

УДК 621.926:621.867.5((66.095.5))
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/32>

Табачун М.О.

Сумський державний університет

Скиданенко М.С.

Сумський державний університет

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЙ ВІБРАЦІЙНИХ ПРИЛЕРІВ

У дослідженні здійснено комплексний аналіз сучасного стану, тенденцій розвитку та технологічних особливостей конструкцій вібраційних прилерів, що застосовуються у виробництві гранульованих мінеральних добрив, зокрема аміачної селітри, пористої аміачної селітри та карбаміду. Розглянуто систематизований огляд принципів роботи статичних, акустичних, вібраційних та обертових грануляційних систем із виокремленням конструктивних параметрів, які найбільше впливають на стабільність формування струменя розплаву, рівномірність відриву крапель та однорідність отримуваних гранул. Особливу увагу приділено фізичним механізмам відриву краплі, включно з взаємодією інерційних, в'язкісних та капілярних сил, умовами формування та руйнування стабільної ділянки струменя, а також впливом контрольованих механічних коливань на характер розвитку капілярної нестійкості.

Детально проаналізовано динамічні режими роботи вібраційних прилерів: роль частоти та амплітуди збудження, механічну реакцію перфорованих елементів, зміни радіуса перетяжки струменя перед відривом, періодичність формування крапель та вплив цих чинників на гранулометричний склад продукту. Показано, що оптимізація геометрії перфорованих пластин, удосконалення характеристик коливальних вузлів та застосування керованого збудження забезпечують суттєве підвищення однорідності гранул за умов змінної подачі розплаву. Окремо відзначено зростаючу роль цифрових моделей, систем високоточного моніторингу та адаптивних алгоритмів керування, які дають змогу передбачати поведінку струменя, своєчасно коригувати параметри процесу та стабілізувати грануляцію в промислових масштабах.

Отримані результати свідчать про поступовий перехід від традиційних механічних рішень до інтегрованих інтелектуальних систем, у яких конструктивні, динамічні та керувальні аспекти розглядаються комплексно. Це забезпечує підвищення надійності, повторюваності та якості процесу прилоутворення, що має важливе значення для сучасного виробництва мінеральних добрив.

Ключові слова: вібраційні прилери, грануляція, інтенсивність коливань, ефективність процесу, динамічне керування.

Постановка проблеми. У сучасному виробництві мінеральних добрив, де річні обсяги випуску досягають сотень тисяч і мільйонів тонн, ключовим етапом технологічного циклу залишається формування гранул у грануляційних баштах. Оскільки більшість підприємств прагне збільшувати продуктивність без спорудження нових баштових комплексів, пріоритетним напрямом модернізації стає удосконалення диспергувальних вузлів, серед яких провідне місце займають статичні та обертові вібраційні гранулятори. Їхня ефективність зумовлена можливістю ініціювати керовані гідродинамічні збурення та забезпечувати регулярний розпад струменя розплаву з фор-

муванням гранул стабільного гранулометричного складу навіть за зміни технологічних параметрів.

Водночас забезпечення стабільної роботи вібраційних прилерів у промислових умовах залишається складною інженерною задачею. Струмień розплаву, що виходить із отвору перфорованої оболонки, характеризується динамічною нестійкістю: на нього одночасно впливають капілярні сили, інерційні ефекти, флуктуації внутрішнього тиску, вісесиметричні збурення та чинники навколишнього газового середовища. Природна довжина розпаду струменя визначається фізичними властивостями розплаву й геометрією отвору, і навіть незначні зміни витрати чи темпера-

тури здатні суттєво впливати на режим утворення перетяжок [1]. Накладення вібраційного впливу – основний принцип роботи вібраційних грануляторів – модифікує характер нестабільностей струменя. Залежно від частоти, амплітуди та форми збуджувального сигналу процес розпаду може переходити як у впорядкований режим відриву крапель, так і в нерегулярне дроблення. В обертових вібраційних грануляторах до цього додається вплив відцентрового тиску, складної внутрішньої гідродинаміки розплаву та коливальних процесів, що передаються через диск-випромінювач і перфороване днище. Нелінійні властивості коливальних систем, зміна маси розплаву в кошику, температурні градієнти та відмінність реальних сигналів від гармонічних моделей ускладнюють керування динамікою відриву крапель. Додатковим фактором є теплові процеси: після виходу з отвору крапля зазнає інтенсивного охолодження, і, як показано у дослідженні [2], початкові умови теплообміну впливають на геометрію, щільність і подальше формування гранули. У промислових умовах саме неузгодженість між гідродинамікою струменя, режимами збудження та тепловими процесами призводить до збільшення частки гранул нестабільної форми, дефектних утворень або дрібнодисперсної фракції.

У підсумку формулюється науково-технічна проблема розроблення конструкцій вібраційних прилерів, здатних забезпечувати стабільний і керований розпад струменя розплаву в широкому діапазоні навантажень, температур і швидкостей обертання. Її вирішення передбачає поглиблене вивчення внутрішньої гідродинаміки перфорованих оболонок, взаємодії вимушених коливань із течією розплаву, впливу параметрів диска-випромінювача на тиск у зоні отворів, а також створення методів прогнозування гранулометричного складу на основі точного керування параметрами збудження. Поєднання вдосконалених фізичних моделей, сучасних конструктивних підходів і адаптивних систем керування визначає актуальність подальших досліджень у галузі вібраційних грануляторів для виробництва мінеральних добрив.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях проблематика стабільності та керованості процесів у вібраційних грануляторах розглядається як ключовий чинник формування однорідного гранулометричного складу у виробництві мінеральних добрив. Механічні коливання, які накладаються на струмінь розплаву в статичних та обертових вібраційних грануляторах, визначають механізм утворення перетяжок,

швидкість відриву крапель та розвиток капілярної нестійкості. Це потребує високоточного контролю параметрів збудження та коректних моделей взаємодії коливань із гідродинамікою струменя.

У науковій роботі [3] показано, що зміна частоти та амплітуди накладених коливань здатна істотно змінювати характер поверхневих хвиль і процес формування краплі. Автори продемонстрували, що навіть незначні коливальні відхилення можуть порушувати регулярність руйнування струменя, що є критично важливим для промислових прилерів. Фундаментальні закономірності природного розпаду рідинного струменя викладені у раніше згаданій праці [1]. Доведено залежність довжини стабільної ділянки струменя від поєднання капілярних, інерційних та реологічних властивостей. Запропонований авторами підхід дозволяє моделювати вплив зовнішніх збурень, що на пряму корелює з роботою вібраційних грануляторів, де на рідину діють регулярні вимушені коливання. Прикладний аспект взаємодії струменя з коливальними елементами конструкції розкрито у дослідженні А. Потніса та А. Сахи [4]. Вони встановили, що коливання навіть малої амплітуди впливають на геометрію струменя та момент відриву краплі, що підтверджує доцільність удосконалення перфорованих оболонок та вузлів передачі коливань у прилерах.

Окремим напрямом є врахування температурних ефектів. У дослідженні [2] доведено, що температурні градієнти на ранніх стадіях охолодження крапель визначають подальшу морфологію гранул та їхню стійкість до механічних деформацій. У баштових виробництвах мінеральних добрив це безпосередньо впливає на якість готової продукції. Сфера діагностики та високоточного моніторингу також активно розвивається. Наукова робота К. Рембе та ін. [5] демонструє можливість застосування лазерно-доплерівської віброметрії для контролю коливань конструктивних елементів у реальному часі. Такий підхід відкриває перспективи впровадження безконтактних систем контролю стану вібраційних грануляторів. У науковій статті Х. Вана та ін. [6] підкреслено, що для складних механічних систем важливим є врахування локальних резонансних зон, власних частот та форм коливань при моделюванні динаміки обладнання. Це безпосередньо стосується перфорованих оболонок прилерів, які працюють як системи зі змінним навантаженням і потребують точного врахування коливальних характеристик.

Дослідження поведінки гранульованих середовищ під дією коливань, представлені П. Вотсоном

та ін. [7], показують, що насипний гранульований матеріал реагує на зовнішні коливання чутливо та може змінювати структуру руху залежно від амплітудно-частотних характеристик. Це означає, що параметри збудження мають регулюватися з високою точністю, щоб уникнути нерівномірного гранулоутворення. Важливий внесок зроблено також у сфері досліджень поведінки рідини на поверхнях зі змінними поверхневими властивостями. У роботі А. С. Раві та С. Далві [8] описано механізми деформації межі поділу фаз під дією коливань, що є суттєвим для моделювання початкових стадій формування крапель. Ц. Ян та ін. [9] показали, що флуктуації тиску у зоні перед вихідним отвором можуть значно впливати на симетрію й стабільність струменя – параметр, що потребує врахування при оптимізації геометрії перфорованих оболонок.

Узагальнюючи, сучасні дослідження підтверджують багатофакторний характер процесів, що визначають роботу вібраційних грануляторів. Синтез гідродинамічних, коливальних та теплових моделей є необхідною умовою для подальшого вдосконалення конструкцій диспергуючих пристроїв у виробництві мінеральних добрив.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у визначенні сучасного стану та окресленні перспектив розвитку конструкцій прилерів, що працюють із контрольованим механічним збудженням і застосовуються у виробництві мінеральних добрив. Для досягнення поставленої мети проаналізовано конструктивні рішення статичних, акустичних, систем із механічним збудженням та обертових грануляторів, встановлено їхній вплив на стабільність капілярного струменя, момент відриву краплі та однорідність гранул. Окрему увагу приділено фізичним механізмам формування гранул у режимах, де на перфоровані елементи та потік діє періодичне збудження, зокрема ролі частоти й амплітуди та їх чутливості до змін властивостей розплаву. На цій основі оцінено динамічні режими роботи таких конструкцій і визначено параметри, що забезпечують стабільний гранулометричний склад у промислових умовах.

Виклад основного матеріалу. Формування гранул у вібраційних прилерах ґрунтується на закономірностях капілярної нестійкості, описаних класичною моделлю Релея, згідно з якою тонкий рідинний струмінь є нестійким відносно малих осьових збурень. За відсутності зовнішнього впливу струмінь зберігає стабільність на певній довжині, після чого на ньому формується перетяжка, що визначає момент відриву краплі.

Для однорідного потоку критичну довжину стабільної ділянки L_0 можна подати у вигляді співвідношення:

$$L_0 \approx 3,14d \left(1 + \frac{3We}{4} \right), \quad (1)$$

де d – діаметр отвору, а We – число Вебера, яке характеризує співвідношення інерційних і капілярних сил. Це рівняння дає змогу визначити межі природного розпаду струменя та оцінити момент формування первинної краплі у системах без механічних збурень, що узгоджується з результатами дослідження [1].

У разі накладання вібраційного впливу стабільність струменя змінюється, оскільки періодичні коливання створюють циклічні зміни тиску та швидкості витікання в зоні отворів. Амплітуда збудження A впливає на розвиток перетяжки та скорочує довжину стабільної ділянки, що можна описати узагальненим наближенням:

$$L = L_0 \left(1 - k \frac{A}{d} \right), \quad (2)$$

де k – коефіцієнт чутливості струменя до заданих збурень. За збільшення амплітуди відрив краплі відбувається раніше, а діаметр сформованих гранул зменшується завдяки інтенсивнішому розвитку капілярної нестійкості. Частота збудження визначає фазово-синхронізовану взаємодію між коливанням конструкції та моментом утворення перетяжки. За підвищених частот формується періодичний режим, у якому відрив краплі відбувається у фіксовані часові інтервали, що забезпечує стабільний діаметр гранул. У таких умовах механічний вплив стає домінуючим фактором, який задає темп краплеутворення незалежно від природної нестабільності струменя, що підтверджують експериментальні дослідження С. Мака та ін. [3].

На перебіг процесу істотно впливають властивості розплаву. Збільшення поверхневого натягу підвищує стабільність струменя й збільшує L_0 ; підвищена в'язкість сповільнює розвиток хвильових збурень; зміна температури визначає як в'язкісні, так і капілярні характеристики, від яких залежить рівномірність гранул. Як показано науковцями [2], початкові температурні умови формують різну швидкість охолодження первинних крапель і впливають на їхню геометрію та механічні властивості. Узгодження частоти, амплітуди та властивостей розплаву забезпечує керований режим грануляції, у якому формування перетяжки й момент відриву визначаються не випадковими збуреннями, а параметрами збудження. Саме поєднання дії капілярних сил, інерційних ефек-

тів і механічних коливань забезпечує можливість отримувати стабільний гранулометричний склад у вібраційних прилерах у широкому діапазоні технологічних режимів.

У промисловому виробництві мінеральних добрив гранулятори виконують ключову функцію формування стабільних струменів розплаву та перетворення їх у краплі з прогнозованими властивостями. Якість гранул визначається не тільки фізичними параметрами розплаву, а й геометрією перфорованої поверхні, режимом підведення розплаву, способом збудження струменя та умовами відриву краплі. Саме тому порівняння конструкцій грануляторів, що застосовуються в галузі, дозволяє оцінити характер їх впливу на стабільність струменя та гранулометрію продукту. Найпоширенішими рішеннями є лійковий статичний гранулятор, акустичний статичний гранулятор, вібраційний статичний гранулятор та група обертових грануляторів, кожен із яких формує власний режим краплеутворення.

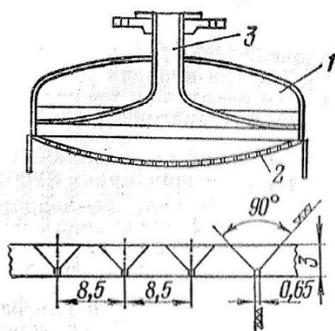


Рис. 1. Статичний гранулятор лійкового типу
1 – повітряна ізоляція; 2 – отвори витікання розплаву; 3 – патрубок вводу розплаву

Рисунок 1 демонструє конструкцію статичного гранулятора лійкового типу, у якому формування крапель відбувається внаслідок природної капілярної нестійкості струменя. Перфороване днище визначає геометрію витікання, а повітряна ізоляція навколо робочої зони допомагає зберегти стабільну температуру розплаву та запобігає різким тепловим градієнтам. Розподіл отворів на днищі забезпечує рівномірне утворення множини струменів, що є критичним для підтримання повторюваної гранулометрії при високих витратах. Патрубок подачі розплаву розміщений таким чином, щоб забезпечити симетричний розподіл матеріалу над перфорованою поверхнею, що зменшує ризик локальних коливань рівня та відхилення довжини стабільної ділянки струменя. Завдяки простій конструкції та мінімальній кількості рухомих елементів

цей тип гранулятора зберігає відтворюваність процесу за умови сталої температури й витрати, що робить його базовим рішенням у виробництві мінеральних добрив.

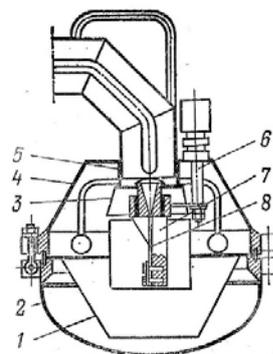


Рис. 2. Акустичний статичний гранулятор
1 – сітчастий фільтр; 2 – сферичне перфороване дно; 3 – щільове сопло; 4 – корпус; 5 – пристрій для регулювання витрати розплаву; 6 – механізм для переміщення резонансної пластини; 7 – рухомий кронштейн; 8 – резонансна пластина

Рисунок 2 ілюструє конструкцію акустичного статичного гранулятора, у якому процес формування крапель керується не лише гідростатичними параметрами, а й накладеним хвильовим збудженням. Сферичне перфороване дно визначає напрям витікання струменів та сприяє їх симетричному виходу, що важливо для підтримання стабільної довжини капілярної ділянки. Щільове сопло вирівнює подачу розплаву по всій робочій площині та зменшує ризик локальних коливань витрати. Сітчастий фільтр перед перфорованою частиною перешкоджає потраплянню включень, які можуть викликати нерівномірність струменя або порушення періодичності відриву. Резонансна пластина разом із механізмом її переміщення створює контрольовані високочастотні коливання, що впливають на момент утворення перетяжки. Така форма збудження дозволяє узгоджувати зовнішню хвильову дію із природними капілярними нестійкостями струменя, забезпечуючи повторюваність формування крапель у режимах змінної температури та витрати. Рухомий кронштейн і регулятор подачі розплаву дають змогу точно налаштувати робочий режим, що є важливим для підтримання стабільної гранулометрії у виробництві мінеральних добрив.

Рисунок 3 демонструє конструкцію вібраційного статичного гранулятора, у якому механічне збудження безпосередньо передається на перфороване дно через центральний стрижень. Така схема забезпечує синхронізацію коливань із моментом утворення перетяжки, завдяки чому

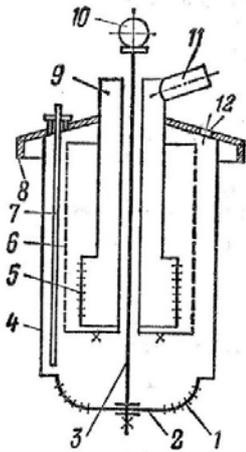


Рис. 3. Вібраційний статичний гранулятор

- 1 – перфороване дно; 2 – центральна неперфорована частина дна; 3 – стрижень;
4 – корпус гранулятора; 5 – розподільвач;
6 – сітка для фільтрації розплаву;
7 – п'єзометричний датчик рівня; 8 – ущільнююче кільце; 9 – кільцевий канал; 10 – вібратор;
11 – ввід розплаву; 12 – вихід повітря

відрив краплі відбувається у стабільних умовах навіть за зміни витрати або температури розплаву. Перфорована частина дна формує множину рівномірних струменів, а центральна неперфорована зона стабілізує розподіл тиску й запобігає локальному перерозподілу потоку під дією коливань. Живлення здійснюється через розподільвач, що вирівнює надходження розплаву по всій площині

дна, а фільтрувальна сітка утримує механічні домішки, які могли б порушити симетрію струменів. П'єзометричний датчик рівня дозволяє контролювати висоту шару розплаву, підтримуючи умови стабільного витікання. Кільцевий канал та ущільнювальне кільце забезпечують надійність конструкції й перешкоджають проникненню повітря у зону диспергування. Роботу гранулятора приводить у дію вібратор, параметри якого визначають характер зовнішнього збудження та впливають на повторюваність відриву крапель. Повітря відводиться через окремий канал, що сприяє збереженню стабільного тиску всередині корпусу. Сукупність цих елементів дозволяє формувати гранули із передбачуваною геометрією у широкому діапазоні технологічних режимів, характерних для виробництва мінеральних добрив.

Рисунок 4 подає три конструктивні варіанти обертових грануляторів, що застосовуються у виробництві мінеральних добрив для диспергування розплаву через перфоровану оболонку під дією відцентрових сил. В основі їхньої роботи лежить формування тонкого шару розплаву на внутрішній поверхні оболонки та подальший винос крапель за межі апарата при обертанні. У варіанті з циліндрично-конічною оболонкою (а) розподілення розплаву здійснюється радіальними лопатками, які рівномірно подають його на стінку, забезпечуючи стабільний шар і передбачуваний характер відриву крапель. П'єзометрична трубка

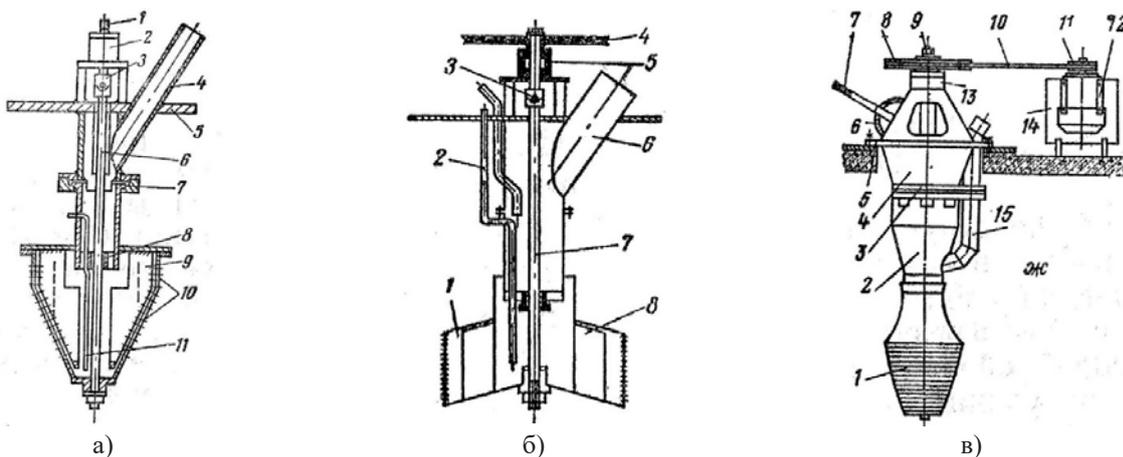


Рис. 4. Обертові гранулятори

- а) лопатевий з циліндрично-конічною оболонкою: 1 – вал приводу; 2 – підшипники; 3 – шарнірна муфта; 4 – патрубок для підведення розплаву; 5 – фланець; 6 – нижній вал; 7 – шарове з'єднання; 8 – втулка; 9 – радіальні лопатки; 10 – перфорована оболонка; 11 – п'єзометрична труба для контролю навантаження;
б) лопатевий з циліндричною оболонкою: 1 – перфорована оболонка; 2 – п'єзометричний датчик рівня розплаву; 3 – шарнірна муфта; 4 – шкала; 5 – вузол підшипників; 6 – ввід розплаву; 7 – вал; 8 – лопаті;
в) марки ГрЦСа-40 з дво- та чотирьохсекційними перфорованими конічними оболонками і пристроєм для розподілення розплаву: 1 – перфорована оболонка; 2 – живильна камера; 3, 13 – підшипникові вузли; 4 – корпус; 5 – опорна плита; 6 – шкала; 7 – важіль для керування пристроєм розподілення розплаву; 8, 11 – шків; 9 – вал; 10 – пасова передача; 12 – електродвигун; 14 – плита для монтажу двигуна; 15 – патрубок для вводу розплаву

дає змогу контролювати навантаження та робочий рівень розплаву, що особливо важливо при змінній витраті. Конічна геометрія сприяє впорядкованому руху шару та зменшує вплив місцевих коливань на диспергування. Конструкція з циліндричною оболонкою (б) працює за аналогічним принципом, але має спрощену схему, де лопаті розподіляють розплав по внутрішній поверхні корпусу. Датчик рівня стабілізує товщину шару, що підтримує сталий режим формування крапель. У варіанті марки ГрЦСа-40 (в) використано дво- або чотирисекційні конічні оболонки зі спеціальним механізмом розподілу розплаву, який дозволяє балансувати подачу між секціями та забезпечувати рівномірність роботи при високих продуктивностях. Вибір типу обертового гранулятора визначається властивостями розплаву, необхідним діапазоном продуктивності та вимогами до гранулометричного складу. За рахунок регульованої швидкості обертання такі апарати здатні підтримувати стабільний режим краплеутворення, хоча чутливість до зміни товщини шару й до локальних неоднорідностей поверхні оболонки потребує точного налаштування робочих параметрів. Кожний тип гранулятора формує власний механізм контролю струменя: статичні конструкції працюють у рамках природної капілярної нестійкості, акустичні додають хвильове збудження, вібраційні дають змогу точно керувати моментом відриву, а обертові реалізують режим, у якому домінує відцентрова дія. Вибір конструкції визначається вимогами до продуктивності, стабільності струменя, чутливості до коливань температури та необхідного гранулометричного складу для конкретних умов виробництва мінеральних добрив.

Динамічна поведінка струменя у вібраційних прилерах визначає стабільність формування гранул і суттєво впливає на розподіл за діаметром. У базовому режимі довжина стабільної ділянки струменя L_0 описується класичним співвідношенням, що враховує діаметр отвору d , густину ρ , швидкість витікання v та поверхневий натяг σ :

$$L_0 \approx \pi d \left(1 + \frac{3 \rho v^2 d}{4 \sigma} \right), \quad (3)$$

що відображає вплив інерційних та капілярних сил на первинний момент формування перетяжки. У присутності коливань ця характеристика модифікується, оскільки амплітуда збудження змінює профіль струменя. Для узагальненої оцінки такої зміни використовують вираз:

$$L = L_0 \left(1 - k \frac{A}{d} \right), \quad (4)$$

де A – амплітуда збудження, а k – коефіцієнт чутливості струменя до прикладених деформацій. Зростання амплітуди призводить до більш раннього формування перетяжки, що зменшує розмір крапель та стабілізує гранулометричний склад. Частотна характеристика коливань відіграє не меншу роль. Зі збільшенням частоти ω інтервал між двома циклічними деформаціями шийки струменя скорочується, і момент відриву настає раніше. Для реального струменя це означає зменшення середнього діаметра краплі та підвищення рівномірності, оскільки фазова синхронізація коливального впливу з перебігом капілярної нестійкості зменшує вплив випадкових флуктуацій [2].

Важливою динамічною характеристикою є пульсації подачі розплаву. Навіть незначні зміни тиску всередині живильної камери призводять до періодичної зміни витратного режиму, що відбивається на діаметрі та швидкості витікання струменя. У вібраційних конструкціях ця пульсація частково компенсується коливаннями, однак ступінь компенсації залежить від товщини та жорсткості перфорованої оболонки. Тонкостінні оболонки можуть деформуватися синхронно з коливальним сигналом, що впливає на локальну форму вихідних каналів і змінює діаметр струменя ще до появи перетяжки. Загальна динаміка роботи конструкції визначається також властивостями перфорованої оболонки – її висотою, жорсткістю та геометрією. Розподіл коливань уздовж стінок впливає на те, наскільки рівномірно працюють окремі отвори. У жорсткіших конструкціях коливання передаються рівномірно, забезпечуючи синхронне формування сукупності струменів. У більш гнучких оболонках можливе локальне зміщення фаз коливань, що спричиняє різницю в довжині стабільних ділянок і, відповідно, варіабельність діаметра гранул [10].

Взаємодія сусідніх струменів у промислових умовах є суттєвим фактором. При збільшенні навантаження міжструминна відстань зменшується, і траєкторії руху частинок можуть зближуватися в початковій зоні. Правильний добір амплітуди та частоти збудження дозволяє зменшити довжину початкової ділянки, стабілізувати напрямок руху гранул і знизити ймовірність перехрещення факелів. В обертових грануляторах динаміка відриву визначається іншим механізмом – відцентровою дією. Стінка перфорованої оболонки перебуває у стані постійної деформації, залежної від товщини шару розплаву та швидкості обертання. Оскільки відрив краплі тут визначається балансом поверхневого натягу та відцен-

трової сили, невеликі зміни швидкості обертання або нерівномірність шару розплаву можуть збільшувати діапазон гранулометрії. На відміну від цього, у вібраційних конструкціях момент відриву задається коливальним впливом, що сприяє формуванню вужчого розподілу діаметрів.

Висновки. Проведене дослідження дало змогу узагальнити сучасні уявлення про роботу конструкцій прилерів, що застосовуються у виробництві мінеральних добрив. Порівняльний аналіз статичних, акустичних, вібраційних та обертових апаратів показав, що найбільш керований режим формування гранул забезпечують системи, у яких момент відриву краплі визначається поєднанням гідростатичного тиску та зовнішнього механічного збудження. Це дозволяє підтримувати стабільні умови розвитку капілярної нестійкості й одержувати більш рівномірний гранулометричний склад без зміни продуктивності та без втручання в режим подачі розплаву. Аналіз фізичних механізмів струменеутворення засвідчив, що частота та амплітуда коливань прямо впливають на довжину стабільної ділянки струменя та радіус перетяжки перед відривом. Зміна цих параметрів дає можливість

регулювати розмір гранули й зменшувати вплив випадкових збурень у зоні витікання. У конструкціях обертового типу формування гранул додатково визначається дією відцентрових сил, тому якість продукту сильніше залежить від рівномірності подачі на перфоровану оболонку та стабільності обертання. Отримані закономірності підтверджують, що контрольоване механічне збудження є одним із найбільш ефективних шляхів покращення якості грануляції у промислових умовах.

Перспективи подальшого розвитку конструкцій полягають у вдосконаленні геометрії перфорованих елементів, оптимізації масо-габаритних характеристик, підвищенні жорсткості вузлів передавання коливань та поліпшенні рівномірності розподілу розплаву в зоні витікання. Застосування таких рішень дозволить підвищити однорідність гранул, стабільність роботи апаратів та забезпечити відтворюваність процесу при змінних властивостях розплаву. У сукупності ці напрями формують основу подальшого вдосконалення конструкцій прилерів та підвищення ефективності грануляційних процесів у виробництві мінеральних добрив.

Список літератури:

1. Gañán-Calvo A. M., Chapman H. N., Heymann M., Wiedorn M. O., Knoska J., Gañán-Riesco B., López-Herrera J. M., Cruz-Mazo F., Herrada M. A., Montanero J. M., Bajt S. The Natural Breakup Length of a Steady Capillary Jet: Application to Serial Femtosecond Crystallography. *Crystals*. 2021. Vol. 11. No. 8. P. 990. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst11080990>
2. Nadhem A. K. M., Yershova N., Dziuba O. Study of temperature changes in mineral fertiliser granules in the rotating vibrating granulator. *Suchasni Tekhnologii u Promyslovomu Vyrobnystvi*. 2023. URL: <https://journals.uran.ua/tarp/article/view/286693>
3. Mak S. Y., Chao Y., Rahman S., Shum H. C. Droplet formation by rupture of vibration-induced interfacial fingers. *Langmuir*. 2018. Vol. 34. No. 3. P. 926–932. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29094601/>
4. Potnis A., Saha A. On formation and breakup of jets during droplet impact on oscillating substrates. *Experiments in Fluids*. 2025. Vol. 66. Art. 2. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00348-024-03911-z?utm_source
5. Rembe C., Halkon B. J., Ismail M. A. A. Measuring vibrations in large structures with laser-Doppler vibrometry and unmanned aerial systems: a review and outlook. *Advanced Devices & Instrumentation*. 2025. Vol. 6. P. 0103. URL: <https://spj.science.org/doi/full/10.34133/adi.0103>
6. Wang H., Xiong D., Duan Y., Liu J., Zhao X. Advances in vibration analysis and modeling of large rotating mechanical equipment in mining arena: a review. *AIP Advances*. 2023. Vol. 13. No. 11. P. 110702. URL: <https://pubs.aip.org/aip/adv/article/13/11/110702/2922440>
7. Watson P., Bonnieu S. V., Lappa M. Fluidization and transport of vibrated granular matter: a review of landmark and recent contributions. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. 2023. Vol. 20. No. 1. P. 1–29. DOI: 10.32604/fdmp.2023.029280
8. Ravi A. S., Dalvi S. Liquid marbles and drops on superhydrophobic surfaces: interfacial aspects and dynamics of formation: a review. *ACS Omega*. 2024. Vol. 9. Issue 11. DOI: 10.1021/acsomega.3c07657
9. Yan Q., et al. Study on the formation and separation process of droplets in atomization device induced by intra-hole fluctuation. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 35. Art. 7. URL: https://cjme.springeropen.com/articles/10.1186/s10033-022-00754-9?utm_source
10. Vadaga A. K., Gudla S. S., Nareboina G. S. K., Gubbala H., Golla B. Comprehensive review on modern techniques of granulation in pharmaceutical solid dosage forms. *Intelligent Pharmacy*. 2024. Vol. 2. No. 5. P. 609–629. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949866X24000674>

Tabachun M.O., Skydanenko M.S. CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF VIBRATION DEVICE CONSTRUCTIONS

The study presents a comprehensive analysis of the current state, development trends, and technological features of vibrating priller designs used in the production of granular mineral fertilizers, including ammonium nitrate, porous ammonium nitrate, and urea. It provides a systematic overview of the operating principles of static, acoustic, vibrating, and rotary granulation systems, identifying the structural parameters that most significantly influence melt-jet stability, droplet detachment uniformity, and the homogeneity of the resulting granules. Particular attention is devoted to the physical mechanisms governing droplet formation and breakup, including the interaction of inertial, viscous, and capillary forces, the conditions that determine the formation and collapse of the stable jet region, and the influence of controlled mechanical excitation on the evolution of capillary instability.

The dynamic operating modes of vibrating prillers are examined in detail, with emphasis on the role of excitation frequency and amplitude, the mechanical response of perforated elements, variations in jet necking radius prior to detachment, the periodicity of droplet formation, and the resulting particle-size distribution. It is demonstrated that optimizing the geometry of perforated plates, improving the characteristics of oscillatory assemblies, and applying controlled excitation significantly enhance granule uniformity under variable melt-flow conditions. The analysis further highlights the growing importance of digital modeling, advanced monitoring systems, and adaptive control algorithms capable of predicting jet behavior, adjusting operating parameters in real time, and stabilizing the granulation process at industrial scales.

The findings indicate a gradual shift from traditional purely mechanical improvements toward more integrated and adaptive design concepts, in which structural, dynamic, and control aspects are considered holistically. Such an approach increases the reliability, repeatability, and quality of the prilling process, forming a robust foundation for further advancement of priller designs used in modern fertilizer production.

Key words: vibrating priller, granulation, oscillation intensity, process efficiency, dynamic control.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 16.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025