

УДК 621.926.5:539.215

Науменко Ю. В., д.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ТРИФАЗНИЙ РЕЖИМ РУХУ ЗЕРНИСТОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО ЗМІШУВАЧА

Розглянуто модель реального трифазного режиму руху внутрішньо-камерного зернистого завантаження обертового барабана. Проаналізовано інтенсивність циркуляції завантаження. Встановлено умови підвищення ефективності робочого процесу барабанного змішувача.

Ключові слова: барабанний змішувач, зернисте завантаження, інтенсивність циркуляції.

Змішування зернистих матеріалів здійснюється переважно в машинах барабанного типу [1-3].

Традиційна теорія руху зернистого заповнення барабана [4-12] передбачає двофазний «водоспадний» режим руху із твердотільною зоною і зоною підкидання та падіння в поперечному перерізі камери.

Модель реального трифазного режиму враховує виникнення третьої зсувної зони руху завантаження, де і відбувається основні процеси обробки зернистого середовища.

За мету роботи було поставлено визначення параметрів трифазного режиму руху завантаження на основі візуального аналізу картин руху.

За основу взято уточнену трифазну схему руху завантаження в поперечному перерізі обертової камери (рис. 1).

Картину руху завантаження можна умовно розділити на три зони. Перша зона твердотільного руху без відносного пересування елементів завантаження – поблизу поверхні камери, друга зона руху із відокремленням та падінням елементів – у верхній частині камери, третя зона течії у вигляді швидкого гравітаційного зсувного потоку – поблизу вільної поверхні у нижній частині завантаження. При низькій швидкості обертання друга зона є слабовираженою, а третя представлена тонким шаром. Зі зростанням швидкості масові частки другої та третьої зон зростають за рахунок першої зони. При наближенні швидкості до критичної друга зона набуває максимального значення, а третя збігається до нуля.

Основний процес стираючої дії на завантаження реалізується у

верхній частині третьої зони при швидкій течії із значним зсувним градієнтом.

Визначальними параметрами, що характеризують трифазний режим руху зернистого завантаження камери обертового барабана при реалізації процесу змішування суміші зернистих матеріалів, є масовий розподіл завантаження між трьома зонами, оборотність завантаження, динамічність активації та відносні момент і потужність опору [13, 14].

Масовий розподіл характеризується ступенями балістичної $K_{\delta a} = m_{\delta} / m$ і зсувної $K_{z a} = m_z / m$ активації та приєднання $K_n = (m - m_{\delta} - m_z) / m$, де m_{δ} та m_z – маса балістичної другої та зсувної третьої зони завантаження, m – маса всього завантаження, характеризують питомі частки відповідно другої, третьої та першої зон у масі всього завантаження. Ці масові параметри кількісно характеризують дію на середовище, відповідно, ударянням, стиранням та роздавлюванням.

Оборотність $K_o = 2\pi / (t_u \omega)$, де t_u – тривалість циклу руху завантаження, характеризує кількість періодів циркуляції завантаження впродовж одного оберту барабана. Параметр визначає продуктивність робочого процесу.

Динамічність активації K_d дорівнює відношенню уявного сумарного вертикального прискорення W , обумовленого зростанням кінетичної енергії при падінні, у певному перерізі верхньої частини зсувного шару до гравітаційного прискорення g . Параметр характеризує стираючу дію на завантаження.

Відносний момент $\psi_{M0,5}$ дорівнює відношенню дійсного моменту опору завантаження обертанню барабана M до умовного максимального моменту при половинному заповненні камери $M_{0,5max}$, який відповідає розподілу завантаження в поперечному перерізі камери у вигляді ідеального твердотільного сегмента, що повернуто разом із барабаном відносно початкового положення на прямий кут. Параметр характеризує силову дію на завантаження.

Відносна потужність $\psi_{N0,5}$ визначає відношення дійсної потужності опору завантаження обертанню барабана до добутку умовного максимального моменту при половинному заповненні камери на критичну кутову швидкість $\sqrt{g/R}$. Параметр характеризує кінетичну енергоємність процесу.

Для чисельного визначення параметрів руху було застосовано аналітико-експериментальний метод дослідження. Він полягав у розраху-

нку параметрів на основі аналітичних залежностей та з урахуванням експериментальних даних за результатами візуального аналізу картин руху завантаження.

Чисельні значення шуканих параметрів обчислювались за виразами: $K_{ба} = S_{\bar{o}} / (\pi R^2 \kappa)$, $K_{за} = S_3 / (\pi R^2 \kappa)$, $K_n = 1 - K_{ба} - K_{за}$, $K_o = [1 - (R_{ц}/R)_2] / \kappa$, $K_D = W/g$, $\psi_{M0,5} = M/M_{0,5max}$, $\psi_{N0,5} = M\omega / M_{0,5max} \sqrt{g/R}$, де $S_{\bar{o}} (S_{ABCA})$ та $S_3 (S_{BCDEB})$ – площі другої балістичної та третьої зсувної зони, R – радіус камери барабана, κ – ступінь заповнення камери завантаженням, ω – кутова швидкість обертання барабана.

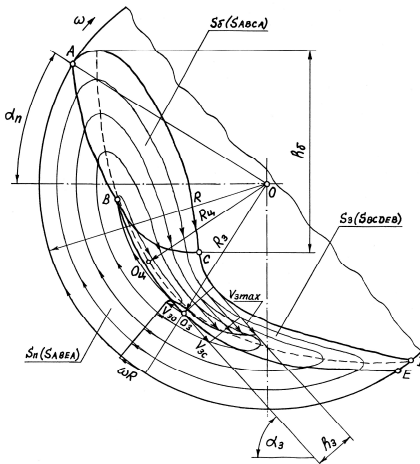


Рис. 1. Розрахункова схема визначення основних параметрів трифазного режиму руху зернистого завантаження камери обертового барабана за допомогою візуалізації картини руху

Параметри руху визначались для діапазону ступеня заповнення камери $\kappa=0,25\dots0,45$. Відносна швидкість обертання ($\psi_{\omega} = \omega/\omega_{кр}$, $\omega_{кр} = \sqrt{g/R}$ – критична кутова швидкість, при якій відцентрове прискорення на циліндричній поверхні камери дорівнює гравітаційному прискоренню g) змінювалась у діапазоні $\psi_{\omega}=0-0,6$ із кроком 0,1, а при $\psi_{\omega}>0,6$ – із кроком 0,05.

Отримано результати для чотирьох типових випадків роботи барабаних змішувачів. Перший випадок характеризується відносним розміром елементів завантаження d у камері діаметром $D - d/D=0,022$ та хвилювою формою її поверхні. Другий – $d/D=0,026$, третій – $d/D=0,01$, четвертий – $d/D=0,0024$, а також гладкою камерою.

На рис. 2 зображено отримані залежності масового розподілу між

зонами руху завантаження $K_{\delta a}$, $K_{\text{за}}$ та K_n від відносної швидкості ψ_ω при $\kappa=0,25-0,45$ для чотирьох випадків роботи змішувачів.

Максимальне значення масової частки балістичної зони $K_{\delta a}$ становить 0,41-0,3 і практично не залежить від відносного розміру елементів завантаження d/D . При цьому значення частки зсувної зони $K_{\text{за}}$ становить 0,03-0,09. Максимум $K_{\delta a}$ відповідає відносній швидкості $\psi_\omega=0,9-1,05$. При зношуванні поверхні хвильової футерівки, у другому випадку роботи змішувачів, максимум $K_{\delta a}$ відповідає $\psi_\omega=1,1-1,85$, що спадає зі збільшенням заповнення κ .

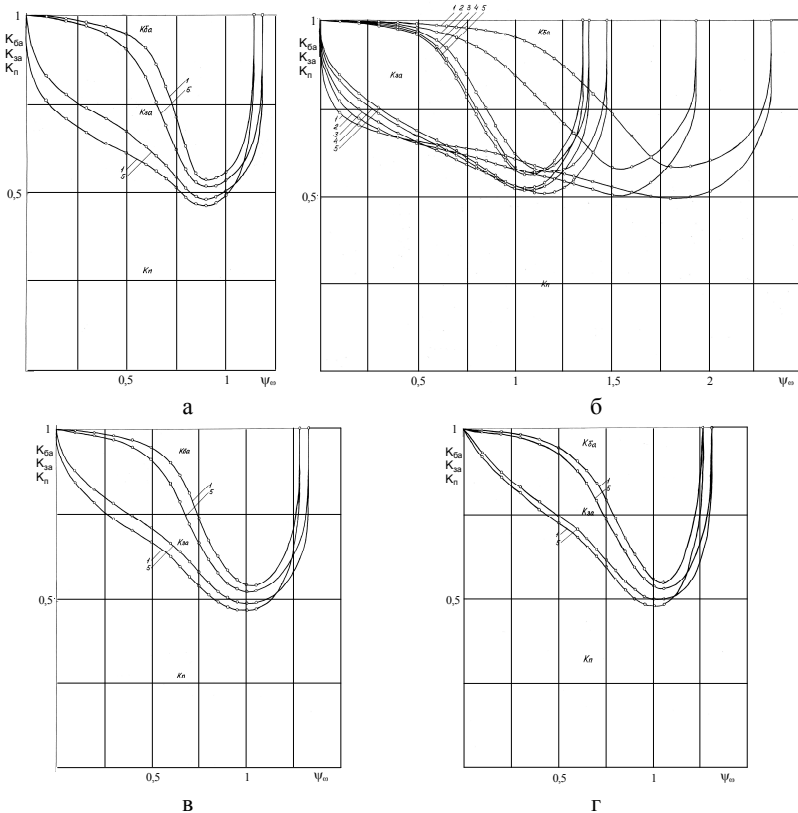


Рис. 2. Залежності $K_{\delta a}$, $K_{\text{за}}$ та K_n від ψ_ω при: а – $d/D=0,022$ та хвильовій камері, б – $d/D=0,026$ та гладкій камері, в – $d/D=0,01$ та гладкій камері, г – $d/D=0,0024$ та гладкій камері: 1 – $\kappa=0,25$; 2 – $\kappa=0,3$; 3 – $\kappa=0,35$; 4 – $\kappa=0,4$; 5 – $\kappa=0,45$

Максимальне значення масової частки зсувної зони $K_{за}$ становить 0,18-0,33, відповідає $\psi_{\omega}=0,35-0,5$ і знижується зі збільшенням κ та зростає зі збільшенням d/D . При цьому $K_{\bar{\omega}\bar{\omega}}=0,03-0,17$.

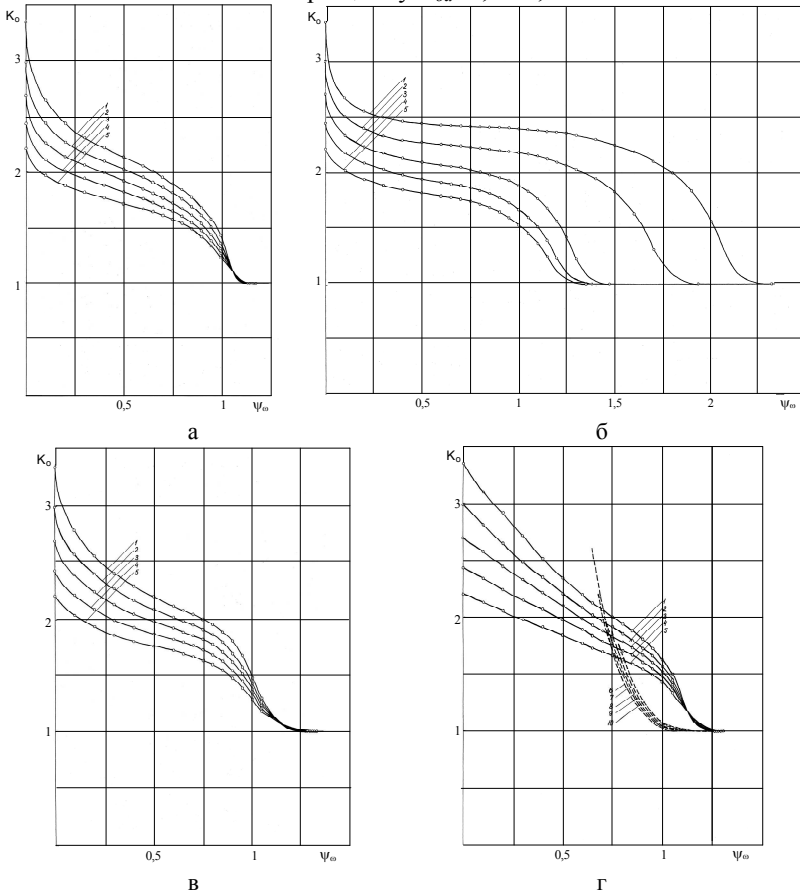


Рис. 3. Залежності K_0 від ψ_{ω} при: а – $d/D=0,022$ та хвильовій камері, б – $d/D=0,026$ та гладкій камері, в – $d/D=0,01$ та гладкій камері, г – $d/D=0,0024$ та гладкій камері (теоретичні позначення за існуючою методикою розрахунку: 6 – $\kappa=0,25$; 7 – $\kappa=0,3$; 8 – $\kappa=0,35$; 9 – $\kappa=0,4$; 10 – $\kappa=0,45$); 1 – $\kappa=0,25$; 2 – $\kappa=0,3$; 3 – $\kappa=0,35$; 4 – $\kappa=0,4$; 5 – $\kappa=0,45$

На рис. 3 зображено залежності оборотності K_0 від ψ_{ω} . На рис. 3, г наведено також залежності, отримані за існуючою методикою розрахунку. Зі збільшенням швидкості обертання K_0 монотонно спадає від

максимального значення 2,2-3,3, на початку порушення стану спокою, до значення 1 при утворенні пристінкового шару. Зі збільшення к оборотність зменшується. Інтенсивність спадання K_{ω} , при збільшенні ψ_{ω} , підвищується зі збільшенням d/D .

На рис. 4 зображено залежності динамічності активації K_{Δ} від ψ_{ω} . Абсолютне максимальне значення K_{Δ} становить 15,1-19,5, відповідає $\psi_{\omega}=0,86-1,03$ і зростає зі збільшенням κ та зменшенням d/D . При зношуванні футерівки цей максимум відповідає значенню $\psi_{\omega}=1-1,83$, що спадає зі збільшенням κ .

При $d/D < 0,01$ виникає локальний максимум значення K_{Δ} , що становить 5,7-9,6, відповідає значенню $\psi_{\omega}=0,15-0,28$ і спадає зі збільшенням κ . Співвідношення між локальним тихохідним та абсолютним швидкохідним максимумами становить 0,29-0,64 і спадає зі збільшенням κ . Значення середньоходового мінімуму K_{Δ} між цими максимумами становить 3,6-4,9, відповідає $\psi_{\omega}=0,51-0,62$ і слабо залежить від κ .

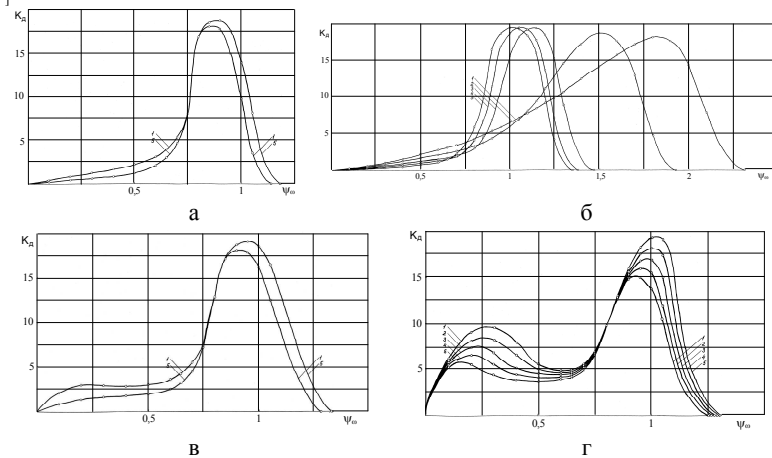


Рис. 4. Залежності K_{Δ} від ψ_{ω} (позначення за рис. 2)

На рис. 5 зображено залежності відносного моменту $\psi_{M0,5}$ від ψ_{ω} . Зі зростанням швидкості обертання $\psi_{M0,5}$ монотонно збільшується від початкового значення 0,4-0,56, зумовленого кутом природного укосу завантаження в русі, до максимальної величини 0,55-0,75 при $\psi_{\omega}=0,72-0,85$, а потім інтенсивно спадає до нуля при утворенні пристінкового шару. Із збільшення заповнення $\psi_{M0,5}$ зростає. При зношуванні футерівки максимум $\psi_{M0,5}$ відповідає значенню $\psi_{\omega}=0,85-1,5$, що спадає зі збільшенням κ .

На рис. 6 зображено залежності відносної потужності $\psi_{N0,5}$ від ψ_{ω} . Максимальне значення $\psi_{N0,5}$ становить 0,45-0,68, відповідає $\psi_{\omega}=0,82-0,93$ і зростає зі збільшенням κ . Із збільшення заповнення $\psi_{M0,5}$ зростає. При зношуванні футерівки максимум $\psi_{N0,5}$ становить 0,63-0,87 і відповідає значенню $\psi_{\omega}=0,93-1,65$, що спадає зі збільшенням κ .

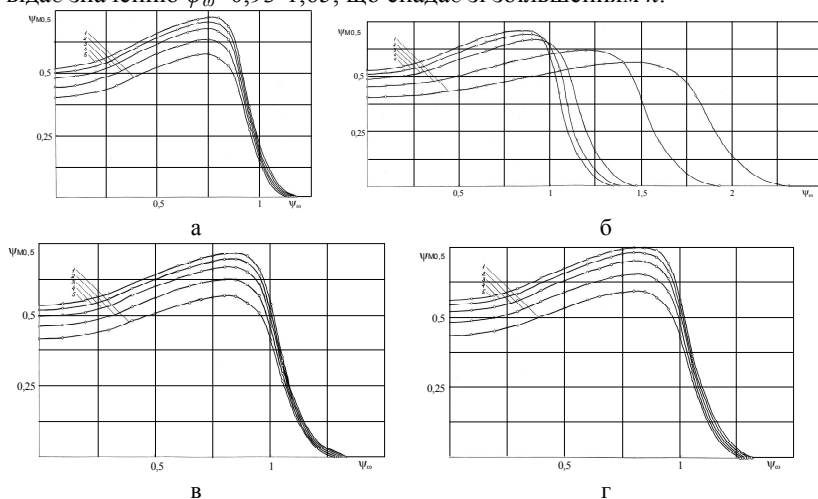


Рис. 5. Залежності $\psi_{M0,5}$ від ψ_{ω} (позначення за рис. 2)

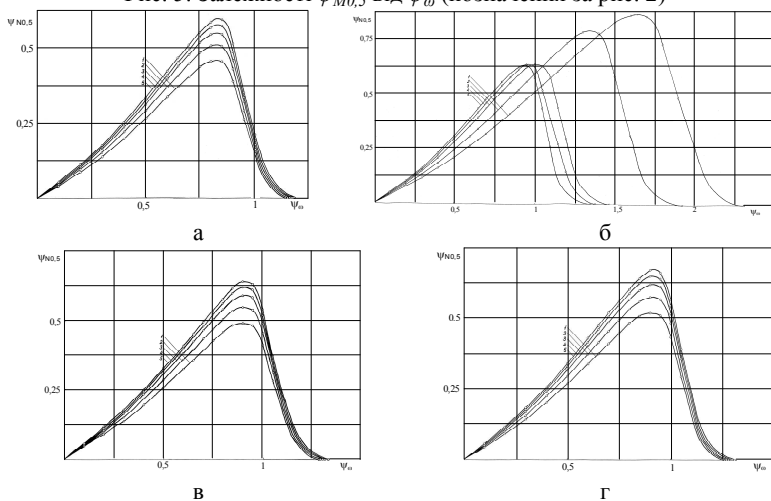


Рис. 6. Залежності $\psi_{N0,5}$ від ψ_{ω} (позначення за рис. 2)

Таким чином, зважаючи на реологічну поведінку, зокрема ефект псевдозрідження та квазітекучості, змішування доволі рухливих дрібнодисперсних зернистих сумішей в барабанних змішувачах доцільно реалізувати шляхом створення зсувної дії на середовище в зоні зсувного руху завантаження, а змішування малорухливих крупнодисперсних матеріалів – шляхом створення динамічної дії в зоні руху завантаження із невеликим падінням. На підставі отриманих результатів щодо масового розподілу зон руху, оборотності, динамічності активації, силової дії та кінетичної енергоємності завантаження, раціональними параметрами процесу змішування дрібнодисперсних матеріалів є низька швидкість обертання ($\psi_{\omega}=0,25-0,5$) та мала ступінь заповнення ($\kappa<0,5$), коли інтенсивність зсувної циркуляції, зокрема частка зсувного шару та оборотність завантаження, набуває максимального значення. Натомість раціональними параметрами процесу змішування крупнодисперсних матеріалів є висока швидкість обертання ($\psi_{\omega}=0,5-0,75$) та велике заповнення ($\kappa>0,5$), коли інтенсивність динамічної активації, зокрема частка зони невеликого падіння та силова дія та енергоємність руху, набуває максимального значення.

1. Макаров Ю. И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с. **2.** Кафаров В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов. – М. : Наука, 1985. – 440 с. **3.** Першин В. Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В. Ф. Першин, В. Г. Однолько, С. В. Першина. – М. : Машиностроение, 2009. – 220 с. **4.** Дэвис Э. В. Тонкое дробление в шаровых мельницах: Пер. с англ. / Э. В. Дэвис // Технология и практика измельчения. – М., Л., Новосибирск : ГНТГИ, 1932. – С. 194-234. **5.** Олевский В. А. Размольное оборудование обогатительных фабрик / В. А. Олевский. – М. : Госгортехиздат, 1963. – 448 с. **6.** Андреев С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С. Е. Андреев, В. А. Перов, В. В. Зверевич. – М. : Недра, 1980. – 415 с. **7.** Крюков Д. К. Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий / Д. К. Крюков. – М. : Недра, 1966. – 174 с. **8.** Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – М. : Химия, 1977. – 368 с. **9.** Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Под ред. О. С. Богданова, В. А. Олевского. – М. : Недра, 1982. – 366 с. **10.** Маляров П. В. О движении внешнего слоя шаров при смешанном режиме работы барабанных мельниц / П. В. Маляров, В. Ф. Степурин // Обогащение руд. – 1979. – № 2(142). – С. 29-32. **11.** Юдахин Н. Н. Распределение массы загрузки в трубной мельнице при смешанном режиме / Н. Н. Юдахин // Тр. ВНИИЦеммаш. – 1979. – Вып. 22. – С. 61-67. **12.** Морозов Е. Ф. О механике дробящих тел барабанной мельницы при смешанном скоростном режиме / Е. Ф. Морозов // Физико-техн. проблемы разработки полез. ископае-

мых. – 1981. – № 6. – С. 73-80. **13.** Науменко Ю. В. Основи теорії режимів роботи барабаних млинів : Монографія / Ю. В. Науменко. – Рівне : Видавництво СПД Зелент О. І., 2009. – 282 с. **14.** Напружено-деформований стан будівельних матеріалів в технологічних процесах виробництва / В. Й. Сівко, В. А. Поляченко, М. П. Кузьмінець, Є. В. Сівко, Ю. В. Науменко. – К. : НТУ, 2010. – 352 с.

Рецензент: к.т.н., професор Сухарєв Е. О. (НУВГП)

Naumenko Y. V., Doctor of Engineering, Associate Professor (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

THREE-PHASE MODE ROTATING OF GRANULAR FILLING DRUM INTRACHAMBER

The model of the actual rotating drum intrachamber filling three-phase flow is considered. The filling circulation intensity is examined. The possibilities for raising the value of a drum mixer operating conditions are established.

Keywords: drum mixer, granular filling, circulation intensity.

Науменко Ю. В., д.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ТРЕХФАЗНЫЙ РЕЖИМ ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНИСТОЙ ЗАГРУЗКИ БАРАБАННОГО СМЕСИТЕЛЯ

Рассмотрена модель реального трехфазного режима движения внутрикамерной зернистой загрузки вращающегося барабана. Проанализирована интенсивность циркуляции загрузки. Установлены условия повышения эффективности рабочего процесса барабанного смесителя.

Ключевые слова: барабанный смеситель, зернистая загрузка, интенсивность циркуляции.
