінійна траєкторія, вібраційне число 6,2 g) до запропонованого (частота 32 Гц, амплітуда 1,9 мм, кут еліпса 45°, вібраційне число 7,0 g) підвищив питому пропускну здатність зі 136,6 до 150,2 л/(хв·м²), тобто на 10%, і знизив граничний розмір сепарації з 72,3 до 65,8 мкм, тобто на 9%. На вузлі з промивальною рідиною класу НДП (12 змін) вміст твердої фази знизився з 3,76 до 1,45% об. (–61%), простій – з 37 до 15 хв за зміну (–59%), кількість замін сітки – з 1,67 до 1,33 за зміну (–20%).

База розрахунку – свердловина глибиною 3000 м, 30 діб буріння, дві зміни на добу, три вібросита на установці. Скорочення простою на 22 хв за зміну дає близько 22 год на свердловину; при вартості 16–24 тис. грн за годину роботи установки це становить 0,35–0,52 млн грн. Зменшення кількості замін сіток на 20% дає 0,11–0,15 млн грн. Разом економія становить 0,46–0,67 млн грн на свердловину. Разові витрати на віброзбуджувачі, частотний перетворювач, пружини, датчики й автоматику – близько 1,39 млн грн на установку. Окупність – друга–третя свердловина.

Висновок. На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано такі висновки.

1. Розроблена напіваналітична модель (1–5) описує фільтрацію неньютонівської рідини, рух частинки з адгезійно-капілярними силами і деградацію пропускної здатності сітки та відтворює напрями впливу досліджених факторів.

2. Домінуючими факторами є тип розчину і розмір осередку. Перехід із 53 на 74 мкм підвищує початкову пропускну здатність на 17,3 ± 8,0 л/(хв·м²) і граничний розмір сепарації на 17,5 ± 1,8 мкм.

3. Криволінійна траєкторія (φ = 45–90°) підвищує початкову пропускну здатність на 8–14 л/(хв·м²) відносно лінійної. Робочою точкою прийнято вібраційне число K = 7,0 g в інтервалі 5,5–8,5 g; амплітуду визначають за формулою (6).

4. Для сітки API 200 робочі режими дають Q_0 = 109–167 л/(хв·м²) (1810–2770 л/(хв·м²) у масштабі площі), d_{50} = 59–78 мкм і C_{out} = 3,3–6,1% об. при C_{in} = 10% об.

5. Промислові випробування підтвердили приріст питомої пропускної здатності на 10% і зниження d_{50} на 9%, а також скорочення простоїв на 59% і замін сітки на 20%. Економічний ефект становить 0,46–0,67 млн грн на свердловину при разових витратах 1,39 млн грн; окупність – друга–третя свердловина.

Таким чином, запропоновані режими вібраційного сепарування забезпечують підвищення ефективності очищення бурових промивальних рідин, зниження вмісту твердої фази та скорочення непродуктивних витрат часу, що дозволяє рекомендувати їх для впровадження на вітчизняних бурових установках.

Список використаних джерел:

1. Шумов, А. С., Судаков, А. К., & Передерій, Н. О. (2024). Інноваційна технологія обладнання гідрогеологічних свердловин блочними гравійними фільтрами. В *«Молодь: наука та інновації» 2024: матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених* (Том 1, с. 76). НТУ «ДП».

2. Pashchenko, O., Rastsvietaiev, V., Davydenko, O., Shumov, A., & Voita, M. (2025). Computer modeling and analysis of filtration flows in heterogeneous porous media. *Geotechnical Mechanics*, 172, 65-75. https://doi.org/10.15407/geotm2025.172.065

3. Sudakov A., Shumov A., Voita M., Hanzha Y., Dmytruk O. (2026). Modeling and Analysis of Hydrodynamics in Filtration Systems. *Advances in Science and Technology*. Vol. 172. Pp. 215–225. https://doi.org/10.4028/p-RzP6VN

4. Voita, M. (2026). Математичне моделювання роботи вібросита для очищення промивальної рідини при бурінні нафтових і газових свердловин. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 85, 30–44. https://doi.org/10.33271/crpnmu/85.030

5. Derrick Corporation. (2023). *Hyperpool Shale Shaker: Technical Manual*. https://www.tr-shale-shaker.com/__trashed/

6. M-I SWACO. (2024). *Mongoose PRO Shale Shaker: Operation Manual*. Schlumberger. https://media.theofmp.com/media/miswaco/documents/m-iswaco_mongooseproshakermanual_july2018_v1.pdf

7. NOV Brandt. (2024). *King Cobra Venom Shale Shaker: Technical Specifications*. National Oilwell Varco. https://www.nov.com/products/king-cobra-venom-shale-shaker

8. Zhao, L., Zhao, Y., Bao, C., Hou, Q., & Yu, A. (2017). Optimisation of a circularly vibrating screen based on DEM simulation and Taguchi orthogonal experimental design. *Powder Technology*, 310, 307–317. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.049

9. Lal M., Hoberock L. L. (1988). Solids-conveyance dynamics and shaker performance. *SPE Drilling Engineering*, 3(4), 385–394. https://doi.org/10.2118/14389-PA

10. American Petroleum Institute. (2020). Recommended practice on drilling fluid processing systems evaluation (API RP 13C) (5th ed.). https://www.api.org/~/media/files/publications/whats%20new/13c_e5%20pa.pdf

References

Shumov, A. S., Sudakov, A. K., & Perederii, N. O. (2024). Innovatsiina tekhnolohiia obladnannia hidroheolohichnykh sverdlovyn blochnymy hraviinymy filtramy [Innovative technology of equipment for hydrogeological wells with block gravel filters]. In *«Molod: nauka ta innovatsii» 2024: materialy XII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh* (Vol. 1, p. 76). NTU «DP». [in Ukrainian].

Pashchenko, O., Rastsvietaiev, V., Davydenko, O., Shumov, A., & Voita, M. (2025). Computer modeling and analysis of filtration flows in heterogeneous porous media. *Geotechnical Mechanics*, 172, 65-75. https://doi.org/10.15407/geotm2025.172.065

Sudakov A., Shumov A., Voita M., Hanzha Y., Dmytruk O. (2026). Modeling and Analysis of Hydrodynamics in Filtration Systems. *Advances in Science and Technology*. Vol. 172. Pp. 215–225. https://doi.org/10.4028/p-RzP6VN

Voita, M. O. (2026). Matematychne modeliuvannia roboty vibrosyta dlia ochyshchennia promyvalnoi ridyny pry burinni naftovykh i hazovykh sverdlovyn [Mathematical modeling of shale shaker operation for drilling fluid cleaning during oil and gas well drilling]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 85, 30–44. https://doi.org/10.33271/crpnmu/85.030 [in Ukrainian].

5. Derrick Corporation. (2023). *Hyperpool Shale Shaker: Technical Manual*. https://www.tr-shale-shaker.com/__trashed/

6. M-I SWACO. (2024). *Mongoose PRO Shale Shaker: Operation Manual*. Schlumberger. https://media.theofmp.com/media/miswaco/documents/m-iswaco_mongooseproshakermanual_july2018_v1.pdf

7. NOV Brandt. (2024). *King Cobra Venom Shale Shaker: Technical Specifications*. National Oilwell Varco. https://www.nov.com/products/king-cobra-venom-shale-shaker

8. Zhao, L., Zhao, Y., Bao, C., Hou, Q., & Yu, A. (2017). Optimisation of a circularly vibrating screen based on DEM simulation and Taguchi orthogonal experimental design. *Powder Technology*, 310, 307–317. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.049

9. Lal M., Hoberock L. L. (1988). Solids-conveyance dynamics and shaker performance. *SPE Drilling Engineering*, 3(4), 385–394. https://doi.org/10.2118/14389-PA

10. American Petroleum Institute. (2020). Recommended practice on drilling fluid processing systems evaluation (API RP 13C) (5th ed.). https://www.api.org/~/media/files/publications/whats%20new/13c_e5%20pa.pdf