

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЗАТОРА ДИСКРЕТНОЇ ДІЇ З ПЕРЕКИДНИМ КОВШЕМ

Григорій Черепашук, к.т.н., проф., Олексій Потильчак, к.т.н., доц.
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна;

e-mail: o.potylchak@khai.edu

Тетяна Бикова, к.т.н., доц.

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Україна

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2025.01.074>

Анотація

У статті розглянуті питання дозування сипких матеріалів за допомогою вагових дозаторів. Описані існуючі типи дозаторів, наведені основні недоліки відомих дозаторів дискретної дії з перекидним ковшем. Представлено розроблений авторами дозатор дискретної дії з перекидним ковшем, наведено його структурну схему, за якою детально розглянуто принцип дії дозатора. Дозатор містить такі блоки: витратний бункер, вантажоприймач, верхній та нижній обмежувальні упори, противагу, блок вимірювання та індикації ваги. Процес дозування сипких матеріалів зводиться до циклічного виконання чотирьох послідовних операцій: подавання сипкого матеріалу з витратного бункера у вантажоприймач під ним; нахилу і перекидання вантажоприймача після набору заданої дози; різкої зупинки перекинутого вантажоприймача та вивантаження набраної дози; повернення спороженого вантажоприймача у вихідне положення. Усі механічні переміщення в зазначених операціях здійснюються в автоматичному режимі та тільки за рахунок потенційної енергії сипкого матеріалу, що дозується, обумовленої його вагою. Виведено диференціальне рівняння другого порядку, яке описує рух вантажоприймача під час перекидання. Розглянуті статичні рівняння моментів для різних стадій робочого циклу дозатора, з яких отримані рекомендації для розрахунку геометричних та вагових параметрів дозатора.

Ключові слова

Дозатор дискретної дії, Сипкий матеріал, Вантажоприймач, Противага, Витратний бункер, Диференціальне рівняння

1. Вступ

На промислових підприємствах різних галузей виконується велика кількість операцій із сипкими матеріалами. Значна частина цих матеріалів у процесі переробки підлягає процесу дозування, для якого використовують різноманітні дозатори. Без правильної організації процесу дозування та застосування відповідної апаратури неможливо забезпечити високу якість кінцевого продукту.

Під дозуванням розуміють зважування або відмірювання за об'ємом із заданою точністю встановленої рецептом кількості кожного компонента для формування суміші готової продукції, а також формування дози при упаковці готового продукту [1].

Неправильне дозування може стати причиною зниження якості продукту, що випускається, перевитрати дефіцитних та коштовних компонентів, а також до збільшення вартості готової продукції. Таким чином, дозування дуже важливою технологічною операцією на підприємствах багатьох галузей промисловості.

Загальною вимогою до дозаторів є забезпечення точного подавання в зазначені проміжки часу певної кількості матеріалу, що дозується, для забезпечення заданих технологічних процесів з можливістю регулювання подавання незалежно від тиску в середовищі.

Дозатори сипких матеріалів залежно від механізму роботи поділяються на дві великі групи [2]:

- дозатори безперервної дії – призначені для автоматичного подавання продуктів і матеріалів до відповідної технологічної ємності або установки (наприклад, змішувача). Такі дозатори застосовуються у виробничих процесах з горизонтальним розміщенням верстатів і конвеєрною подачею компонентів;
- дозатори дискретної дії – використовуються, якщо передбачено непостійне подавання матеріалів у бункер. Дозатор вмикається та вимикається в автоматичному режимі, коли за технологією передбачена дана операція. Такий тип дозаторів орієнтований на виробничі процеси з висотним розміщенням обладнання. Дозатори дискретної дії набули значно ширшого застосування, тому подальший розгляд буде зосереджено саме на цьому типі.

2. Аналіз публікацій

Описані у [3 – 9] дозатори дискретної дії за конструкцією поділяються на:

- дозатори з перекидним ковшем;
- дозатори з ковшем, дно якого відкривається.

Основними недоліками відомих дозаторів з перекидним ковшем є додаткові витрати енергії на перекидання ковша, динамічні впливи на точність дозування, а також зниження точності дозування через налипання залишків сипкого матеріалу на стінках ковша.

3. Постановка задачі

Задачею дослідження є розробка енергозберігаючого дозатора дискретної дії з перекидним ковшем, який матиме просту конструкцію та підвищену точність дозування, а також дослідження математичної моделі дозатора.

4. Розробка дозатора дискретної дії з перекидним ковшем

Для вирішення поставленої задачі авторами було розроблено дозатор [10], структурну схему якого показано на рис. 1.

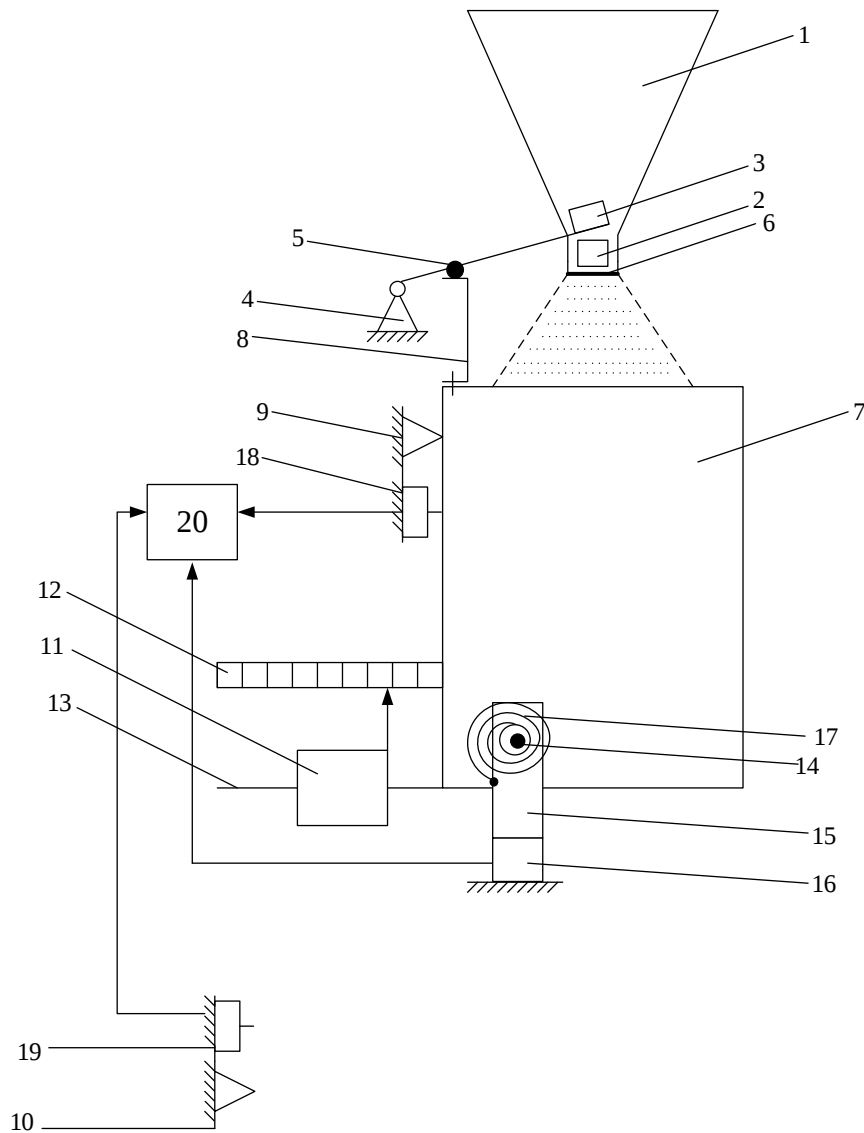


Рис.1. Структурна схема дозатора дискретної дії з перекидним ковшем

Структурна схема містить:

- витратний бункер 1, в якому вертикальний розвантажувальний отвір 2 обладнано заслінкою 3, яка виконана у вигляді змонтованої на опорі 4 поворотної пластини, що має палець 5 та оперта на виступаючу з-під отвору 2 платформу 6;
- вантажоприймач 7, у верхній частині якого закріплений штовхач 8 заслінки 3;
- верхній обмежувальний упор 9 та нижній обмежувальний упор 10, що пов'язані з нерухомою основою;
- протизвагу 11;
- блок 20 вимірювання та індикації ваги.

До вантажоприймача 7 жорстко прикріплені лінійна шкала дози 12, градуйована в одиницях ваги дози матеріалу, що зважується, і регулювальний важіль 13. Уздовж важеля 13 може пересуватися протизвагу 11 з можливістю фіксації його положення будь-яким відомим способом та індикації цього положення за шкалою 12 за допомогою, наприклад, стрілочного покажчика. На передній і задній стінках вантажоприймача 7 нижче його

центру мас жорстко прикріплені дві обертові півосі 14, що знаходяться на одній прямій, перпендикулярній напрямку регульовального важеля 13 і зміщеній по горизонталі в його сторону відносно центру мас вантажоприймача 7. Півосі 14 можуть вільно обертатися при перекиданні вантажоприймача 7 в отворах втулок ковзання 15, які оперті на ваговимірювальні, наприклад, тензометричні датчики 16. Спиральні пружини 17, що закручуються при перекиданні вантажоприймача 7, утворюють пружний зв'язок півосей 14 з втулками 15. Виходи ваговимірювальних датчиків 16, верхнього кінцевого вимикача 18, прикріпленого до верхнього упору 9, та нижнього кінцевого вимикача 19, прикріпленого до нижнього упору 10, електрично зв'язані з входами блоку 20 вимірювання та індикації ваги.

Процес дозування сипких матеріалів зводиться до циклічного виконання чотирьох послідовних операцій:

- подавання сипкого матеріалу з витратного бункера 1 у вантажоприймач 7 під ним;
- нахилу і перекидання вантажоприймача 7 після набору заданої дози, яке супроводжується закриттям затвора витратного бункера 1 і визначенням загальної ваги набраної дози та вантажоприймача 7 з усіма елементами, закріпленими на ньому (ваги «брутто»);
- різкої зупинки перекинутого вантажоприймача 7 та вивантаження набраної дози;
- повернення спорожненого вантажоприймача 7 у вихідне положення, яке супроводжується визначенням його ваги (ваги «тара») і відкриттям затвора витратного бункера 1.

Усі механічні переміщення в зазначених операціях здійснюються в автоматичному режимі та тільки за рахунок потенційної енергії сипкого матеріалу, що дозується, обумовленої його вагою.

У вихідному положенні розвантажувальний отвір 2 витратного бункера 1 перекрито заслінкою 3, що оперта на платформу 6. Порожній вантажоприймач 7 під дією створюваного вагою противаги 11 обертового моменту, який більше обертового моменту, що створюється вагою порожнього вантажоприймача 7 та направлений протилежно йому, обертається на півосях 14 проти годинникової стрілки до торкання верхнього упору 9. На заключній стадії повороту закріплений в його верхній частині штовхач 8 упирається в палець 5 заслінки 3 і піднімає її, а ліва бокова стінка вантажоприймача 7 натискає на верхній кінцевий вимикач 18, що приводить до його замикання і запуску блоку 20 вимірювання та індикації ваги. Блок 20 за сигналами ваговимірювальних датчиків 16 починає виконувати періодичне вимірювання ваги вантажоприймача 7 із закріпленими на ньому елементами.

Розрахункова схема дозатора дискретної дії з перекидним ковшем показана на рис. 2.

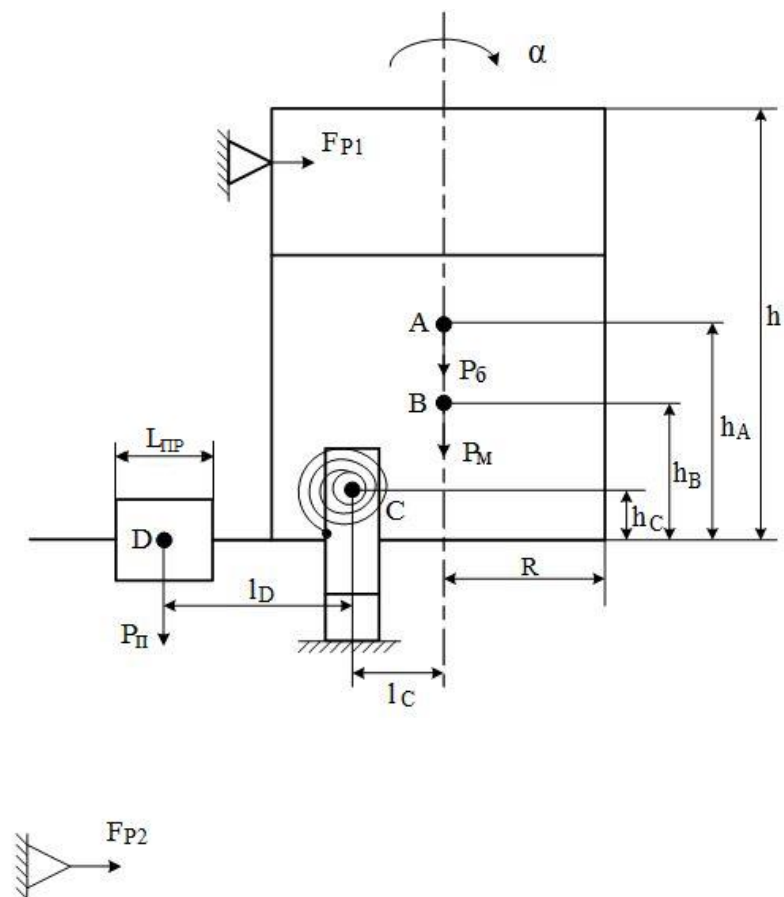


Рис. 2. Розрахункова схема дозатора дискретної дії з перекидним ковшем

Відповідно до схеми, сила реакції упору 9 компенсує сумарний крутний момент, що діє на порожній вантажоприймач 7, і розраховується за формулою:

$$M_{\text{сум}} = P_{\Pi} \cdot l_{\Pi} - P_B \cdot l_B + W \cdot \alpha, \quad (1)$$

де P_{Π} та P_B – вага протизваги 11 та порожнього вантажоприймача 7 відповідно;

l_{Π} та l_B – зміщення по горизонталі центрів мас протизваги 11 та порожнього вантажоприймача 7 відносно осі поворотних півошей 14 (плечі дії сил ваги P_{Π} та P_B);

W – питомий протидіючий момент спіральних пружин 17;

α – кут відхилення вантажоприймача 7 від вертикалі.

У вихідному вертикальному положенні кут $\alpha = 0$, а плечі $l_{\Pi} = l_D$, $l_B = l_C$. Через відкритий розвантажувальний отвір 2 витратного бункера 1 сипкий матеріал починає надходити під власною вагою в розташований під ним вантажоприймач 7. Перекидний момент, створюваний вагою засипаного у вантажоприймач 7 сипкого матеріалу, можна розрахувати за формулою:

$$M_{\text{пер}} = P_M \cdot l_M, \quad (2)$$

де P_M – вага засипаного у вантажоприймач 7 сипкого матеріалу;

l_M – зміщення по горизонталі центру мас засипаного матеріалу відносно осі поворотних півошей (плече дії сили ваги P_M). При симетричній формі вантажоприймача і $\alpha = 0$: $l_M = l_B = l_C$.

Як тільки перекидний момент, створюваний вагою засипаного у вантажоприймач 7 сипкого матеріалу зрівняється з сумарним моментом $M_{\text{сум}}$, що створений протизвагою 11 та порожнім вантажоприймачем 7, вантажоприймач 7 з усіма закріпленими на ньому елементами починає обертатися за годинниковою стрілкою (момент сили тертя між елементами 14 і 15 можна не враховувати внаслідок його малості). При цьому заслінка 3 витратного бункера 1, яка вже не утримується штовхачем 8, під власною вагою обертається на своїй осі до упору об платформу 6 і перекриває розвантажувальний отвір 2, перериваючи надходження сипкого матеріалу до вантажоприймача 7. Таким чином, засипання припиняється, що усуває динамічний вплив потоку матеріалу на ваговимірювальні датчики 16. Одночасно бокова стінка вантажоприймача 7 відходить від верхнього кінцевого вимикача 18, що приводить до його розмикання. За сигналом вимикача 18 в блоці 20 відбувається запам'ятовування поточного результату вимірювання, не спотвореного динамічними впливами потоку матеріалу і руху вантажоприймача 7. Цей результат вимірювання відповідає вазі дозованої порції сипкого матеріалу і вантажоприймача 7 з усіма закріпленими на ньому елементами, тобто вазі «брутто» P_B . Під дією перекидного моменту, а після розгону і моменту сил інерції, вантажоприймач 7 на півосях повертається за годинниковою стрілкою, причому в кінці перекидання його рух гальмується за рахунок збільшення протидіючого моменту $W\alpha$ спіральних пружин 17, які закручуються. Зупинка вантажоприймача 7 в вертикальному перекинутому положенні при $\alpha_{\text{max}} = 180^\circ$ відбувається за рахунок зіткнення його правої бокової стінки з нижнім обмежувальним упором 10, який також додатково виконує функції амортизатора і запобігає зворотному руху вантажоприймача 7. При цьому бокова стінка вантажоприймача 7 натискає на нижній кінцевий вимикач 19, що приводить до його замикавання і повторного запуску блоку 20, який починає періодично вимірювати вагу з підвищеною частотою. Одночасно з цим дозована порція сипкого матеріалу завдяки зіткненню і під дією власної ваги швидко висипається з перекинутого вантажоприймача 7 у приймальну ємність (на структурній схемі не показана). Далі під впливом протидіючого моменту при виконанні умови

$$W \cdot \alpha_{\text{max}} > P_{\Pi} \cdot l_{\Pi} - P_B \cdot l_B, \quad (3)$$

яка забезпечується вибором необхідної жорсткості спіральних пружин, спорожнений вантажоприймач 7 на півосях 14 починає обертатися проти годинникової стрілки, повертаючись в початкове положення. При цьому бокова стінка вантажоприймача 7 відходить від нижнього кінцевого вимикача 19, він розмикається і за його сигналом в блоці 20 відбувається запам'ятовування поточного результату вимірювання, не спотвореного динамічними впливами нижнього упору 10 і зворотного руху вантажоприймача 7. Цей результат вимірювання відповідає вазі порожнього вантажоприймача 7 з усіма закріпленими на ньому елементами і залишку сипкого матеріалу, який налипнув на його стінках, тобто вазі «тара» P_T . Після повернення вантажоприймача 7 у вихідне вертикальне положення процес автоматично повторюється без витрат енергії на механічні переміщення елементів дозатора.

Блок 20 за двома результатами зважування P_B і P_T , отриманими у одному циклі дозування, обчислює точне значення ваги порції – ваги «нетто», яке розраховується за формулою:

$$P_M = P_B - P_T, \quad (4)$$

де P_T – вага «тара»;

P_B – вага «брутто».

Розраховане значення ваги «нетто» не спотворене динамічними впливами та вагою налиплених на стінках вантажоприймача 7 залишків сипкого матеріалу, а підсумовування отриманих значень дозволяє визначати точне значення загальної ваги сипкого матеріалу, що пройшов через дозатор.

Вага дозованих порцій сипкого матеріалу однозначно визначається співвідношенням стабільних значень геометричних і вагових параметрів елементів дозатора, що розраховується за формулою:

$$P_M = \frac{P_{\Pi} \cdot l_D - P_B \cdot l_C}{l_C}. \quad (5)$$

Вага дозованих порцій сипкого матеріалу може регулюватися підбором ваги P_{Π} противаги 11 і переміщенням її по важелю 13, що змінює величину l_D , з індикацією дози за шкалою 12. Вага порції і сам процес дозування практично не залежать від сил тертя в обертових опорах вантажоприймача 7, внаслідок їх малості, що забезпечується конструктивним шляхом (мастило, захист від забруднення і т.п.). Це збільшує надійність і точність порційного зважування сипких матеріалів при практичному виключенні енерговитрат на дозування. Точне вимірювання ваги «нетто» ваговимірювальними датчиками й блоком вимірювання та індикації ваги підвищує точність обліку ваги порцій і сумарної ваги сипкого матеріалу, що дозується. Це дозволяє здійснювати дистанційний ваговий контроль маси видаваних порцій сипких компонентів в технологічні потоки.

5. Математична модель дозатора

Процес перекидання ковша дозатора описується диференціальним рівнянням, яке має вигляд:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P_{TP} \frac{d\alpha}{dt} + M_B + M_M - M_{\Pi} - M_{пруж} = 0, \quad (6)$$

де J – момент інерції системи;

P_{TP} – коефіцієнт тертя в опорах;

M_B – момент, що створюється вагою вантажоприймача;

M_M – момент, що створюється вагою сипкого матеріалу;

M_{Π} – момент, що створюється противагою;

$M_{пруж}$ – пружний момент, що створюється пружинами.

Моменти, які входять до рівняння (6), можуть бути виражені через конструктивні параметри дозатора, які позначені на розрахунковій схемі (рис. 2).

Момент, що створюється вагою вантажоприймача:

$$M_B = P_B \cdot \sqrt{(h_A - h_C)^2 + l_C^2} \cdot \sin(\gamma + \alpha), \quad (7)$$

де P_B – вага вантажоприймача;

h_A – висота центру тяжіння вантажоприймача;

h_C – висота обертової півосі;

l_C – відстань між лінією дії ваги вантажоприймача та віссю обертання;

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{l_C}{\sqrt{(h_A - h_C)^2 + l_C^2}}\right);$$

α – кут нахилу вантажоприймача.

Момент, що створюється вагою сипкого матеріалу:

$$M_M = P_M \cdot \sqrt{(h_B - h_C)^2 + l_C^2} \cdot \sin(\beta + \alpha), \quad (8)$$

де P_M – вага сипкого матеріалу;

h_B – висота центру тяжіння сипкого матеріалу;

β – кут початкового натягу пружин.

Момент, що створюється противагою:

$$M_{\Pi} = P_{\Pi} \cdot \sqrt{h_C^2 + l_D^2} \cdot \sin(\eta - \alpha), \quad (9)$$

де P_{Π} – вага противаги;

l_D – відстань між центром тяжіння противаги та віссю обертання;

$$\eta = \arcsin\left(\frac{l_D}{\sqrt{h_C^2 + l_D^2}}\right).$$

Пружний момент, що створюється пружинами:

$$M_{пруж} = K_{пр} \cdot \alpha, \quad (10)$$

де $K_{пр}$ – питома пружність пружин.

З урахуванням виразів (7) – (10), диференціальне рівняння (6) набуде вигляду:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P_{TP} \frac{d\alpha}{dt} + P_B \cdot \sqrt{(h_A - h_C)^2 + l_C^2} \cdot \sin(\gamma + \alpha) + P_M \cdot \sqrt{(h_B - h_C)^2 + l_C^2} \cdot \sin(\beta + \alpha) - P_{\Pi} \cdot \sqrt{h_C^2 + l_D^2} \cdot \sin(\eta - \alpha) - K_{пр} \cdot \alpha = 0. \quad (11)$$

Диференціальне рівняння другого порядку (11) є нелінійним і може бути вирішене тільки за допомогою чисельних методів. Тому для визначення у першому наближенні геометричних та вагових параметрів дозатора необхідно розглянути статичні рівняння моментів для різних стадій його робочого циклу.

На початку завантаження вантажоприймача рівняння моментів має вигляд:

$$M_B - M_{\Pi} + M_{P1} = 0,$$

де M_{P1} – момент сили притиску вантажоприймача до верхнього кінцевого вимикача,

$$M_{P1} = M_{\Pi} - M_B > 0,$$

$$M_{\Pi} > M_B.$$

Звідси можна отримати співвідношення для забезпечення стійкої рівноваги:

$$l_D > \frac{P_B}{P_{\Pi}} \cdot l_C. \quad (12)$$

В кінці завантаження вантажоприймача рівняння моментів має вигляд:

$$M_B + M_M - M_{\Pi} + M_{P1} = 0,$$

$$M_{P1} = M_{\Pi} - M_B - M_M. \quad (13)$$

Підставивши у (13) вирази для відповідних моментів, можна отримати статичну характеристику перетворення:

$$P_{MTP} = P_B - \frac{P_{\Pi}}{l_C} \cdot l_D, \quad (14)$$

де P_{MTP} – значення ваги сипкого матеріалу в кінці завантаження вантажоприймача.

Також можна сформулювати обмеження, які накладаються на параметр l_D . Геометричні обмеження розраховуються за формулою:

$$l_{Dmin} = R - l_C + \frac{L_{PP}}{2}, \quad (15)$$

де L_{PP} – довжина противаги.

Вагові обмеження дають значення:

$$l_{Dmin} = \frac{(P_{MTPmin} + P_B) \cdot l_C}{P_{\Pi}} = \frac{(K_M h_C + P_B) \cdot l_C}{P_{\Pi}}. \quad (16)$$

6. Висновки

Розглянуто дозатори сипких матеріалів, які використовуються у технологічних процесах на підприємствах різних галузей промисловості. Запропоновано конструкцію дозатора дискретної дії з перекидним ковшем, який складається з витратного бункера, вантажоприймача, противаги, обмежувальних упорів, а також блока вимірювання та індикації ваги.

Запропонований дозатор має такі переваги у порівнянні з існуючими:

- виключення додаткових енерговитрат на дозування, завдяки особливостям конструкції дозатора;
- зменшення динамічних впливів на точність дозування;
- виключення похибки дозування, зумовленої налипанням сипкого матеріалу на стінках вантажоприймача.

Друга і третя переваги забезпечуються обраним способом обчислення ваги порції сипкого матеріалу.

Досліджено математичну модель дозатора дискретної дії з перекидним ковшем, дано рекомендації для розрахунку геометричних та вагових параметрів дозатора. Слід зазначити, що значення параметрів дозатора, отримані внаслідок розгляду статичних рівнянь моментів, мають бути перевірені й уточнені шляхом використання результатів чисельного вирішення диференціального рівняння другого порядку, яке описує процес перекидання ковша дозатора.

Список використаної літератури

- [1] ДСТУ OIML R 61-1:2019 Дозатори дискретної дії вагові автоматичні. Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги (OIML R 61-1:2017, IDT).
- [2] С.В. Петриченко, В.О. Олексієнко, О.П. Ломейко, "Аналіз дозаторів пакувальних машин для сипучих матеріалів", Праці Таврійського державного агротехнологічного університету, по. 20, vol. 1, р. 35-42, 2020.
- [3] І.В. Коваленко, В.В. Малиновський, *Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв*: Київ: Воля, 2006. – 264 с.
- [4] О.М. Гавва, А.П. Беспалько, А.І. Волчко, О.О. Кохан, *Пакувальне обладнання*. Київ: ІАЦ "Упаковка", 2010. – 744 с.
- [5] М.В. Стасевич та ін. *Технологічне обладнання біотехнологічної і фармацевтичної промисловості*. Львів: "Новий Світ-2000", 2018. – 410 с.
- [6] "Equipment system for changing bulk material into container canning", B65G 65/32, Пат. CN221499860U, 09.08.2024.
- [7] K. Holmes, S. Will, "Bulk material receiving, conveying, storing, and dispensing", B65D90/205, Пат. EP4222077A2, 09.08.2023.
- [8] "Bulk grain container movement-free rapid overturning accurate loading system and method", B65G 47/248, Пат. CN112061984B, 07.04.2023.

[9] "Intelligent weighing and boxing machine", B65B 1/32, Пат. CN210618520U, 26.05.2020.

[10] О.П. Потильчак, Г.О. Черепашук, Ю.Е. Алістратова, "Пристрій порційного зважування сипучих матеріалів", G01G13/00, Пат. 150979 UA, бюл. 20, 18.05.2022.