

Корисна модель стосується технології промивання зернистого матеріалу для видалення дисперсних частинок, що цементують, і може знайти застосування в металургійній, гірничорудній, хімічній, промисловості будівельних матеріалів та інших галузях виробництва.

Під час промивання зернистого матеріалу в барабані стадіями, що суттєво обмежують процес, є дезінтеграція матеріалу розпушенням та диспергування у воді дрібнодисперсної фракції, що цементує. Це спричинено низькою інтенсивністю відносного руху при циркуляції матеріалу в обертотій камері. Значна частка зернистого завантаження є пасивною, не зазнає деформації і не бере участі у дезінтеграції та диспергуванні.

Відомий спосіб промивання зернистого матеріалу в барабані, що обертають відносно горизонтальної осі, який включає подавання матеріалу у камеру барабана, зрошення його водою, видалення дрібнодисперсної фракції, що цементує, разом із водою, шляхом дезінтеграції матеріалу розпушенням і диспергування у воді дрібнодисперсної фракції, та видалення промитого матеріалу з камери, при цьому не допускається виникнення режимів осадження та центрифугування зернистого матеріалу в камері обертотого барабана за допомогою зміни швидкості обертання [1].

Зазначений спосіб дозволяє дещо підвищити рівень дезінтеграції та диспергування в барабані, оскільки не допускає виникнення пасивних режимів руху зернистого матеріалу в камері, проте основним недоліком зазначеного способу є загальна низька ефективність дезінтеграції та диспергування через малу інтенсивність циркуляції та усталений режим руху матеріалу.

Найбільш близьким аналогом до корисної моделі є спосіб промивання зернистого матеріалу в барабані, що обертають відносно горизонтальної осі, який включає подавання матеріалу у камеру барабана, зрошення його водою, видалення дрібнодисперсної фракції, що цементує, разом із водою, шляхом дезінтеграції матеріалу розпушенням і диспергування у воді дрібнодисперсної фракції, та видалення промитого матеріалу з камери, при цьому зернистому завантаженню надають пульсуючого руху зі змінним розмахом у поперечному перерізі камери, а видалення дрібнодисперсної фракції, що цементує, здійснюють при обертанні барабана із біфуркаційним значенням швидкості самозбудження автоколивань зернистого завантаження у поперечному перерізі камери [2].

Цей спосіб дає змогу здійснити досить ефективну дезінтеграцію та диспергування, оскільки сприяє зниженню об'ємної частки пасивної частини завантаження та центрального ядра сегрегації частинок. Проте основним недоліком зазначеного способу є низька продуктивність процесу внаслідок слабкої автоколивної імпульсної взаємодії частинок зернистого матеріалу через малу інтенсивність циркуляції завантаження в камері.

В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалення способу промивання зернистого матеріалу в барабані, у якому забезпечується посилення імпульсної взаємодії частинок зернистого матеріалу, а отже, і істотне підвищення продуктивності відокремлення дисперсних частинок від крупної фракції.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі промивання зернистого матеріалу в барабані із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням, що обертають відносно горизонтальної осі, який включає подавання матеріалу у камеру барабана, зрошення його водою, видалення дрібнодисперсної фракції, що цементує, разом із водою, шляхом дезінтеграції матеріалу розпушенням і диспергування у воді дрібнодисперсної фракції, та видалення промитого матеріалу з камери, при цьому зернистому завантаженню надають пульсуючого руху зі змінним розмахом у поперечному перерізі камери, проведення видалення дрібнодисперсної фракції, що цементує, здійснюють при проведенні самозбудження автоколивань завантаження у жорсткому режимі.

У найприйнятнішому прикладі реалізації способу при проведенні видалення дрібнодисперсної фракції, що цементує, ступінь заповнення камери барабана завантаженням підтримують при величині, що відповідає максимальному розмаху автоколивань завантаження в камері.

Крім того, при проведенні видалення дрібнодисперсної фракції, що цементує, ступінь заповнення камери барабана завантаженням підтримують у діапазоні 0,25-0,35.

Проведення видалення дрібнодисперсної фракції, що цементує, при проведенні самозбудження автоколивань завантаження у жорсткому режимі дає змогу здійснити стрибкоподібне самозбудження релаксацийних коливань розривного характеру із підвищеним розмахом.

Підтримування ступеня заповнення камери барабана завантаженням при величині, що відповідає максимальному розмаху автоколивань завантаження в камері, при проведенні видалення дрібнодисперсної фракції, що цементує, забезпечує посилення імпульсної взаємодії частинок зернистого матеріалу.

Підтримування ступеня заповнення камери барабана завантаженням у діапазоні 0,25-0,35 при проведенні видалення дрібнодисперсної фракції, що цементує, дає змогу посилити та досягти реалізації явно вираженого прояву жорсткого режиму самозбудження автоколивань.

Виявлений для вирішення поставленої задачі гідродинамічний ефект самозбудження у жорсткому режимі автоколивань завантаження камери при обертанні барабана дозволяє досягти технічного ефекту підвищення продуктивності процесу промивання за рахунок зменшення частки пасивної та збільшення частки активної зони руху завантаження внаслідок посилення дилатансії, а також

збільшення інтенсивності і динамічності циркуляції робочого середовища внаслідок зростання розмаху релаксацийних автоколивань розривного характеру та посилення імпульсної взаємодії зернистих частинок.

Суть способу промивання пояснюється ілюстративними матеріалами.

На фіг. 1 зображено покадрову розгортку відеофіксації послідовних картин одного періоду автоколивного руху зернистого завантаження камери обертового барабана при усередненому режимі самозбудження; на фіг. 2 зображено покадрову розгортку відеофіксації послідовних картин одного періоду автоколивного руху завантаження при жорсткому режимі самозбудження; на фіг. 3 зображено залежність розмаху автоколивань ψ від ступеня заповнення камери завантаженням κ , де: $\psi = 2(U_{\max} - U_{\min}) / (U_{\max} + U_{\min})$ - відносний розмах автоколивань, $U_{\max}$ та $U_{\min}$ - максимальне та мінімальне значення дилатансії завантаження в камері за період коливань; на фіг. 4 зображено залежність добротності автоколивань QF від κ , де: $QF = E_k / E_p$ - добротність коливальної системи, що відповідає відношенню енергії, що була запасена в системі, до енергії, що втрачається в системі, за один період коливань, $E_k = (I\omega^2)/2$ - кінетична енергія завантаження, що була накопичена за один період коливань, $E_p = m\Delta h g$ - кінетична енергія завантаження, що була витрачена за один період коливань, I - осьовий момент інерції завантаження при досягненні мінімального значення дилатансії протягом одного періоду коливань, ω - кутова швидкість обертання барабана, m - маса завантаження, Δh - вертикальне зміщення центра мас завантаження протягом одного періоду коливань, g - гравітаційне прискорення; на фіг. 5 зображено залежність ступеня релаксації автоколивань DR від κ , де: $DR = (24 - z)/z$ - ступінь релаксації, що відповідає відношенню тривалості дорелаксацийного повільного етапу накопичення енергії до тривалості швидкого етапу релаксації енергії протягом одного періоду коливань, z - значення кількості послідовних картин руху завантаження у поперечному перерізі камери для етапу релаксації, що було зареєстровано за допомогою відеозйомки з частотою 24 кадри на секунду.

Збурення коливальної системи барабанної мийки можуть збуджувати автоколивання внаслідок втрати стійкості руху.

Чинниками нестійкості обертового руху машинного агрегату мийки є зміна жорсткості залежностей осьового моменту інерції та моменту сил опору завантаження камери від кулової швидкості обертання барабана [3].

Чинниками нестійкості двовимірного руху зернистого матеріалу в обертовій камері барабана мийки є його дилатансія та демпфуючий вплив дрібних частинок на імпульсну взаємодію крупних частинок [4, 5].

Під час самозбудження автоколивань зернисте завантаження приводиться в періодичний пульсацийний рух у поперечному перерізі камери обертового барабана при взаємному переході циркуляційного режиму руху та режиму пристінкового шару. Суть автоколивного режиму руху пояснюється покадровою розгорткою відеофіксації (фіг. 1) процесу пульсацийної течії при усередненому режимі самозбудження автоколивань [6]. При такому режимі реалізується квазігармонійна форма автоколивань завантаження.

На фіг. 2 наведено покадрову розгортку відеофіксації процесу пульсацийної течії завантаження при жорсткому режимі самозбудження автоколивань [4]. При такому режимі відбувається стрибкоподібне самозбудження розривних релаксацийних автоколивань завантаження негармонійної форми зі значним розмахом. Порівняно з усередненим режимом самозбудження, жорсткий режим характеризується бістабільністю, підвищеним розмахом, зниженою добротністю та підвищеним ступенем релаксації автоколивань. Зі зниженням ступеня заповнення камери завантаженням прояв жорсткого режиму самозбудження посилюється і стає явно вираженим.

Розривний характер релаксацийних автоколивань завантаження камери обертового барабана при жорсткому самозбудженні визначається дисипативними властивостями коливальної системи. Добротність автоколивальної системи та ступінь релаксації автоколивань чисельно характеризують співвідношення нелінійних дисипативних і реактивних сил та процесів в системі.

Як показують експериментальні дослідження [4], відносний розмах автоколивань при жорсткому режимі самозбудження зростає до 0,78, порівняно з 0,05 при усередненому режимі (фіг. 3). Крім того добротність автоколивальної системи знижується до 1,1 при жорсткому режимі, порівняно з 11 при усередненому (фіг. 4). Натомість ступінь релаксації автоколивань зростає до 1,6 при жорсткому режимі, порівняно з 1,1 при усередненому (фіг. 5).

Самозбудження автоколивань завантаження барабана мийки у жорсткому режимі збільшує поверхню дотику завислого у камері пульсуючого зернистого матеріалу, покращує контакт твердої, що перебуває у завислому стані, і рідкої фаз, підвищує градієнт швидкості між окремими шарами матеріалу, збільшує частоту взаємних зштовхувань частинок матеріалу, посилює тертя частинок матеріалу одна з одною, підвищує зусилля, які долають сили зчеплення дрібних частинок, що цементують, із крупними, запобігає утворенню центрального ядра сегрегації частинок за розміром та пришвидшує відокремлення дисперсних частинок від крупної фракції.

Спосіб промивання реалізується за допомогою пристрою, що містить барабан та привод із регулятором швидкості обертання, пружним елементом і реєстратором амплітуди коливань елемента.

Спосіб промивання реалізується таким чином.

Оброблюваний зернистий матеріал подають в камеру барабана мийки та зрошують водою. Для визначення шуканого значення швидкості, при проведенні самозбудження автоколивань завантаження у жорсткому режимі, початкову довільну швидкість обертання барабан змінюють із одночасним вимірюванням амплітуди коливань пружного елемента до досягнення екстремального значення результатів вимірювання. Надалі видалення дрібної фракції, що цементує, здійснюють при отриманому значенні швидкості обертання.

Ступінь заповнення камери барабана мийки завантаженням підтримують при величині, яка відповідає максимальному розмаху автоколивань завантаження в камері, що забезпечує посилення імпульсної взаємодії частинок зернистого матеріалу.

Крім того ступінь заповнення камери барабана мийки завантаженням підтримують у діапазоні 0,25-0,35, що зумовлює явно виражену реалізацію жорсткого режиму самозбудження автоколивань.

Таким чином, здійснення заявленого способу призводить до інтенсифікації процесу дезінтеграції і диспергування та забезпечує підвищення продуктивності промивання матеріалу і зниження витрат води.

Перелік використаних джерел інформації:

1. Пат. UA52029A, МПК B03B 5/56, опубл. 16.12.2002.
2. Пат. UA154576U, МПК B03B 5/56, опубл. 22.11.2023.
3. Deineka K. Yu., Naumenko Yu. V. The tumbling mill rotation stability // *Naukovyi Visnyk Nationalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. Issue 1(163). P. 60-68. Doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/10>.
4. Deineka K., Naumenko Yu. Revealing the mechanism of stability loss of a two-fraction granular flow in a rotating drum // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 4. Issue 1(118). P. 34-46. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263097>.
5. Deineka K., Naumenko Yu. Mathematical modeling of the rotating drum granular fill flow oscillatory stability // *Vibroengineering Procedia*. 2025. Vol. 59. P. 70-81. Doi: <https://doi.org/10.21595/vp.2025.25248>.
6. Both H.-U. Mahlkörperbewegungen in der Kugelmühle [Motions of Grinding Elements in a Ball Mill]. 1966. IWF (Göttingen). [Video]. (06m:43s-07m:11s) YouTube. Doi: <https://doi.org/10.3203/IWF/C-921>.

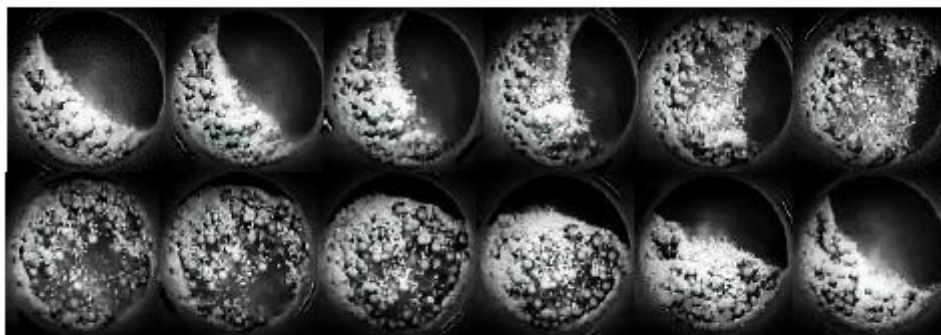


Fig. 1

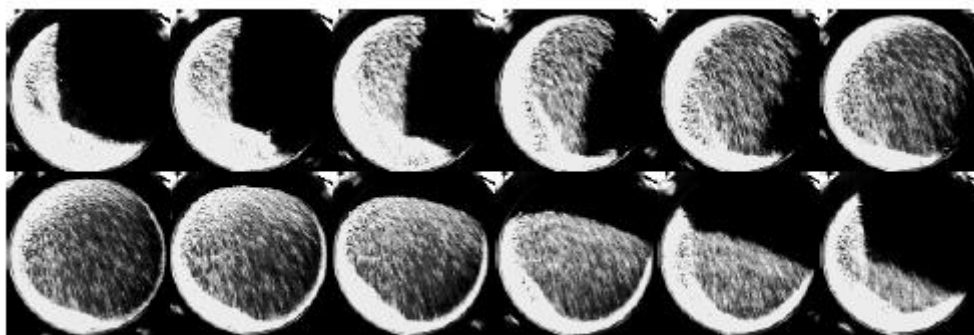


Fig. 2

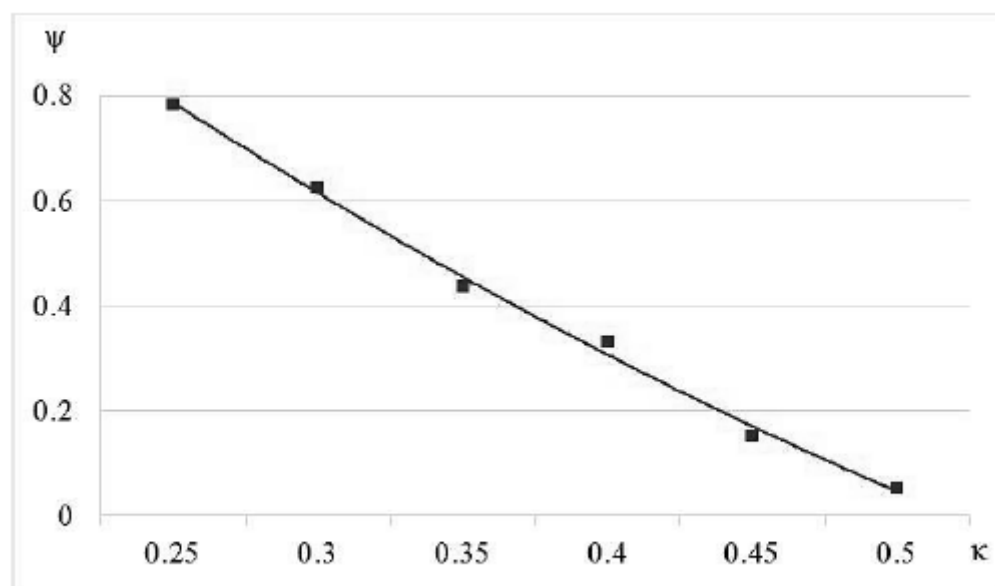


Fig. 3

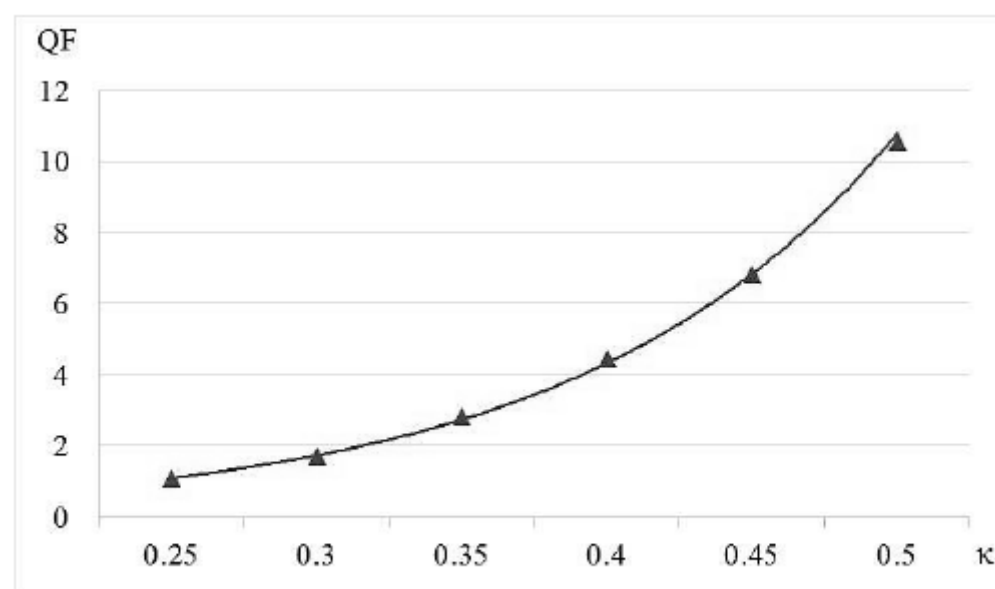


Fig. 4

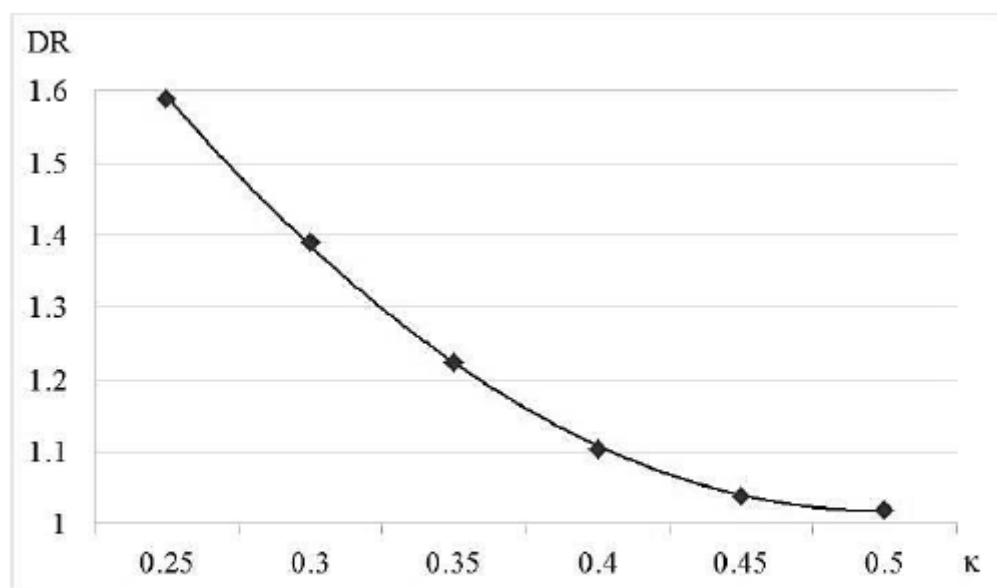


Fig. 5