УДК 621.929.7

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ОБ'ЄМНОГО ДОЗАТОРА ДЛЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Шоловій Ю.П., Магерус Н.І.
Національний університет «Львівська політехніка»

У статті досліджено вплив вібрації на поведінку дрібнодисперсних сипких матеріалів, а саме: пшеничного борошна та цементу. Проаналізовано фактори, що впливають на ефективність роботи вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних сипких матеріалів. Досліджено залежність ефективності роботи вібраційного об'ємного дозатора від амплітуди та частоти коливань. Встановлено вплив параметрів вібрації на точність та продуктивність роботи дозатора. Експериментально визначено значення параметрів вібрації, що забезпечує неперервне та рівномірне витікання дрібнодисперсних сипких матеріалів.
Ключові слова: вібраційний об'ємний дозатор, дрібнодисперсний сипкий матеріал, продуктивність, точність дозування, ефективна в'язкість, модель Лоренца.

Постановка проблеми. Важливими показниками ефективної роботи дозатора для дрібнодисперсних сипких матеріалів (СМ) є висока продуктивність та точність. Продуктивність роботи вібраційного об'ємного дозатора для СМ значною мірою залежить від інтенсивності вібрації $a\omega^2$, де а – пришвидшення вібрації, ω – кругова частота. Чим більше значення $a\omega^2$, тим кращі показники текучості продукту і, відповідно, вища продуктивність. Точність вібраційних дозаторів для дрібнодисперсних СМ, в основному, визначається станом продукту дозування, що піддається впливу вібрації. Ущільнення матеріалу, що спостерігається при низькій інтенсивності коливань, характеризується більш щільною укладкою частинок продукту та зменшенням загаль-

© Шоловій Ю.П., Магерус Н.І., 2016

ного об'єму СМ. Зростання інтенсивності вібрації призводить до зародження циркуляційних рухів частинок продукту у бункері, що супроводжується розрихленням та насиченням СМ повітрям. За показниками текучості продукт дозування перетворюється на псевдорідину. Подальше збільшення амплітуди чи частоти коливань спричиняє виникнення хаотичних циркуляційних рухів СМ, характерною ознакою яких є інтенсивне перемішування матеріалу та значне його розрихлення [1]. Тому на сьогоднішній день актуальним є дослідження впливу параметрів вібрації на стан СМ, що позначається на його швидкості та рівномірності витікання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основними питаннями при розробці вібраційних об'ємних дозаторів для дрібнодисперсних сипких продуктів є підвищення точності при збереженні високої продуктивності процесу дозування. У дослідженні [2] значна увага приділяється аналізу поведінки СМ під дією вібрації та запропонована математична модель, що дає можливість прогнозувати рух віброкиплячого шару зернистих СМ у циліндричному бункері. Однак ця праця непридатні для дослідження поведінки дрібнодисперсних СМ, оскільки не враховують сил зчеплення між частинками продукту. Також дана модель не дозволяє спрогнозувати та дослідити вплив геометрії конічної розвантажувальної лунки на рух СМ. Також дослідженню впливу параметрів вібрації на напружений стан продукту дозування у бункері присвячено багато робіт зарубіжних вчених, зокрема праця Г. Кахе [3], однак вона, в основному, ґрунтується на емпіричних залежностях та не дозволяє аналітично визначити режими роботи вібраційного дозатора і геометрію розвантажувальної лунки, що забезпечуватимуть високу точність та продуктивність процесу дозування.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Висока точність та продуктивність об'ємних дозаторів для дрібнодисперсних СМ досягається лише при реалізації рівномірного витіканні продукту із бункера, що можливо тільки у випадку вмілого використання впливу вібрації на СМ. Оскільки ці питання на сьогоднішній день недостатньо висвітлені у літературі, тому важливим є дослідження впливу параметрів вібрації об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ на ефективність його роботи.

Мета дослідження. Метою цієї роботи є дослідження впливу режимів коливань об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ на його ефективність роботи.

Виклад основного матеріалу дослідження. Процес дозування характеризується значною кількістю різноманітних факторів, що впливають на поведінку дрібнодисперсних СМ. Схематично його можна представити у вигляді «чорного ящика» (рис. 1), де через дію вхідних параметрів формується вектор відгуку $\overline{Y}$.

Умовно усі вхідні параметри (фактори) можна розбити на три групи [4]: 1) керовані $\overline{X}$ (амплітуда $x_1 = a$, частота коливань $x_2 = \nu$, ширина випускного отвору розвантажувальної лунки дозатора $x_3 = b_щ$, висота шару досліджуваного матеріалу $x_4 = h$); 2) контрольовані але некеровані $\overline{W}$ (кут нахилу розвантажувальної лунки дозатора до вертикалі $w_1 = \Theta$ та її висота $w_2 = h_к$, насипна щільність дрібнодисперсного СМ при відсутності дії вібрації $w_3 = \rho_0$); 3) неконтрольовані та некеровані $\overline{Z}$ (насипна щільність матеріалу, що знаходиться під дією вібрації, $z_1 = \rho$, зчеплення між частинками, що визначається через початковий опір зсуву продукту, $z_2 = \tau_0$). Вектор відгуку $\overline{Y}$, що являється функцією вхідних факторів, залежить від мети та поставленого завдання. У якості вектору відгуку для дослідження ефективної роботи вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ обрано продуктивність та точність.

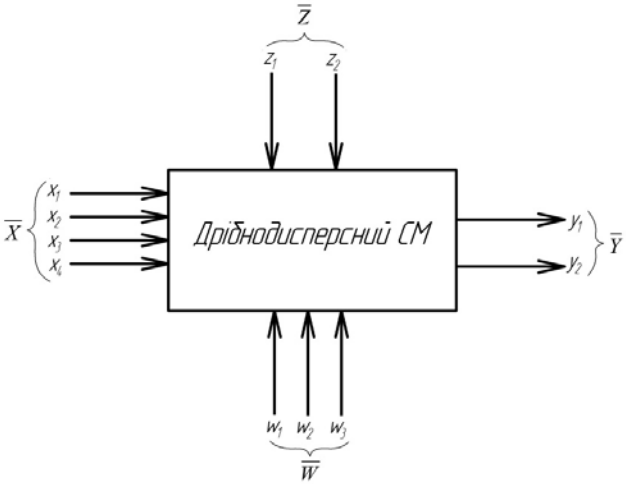

Рис. 1. Схематичне зображення впливу факторів на поведінку дрібнодисперсного СМ під дією вібрації

Дослідження процесу витікання дрібнодисперсних СМ проводились на розробленому експериментальному зразку вібраційного об'ємного дозатора (рис. 2), принципова схема якого зображена на рис. 3.

Рис. 2. Експериментальний зразок вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ

Експериментальне дослідження продуктивності процесу дозування здійснювалось наступним чином (рис. 3): конічна розвантажувальна лунка 1 наповнювалась дрібнодисперсним СМ; вмикався двигун 3, що приводив у обертання муфту 6. Остання, шляхом розведення півмуфт, забезпечувала необхідну амплітуду коливань конічного днища 2 завдяки кривошипно-шатунного механізму 4. Коливання конічного днища 2 спричиняло витікання

продукту через щілину, утворену ним та стінкою розвантажувальної лунки 1. Регулювання розміру випускного отвору відбувалось шляхом переміщення конічної лунки 1 по напрямних 7. Дрібнодисперсний СМ з випускного отвору крізь патрубок 5 потрапляв на похилий лоток, яким направлявся до завантажувальної ємкості. Геометричні параметри розвантажувальної лунки: висота $h_k = 0{,}28$ *м*, діаметр випускного отвору $d_0 = 0{,}16$ *м*, кут нахилу лунки до вертикалі $\Theta = 25^o$.

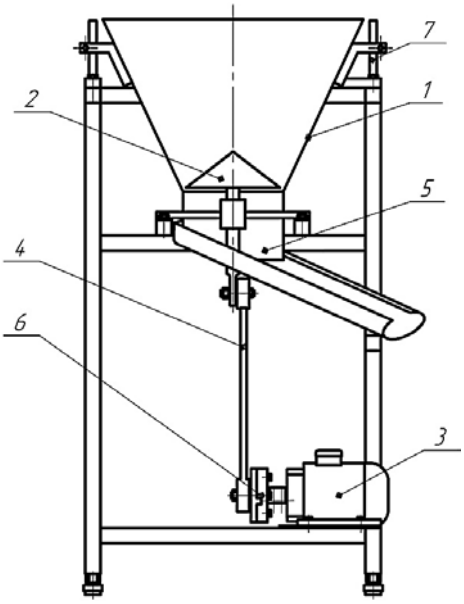

Рис. 3. Принципова схема експериментальної установки вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ

Для дослідження впливу параметрів вібрації дозатора на його продуктивність роботи амплітуда коливань змінювалась від 0,5 мм до 3 мм, а частота – в діапазоні $10 < \nu < 30$ Гц. Формування дози тривало 20 с, контроль точності здійснювався електронною вагою. Для достовірності експерименту досліди проводились з п'ятикратною повторюваністю $n = 5$.

Як уже зазначалось, важливим показником ефективної роботи вібраційного дозатора є продуктивність Q_t, що визначається за формулою:

$$Q_t = \rho_0 \cdot A_{в.о} \cdot V, \qquad (1)$$

де $A_{в.о} = l_щ \cdot b_щ$ – площа перерізу випускного отвору розвантажувальної лунки дозатора, $l_щ$ – довжина щілини випускного отвору, $b_щ$ – ширина щілини випускного отвору, V – швидкість витікання СМ.

Швидкість віброкиплячого дрібнодисперсного СМ у зоні випускного отвору рівна [5]:

$$V = a \cdot \omega \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \varepsilon}{2}\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{4}{\pi} \cdot Z_k \cdot cos\left(\frac{\pi \cdot \varepsilon}{2}\right)\right)^2} \qquad (2)$$

де $\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu$, Z_k – параметр інтенсивності коливань, $\varepsilon = 0{,}834\sqrt{S_h}$ – коефіцієнт [5], S_h – число Струхаля.

Число Струхаля залежить від числа Рейнольдса та визначається за залежністю [6]:

$$S_h = 0{,}212 \cdot \left(1 - \frac{21{,}2}{R_e}\right) \qquad (3)$$

де R_e – число Рейнольдса.

Для забезпечення високої точності дозування достатньо забезпечити ламінарний рух сипкого продукту, при якому число Рейнольдса знаходиться у межах: $45 \le R_e \le 54$ [7].

Використавши формулу (2), рівняння (1) для конічної розвантажувальної лунки із конічним днищем матиме вигляд:

$$Q_t = 2 \cdot \rho_0 \cdot b_щ \cdot l_щ \cdot a \cdot \pi \cdot \nu \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \varepsilon}{2}\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{4}{\pi} \cdot Z_k \cdot cos\left(\frac{\pi \cdot \varepsilon}{2}\right)\right)^2} \qquad (4)$$

У програмному середовищі Mathcad встановлено вплив режимів роботи та розміру випускного отвору щілиноподібної лунки на продуктивність вібраційного дозатора (рис. 4, 5). Для моделювання використано наступні значення вхідних параметрів: $R_e = 50$, $Zk = 0{,}2$, $l_щ = 0{,}5$ *м*.

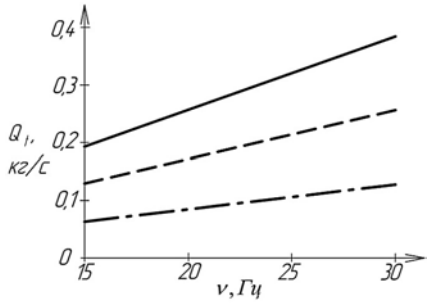

Рис. 4. Залежність продуктивності вібраційного дозатора для СМ від частоти вібрації (_____ – для а = 3 · 10⁻³ м, _ _ – для а = 2 · 10⁻³ м, _ . _ – для а = 1 · 10⁻³ м

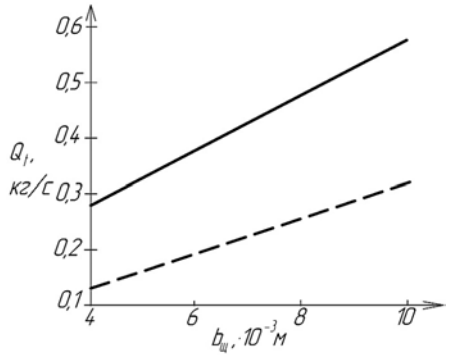

Рис. 5. Залежність продуктивності вібраційного дозатора для СМ від ширини щілини випускного отвору (_____ – для ρ_0 = 960 кг/м³, _ _ – для ρ_0 = 450 кг/м³)

При дослідженні залежності продуктивності вібраційного об'ємного дозатора Q_t від частоти коливань ν (рис. 4) використано наступні значення невідомих величин: $\rho_0 = 450$ кг/м³, $b_щ = 8 \cdot 10^{-3}$ м. Для дослідження впливу ширини щілини $b_щ$ на продуктивність дозатора Q_t (рис. 5) прийнято наступні режими вібрації: $\nu = 20$ Гц, $a = 3 \cdot 10^{-3}$ м.

Аналіз графіків (рис. 4, 5) дозволяє стверджувати, що зміна продуктивності Q_t значною мірою залежить від інтенсивності вібрації $a\omega^2$: чим вища інтенсивність коливань, тим більша продуктивність дозатора Q_t. Графічні залежності (рис. 4) засвідчують, що експлуатація дозатора на високих частотах ν та амплітудах a дозволяє істотно підвищити його продуктивність. Однак при цьому значно зростають динамічні навантаження на робочі елементи конструкції. Отже, встановлення оптимальних режимів роботи вібраційного дозатора α та ν дозволяє регулювати його продуктивність роботи Q_t.

Зростання ширини випускного отвору $b_щ$ розвантажувальної лунки призводить до збільшення його площі $A_{в.о}$, що сприяє зростанню продуктивності дозатора Q_t (рис. 5). Значний вплив на продуктивність дозатора Q_t має також насипна щільність продукту ρ_0, із зростанням якої покращується текучість дрібнодисперсного СМ, оскільки збільшується гравітаційна сила, яка забезпечує рух СМ до випускного отвору розвантажувальної лунки.

В якості продуктів дозування для проведення експерименту по визначенні продуктивності та точності вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ використовувались пшеничне борошно та цемент (табл. 1). При проведенні експерименту досліджувалась висота шару дрібнодисперсного СМ $h = d_0$.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості досліджуваних матеріалів

Фізико-механічні властивості СМ	Пшеничне борошно	Цемент
Умовний діаметр частинки, мм	30-50	20-40
Насипна щільність, кг/м³	450-700	960-1600
Коефіцієнт внутрішнього тертя	0,57-1,116	0,61
Коефіцієнт зовнішнього тертя:		
По сталі	0,49-0,65	0,3-0,6
По гумі	0,85-0,95	0,9-0,98
Початковий опір зсуву, Па	50	150
Коефіцієнт динамічного ущільнення	1,08-1,13	1,15-1,19
Вологість, %	10	5-7

Експериментально встановлено вплив частоти коливань ν конічного днища на продуктивність Q дозатора для борошна при різних амплітудах коливань: 1 – а = 0,5 · 10^{-3} м, 2 – а = 1 ·10^{-3} м, 3 – а = 2 · 10^{-3} м, 4 – а = 3 ·10^{-3} м для розмірів щілин $b_щ$ = 4 · 10^{-3} м (рис. 6), $b_щ$ = 6 · 10^{-3} м (рис. 7), $b_щ$ = 8 · 10^{-3} м (рис. 8).

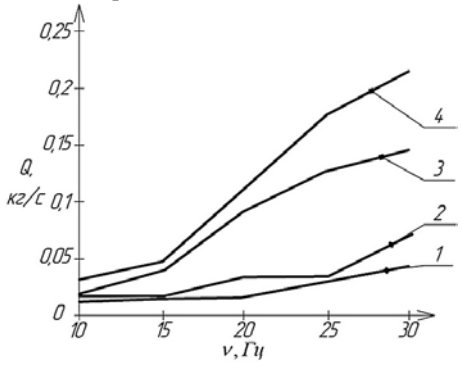

Рис. 6. Залежність продуктивності дозатора для борошна від частоти коливань ($b_щ$ = 4 · 10^{-3} м)

Аналіз відтворюваності результатів вимірювань продуктивності витікання борошна вказує, що при амплітуді $a \geq 2 \cdot 10^{-3}$ м та частоті коливань $\nu \geq 20$ Гц (частини кривих 3 та 4) відхилення продуктивності від середнього значення для кожного досліду становить $\delta \leq 3\%$, що вказує на рівномірність витікання СМ. Тому можна стверджувати, що при інтенсивності вібрації $a\omega^2 \geq 32$ *м/с²* вібраційний об'ємний дозатор для борошна забезпечує високу точність дозування. Однак при $a\omega^2 < 32$ *м/с²* (криві 1, 2) відхилення продуктивності від середнього значення коливається в межах $8 \leq \delta \leq 30\%$, що вказує на непрогнозований характер руху дрібнодисперсного СМ.

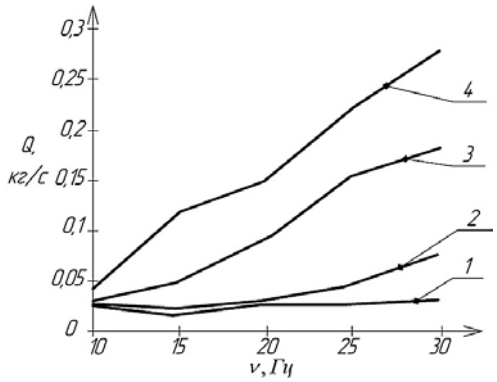

Рис. 7. Залежність продуктивності дозатора для борошна від частоти коливань ($b_щ$ = 6 · 10^{-3} м)

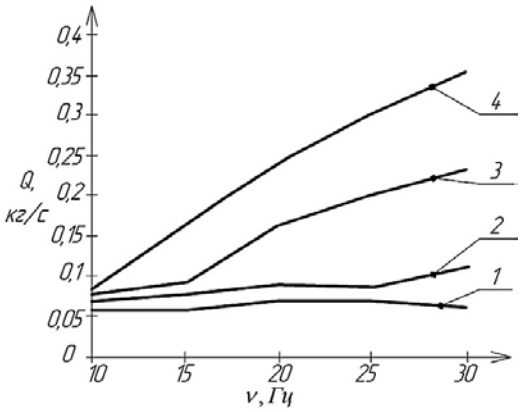

Рис. 8. Залежність продуктивності дозатора для борошна від частоти коливань ($b_щ$ = 8 · 10^{-3} м)

Для перевірки відтворюваності експерименту визначено відносну похибку вимірювань:

$$\delta = \frac{\Delta Q}{Q} \quad (5)$$

де ΔQ – абсолютна похибка вимірювань продуктивності; Q – експериментальне значення продуктивності.

Абсолютна похибка вимірювань визначена за формулою:

$$\Delta Q = Q - Q_t. \quad (6)$$

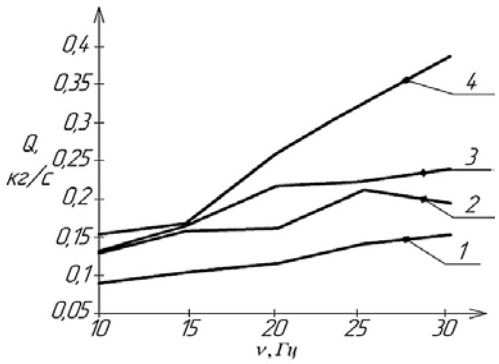

Рис. 9. Залежність продуктивності дозатора для цементу від частоти коливань ($b_щ$ = 4 · 10^{-3} м)

Відносна похибка експериментальних значень продуктивності Q дозатора для борошна при ін-

тенсивності вібрації $a\omega^2 \geq 32$ *м/с*^{2} від теоретичних Q_t, визначених за формулою (4), становить $\delta \leq 18\%$, що вказує на адекватність проведеного експерименту. Збільшення розміру щілини випускного отвору від 4 до $8 \cdot 10^{-3}$ м суттєво збільшує пропускну здатність отвору, що призводить до зростання продуктивності майже на 50%.

Аналогічно проведено експериментальні дослідження продуктивності дозатора для цементу (рис. 9, 10, 11).

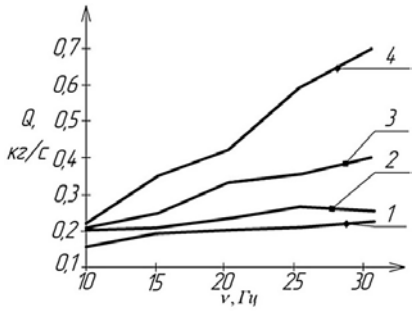

Рис. 10. Залежність продуктивності дозатора для цементу від частоти коливань ($b_щ = 6 \cdot 10^{-3}$ м)

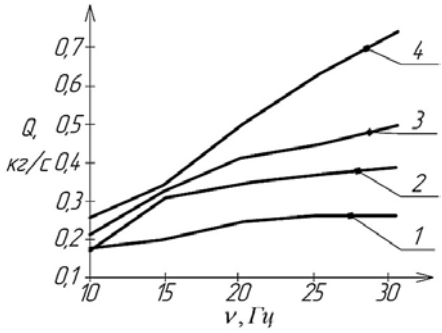

Рис. 11. Залежність продуктивності дозатора для цементу від частоти коливань ($b_щ = 8 \cdot 10^{-3}$ м)

При дослідженні продуктивності дозатора для цементу встановлено, що необхідна інтенсивність вібрації, при якій матеріал витікає рівномірно із точністю в межах допустимої похибки, становить $a\omega^2 \geq 45$ *м/с*^{2}. На графіках (рис. 9, 10, 11) це представлено частинами кривих 3 та 4, а саме: при амплітуді $a = 2 \cdot 10^{-3}$ м дозатор для цементу працюватиме із допустимою точністю $\delta \leq 3\%$ на частотах $\nu \geq 25$ Гц, а при амплітуді $a = 3 \cdot 10^{-3}$ м – на частотах $\nu \geq 20$ Гц.

Теоретичні та експериментальні значення продуктивності Q дозатора для цементу при $a\omega^2 \geq 45$ *м/с*^{2} також відрізняються в межах допустимої похибки $\delta \leq 18\%$. Продуктивність витікання цементу також значною мірою залежить від розміру щілини $b_щ$: чим більший розмір щілини $b_щ$, тим вища продуктивність дозатора Q.

Отже, на основі експериментальних даних можна зробити висновок, що для кожного конкретного дрібнодисперсного СМ існує певне граничне значення інтенсивності вібрації $a\omega^2$, при якому відбувається рівномірне та неперервне витікання продукту і, цим самим, реалізовується висока точність дозування. Значення амплітуди a та частоти коливань ν, що необхідні для досягнення продуктом стану віброкипіння, залежать від ефективної в'язкості продукту дозування, що визначається експериментальним шляхом. Режими вібрації, які необхідні для доведення матеріалу до стану ламінарних циркуляцій, можна визначити за допомогою параметрів розробленої моделі Лоренца [8], що дозволяє встановити вплив геометричних розмірів розвантажувальної лунки, а також властивостей дрібнодисперсних СМ на їх поведінку.

Висновки. Визначальним фактором, що впливає на точність дозатора, є інтенсивність вібрації, яка залежить від фізико-механічних властивостей СМ. Чим більші сили зчеплення у дрібнодисперсному СМ, тим вище значення амплітуди та частоти коливань необхідне для досягнення продуктом стану віброкипіння, що забезпечує його неперервне та рівномірне витікання. При інтенсивності вібрації, більшій за критичну для даного матеріалу, точність дозування знаходиться у межах ±3%. Застосування низьких частот та амплітуд при дозуванні дрібнодисперсного СМ призводить до непрогнозованого витікання продукту і, тим самим, низької точності дозатора. При досягненні продуктом стану ламінарних циркуляції продуктивність дозатора лінійно залежить від частоти та амплітуди коливань. Збільшення розміру щілини випускного отвору та насипної щільності матеріалу також значно впливає на зростання продуктивності дозатора.

Список літератури:

1. Магерус Н. І. Вплив параметрів вібрації та геометрії лунки на рух дрібнодисперсного сипкого матеріалу у конічній лунці дозатора / Н. І. Магерус // Вібрації в техніці та технологіях. – 2014. – № 2. – С. 71-78.
2. Пирожков Д. Н. Механико-технологические основы создания кормоприготовительных машин с вибрируемым зернистим слоем: автореф. дисс. д-ра техн. наук: 05.20.01 / Алтайс. гос. аграр. ун-т. – Барнаул, 2012. – 34 с.
3. Kache G. Verbesserung des Schwerkraftflusses kohäsiver Pulver durch Schwingungseintrag: Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur: Promotionskolloquium / Ottovon-Guericke-Universität Magdeburg. – Magdeburg, 2009. – 223 s.
4. Мухачёв В. Г. Планирование и обработка результатов эксперимента: уч. пособ. / В. Г. Мухачёв – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 118 с.
5. Федоренко А. С. Параметры сепаратора для очистки фуражного зерна от крупных примесей: дисс. к-та техн. наук: 05.20.01 / Алтайс. гос. аграр. ун-т. – Барнаул, 2014. – 225 с.
6. Чжен П. Отрывные течение / Чжен П. – М.: Мир, 1973. – 300 с.
7. Разумов И. М. Псевдоожижение и пневмотранспорт сыпучих материалов / И. М. Разумов – М.: Химия, 1972. – 239 с.
8. Шоловій Ю. П. Моделювання поведінки дрібнодисперсного сипкого матеріалу під дією вібрації у конічній лунці дозатора за допомогою системи Лоренца / Ю. П. Шоловій, Н. М. Тимошенко, Н. І. Магерус // Технологічні комплекси. – 2014. – № 1. – С. 109-117.

Шоловий Ю.П., Магерус Н.И.
Национальный университет «Львовская политехника»

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ОБЪЕМНОГО ДОЗАТОРА ДЛЯ МЕЛКОДИСПЕРСНИХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация
В статье исследовано влияние вибрации на поведение мелкодисперсных сыпучих материалов, а именно: пшеничной муки и цемента. Проанализированы факторы, влияющие на эффективность работы вибрационного объемного дозатора для мелкодисперсных сыпучих материалов. Исследовано зависимость эффективности работы вибрационного объемного дозатора от амплитуды и частоты колебаний. Установлено влияние параметров вибрации на точность и производительность дозатора. Экспериментально определено значения параметров вибрации, что обеспечивает непрерывное и равномерное истечение мелкодисперсных сыпучих материалов.
Ключевые слова: вибрационный объемный дозатор, мелкодисперсный сыпучий материал, производительность, точность дозирования, эффективная вязкость, модель Лоренца.

Sholoviy Y.P., Maherus N.I.
National University «Lviv Polytechnic»

INFLUENCE OF VIBRATION PARAMETERS ON THE PRODUCTIVITY OF THE VOLUME DISPENSER FOR RASH FINE DISPERSE MATERIALS

Summary
The vibration impact on the behaviour of the following fine disperses materials is investigated: wheat flour and cement. Factors, influencing on the efficiency of the volumetric vibrating feeder for fine disperse materials, are analyzed. The dependence of the efficiency of the vibration bulk feeder work from the amplitude and frequency of vibrations is established. The influence of the vibratory parameters on the accuracy and performance of the dispenser is investigated. Values of the vibration parameters ensuring continuous and uniform outflow of the fine disperse materials are experimentally established.
Keywords: vibration bulk dispenser, rash fine disperse material, performance, precision of dosing, effective viscosity, Lorentz model.