

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ СИПКОЇ ПРОДУКЦІЇ НЕАДАПТОВАНИМ ПРОГРАМНИМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ

Анотація. Автором було запропоновано методику використання програмного забезпечення, неадаптованого до моделювання руху сипкої продукції з перевіркою моделей аналітичним методом. Дослідження проводилися за допомогою кінцево-елементних пакетів, які дозволили отримати картину характеру руху та розподілу швидкостей руху сипучого середовища різної фракції. Аналітична частина роботи дозволила оцінити вірність обраної моделі імітації руху. Для першого варіанту було розглянуто сипучу продукцію, як набір штучних елементів (окремих часток). Анімація процесу дозволило визначити час виходу на сталий (лінійний рух) продукту. У якості параметрів відстеження руху при моделюванні рідиною та газом були обрані швидкості на вході та виході шнеку. У результаті роботи були розроблені рекомендації щодо використання запропонованої методики для моделювання руху сипкої продукції обладнанням періодичної та постійної дії.

Ключові слова: сипка продукція, моделювання, шнек, сталий рух, дискретна модель, рідина, газ.

Moskovska Natalia

National Aerospace University H.E. Zhukovsky
"Kharkiv Aviation Institute"

SIMULATION OF MOTION OF BULK PRODUCTS BY UNADAPTED SOFTWARE

Summary. The method of using software that is not adapted to model the movement of bulk products was proposed by the author. As conditions which are influencing the creation of models, consider the following factors: the size of the fraction of the bulk products; universality of the designed device; correspondence of results of analytical calculations to results of modeling; use and verification of classical theories of analytical modeling of bulk products. The screw conveyor was developed as an experimental model of a conveying device for bulk products for all types of research. The research was carried out with the help of Solid Works and Flow Simulation, which allowed to obtain a picture of the motion and distribution of velocities of the bulk products of different fractions. The analytical part of the work allowed us to evaluate the accuracy of the selected motion simulation models. For the first variant, bulk products were considered as a set of separated elements. Animation of the process allowed to determine the time to reach a constant or linear motion of products. The discrete model was recommended for small and coarse particles in the case of a low coefficient of internal friction. Despite the complexity of setting the number of particles, the model allows to easily rearrange their size. The result of three-dimensional modeling of bulk products as a liquid with using Flow Simulation showed a result close to the theory. This model allowed to determine the time of entry into steady motion and is recommended for the design of equipment of non-periodic action (volume dispensers). The complexity of its implementation consists only in the correct selection of fluid for modeling, which depends on the fraction of the real product. The presence of a jump in the graph of the exit from the conveyor (illustrated by the image of the animation) revealed that the disadvantage of this method can be considered binding to point goals, which are the beginning of the movement of the conveyor filling, which also requires careful application. Modeling as an air flow is recommended for bulk products of fine grinding on the equipment of continuous action.

Keywords: bulk products, modeling, screw conveyor, steady motion, discrete model, liquid, gas.

Постановка проблеми. Сипуча продукція – це складна система, яка змінює свої властивості в залежності від щільності укладання твердих частинок, характеру зовнішньої дії і зовнішніх умов (вологість, температура). Одна і та ж продукція, в залежності від напруженого стану, може мати властивості як ідеально сипучого, так і в'язкого середовища.

Існує широкий спектр пакувального та транспортного обладнання, для проектування та розробки якого необхідно здійснити оцінку характеристик переміщення продукції. Традиційно для цього використовувались методи аналітичного розрахунку, які потребували значної бази практичних та теоретичних даних, що значно ускладнювало процес проектування при, наприклад, розробці модифікацій пристроїв одного типу для різних видів сипкої продукції.

З метою запобігання цієї проблеми, та прискорення процесів конструювання, а також оцінки можливості використання найсучасніших пакетів моделювання для продукції різної фракції була виконана дана робота

Аналіз останніх досліджень та публікацій Питанням дискретного моделювання руху сипкої продукції як частини системи займався у своїй роботі Дорофеєнко С.О. [1]. В його роботі було зроблено упор саме на математичне моделювання сипкої системи та розглянуті питання механічного контакту окремих часток між собою. Значна частина існуючих робіт присвячена розгляду математичного моделювання у контексті використання конкретних типів обладнання, що знижує універсальність розглянутих методів. До таких авторів можна віднести Огурцова В.О. [2], Огурцова О.В. [3]. Методи комп'ютерного моделювання для сипучої продукції як дискретної

системи було розглянуто у статті [4]. Загальною проблемою розглянутих вище матеріалів є відсутність комп'ютерного моделювання сипких систем у контексті розгляду їх як в'язкого суцільного середовища, що є однією з класичних теорій математичного моделювання.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Головною метою обладнання для пакування та переміщення сипучої продукції є забезпечення її рівномірного, «щільного» руху. Це є необхідною умовою для створення стабільного процесу зі сталими характеристиками режиму роботи. Традиційно для такого типу продукції використовують шнекове обладнання різноманітної конфігурації (гвинтові конвеєри, об'ємні шнекові дозатори, екструдери тощо).

Шнек забезпечує лінійне переміщення продукту з його одночасним ущільненням. Основною проблемою такого типу обладнання є складність теоретичного визначення виходу на сталий режим, що характеризується ступеню наповненості робочого об'єму та щільністю продукції в ньому. Це є особливо важливим для обладнання, що працює дискретно, повторюючи процес циклічно або за командою.

Проблеми з таким обладнанням можуть виникати і у разі переходу на новий тип сипучої продукції (особливо якщо фракційні характеристики мають значну відмінність), або при зміні умов експлуатації.

Оптимальним виходом для рішення таких проблем має бути використання сучасного програмного забезпечення для моделювання процесів руху. Але наявні та широко доступні програми не дають змоги моделювання руху саме сипкої продукції у всьому діапазоні їх характеристик. Тож актуальність роботи буде у розробці альтернативних варіантів моделювання сипкого середовища, та оцінці можливостей використання того чи іншого програмного забезпечення для різних сипких структур.

Формулювання цілей статті. Метою даного дослідження є розробка варіантів моделювання руху різних типів сипких середовищ неадаптованими програмами кількох типів, а також використання анімаційних ефектів для визначення виходу на сталий режим роботи.

Дослідження проводилось на прикладі гвинтового конвеєра, спроектованого з можливістю використання під широкий діапазон сипучої продукції. Як умови, що впливають на створення моделей, було доцільно розглянути наступні фактори:

- 1) розмір фракції сипучого середовища;
- 2) універсальність спроектованої установки;
- 3) відповідність результатів аналітичних розрахунків результатам моделювання для прийняття рішення о коректності обраної моделі;
- 4) використання та перевірка класичних теорій аналітичного моделювання сипкої продукції.

Дослідження проводилися за допомогою кімцево-елементних пакетів, які дозволили отримати картину характеру руху та розподілу швидкостей руху сипучого середовища різної фракції.

При цьому був прийнятий ряд припущень:

- 1) при штучному моделюванні для відповідності теоретичному розрахунку нехтуємо контактом частинок між собою;

- 2) пріоритетним напрямом дослідження обираємо швидкість руху на вході та виході установки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як віртуальна модель установки використовуємо шнековий конвеєр, тримірна модель якого наведена на рисунку 1. Модель була попередньо спроектована за класичною теоретичною методикою, та змодельована у SolidWorks. Як продукт, для якого здійснювалась перевірка коректності побудови віртуальної моделі пристрою, використовуємо гречану крупу, характеристики якої наведено у таблиці 1.

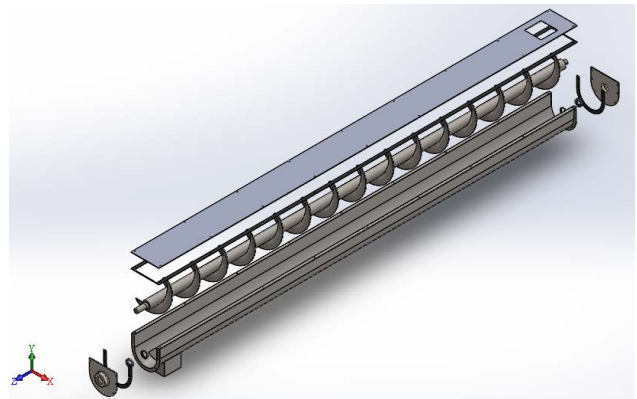


Рис. 1. Модель гвинтового конвеєра

Було прийняте допущення, що переміщення продукції здійснюється без прослизання, тобто продукція не прослизає відносно шнека і не обсипається в межах порожнин витків (ще один з недоліків, який був врахований при подальшій анімації процесу).

Таблиця 1

Характеристики сипучої продукції

Продукт	Насипна щільність, кг/м ³	Кут природного укосу, град	Група абразивності
Крупа гречана	600-730	25-32	Мало абразивні

Аналітична частина роботи є необхідною складовою, що дозволяє оцінити правильність обраної моделі пристрою та імітації руху. Для першого варіанту розглянемо сипучу продукцію за дискретною схемою як комплект штучних елементів (окремих часток). Частка матеріалу, що спирається на гвинтові поверхню і притиснута до стінки кожуха, у загальному випадку розташування осі гвинтового конвеєра має рух, що описується диференціальними рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} N_1 \cos \alpha - f_1 N_1 \sin \alpha - m a \cdot \left(\frac{d^2 \varphi}{dt^2} \right) - G \cos \gamma - f_2 N_2 \sin \beta &= 0 \\ G \cos \gamma \sin \epsilon + f_2 N_2 \cos \beta - f_1 N_1 \cdot \cos \alpha - N_1 \sin \alpha - m r \left(\frac{d^2 \varphi}{dt^2} \right) &= 0 \\ G \cos \epsilon \sin \gamma + m r w_0^2 - N_2 + m r \left(\frac{d \varphi}{dt} \right)^2 - 2 m r w_0 \frac{d \varphi}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

де f_1 – коефіцієнт тертя матеріалу по лопаті гвинта;

f_2 – коефіцієнт тертя матеріалу по стінці кожуху, $f_1 = f_2 = 0,53$;

m – маса елемента матеріалу;

N_1 – нормальна реакція до лопаті шнека (похилій площині);

N_2 – нормальна реакція кожуху;

r – радіус лопаті шнеку (зовнішній радіус),
 $r = 0.08$ м;

$\alpha = \arctg \frac{S}{2\pi r}$ – кут підйому гвинтової лінії,
 $\alpha = 12,8^\circ$;

S – шаг гвинта;

β – кут між векторами абсолютної і переносної швидкостей;

w_0 – кутова швидкість шнека;

$g = 9,81 \text{ м} / \text{с}^2$ – прискорення вільного падіння.

З урахуванням горизонтального розташування конвеєра та з огляду на всі дані, отримуємо:

$$N_1 \cos \alpha - f_1 N_1 \sin \alpha - f_2 N_2 \sin \beta = 0 \quad (2)$$

$$f_2 N_2 \cos \beta - f_1 N_1 \cos \alpha - N_1 \sin \alpha = 0 \quad (3)$$

$$mg + mrw_0^2 - N_2 = 0 \quad (4)$$

Звідки:

$$N_1 = \frac{f_2 N_2 \sin \beta}{(\cos \alpha - f_1 \sin \alpha)} \quad (5)$$

$$N_2 = mg + mrw_0^2 \quad (6)$$

$$f_2 \cos \beta (mg + mrw_0^2) - \frac{f_2 \sin \beta (mg + mrw_0^2)}{\cos \alpha - f_1 \sin \alpha} \cdot (f_1 \cos \alpha + \sin \alpha) = 0 \quad (7)$$

Кут між векторами абсолютної і переносної швидкостей:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{2\pi r - \mu f P}{2\pi r \mu f + P} \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,08 - 0,53 \cdot 0,16}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,08 \cdot 0,53 + 0,16};$$

$$\operatorname{tg} \beta = 0,977744 \Rightarrow \beta = 44,4^\circ;$$

Підставляючи в рівняння (7) усі значення, визначимо V :

$$f_2 \cos \beta (mg + mrw_0^2) - \frac{f_2 \sin \beta (mg + mrw_0^2)}{\cos \alpha - f_1 \sin \alpha} \cdot (f_1 \cos \alpha + \sin \alpha) = 0 \quad (9)$$

$$w_0 = \frac{V}{r} \quad (10)$$

$$0,53 \cdot \cos 44,4 \cdot \left(4 \cdot 10^{-5} \cdot 9,8 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot 0,08 \cdot \frac{V^2}{0,08^2} \right) - \frac{0,53 \cdot \sin 44,4 \cdot \left(4 \cdot 10^{-5} \cdot 9,8 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot 0,08 \cdot \frac{V^2}{0,08^2} \right)}{\cos 12,8 - 0,53 \cdot \sin 12,8} \cdot (0,53 \cdot \cos 12,8 + \sin 12,8) \Rightarrow V;$$

В результаті рішення рівнянь отримали швидкість переміщення середовища $V = 0,88$ м/с. Ця швидкість відмінна від фактичної, так як не враховує внутрішнє тертя між частинкам, але може бути використана для перевірки результатів моделювання.

Змоделюємо рух дискретної системи. Для чого створюємо силову взаємодію окремої частинки з елементами конвеєра. Кількість крупинок створюємо обмеженою. Це пов'язано з тим, що адекватність моделі перевіряємо за теорією, яка не враховує взаємодію частинок між собою,

то ж і в моделюванні зводимо такий контакт до мінімуму. Крім того, введення значної кількості елементів в систему розрахунку може привести до конфлікту рішення задачі.

Анімація процесу показала, що повний час виходу на сталій (лінійний рух) здійснився за 6 секунд. До цього моменту частинки мали хаотично гвинтовий рух. Елементи нарізки кадрів з вказанням часу наведено на рисунку 2.

Відповідно часу руху частинок конвеєром, було виявлено, що швидкість руху практично співпадає з розрахунковою, то ж модель може бути використана для оцінки переміщення штучної продукції та визначення часу виходу на сталій режим (що є особливо важливим при проектуванні дозуючих пристроїв). Але, зважаючи на специфіку моделі, анімацію в основному блоку програми Solid Works можна здійснити тільки для достатньо великих часток. Подальша робота в цьому напрямку буде здійснюватися шляхом варіювання розміру, форми та кількості часток для визначення критичних меж моделі.

Заміна сипучої продукції на рідину – ще один класичний прийом, що використовується для аналітичних розрахунків. Скориставшись цією теорією, змоделюємо рух сипких середовищ за допомогою додатка Flow Simulation. Для створення потоку рідини в програмі Flow Simulation використовуємо модель установки, що була розроблена раніше. Для спрощення розрахунків було виключено передню і задню опори та створена область обертання, як окрема деталь. У якості текучого середовища було обрано у розділі «Ньютонівські рідини» матеріал «Slurry», генерація потоку якого наведена на рисунку 3.

У якості параметру відстеження були обрані швидкості на вході та виході шнеку. Результати за допомогою Excel були оброблені, та виведені як графіки (рисунок 4, 5).

Згідно графіків, кінцева швидкість сталого руху складає приблизно 0.9 м/с, що є дуже близьким до теоретичного розрахунку. Тобто, модель заміни руху сипучого середовища рідиною можемо вважати допустимою. Складність її реалізації буде лише у коректному підборі рідини для симуляції у залежності від розмірів фракції реального продукту, що і складатиме подальшу роботу у цьому напрямку.

Найявність скачку на графіку виходу може бути проілюстровано за допомогою стоп-кадру анімації на 5 с (рисунок 6), де показано що недоліком розрахунку за такою методикою можна вважати прив'язування до точок, що стають початком формування руху заповнення конвеєра, що також потребує їх обережного застосування.

Існує окрема категорія дрібнодисперсної сипкої продукції, яка визначається деякими специфічними характеристиками, а саме – утворенням легкої повітряної суспензії, схильністю до налипання та інше. Саме тому моделювання такого середовища за допомогою двох попередніх моделей буде помилковим. Вирішимо дану проблему шляхом заміни середовища на повітряне. Для створення повітряного потоку в програмі Flow Simulation обираємо газу (Air) при стандартних термодинамічних параметрах та задаємо тиск навколишнього середовища.

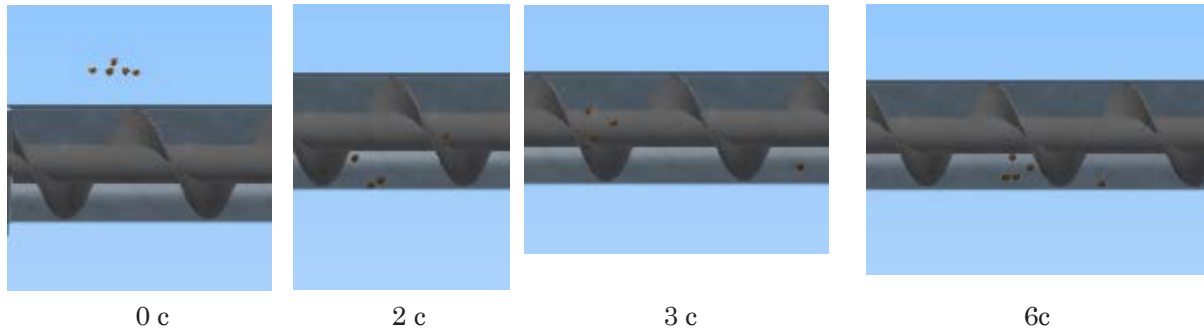


Рис. 2. Характерні моменти руху частинок

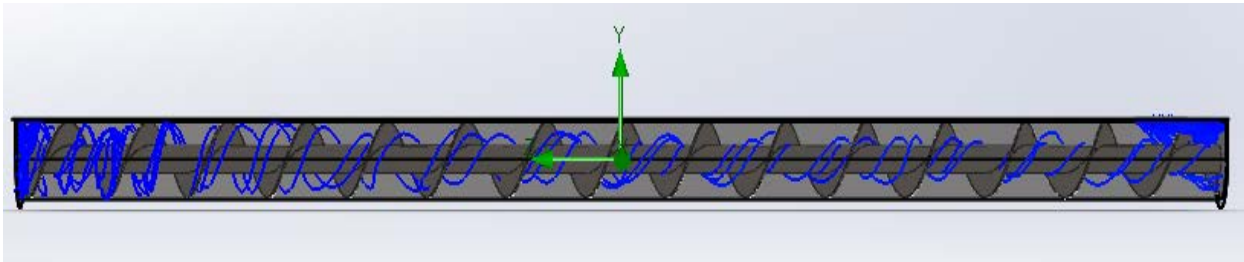


Рис. 3. Генерація потоку сипучої продукція як рідини



Рис. 4. Графік швидкості на вході



Рис. 5. Графік швидкості на виході

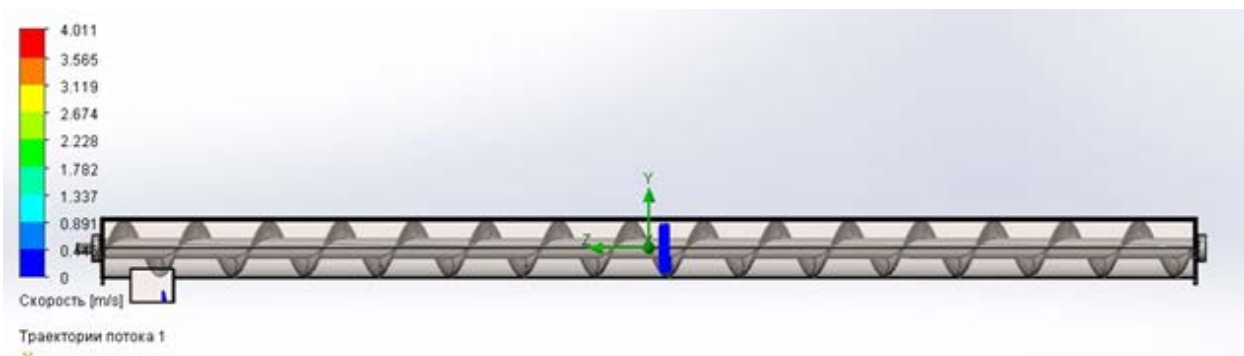


Рис. 6. Початок формування потоку в точкових цілях



Рис. 7. Графік швидкості на вході

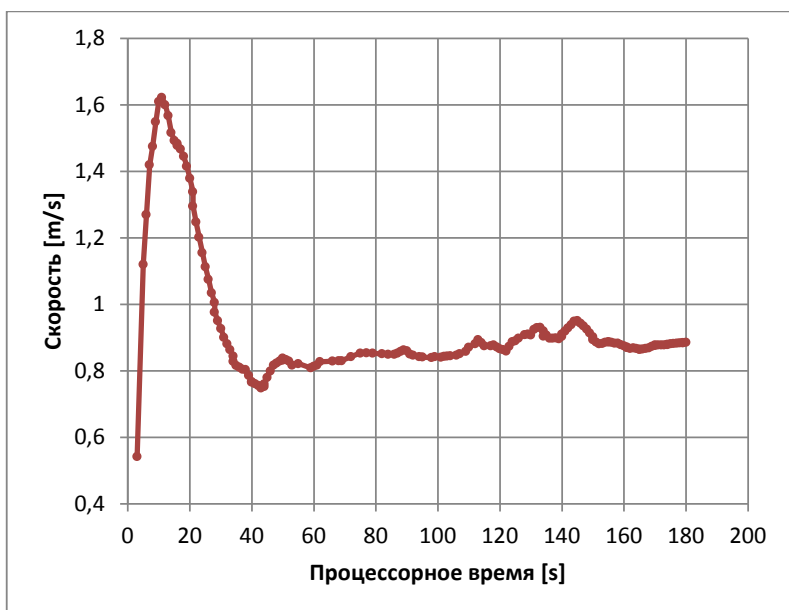


Рис. 8. Графік швидкості на виході

Згідно попередній моделі отримуємо графіки (рисунок 7, 8). Анімація за газовою моделлю показала більш стабільний рух середови-

ща, відсутність прив'язки до точок та більшу точність моделювання. Але за рахунок встановлення сталого руху тільки за умов повного заповнення робочого об'єму конвеєра, графік швидкості на виході показав більш тривалий період виходу на нормальний режим експлуатації. Таким чином модель може бути рекомендована тільки для обладнання неперервної дії, або обладнання, що має значну довжину робочої камери.

Висновки і пропозиції. Коректний вибір варіанта комп'ютерного моделювання процесу руху сипкого середовища дозволяє скоротити час проектування обладнання, його переналагоджування та визначення продуктивності при новому типі продукції.

У ході виконання науково-дослідницької роботи були розглянуті три варіанти моделювання сипкої продукції:

1. Як комплект штучних елементів. Дана модель може бути рекомендована для дрібної та крупної продукції у разі наявності малого коефіцієнту внутрішнього тертя. Не зважаючи на складність завдання кількості частинок, модель дозволяє легко перебудувати їх розмір.

2. Як потік рідини. Аналогічна математична модель є класичною. Результат тримірному моделювання з використанням Flow Simulation показав результат що є наближеним до теорії. Така модель дозволяє максимально точно визначити час виходу на сталий рух та може бути рекомендована для проектування обладнання періодичної дії (об'ємних дозаторів).

3. Як повітряний потік. Зважаючи на специфіку моделі вона може бути використана для сипкої продукції тонкого подрібнення на обладнанні постійної дії.

Список літератури:

1. Дорофеев С.О. Моделирование сыпучих сред методом дискретных элементов : дис. ... канд. физ-мат. наук : 01.04.17. Черноголовка, 2008. 114 с.
2. Огурцов В.А. Процессы грохочения сыпучих строительных материалов: моделирование, расчет и оптимизация : дис. ... доктора тех. наук : 05.02.13. Иваново, 2010. 303 с.
3. Огурцов Александр Валерьевич. Совершенствование технологии и оборудования процессов виброгрохочения на основе имитационного моделирования : диссертация ... канд. тех. наук : 05.02.13. Иваново, 2016. 123 с.
4. Ровин С.Л., Ровин Л.Е., Жаранов В.А., Мазуров В.С. Компьютерное моделирование движения дисперсных материалов во вращающихся печах. *Литье и металлургия*. 2016. № 2(83). С. 39–43.
5. Соколенко А.І., Яровий В.Л., Піддубний В.А., Васильківський К.В., Шевченко О.Ю. Моделювання процесів пакування: підручник / за ред. А.І. Соколенка. Вінниця : Нова книга, 2004. 272 с.
6. Гавва О.М., Беспалько А.П., Волчко А.І. Пакувальне обладнання / за ред. О.М. Гавви. Київ : ІАЦ «Упаковка», 2008. Т. 1. 436 с.
7. Соколов М.В., Клишков А.С., Ефремов О.В., Беляев П.С., Однолько В.Г. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин. Москва : Машиностроение, 2004. 248 с.
8. Сиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины : учеб. пособие для машиностроительных вузов. Москва : Машиностроение, 1983. 487 с.

References:

1. Dorofeenko, S.O. (2008). Modelirovanie sypuchih sred metodom diskretnyh elementov [Modeling of bulk products using the discrete element method], (PhD Thesis), Chernogolovka. (in Russian)
2. Ogurcov, V.A. (2010). Processy grohocheniya sypuchih stroitel'nyh materialov: modelirovanie, raschet i optimizaciya [Screening processes for bulk building materials: modeling, calculation and optimization], (PhD Thesis), Ivanovo. (in Russian)
3. Ogurcov, A.V. (2016). Sovershenstvovanie tekhnologii i oborudovaniya processov vibrogrohocheniya na osnove imitacionnogo modelirovaniya [Improving the technology and equipment of vibro-screening processes based on simulation modeling], (PhD Thesis), Ivanovo. (in Russian)
4. Rovin, S.L., Rovin, L.E., Zharanov, V.A., & Mazurov, V.S. (2016). Komp'yuternoe modelirovanie dvizheniya dispersnyh materialov vo vrashchayushchih-sya pechah [Computer simulation of the movement of dispersed materials in rotary kilns]. *Lyte i Metallurhiya*, vol. 2, no. 83, pp. 39–43. (in Russian)
5. Sokolenko, A.I., Yarovy, V.L., Piddubnyi, V.A., Vasytkivskyi, K.V., & Shevchenko, O.Y. (2004). Modelyuvannya procesiv pakuvannya [Modeling of packaging processes]. Vinnytsia: Nova Knyha. (in Ukrainian)
6. Havva, O.M., Bepalko, A.P., & Volchko, A.I. (2008). Pakovalne Obladnannia [Packing equipment]. Kyiv: Upakovka. (in Ukrainian)
7. Sokolov, M.V., Klinkov, A.S., Efremov, O.V., Belyaev, P.S., & Odnol'ko, V.G. (2004). Avtomatizirovannoe proektirovanie i raschet shnekovyh mashin [Automated design and calculation of screw machines]. Moskva: Mashinostroenie. (in Russian)
8. Spivakovskij, A.O., & D'yachkov, V.K. (1983). Transportiruyushchie mashiny: ucheb. posobie dlya mashinostroitel'nyh vuzov [Transporting machines]. Moskva: Mashinostroenie. (in Russian)