

Корисна модель стосується технологій теплової обробки зернистого матеріалу для твердофазних перетворень і може знайти застосування в металургійній, хімічній, промисловості будівельних матеріалів та інших галузях виробництва.

Під час теплової обробки зернистого матеріалу в барабані стадіями, що суттєво обмежують ефективність технологічного процесу, є зовнішній теплообмін та внутрішній теплоперенос. Це спричинено низькою інтенсивністю відносного руху при циркуляції матеріалу в обертівій камері. Значна частка зернистого завантаження є пасивною, не зазнає деформації і не бере участі у теплообміні.

Відомий спосіб теплової обробки зернистого матеріалу в барабані при досягненні катарактного (водоспадного) режим руху матеріалу за допомогою зміни швидкості обертання із урахуванням граничного значення числа Фруда на циліндричній поверхні камери [1].

Зазначений спосіб дозволяє інтенсифікувати зовнішній теплообмін та внутрішній теплоперенос у псевдозрідженому киплячому шарі, проте основним недоліком цього способу є низький градієнт швидкості між окремими шарами та відсутність циркуляції матеріалу.

Найбільш близьким за технічною суттю до корисної моделі є спосіб теплової обробки зернистого матеріалу в барабані із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням, що обертають відносно горизонтальної осі, який включає подавання матеріалу у камеру барабана, нагрівання шляхом зовнішнього теплообміну та внутрішнього теплопереносу, витримування при температурі випалювання, охолодження та видалення його з камери, при цьому зернистому завантаженню надають пульсуючого руху зі змінним розмахом у поперечному перерізі камери, а нагрівання, витримування та охолодження здійснюють при обертанні барабана із біфуркаційним значенням швидкості самозбудження автоколиваний зернистого завантаження у поперечному перерізі камери [2].

Цей спосіб дає змогу здійснити досить ефективну теплову обробку, оскільки сприяє деякому зниженню масової частки пасивної частини завантаження, яка не бере участі у обробці. Проте основним недоліком зазначеного способу є висока енергоємність процесу зовнішнього теплообміну та внутрішнього теплопереносу через підвищену швидкість обертання та посилену сегрегацію шарів завантаження внаслідок динамічності пульсаційної взаємодії елементів робочого середовища.

В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалення способу теплової обробки зернистого матеріалу в барабані, у якому забезпечується зниження опору обертанню завантаженого барабана, збільшення поверхні дотику завислого у газовому потоці пульсуючого зернистого матеріалу із пришвидшенням нагрівання і посиленням інтенсивності передавання тепла, а отже, і істотне зниження енергоємності зовнішнього теплообміну і внутрішнього теплопереносу.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі теплової обробки зернистого матеріалу в барабані із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням, що обертають відносно горизонтальної осі, який включає подавання матеріалу у камеру барабана, нагрівання шляхом зовнішнього теплообміну та внутрішнього теплопереносу, витримування при температурі випалювання, охолодження та видалення його з камери, при цьому зернистому завантаженню надають пульсаційного руху зі змінною дилатансією у поперечному перерізі камери, проведення нагрівання, витримування та охолодження здійснюють при проведенні самозбудження автоколиваний завантаження у м'якому режимі.

У найприйнятнішому прикладі реалізації способу при проведенні нагрівання, витримування та охолодження ступінь заповнення камери барабана завантаженням підтримують при величині, що відповідає мінімальному біфуркаційному значенню дилатансії завантаження в камері.

Крім цього, при проведенні нагрівання, витримування та охолодження ступінь заповнення камери барабана завантаженням підтримують у діапазоні 0,35-0,5.

Проведення нагрівання, витримування та охолодження при проведенні самозбудження автоколиваний завантаження у м'якому режимі дає змогу здійснити плавне самозбудження гармонійних коливаний із обмеженим розмахом і підвищеною частотою при сповільненому обертанні.

Підтримування ступеня заповнення камери барабана завантаженням при величині, що відповідає мінімальному біфуркаційному значенню дилатансії завантаження в камері, при проведенні нагрівання, витримування та охолодження забезпечує підвищення кількості пульсацій завантаження за один оберт барабана.

Підтримування ступеня заповнення камери барабана завантаженням у діапазоні 0,25-0,35 при проведенні нагрівання, витримування та охолодження дає змогу посилити та досягти реалізації явно вираженого прояву м'якого режиму самозбудження автоколиваний.

Виявлений для вирішення поставленої задачі гідродинамічний ефект самозбудження у м'якому режимі автоколиваний зрідженого зернистого завантаження камери при обертанні барабана дозволяє досягти технічного ефекту зниження енергоємності процесу теплової обробки за рахунок сповільнення обертання та зменшення сегрегації завантаження внаслідок плавного самозбудження гармонійних коливаний із обмеженим розмахом і підвищеною частотою.

Суть способу теплової обробки пояснюється ілюстративними матеріалами.

На фіг. 1 зображено послідовні картини одного періоду автоколивного руху зернистого завантаження камери обертового барабана при усередненому режимі самозбудження; на фіг. 2 зображено послідовні картини одного періоду автоколивного руху завантаження при м'якому режимі самозбудження.

Збурення коливальної системи барабанної машини для теплової обробки можуть збуджувати автоколивання внаслідок втрати стійкості руху. Чинниками нестійкості обертового руху машинного агрегату барабанної машини для теплової обробки є зміна жорсткості залежностей осьового моменту інерції та моменту опору завантаження камери барабана від швидкості обертання [3]. Чинниками нестійкості двовимірному руху зернистого матеріалу в обертовій камері барабана для теплової обробки є його дилатансія та демпфуючий вплив дрібних частинок на імпульсну взаємодію крупних частинок [4, 5].

Під час самозбудження автоколиваний зернистий матеріал приводиться в періодичний пульсаційний рух у поперечному перерізі камери обертового барабана при взаємному переході циркуляційного та режиму пристінкового шару. Суть автоколивного режиму руху пояснюється покадровою розгорткою відеофіксації (фіг. 1) процесу пульсаційної течії при усередненому режимі самозбудження автоколиваний [6]. При такому режимі реалізується суттєво негармонійна форма релаксаційних автоколиваний завантаження чітко вираженого розривного характеру.

На фіг. 2 наведено покадрову розгортку відеофіксації процесу пульсаційної течії при м'якому режимі самозбудження автоколиваний [4, 5]. При такому режимі відбувається плавне самозбудження автоколиваний завантаження квазігармонійної форми із обмеженим розмахом. Порівняно з усередненим режимом самозбудження, м'який режим характеризується моностабільністю, зниженими біфуркаційними значеннями швидкості обертання барабана і дилатансії завантаження в камері та підвищеною кількістю пульсацій завантаження за один оберт барабана. Зі зростанням ступеня заповнення камери завантаження прояв м'якого режиму самозбудження посилюється і стає явно вираженим.

Самозбудження автоколиваний у м'якому режимі посилює зрідження зернистого завантаження камери барабана для теплової обробки та збільшує масову частку і висоту активної зони невідного падіння. Це значно підвищує поверхню дотику пульсуючого зернистого матеріалу, покращує контакт твердої, що перебуває у завислому стані, і газоподібної фаз, пришвидшує нагрівання та посилює інтенсивність передавання теплоти.

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

Спосіб теплової обробки реалізується таким чином.

Оброблюваний зернистий матеріал подають в камеру барабана для теплової обробки. Для визначення шуканого значення швидкості, при проведенні самозбудження автоколиваний завантаження у м'якому режимі, початкову довільну швидкість обертання барабана змінюють із одночасним вимірюванням амплітуди коливаний пружного елемента до досягнення стрибкоподібного зростання результатів вимірювання. Надалі нагрівання, витримування та охолодження здійснюють при отриманому значенні швидкості обертання.

При проведенні нагрівання, витримування та охолодження ступінь заповнення камери барабана завантаженням підтримують при величині, яка не є нижчою за початкове значення, що забезпечує досягнення мінімального біфуркаційного значення дилатансії завантаження в камері та реалізацію м'якого самозбудження автоколиваний із обмеженим розмахом.

Крім цього, при проведенні нагрівання, витримування та охолодження ступінь заповнення камери барабана завантаженням підтримують у діапазоні 0,35-0,5, що зумовлює явно виражену реалізацію м'якого режиму самозбудження автоколиваний.

Як показують експериментальні дослідження [4], відносне біфуркаційне значення швидкості обертання при м'якому режимі самозбудження знижується до 0,22-0,38, порівняно з 0,6-0,95 при усередненому режимі. Крім цього відносне біфуркаційне значення дилатансії завантаження в камері знижується до 0,24-0,32 при м'якому режимі, порівняно з 0,75-0,86 при усередненому. Натомість частота пульсацій завантаження за один оберт барабана зростає до 3,5-6,7 при м'якому режимі, порівняно з 1,1-1,3 при усередненому.

Таким чином, здійснення заявленого способу призводить до інтенсифікації процесу зовнішнього теплообміну, внутрішнього теплопереносу і твердотільних перетворень та пришвидшеній стабілізації фазового складу матеріалу, забезпечує підвищення продуктивності теплової обробки, збільшення ступеня заповнення камери барабана завантаженням, зниження динамічного навантаження на обладнання та витрат тепла і енергії на привод обертання.

Джерела інформації:

1. Пат. UA13663U, МПК F27B 7/00, опубл. 17.04.2006.
2. Пат. UA155101U, МПК F27B 7/00, опубл. 17.01.2024.
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>.

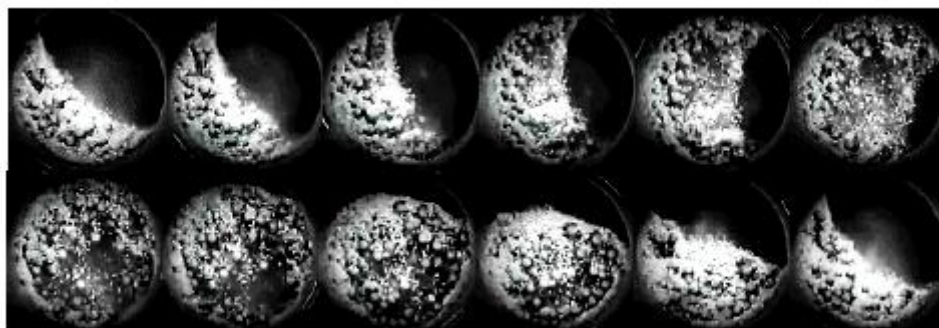


Fig. 1

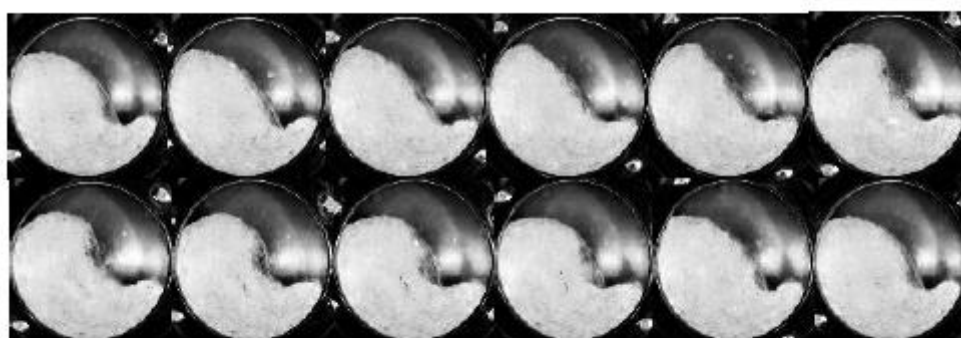


Fig. 2