

СВЯЩУК ЮРІЙ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0007-5398-8824>

e-mail: y.sviashchuk@gmail.com

ЗАГНІТКО ЯРОСЛАВ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0002-6870-7347>

e-mail: yaroslavzagnitko94@gmail.com

ВІБРАЦІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ РІДИН ВІД ТВЕРДИХ ВКЛЮЧЕНЬ: АКТУАЛЬНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ

У статті здійснено комплексний огляд сучасного стану, технічних характеристик і перспектив розвитку вібраційного обладнання для очищення рідин від твердих включень. Показано, що зростаюча потреба промисловості у високоефективних, енергоощадних та екологічно безпечних технологіях зумовлює активне впровадження вібраційних методів сепарації. Проведено класифікацію основних типів вібраційних систем – сіткових, ультразвукових, електромагнітних, п'єзоелектричних, мембранних та кавітаційних установок. Для кожного типу наведено характерні частотні діапазони, рівень ефективності очищення та специфічні області застосування у водоочисненні, хімічній, фармацевтичній, харчовій і нафтохімічній промисловості.

Окрему увагу приділено низькочастотним віброкавітаторам, здатним забезпечувати обробку рідин під збільшеним тиском, що дозволяє інтенсифікувати процеси кавітації, підвищити ефективність знезараження і зменшити енергоспоживання. Проаналізовано технічні параметри різних типів установок – амплітуду коливань, продуктивність, діапазон робочих тисків, термін служби. Доведено, що застосування вібраційних технологій скорочує тривалість обробки рідин, забезпечуючи стабільні результати навіть за змінних фізико-хімічних властивостей середовища.

Висвітлено інноваційні напрями розвитку галузі: інтеграцію систем IoT для автоматичного керування параметрами процесу, використання наноструктурованих мембран і смарт-матеріалів, створення гібридних та модульних систем, що поєднують різні принципи сепарації. Визначено основні технічні виклики, пов'язані з втомною міцністю конструкцій, стабілізацією режимів вібрації та запобіганням забиванню фільтрів. Зроблено висновок, що вібраційні методи очищення є перспективним напрямом розвитку енергоефективних і високопродуктивних технологій сепарації для широкого спектра галузей промисловості.

Ключові слова: вібраційне обладнання, очищення рідин, фільтрування, нанотехнології, енергоефективність.

SVIASHCHUK YURI**ZAGNITKO YAROSLAV**

Vinnytsia National Technical University

VIBRATION EQUIPMENT FOR CLEANING LIQUIDS FROM SOLID INCLUSIONS: CURRENT STATE AND PROMISING DIRECTIONS OF DEVELOPMENT

The article provides a comprehensive review of the current state, technical characteristics and development prospects of vibration equipment for cleaning liquids from solid inclusions. It is shown that the growing need of industry for highly efficient, energy-saving and environmentally friendly technologies leads to the active introduction of vibration separation methods. The main types of vibration systems are classified - mesh, ultrasonic, electromagnetic, piezoelectric, membrane and cavitation units. For each type, characteristic frequency ranges, cleaning efficiency levels and specific areas of application in water treatment, chemical, pharmaceutical, food and petrochemical industries are given. Special attention is paid to low-frequency vibration cavitators, capable of providing liquid processing under increased pressure, which allows to intensify cavitation processes, increase disinfection efficiency and reduce energy consumption. The technical parameters of different types of installations were analyzed - oscillation amplitude, productivity, operating pressure range, service life. It was proven that the use of vibration technologies reduces the duration of liquid processing, ensuring stable results even with variable physicochemical properties of the medium.

Innovative directions of industry development were highlighted: integration of IoT systems for automatic control of process parameters, use of nanostructured membranes and smart materials, creation of hybrid and modular systems that combine different separation principles. The main technical challenges associated with fatigue strength of structures, stabilization of vibration modes and prevention of filter clogging were identified. It was concluded that vibration cleaning methods are a promising direction for the development of energy-efficient and high-performance separation technologies for a wide range of industries.

Keywords: vibration equipment, liquid cleaning, filtration, nanotechnology, energy efficiency.

Стаття надійшла до редакції / Received 03.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Постановка проблеми та мета даної роботи

Сучасні технології очищення рідин від твердих включень переживають період стрімкого розвитку, при цьому особлива увага приділяється вібраційним методам завдяки їх високій ефективності, екологічності та універсальності застосування[1]. Вібраційне обладнання демонструє значні переваги порівняно з традиційними методами фільтрації, забезпечуючи ефективність очищення до 99% при одночасному зниженні енергоспоживання та експлуатаційних витрат[2]. Дослідження показують, що впровадження вібраційних технологій дозволяє скоротити тривалість обробки рідини на 20-25%. Інтенсивність сформованого кавітаційного поля також підвищується при використанні вібраційних методів[3]. Основними перспективними

напрямами розвитку є застосування нанотехнологій та створення гібридних систем[4].

Аналіз досліджень і публікацій

Проблематика очищення рідин від твердих включень є міждисциплінарною областю, що охоплює фундаментальні дослідження фізико-хімічних процесів, розробку нового обладнання та впровадження інноваційних технологічних рішень. Аналіз наукових публікацій останніх років свідчить про перехід від традиційних методів фільтрації до інтегрованих вібраційно-кавітаційних систем, які забезпечують вищу ефективність при значно нижчих енерговитратах.[3]

Фундаментальні основи застосування вібраційних та ультразвукових технологій ґрунтовно розкрито у монографії Луговського О.Ф. та співавторів, де систематизовано фізико-механічні принципи акустичної кавітації. Автори доводять, що оптимізація амплітудно-частотних параметрів ультразвукових генераторів у діапазоні 15–40 кГц дозволяє підвищити якість очищення у 1,3–1,5 раза порівняно з класичними методами. [1] Ця концепція знайшла практичне втілення у роботі Шевчука Л.І. з колегами, які запропонували низькочастотний віброкавітатор резонансного типу. Їхня установка працює під тиском до 0,4 МПа при температурах до 100°C, забезпечуючи продуктивність понад 2 м³/год. Скорочення часу обробки досягає 20–30%. Принциповою відмінністю цього рішення є використання електромагнітного приводу без еластичних гофр, що підвищує надійність конструкції в агресивних середовищах [3]. Порівняльні характеристики основних типів вібраційного обладнання для очищення рідин наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Типи вібраційного обладнання для очищення рідин

Тип обладнання	Принцип дії	Частотний діапазон (Гц)	Ефективність очищення (%)	Основне застосування
Вібраційні сіткові фільтри	Механічна вібрація сітки	20-100	85-95	Водоочищення, хімічна промисловість
Ультразвукові фільтри	Ультразвукові хвилі	20000-40000	95-99	Медицина, фармацевтика
Електромагнітні фільтри	Електромагнітні хвилі	10-200	80-92	Промислові рідини
П'єзоелектричні фільтри	П'єзоефект	50-5000	88-96	Електроніка
Мембранні з вібрацією	Мембранна фільтрація + вібрація	15-150	15-150	Зворотний осмос
Вібраційні кавітатори	Віброрезонансна кавітація	50-120	90-99	Знезараження води

Розвиваючи ідею резонансних систем, науковці КПІ розробили методіку розрахунку циліндричного ультразвукового фільтра з ефектом регенерації. Таке рішення особливо важливе для фармацевтичної галузі, де потрібна стерильність без застосування хімічних реагентів[8].

З точки зору енергоефективності, значний внесок зробив Черно О. О. у своїй праці, яка присвячена вдосконаленню електромагнітного вібраційного приводу, здатного працювати в режимі білярезонансних частот. Експериментально доведено, що така конфігурація забезпечує енергозбереження на рівні 25–30% при збереженні стабільності амплітуд коливань.[7]. Ці розробки добре узгоджуються з сучасними тенденціями автоматизації, описаними у технічних оглядах Porvoo Clean-Tech та HSD Industry [4, 12].

Відтак, сучасний стан досліджень характеризується конвергенцією класичних методів фільтрації з вібраційно-кавітаційними технологіями та їх інтеграцією з цифровими системами керування [3]. Це створює основу для переходу до інтелектуальних енергоефективних систем очищення рідин, здатних адаптуватися до змінних умов експлуатації та забезпечувати максимальну економічну й екологічну ефективність.

Особливе місце серед сучасних технологій займають вібраційні кавітатори, розроблені в Національному університеті «Львівська політехніка». Ці пристрої реалізують принцип віброрезонансної кавітаційної обробки рідин через збурення кавітаційних процесів. Принцип роботи полягає у підведенні до резонансного коливного режиму наявних у рідинах зародків кавітації. Низькочастотні віброкавітатори здатні забезпечувати високоякісну обробку хімічно-активних рідин під тиском до 0,35-0,40 Мпа. Такі системи працюють при підвищених температурах до 100°C. Продуктивність віброкавітаторів може досягати 2,0 м³/год [3].

Конструктивно такі кавітатори складаються з герметично закритої робочої камери з симетричними фланцями. До фланців приєднані циліндричні корпуси з електромагнітними приводами. Ключовою особливістю є відсутність еластичних гофр, що забезпечує можливість роботи при підвищених тисках та температурах. Загальний вигляд вібраційного кавітатора наведено на рисунку 1.

Система автоматичного регулювання частоти через прилад AFC-120 дозволяє оптимізувати режими роботи. Оптимізація проводиться залежно від характеристик оброблюваної рідини [3].

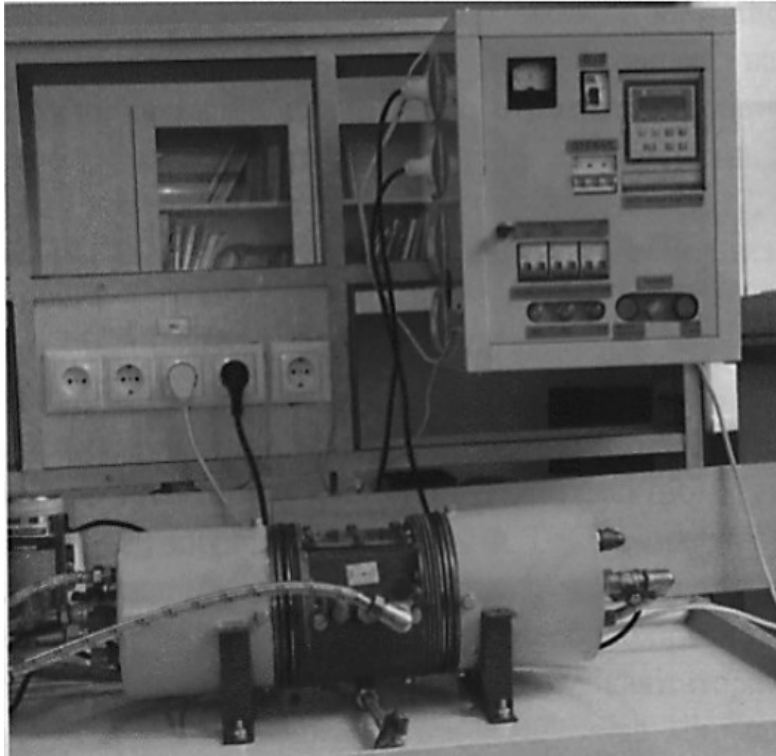


Рис. 1. Світлина вібраційного кавітатора [3]

Експериментальні дослідження показали, що для рідин на основі води оптимальний діапазон частот коливань зародків кавітації становить 64-70 Гц за нормальних умов. При роботі в таких частотних діапазонах амплітуда коливань зростає на 25-30%. Це підвищує інтенсивність кавітаційного поля та скорочує тривалість обробки на 20-25%. Важливо відзначити, що підвищення температури оброблюваної рідини знижує значення кратного діапазону частот на 1-1,2 Гц при підвищенні температури на 1°C. Збільшення тиску, навпаки, підвищує ці значення [3].

Технічні характеристики та порівняльний аналіз

Сучасне вібраційне обладнання характеризується широким діапазоном технічних параметрів, що дозволяє вибирати оптимальні рішення для конкретних технологічних задач. Вібраційні сита, що використовуються в гірничій справі та будівництві, працюють у частотному діапазоні 15-50 Гц. Амплітуда коливань таких систем становить 1-5 мм. Продуктивність вібраційних сит може досягати 90 л/с [5]. Ці системи ефективно класифікують матеріали за розміром частинок, досягаючи ефективності сепарації 85-95% [10]. Приклад конструкції вібраційного сепаратора наведено на рисунку 2.



Рис. 2 Вібраційний сепаратор від компанії DAHAN

Ультразвукові системи, незважаючи на найвище енергоспоживання ($2,5 \text{ кВт/м}^3$), демонструють найкращі показники очищення. Це досягається завдяки можливості роботи з частинками розміром до $0,1 \text{ мкм}$ [6]. Мембранні фільтри з вібрацією займають проміжне положення. Вони поєднують високу ефективність (92-98%) з помірним енергоспоживанням ($1,5 \text{ кВт/м}^3$) [9]. Термін служби мембранних систем з вібрацією може досягати 8 років. Порівняльні технічні характеристики основних типів вібраційного обладнання наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики основних типів вібраційного обладнання

Характеристика	Сіткові фільтри	Ультразвукові фільтри	Мембранні з вібрацією	Кавітатори
Діапазон частот (Гц)	20-100	20000-40000	15-150	50-120
Амплітуда коливань (мм)	1-5	0.01-0.1	0.5-3	2-4
Продуктивність ($\text{м}^3/\text{год}$)	5-50	1-20	2-30	0.5-2.0
Розмір частинок (мкм)	50-5000	0.1-100	0.001-10	0.01-1000
Робочий тиск (МПа)	0.1-1.0	0.1-0.6	0.2-4.0	0.1-0.4
Температура експлуатації ($^{\circ}\text{C}$)	5-80	10-60	5-90	20-100
Термін служби (роки)	5-10	8-15	3-8	10-20

Інноваційні розробки та технологічні рішення

Інтеграція штучного інтелекту в системи вібраційного очищення рідин представляє один з найперспективніших напрямів розвитку. AI-керовані системи здатні в режимі реального часу оптимізувати параметри сепарації. Оптимізація проводиться на основі характеристик вхідного матеріалу. Це призводить до зниження енергоспоживання на 25-30%. При цьому одночасно відбувається підвищення продуктивності на 15-20% [4].

Такі системи використовують алгоритми машинного навчання для аналізу взаємозв'язків між параметрами процесу та якістю очищення.

Розумні системи моніторингу та автоматизації базуються на технологіях Інтернету речей (IoT). Вони дозволяють відстежувати ефективність сепарації в режимі реального часу. Такі системи прогнозують потреби в обслуговуванні та коригують процеси автоматично. Це зменшує потребу в ручному контролі.

Знижуються трудовитрати та підвищується надійність роботи обладнання. Автоматизовані системи можуть інтегруватися з існуючими виробничими лініями [11].

Нанотехнології відкривають революційні можливості для вдосконалення процесів твердо-рідинної сепарації. Наноструктуровані мембрани з прецизійно контрольованими розмірами пор здатні досягати надвисокої селективності. Такі мембрани дозволяють розділяти молекули, що відрізняються за розміром менш ніж на $0,1 \text{ нанометра}$. Деякі нано-інженерні мембрани демонструють ефективність видалення специфічних забруднень до 99,999%. Це значно перевершує можливості традиційних технологій [4].

Смарт-наноматеріали реагують на зовнішні стимули, такі як pH, температура або магнітні поля. Вони створюють основу для динамічних систем сепарації. Такі системи здатні адаптуватися в режимі реального часу до змін складу вхідного потоку. Нанокаталізатори та нанoadсорбенти з надвисокою площею поверхні можуть бути налаштовані для селективного вилучення специфічних забруднень. Магнітні наночастинки, функціоналізовані специфічними лігандами, використовуються для цільового видалення важких металів з промислових стічних вод.

Гібридні технології, що поєднують кілька методів сепарації, набувають все більшої популярності. Це зумовлено можливістю використання переваг кожної техніки. Поєднання мембранної та центрифужної систем забезпечує покращені результати сепарації. Такі результати досягаються для складних застосувань порівняно з системами, що використовують лише один метод. У високотехнологічних галузях гібридні системи демонструють кращі результати сепарації. Це досягається завдяки синергетичному ефекту різних принципів дії [11].

Розробка модульних систем з можливістю швидкого коригування потужності набуває поширення в галузях зі змінними вимогами до продуктивності. Такі системи забезпечують легке обслуговування. Вони дозволяють оперативно адаптуватися до змін технологічного процесу без значних капітальних вкладень. Гібридні декантерні системи інтегрують центрифужну сепарацію з мембранною фільтрацією. Деякі системи також використовують електрокоагуляцію. Це значно підвищує загальну ефективність сепарації при зменшенні габаритних розмірів установок.

Галузеві застосування та практичні рішення

Вібраційні технології знаходять широке застосування в системах водоочищення. Це зумовлено їх екологічністю та відсутністю потреби в хімічних реагентах. Вібраційні системи очищення стають популярним методом завдяки ефективності та простоті використання. У сфері муніципального водопостачання вібраційні фільтри забезпечують надійне видалення механічних домішок. Вони ефективно видаляють суспензії та колоїдні частинки. Системи з вібраційною регенерацією дозволяють значно подовжити інтервали між обслуговуванням фільтрів. Це знижує експлуатаційні витрати.

У хімічній промисловості вібраційне обладнання використовується для очищення технологічних рідин. Воно ефективно видаляє каталізаторні маси, полімерні включення та інші тверді домішки. Електромагнітні

віброфільтри ефективно працюють з агресивними середовищами. Це досягається завдяки можливості виготовлення з корозійностійких матеріалів. Центрифужні віброфільтри знаходять застосування в процесах переробки нафти. Вони використовуються для відділення твердих парафінів та асфальтенів [10].

Ультразвукові системи широко використовуються для очищення розчинників та органічних рідин від мікрочастинок. Високочастотна вібрація забезпечує ефективну дезагрегацію забруднень. Це досягається навіть у в'язких середовищах. П'єзоелектричні фільтри застосовуються в процесах тонкого органічного синтезу. Вони використовуються там, де потрібна висока чистота кінцевих продуктів [8].

У харчовій промисловості вібраційні сита та фільтри забезпечують якісну сепарацію харчових інгредієнтів. Вони також ефективно сепарують готові продукти. Вібраційні системи дозволяють підвищити ефективність та точність грохочення. Це забезпечує якість та цілісність харчових продуктів [12]. У виробництві соків та напоїв застосовуються спеціалізовані вібраційні фільтри. Вони використовуються для видалення м'якоті та інших твердих включень [13].

Фармацевтична промисловість висуває особливо високі вимоги до чистоти продукції. Це робить вібраційні технології незамінними для фільтрування лікарських препаратів. Ультразвукові фільтри забезпечують видалення мікроорганізмів та субмікронних частинок. При цьому не використовується хімічна стерилізація [6].

Перспективні напрями розвитку та майбутні технології

Одним з пріоритетних напрямів розвитку є створення енергоефективних вібраційних систем. Такі системи працюють у резонансних режимах. Дослідження показують, що робота віброкавітаторів у частотних діапазонах, кратних резонансним частотам, дозволяє підвищити ефективність процесу очистки на 25-30%. При цьому одночасно знижується енергоспоживання. Розробка систем автоматичного налаштування резонансних частот становить перспективний напрям досліджень. Така оптимізація проводиться на основі аналізу характеристик оброблюваної рідини [3].

Електромагнітні вібраційні приводи демонструють значні переваги у порівнянні з іншими типами приводів. Це досягається завдяки можливості точного керування параметрами коливань. Забезпечення резонансного режиму роботи через автоматичне керування частотою дозволяє досягти максимальної енергетичної ефективності. Також важливе автоматичне керування амплітудою коливань [7]. Перспективними є розробки систем із змінною геометрією коливальних елементів. Такі системи дозволяють адаптуватися до різних типів рідин. Основні перспективні напрями розвитку вібраційного обладнання наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Перспективні напрями розвитку вібраційного обладнання

Напрямок розвитку	Технологічне рішення	Переваги
Штучний інтелект	AI-оптимізовані системи	Зниження енергоспоживання на 25-30%
Нанотехнології	Наноструктуровані мембрани	Селективність до 99,999%
Гібридні технології	Поєднання різних методів	Ефективність +15-25%
Енергоефективність	Резонансні режими	Економія енергії до 40%
ІоТ автоматизація	Інтелектуальні датчики	Зменшення обслуговування на 50%

В Україні активно розвиваються дослідження в галузі вібраційних технологій. Вібраційні технології відкривають нові горизонти науки та промисловості. Українські науково-дослідні інститути працюють над створенням інноваційних рішень. Розробки ведуться у сфері вібраційного обладнання для різних галузей економіки [14]. Перспективним напрямом є розвиток вібраційних технологій для потреб агропромислового комплексу. Застосування вібраційних методів у виробництві біопалива показує високу ефективність [15].

Технічні виклики та шляхи їх вирішення

Одним з основних технічних викликів вібраційних систем є забезпечення довготривалої надійності роботи. Системи працюють в умовах постійних механічних навантажень. Циклічні навантаження призводять до втомного руйнування конструкційних елементів [7]. Особливо це проявляється в зонах концентрації напружень. Вирішення цієї проблеми лежить у застосуванні сучасних матеріалів з підвищеною втомною міцністю. До таких матеріалів належать титанові сплави та керамічні композити [2].

Розробка систем активної вібраційної ізоляції дозволяє мінімізувати передачу коливань. Коливання не передаються на несучі конструкції та суміжне обладнання. Використання магнітних підшипників значно підвищує надійність. Також застосовуються безконтактні ущільнення. Це зменшує потребу в обслуговуванні. Впровадження систем безперервного моніторингу технічного стану дозволяє прогнозувати відмови. Використовуються методи вібродіагностики. Це дозволяє планувати профілактичні роботи [7].

Підтримання стабільних параметрів вібрації в умовах змінних властивостей оброблюваної рідини становить значний технічний виклик. Зміни в'язкості, густини та концентрації твердих частинок впливають на ефективність процесу сепарації [3]. Розробка адаптивних систем керування з використанням нейронних мереж дозволяє автоматично коригувати параметри вібрації. Коригування проводиться залежно від поточних характеристик процесу [11].

Проблема забивання фільтрувальних елементів вирішується через застосування ефективних систем зворотної промивки. Також використовуються системи самоочищення. Використання пульсуючих режимів роботи сприяє видаленню накопичених забруднень. Ефективною є періодична зміна напрямку коливань.

Розробка само регенеративних поверхонь з використанням наноструктур відкриває нові можливості. Це дозволяє створювати самоочисні фільтрувальні елементи [4].

Висновки

Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку вібраційного обладнання для очищення рідин від твердих включень свідчить про динамічний розвиток цієї галузі технологій. Вібраційні методи очищення демонструють суттєві переваги порівняно з традиційними технологіями. Вони забезпечують високу ефективність сепарації до 99%. При цьому знижується енергоспоживання та експлуатаційні витрати. Різноманітність типів вібраційного обладнання дозволяє вибирати оптимальні рішення. Це справедливо для широкого спектру промислових застосувань - від простих сіткових фільтрів до складних кавітаційних реакторів.

Ключовими технологічними трендами найближчих років є інтеграція штучного інтелекту та IoT-технологій. Це дозволить створити повністю автоматизовані самоадаптивні системи з мінімальними витратами на обслуговування. Застосування нанотехнологій відкриває революційні можливості. Можна досягти надвисокої селективності сепарації до 99,999%. Стає можливим створення принципово нових типів фільтрувальних матеріалів. Гібридні технології забезпечують синергетичний ефект. Відбувається підвищення загальної ефективності процесів.

Перспективи розвитку вібраційного обладнання для очищення рідин від твердих включень характеризуються високим інноваційним потенціалом. Існують широкі можливості для створення конкурентоспроможних технологічних рішень. Успішна реалізація цього потенціалу потребує координації зусиль науково-дослідних установ, промислових підприємств та інвестиційних фондів. Це необхідно для забезпечення трансферу технологій від лабораторних розробок до промислового впровадження.

Література

1. Ультразвукові кавітаційні технології. Знезараження та фільтрування: монографія / О. Ф. Луговський, І. А. Гришко, А. І. Зілінський, А. В. Шульга, А. В. Мовчанюк, І. М. Берник. Вінниця : ФОП Кушнір Ю.В., 2022. 268 с.
2. Henan Quanhong Filtration Equipment Co., Ltd. Filter Press, Plate Filter Press, Membrane Filter Press Manufacturer & Supplier - Henan Quanhong Filtration Equipment Co., Ltd. URL: https://www.qhfilterpress.com/Automatic-Chamber-Filter-Press-pd563644068.html?gad_source=1&gad_campaignid=22733385998&gclid=CjwKCAjwu9fHBhAWEiwAzGRC_1F6QHjOJovxnZEvRLocbisJtCIZDEwaf2nvGxNhWvakNYJguIWVPhoCG1AQAvD_BwE (дата звернення 04.10.2025).
3. Низькочастотний віброкавітатор для кавітаційної обробки хімічно-активних рідин, рідин під тиском та при підвищених температурах / Л. І. Шевчук та ін. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2014. № 48.
4. Top Solid-Liquid Separation Equipment for 2025. PORVOO Clean-Tech. URL: <https://porvoo.com.cn/blog/top-solid-liquid-separation-equipment-for-2025/> (дата звернення: 04.10.2025).
5. Учасники проєктів Вікімедіа. Вібраційне сито – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Вібраційне_сито (дата звернення: 04.10.2025).
6. Ultrasound-assisted filtration system - Google Patents. Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/US6221255B1/en> (дата звернення: 06.10.2025).
7. Черно О. О., Гуров А. П., Иванов А. В. Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку електромагнітного вібраційного приводу автоматизованих технологічних ліній. Збірник наукових праць нук. 2018. 3-4.
8. Method for calculating a cylindrical ultrasonic cavitation filter chamber with a regeneration effect | Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparobuduvannia. Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparobuduvannia. URL: <https://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1659> (дата звернення 06.10.2025).
9. Карпенко М., Радовенчик В. Дослідження можливостей регенерації мембран зворотного осмосу. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/92312f80-66a3-4ac4-b8ce-e4f89372157a/content> (дата звернення: 06.10.2025).
10. Solid-liquid separation vibrating screen. Dahan Machinery Co. URL: <https://www.sieving.net/Solid-liquid-separation-vibrating-screen.html> (дата звернення: 06.10.2025).
11. Innovative Approaches to Solid-Liquid Separation. Slurry Separation. URL: <https://slurryseparation.com/solid-liquid-separation/> (дата звернення: 07.10.2025).
12. Features and application scenarios of vibrating screen. HSD Industry. URL: <https://www.hsd-industry.com/news/features-and-application-scenarios-of-vibrating-screen/> (дата звернення: 07.10.2025).
13. Vibrating Screens for Liquid & Fine Solid Separation. GAP Technology. URL: <https://www.gaptechnology.co.uk/waste-water-screening-machines/vibrating-screens/> (дата звернення: 07.10.2025).
14. Вібраційні технології: нові горизонти науки та промисловості. Національний університет "Львівська політехніка". URL: <https://lpnu.ua/news/vibratsiini-tekhnohologii-novi-horyzonty-nauky-ta-promyslovosti> (дата звернення: 07.10.2025).

15. Гевко Б. М., Рогатинський Р. М., Дячун А. Є. Application of vibration effects in biofuel production. Вібрації в техніці та технологіях. 2021. No. 2(101). URL: <http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/June2021/muH9Q9KYEdUEM0XaYOBf.pdf> (дата звернення: 07.10.2025).

References

1. Ultrazvukovi kavitatsiini tehnolohii. Znezarazhennia ta filtruvannia: monohrafiia / O. F. Luhovskiy, I. A. Hryshko, A. I. Zilinskyi, A. V. Shulha, A. V. Movchaniuk, I. M. Bernyk. Vinnytsia : FOP Kushnir Yu. V., 2022. 268 s.
2. Henan Quanhong Filtration Equipment Co., Ltd. Filter Press, Plate Filter Press, Membrane Filter Press Manufacturer & Supplier - Henan Quanhong Filtration Equipment Co., Ltd. URL: https://www.qhfilterpress.com/Automatic-Chamber-Filter-Press-pd563644068.html?gad_source=1&gad_campaignid=22733385998&gclid=CjwKCAjwu9fHBhAWEiwAzGRC_1F6QHjOJovxnZEVRLoebisJtCIZDEwaf2nvGxNhWvakNYJguIWVPhoCG1AQAvD_BwE (data zvernennia 04.10.2025).
3. Nyzkochastotnyi vibrokavitator dlia kavitatsiinoi obrobky khimichno-aktyvnykh ridyn, ridyn pid tyskom ta pry pidvyshchenykh temperaturakh / L. I. Shevchuk ta in. Avtomatyzatsiia vyrobnychyykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni. 2014. № 48.
4. Top Solid-Liquid Separation Equipment for 2025. PORVOO Clean-Tech. URL: <https://porvoo.com.cn/blog/top-solid-liquid-separation-equipment-for-2025/> (data zvernennia: 04.10.2025).
5. Uchasnyky proektiv Wikimedia. Vibratsiine syto – Vikipediia. Vikipediia. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Vibratsiine_syto (data zvernennia: 04.10.2025).
6. Ultrasound-assisted filtration system - Google Patents. Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/US6221255B1/en> (data zvernennia: 06.10.2025).
7. Chernov O. O., Hurov A. P., Ivanov A. V. Analiz suchasnoho stanu ta perspektyv rozvytku elektromagnitnoho vibratsiinoho pryvodu avtomatyzovanykh tekhnolohichnykh liniy. Zbirnyk naukovykh prats nuk. 2018. 3-4.
8. Method for calculating a cylindrical ultrasonic cavitation filter chamber with a regeneration effect | Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. URL: <https://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1659> (data zvernennia 06.10.2025).
9. Karpenko M., Radovenchuk V. Doslidzhennia mozhlyvosti reheneratsii membran zvorotnoho osmosu. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/92312f80-66a3-4ac4-b8ce-e4f89372157a/content> (data zvernennia: 06.10.2025).
10. Solid-liquid separation vibrating screen. Dahan Machinery Co. URL: <https://www.sieving.net/Solid-liquid-separation-vibrating-screen.html> (data zvernennia: 06.10.2025).
11. Innovative Approaches to Solid-Liquid Separation. Slurry Separation. URL: <https://slurryseparation.com/solid-liquid-separation/> (data zvernennia: 07.10.2025).
12. Features and application scenarios of vibrating screen. HSD Industry. URL: <https://www.hsd-industry.com/news/features-and-application-scenarios-of-vibrating-screen/> (data zvernennia: 07.10.2025).
13. Vibrating Screens for Liquid & Fine Solid Separation. GAP Technology. URL: <https://www.gaptechnology.co.uk/waste-water-screening-machines/vibrating-screens/> (data zvernennia: 07.10.2025).
14. Vibratsiini tehnolohii: novi horyzonty nauky ta promyslovosti. Natsionalnyi universytet "Lvivska politehnika". URL: <https://lpnu.ua/news/vibratsiini-tehnolohii-novi-horyzonty-nauky-ta-promyslovosti> (data zvernennia: 07.10.2025).
15. Hevko B. M., Rohatynskyi R. M., Diachun A. Ye. Application of vibration effects in biofuel production. Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. 2021. No. 2(101). URL: <http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/June2021/muH9Q9KYEdUEM0XaYOBf.pdf> (data zvernennia: 07.10.2025).