

Корисна модель стосується технології проведення реакційних процесів з неорганічними та органічними зернистими матеріалами і може знайти застосування в хімічній, промисловості будівельних матеріалів, теплоенергетиці, переробці і утилізації відходів та інших галузях виробництва.

Під час проведення реакції з зернистим матеріалом в барабані стадіями, що суттєво обмежують ефективність технологічного процесу, є дифузія реагентів до реакційної зони на поверхні розділу фаз, адсорбція частинок реагентів на поверхні, десорбція продуктів реакції та дифузія реагентів і продуктів через шар матеріалу. Це спричинено низькою інтенсивністю відносного руху при циркуляції матеріалу в обертовій камері. Значна частка зернистого завантаження є пасивною, не зазнає деформації і не бере участі у дифузії, адсорбції та десорбції.

Відомий спосіб проведення гетерогенного процесу з зернистим матеріалом в барабанному реакторі, при цьому забезпечується проходження матеріалу через камеру реактора під дією сили тяжіння у пробковому режимі за допомогою щонайменше одного перемішувального засобу [1].

Зазначений спосіб дозволяє дещо інтенсифікувати проведення гетерогенного процесу у зрідженому шарі матеріалу, оскільки не допускає виникнення пасивних режимів руху зернистого завантаження в камері. Проте основним недоліком зазначеного способу є загальна низька ефективність реакційного процесу через низький градієнт швидкості між окремими шарами та обмежену циркуляцію матеріалу.

Найбільш близьким за технічною суттю до технічного рішення, що заявляється, є спосіб проведення гетерогенного процесу з зернистим матеріалом в барабанному реакторі із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням, що обертають відносно горизонтальної осі, який включає подавання матеріалу і реагентів у камеру барабана, проведення реакційного процесу шляхом дифузії реагентів до реакційної зони на поверхні розділу фаз, активованої адсорбції частинок реагентів на поверхні, фізико-хімічних перетворень адсорбованих частинок, десорбції утворених продуктів реакції та дифузії реагентів і продуктів через шар зернистого матеріалу та відведення продуктів реакції з камери, при цьому зернистому завантаженню надають пульсаційного руху зі змінним розмахом у поперечному перерізі камери, а проведення реакційного процесу здійснюють при обертанні барабана із біфуркаційним значенням швидкості самозбудження автоколивань зернистого завантаження у поперечному перерізі камери [2].

Цей спосіб дає змогу здійснити досить ефективну дифузію, адсорбцію, десорбцію та фізико-хімічні перетворення в барабані, оскільки сприяє деякому зниженню масової частки пасивної частини завантаження, яка не бере участі у проведенні гетерогенного процесу. Проте основним недоліком зазначеного способу є висока енергоємність реакційного процесу через підвищену швидкість обертання та посилену сегрегацію шарів завантаження внаслідок динамічності пульсаційної взаємодії елементів робочого середовища.

В основу корисної моделі поставлено задачу вдосконалення способу проведення гетерогенного процесу з зернистим матеріалом в барабанному реакторі, у якому забезпечується зниження опору обертанню завантаженого барабана, збільшення площі поверхні розподілу фаз і підвищення швидкості відносного руху із пришвидшенням дифузії, адсорбції і десорбції та посиленням інтенсивності роботи по цільовому продукту, а отже, і істотне зниження енергоємності реакційного процесу.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі проведення гетерогенного процесу з зернистим матеріалом в барабанному реакторі із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням, що обертають відносно горизонтальної осі, який включає подавання матеріалу і реагентів у камеру барабана, проведення реакційного процесу шляхом дифузії реагентів до реакційної зони на поверхні розділу фаз, активованої адсорбції частинок реагентів на поверхні, фізико-хімічних перетворень адсорбованих частинок, десорбції утворених продуктів реакції та дифузії реагентів і продуктів через шар зернистого матеріалу

та відведення продуктів реакції з камери, при цьому зернистому завантаженню надають пульсаційного руху зі змінною дилатансією у поперечному перерізі камери, згідно з корисною моделлю, проведення реакційного процесу здійснюють при проведенні самозбудження автоколивань завантаження у м'якому режимі.

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

Крім цього, при проведенні реакційного процесу ступінь заповнення камери барабана завантаженням підтримують у діапазоні 0,25-0,35.

Проведення реакційного процесу при проведенні самозбудження автоколивань завантаження у м'якому режимі дає змогу здійснити плавне самозбудження гармонійних коливань 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 реакційного процесу забезпечує підвищення кількості пульсацій завантаження за один оберт барабана.

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

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

Суть способу проведення гетерогенного процесу 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 барабанного реактора можуть збуджувати автоколивання внаслідок втрати стійкості руху.

Чинниками нестійкості обертового руху машинного агрегату барабанного реактора є зміна жорсткості залежностей осьового моменту інерції та моменту опору завантаження камери барабана від швидкості обертання [3]. Чинниками нестійкості двовимірного руху зернистого матеріалу в обертовій камері барабанного реактора є його дилатансія та демпфуючий вплив дрібних частинок на імпульсну взаємодію крупних частинок [4, 5].

Під час самозбудження автоколивань 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 автоколивань [6]. При такому режимі реалізується суттєво негармонійна форма релаксаційних автоколивань завантаження чітко вираженого розривного характеру.

На фіг. 2 наведено покадрову розгортку відеофіксації процесу пульсаційної течії при м'якому режимі самозбудження автоколивань [4, 5]. При такому режимі відбувається плавне самозбудження автоколивань 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 автоколивань завантаження барабанного реактора у м'якому режимі посилює зрідження зернистого завантаження камери барабана реактора та збільшує масову частку і висоту активної зони невідного падіння. Це значно збільшує поверхню дотику завислого у камері пульсуючого зернистого матеріалу, покращує контакт твердої, що перебуває у завислому стані, і газоподібної фаз, підвищує градієнт швидкості між окремими шарами матеріалу, збільшує частоту взаємних зштовхувань частинок матеріалу, пришвидшує хімічні і фізичні масообмінні та теплообмінні процеси, підвищує ступінь перетворення і вихід продукту та інтенсивність, селективність і рушійну силу реакційного процесу.

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

Спосіб проведення гетерогенного процесу реалізується таким чином.

Оброблюваний зернистий матеріал та реагенти подають в камеру барабана реактора. Для визначення шуканого значення швидкості, при проведенні самозбудження автоколивань завантаження у м'якому режимі, початкову довільну швидкість обертання барабана змінюють із одночасним вимірюванням амплітуди коливань пружного елемента до досягнення стрибкоподібного зростання результатів вимірювання. Надалі реакційний процес здійснюють при отриманому значенні швидкості обертання.

При проведенні реакційного процесу ступінь заповнення камери барабана реактора 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 автоколивань із обмеженим розмахом.

Крім цього, при проведенні реакційного процесу ступінь заповнення камери барабана реактора завантаженням підтримують у діапазоні 0,35-0,5, що зумовлює явно виражену реалізацію м'якого режиму самозбудження автоколивань.

Як показують експериментальні дослідження [4], відносно 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 відносно 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 гетерогенного процесу, активізації дифузії реагентів і продуктів, пришвидшення фізико-хімічних перетворень та забезпечує підвищення продуктивності реакційного процесу, збільшення ступеня заповнення камери барабана завантаженням, зниження динамічного навантаження на обладнання, енергетичних витрат на перемішування і переміщення матеріалу через реактор та на привод обертання, раціональне використання теплоти екзотермічних реакцій і теплоти, що підводиться до реактора зовні.

Перелік використаних джерел інформації:

1. Пат. UA96319C2, МПК F27B 7/00, B01J 19/28, C08G 63/78, C08G 63/80, C08J 11/04, опубл. 25.10.2011.

2. Пат. UA157608U, МПК F26B 11/04, опубл. 06.11.2024.

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>

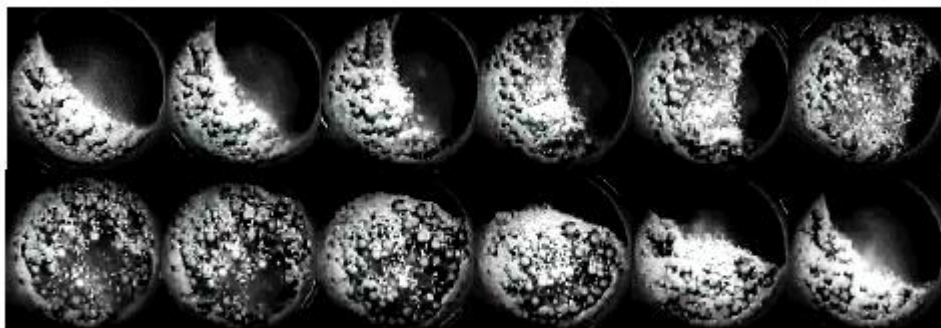


Fig. 1

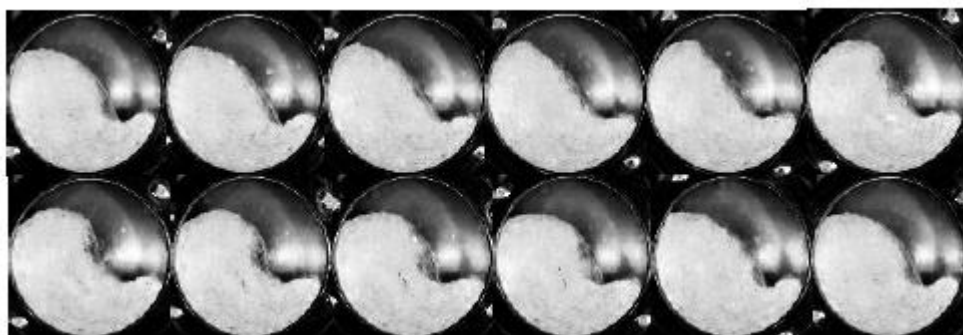


Fig. 2