

Моделювання поведінки дрібнодисперсного матеріалу при його витіканні із конічної лунки дозатора

Юрій Шоловій¹, Надія Магерус²

Кафедра механіки та автоматизації машинобудування,
Національний університет "Львівська політехніка",
УКРАЇНА, м. Львів, вул. С. Бандери, 12,

¹ E-mail: -sholov@rambler.ru

² E-mail: maherusn@gmail.com

This article purpose is the modeling of the bulk material behavior during its outflow from the conical hole. The feasibility of bulk material behavior modeling and properties of the product and the environment impact on the flow properties of product features are justified in the article. The mathematical model of the bulk material behavior taking into account the power factors, that affect the bulk material batching features. The catenation forces impact (autohesion) on the bulk material behavior and its variability depending on the product and the environment properties is analyzed. The influence of humidity on the autohesion force was founded using the developed mathematical model and graphical method. The novelty of this mathematical model lies in the account of the catenation forces between the particles of the product and the investigating of its characteristics during the product and the environment properties changing.

Ключові слова – дозатор, лунка, дрібнодисперсний сипкий матеріал, математична модель, аутогезія, склепіння, елементарний об'єм.

I. Вступ

На сьогоднішній день ринок України багатий на продукцію, значну частину якої займають сипкі матеріали (СМ), зокрема дрібнодисперсні сипкі продукти із розміром частинок менше 50 мкм (борошно, цукор-пудра, крохмаль тощо). Зважаючи на варіативність властивостей таких продуктів у процесі транспортування, пакування та зберігання, значна увага приділяється дослідженню впливу різних факторів, а також конструктивних параметрів обладнання (розмір випускного отвору, кут нахилу лунки тощо) на поведінку СМ при витіканні з ємкостей. Це питання є дуже важливим при конструюванні обладнання для переробки СМ, оскільки рівномірність витікання і точність дозування залежить від фізико-механічних характеристик сипких продуктів. Хаотичний і не прогнозований рух СМ в ємкостях, а інколи повна його відсутність створюють неабиякі труднощі при дозуванні дрібнодисперсних матеріалів. Для дослідження витікання СМ з ємкостей необхідно змоделювати поведінку дрібнодисперсного матеріалу та встановити вплив різних факторів та параметрів на умови витікання.

II. Аналіз останніх досліджень

Моделюванням поведінки сипкого матеріалу займаються багато вчених, починаючи з кінця XIX століття. Дослідженням витікання сипкого матеріалу із бункерів різних конструкцій займався Дженіке Е. В.

[1]. Ним була розроблена теорія витікання СМ, конструкції бункерів і пристроїв для покращення показників текучості продукту, а також запропоновані рекомендації для конструювання бункерів для СМ з хорошою сипучістю. Однак використання теорії Дженіке для матеріалів із діаметром частинок менше 50 мкм не завжди виправдане. Значний внесок у дослідження поведінки витікання дрібнодисперсного сипкого матеріалу із лунки зробив німецький дослідник Г. Кахе [2]. Запропонована ним модель витікання базується на використанні вібрації для покращення показників текучості. Однак вона не може використовуватись для широкої номенклатури матеріалів, оскільки такий важливий показник, як аутогезія між частинками, врахований лише через коефіцієнт зчеплення і не відображає реальних умов взаємодії між частинками СМ під час руху. Особливістю даної роботи є те, що досліджується вплив вібрації лише на технологічні параметри процесу дозування, при цьому не досліджуються конструктивні розміри бункера. У роботі [3] запропонована модель поведінки сипкого матеріалу у стійкому склепінні. Недоліком запропонованої моделі є неврахування сили зчеплення між частинками, що унеможливило використання теорії Томаса при конструюванні бункерів для дрібнодисперсних матеріалів. Тому на сьогоднішній день залишається актуальним моделювання поведінки дрібнодисперсного матеріалу у випускній лунці з урахуванням усіх факторів, що визначають показники текучості та точність процесу дозування.

III. Розробка математичної моделі поведінки дрібнодисперсного СМ

Дрібнодисперсні сипкі матеріали – клас продуктів, що характеризуються особливими властивостями та специфікою транспортування і дозування. Як показує практика, витікання таких СМ із бункерів чи випускних пристроїв часто відбувається нерівномірно. Для розроблення допоміжних пристроїв, що покращують витікання продукту, необхідно затратити додаткові кошти і час, однак і це не завжди дає позитивний ефект. Тому доцільно дослідити фактори та параметри, які впливають на витікання дрібнодисперсного матеріалу із бункера та оптимізувати їх. Схильність СМ до злежування при зберіганні і транспортуванні призводить у подальшому до його нерівномірного витікання та зависання у вихідних лунках ємкостей та міриниках об'ємних дозаторів. Крім цього дрібнодисперсний продукт налипає на стінках бункерів і вихідних лунок, що негативно позначається на корисному об'ємі останніх.

Для розробки моделі поведінки дрібнодисперсного матеріалу при витіканні із лунки (рис. 1) зроблено наступні припущення:

- елементарний об'єм, який розглядаємо при моделюванні, повинен бути значно більшим від розміру частинок, що його утворюють (лінійні розміри елементарного об'єму мають бути щонайменше в 25 раз більші за розмір частинки);

- пружна взаємодія частинок продукту (нехтується будь-яка деформація чи стирання);
- частинки, що взаємодіють, розглядаються як тверде однорідне тіло.

При розробці вихідних отворів ємкостей та мірників дозуючих пристроїв для дрібнодисперсних матеріалів важливим конструктивним параметром, що впливає на точність і продуктивність дозування, є розмір випускного отвору. Типовим конструктивним параметром дозатора з конічною лункою є діаметр вихідного отвору (D).

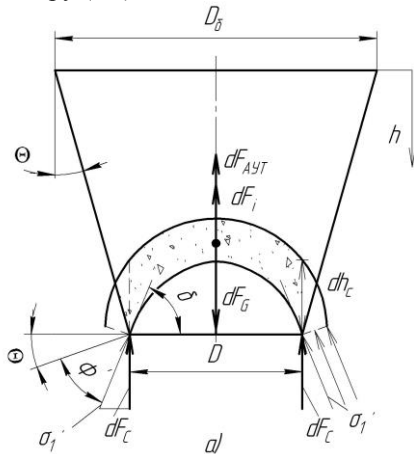


Рис. 1. Математична модель поведінки дрібнодисперсного матеріалу при витіканні із конічної лунки

Для визначення конструктивних параметрів дозуючої лунки розглянемо рівноважний елементарний об'єм у склепінні, яке формується над випускним отвором. При дозуванні сипкого матеріалу із розміром частинок менше 50 мкм існує ряд причин, що перешкоджають вільному витіканню продукту із бункера. Найбільш поширеними є утворення склепіння і витікання з трубоутворенням (рис. 2).

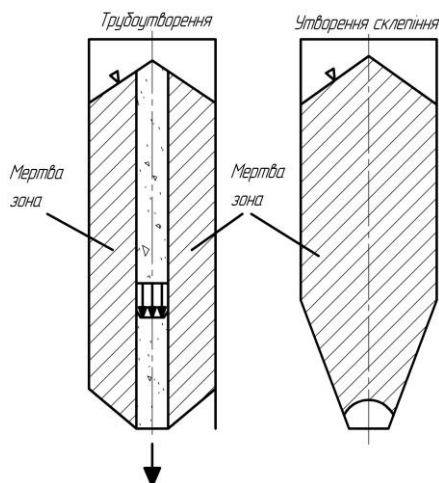


Рис. 2. Форми зависання СМ у бункері

Велике значення при дозуванні таких матеріалів має явище аутогезії, тобто зчеплення частинок продукту. Аутогезія у значній мірі впливає на поведінку СМ в процесі його переробки і використання, негативно позначається на показниках текучості дрібнодисперсного продукту [4].

Як правило, сили зчеплення у СМ зростають із ступенем ущільнення дозуючого продукту, який не повинен перевищувати критичного значення, що залежить від властивостей матеріалу. Взаємодія між частинками визначається формою, розміром та властивостями останніх.

Зчеплення між частинками сипких матеріалів (F_{AUT1}) обумовлене силами різної природи. Це насамперед молекулярні, електричні і капілярні сили (рис. 3).

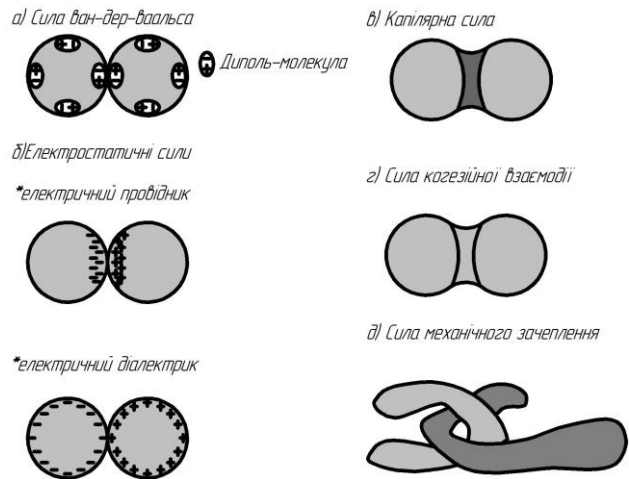


Рис. 3. Компоненти сили аутогезії

Сили ван-дер-ваальса (F_M) належать до молекулярних сил і проявляються ще до безпосереднього контакту частинок. Їх значення залежить від розмірів і властивостей частинок матеріалу. Ці сили переважають, в основному, у сухих і неущільнених матеріалах. До сили аутогезії F_{AUT1} належать також електростатичні сили (F_E). Вони поділяються на кулонівські, які діють між частинками, що мають надлишковий заряд, а також електричні, що обумовлені різницею потенціалів контактуючих елементів. Для виникнення когезійної сили (F_K) не достатньо лише контакту між частинками. Важливим є відсутність будь-яких окисних і адсорбційних плівок на поверхні матеріалу, оскільки останні перешкоджають утворенню твердих містків між контактуючими частинками. Ще одним компонентом сили аутогезії (F_{AUT1}) є капілярна сила ($F_{КАП}$). Вона може впливати на зчеплення частинок по-різному в залежності від кількості вологи і форми її знаходження у сипкому матеріалі [5]. Сили механічного зчеплення ($F_{М.З.}$) характерні для частинок неправильної форми. Зазвичай вони проявляються при дії на матеріал зовнішнього навантаження.

Аутогезія (F_{AUT1}) може бути обумовлена кількома одночасно діючими силами; взаємно виключаються лише капілярні і електричні сили [5]:

$$F_{AUT1} = F_M + F_K + F_E + F_{МЗ}$$

або

$$F_{AUT1} = F_M + F_K + F_{КАП} + F_{МЗ} \quad (1)$$

Величина сили аутогезії (F_{AUT1}) залежить від властивостей матеріалу і умов навколишнього сере-

довища. Матеріал частинок, що контактують, визначає величину ван-дер-ваальсових (F_M) і когезійних сил (F_K). Від пружно-пластичних властивостей частинок залежить площа і, відповідно, міцність контакту, а також можливість виникнення когезійних сил (F_K).

Шорсткість поверхні частинок і висота виступів визначають ступінь їх зближення при контакті і тим самим значення молекулярної сили. Форма і розмір частинок впливають на міцність контакту. При наявності вологи велике значення має розчинність матеріалу частинок, від якої залежить виникнення містків рідини між ними, що також впливає на аутогезію (F_{AVT1}).

Аутогезія значною мірою залежить від температури і вологості навколишнього середовища. Температура впливає на пружно-пластичні властивості частинок і утворення адсорбційних шарів, які, у свою чергу, залежать від величини молекулярних сил.

Усі вище згадані сили визначаються в залежності від умов експлуатації, а також властивостей матеріалу. Дуже важливе значення для дрібнодисперсних сипких матеріалів, що використовуються у харчовій промисловості, має капілярна сила ($F_{КАП}$), оскільки більшість продуктів гідрофільні і їх властивості значно залежать від часу злежування і вологості [5]. Вологість навколишнього середовища позначається на кількості води у зоні контакту, природі і величині капілярних сил:

$$F_{КАП} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_n \cdot r \cdot \cos(\Theta_K)}{1 + tg\left(\frac{\beta}{2}\right)}, \quad (2)$$

де σ_n – середнє значення величини поверхневого натягу рідини; r – радіус частинок СМ; Θ_K – крайовий кут змочування поверхні; β – кут, що вказує на кількість вологи у матеріалі.

Умову, при якій аутогезія визначається лише капілярними силами, можна виразити наступним чином: $\Theta_K = 90^\circ - \beta/2$. Сила аутогезії зростає за рахунок капілярної компоненти при $\Theta_K < 90^\circ - \beta/2$. Це означає, що крайовий кут змочування поверхні повинен бути $\leq 90^\circ$, тобто поверхня повинна бути гідрофільною. Із збільшенням гідрофільності поверхні зростає капілярна сила ($F_{КАП}$). У випадку $\Theta_K > 90^\circ - \beta/2$ капілярна компонента ($F_{КАП}$) не впливає на аутогезію частинок (F_{AVT1}). Тому для частинок із гідрофобною поверхнею можливе виключення капілярної сили ($F_{КАП}$).

Із збільшенням β при $\Theta_K = 0$ величина капілярної сили різко зменшується. Якщо $\Theta_K \neq 0$, то для невеликих значень β є проміжна область, у якій капілярні сили практично незмінні. В загальному випадку Θ_K є однією із найважливіших характе-

ристик, що впливають на капілярну компоненту ($F_{КАП}$) сили аутогезії (F_{AVT1}) [5].

Однак у процесах пакування і дозування істотне значення має аутогезійна взаємодія шару сипкого матеріалу (F_{AVT}), а не окремих частинок (F_{AVT1}). Аутогезія множини частин (F_{AVT}), із яких складається сипкий продукт, проявляється у індивідуальних контактах між частинками і залежить від величини цих сил. Крім цього вона визначається взаємним розміщенням, розміром, формою частинок, що тим самим впливає на кількість контактів між ними. Для оцінки аутогезії шару матеріалу (F_{AVT}) потрібно визначити сумарне значення сил аутогезії між окремими частинками (F_{AVT1}):

$$F_{AVT} = \sum F_{AVT1} \quad (3)$$

Рушійним фактором гравітаційного витікання є сила ваги, оскільки саме вона при відсутності додаткових навантажень стимулює витікання матеріалу через випускний отвір. Сила ваги, яка діє на елементарний об'єм, прямопропорційна ширині випускного отвору і є найважливішим чинником гравітаційного витікання матеріалу:

$$dF_G = \rho_{0B} \cdot g \cdot S \cdot h_C, \quad (4)$$

де ρ_{0B} – об'ємна щільність матеріалу; $S = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$ – площа перерізу елементарного об'єму склепіння у конічній лунці; h_C – висота елементарного об'єму склепіння.

Наявність вологи у дрібнодисперсному матеріалі позначається на його щільності. Зв'язок кількості вологи і об'ємної щільності у дрібнодисперсних матеріалах виражається формулою [6]:

$$\rho_{0B} = \frac{\rho_0 \cdot (1 + W_{абс})}{1 + \frac{W_{абс} \cdot \rho_m}{3 \cdot \rho_p}} \quad (5)$$

де ρ_{0B} – об'ємна щільність вологого матеріалу; ρ_0 – об'ємна щільність сухого матеріалу; ρ_m , ρ_p – щільність частинок матеріалу і рідини відповідно.

При відносній вологості повітря $< 65\%$ сила аутогезії (F_{AVT1}) приблизно постійна, однак при збільшенні вологості $> 65\%$ аутогезія (F_{AVT1}) значно збільшується в результаті збільшення капілярної компоненти ($F_{КАП}$). Дуже важливо враховувати формулу (5) при моделюванні поведінки СМ, що дозується і зберігається в умовах підвищеної вологості [5].

Критичним місцем формування зависання у СМ є звужена частина лунки, оскільки у цьому місці значний опір переміщенню частинок чинить сила реакції стінок, що визначається за формулою [3]:

$$dF_C = \sigma_1' \cdot \sin(\delta) \cdot h_C \cdot \cos(\delta) \cdot \pi \cdot D, \quad (6)$$

де σ_1' – напруження вільного витікання СМ; $\delta = \Theta + \Phi'$ – сумарний кут; Θ – кут нахилу лунки; Φ' – кут тертя об стінку.

Значний вплив на поведінку сипкого матеріалу має сила інерції, що виникає у момент переходу матеріалу від вільного витікання до нерухомого стану у склепінні:

$$dF_i = F_G \cdot \frac{a}{g}, \quad (7)$$

де a – прискорення сипкого матеріалу у лунці.

Для дослідження взаємовпливу властивостей СМ на процес дозування розглянемо рівновагу елементарного об'єму склепіння у відповідності з рис. 1. Рівняння балансу сил, які діють на елементарний об'єм, має вигляд:

$$dF_{AVT} + dF_i + dF_C = dF_G \quad (8)$$

де індекси вказують на силові фактори, які аналізуються.

Як уже зазначалось, вологість СМ може змінюватись під дією вологості повітря. Для дослідження впливу вологості повітря на аутогезію використаємо вираз (5) і рівняння балансу сил (8). Як матеріал для моделювання обираємо борошно із наступними властивостями: $\Phi = 35^\circ$ – середнє значення кута внутрішнього тертя; $\Phi' = 28,8^\circ$ – середнє значення кута тертя об стінку (сталь); $\rho_0 = 0,45 \cdot 10^6$ кг/м³ – об'ємна щільність сухого матеріалу; $d = 30 \cdot 10^{-6}$ м – діаметр частинки СМ. Досліджуємо вплив вологості повітря на аутогезію у конічній лунці з діаметром випускного отвору $D = 0,04$ м (рис. 4).

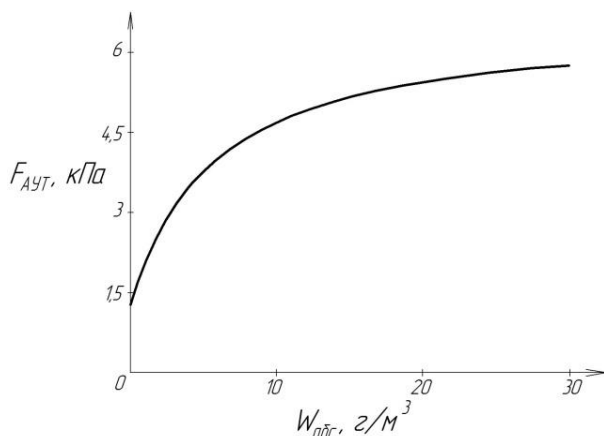


Рис. 4. Вплив вологості повітря на аутогезію

Із графіка (рис. 4) видно, що збільшення вологості повітря призводить до зростання сил зчеплення між частинками, що пояснюється виникненням і зростанням капілярної компоненти сили аутогезії ($F_{кап}$).

Тому збільшення вологості повітря негативно позначається на показниках текучості матеріалу.

Запропонована модель також дозволяє досліджувати залежність констуктивних і технологічних параметрів дозатора від властивостей сипкого матеріалу в лунці.

Висновок

Отже, на сьогоднішній день є актуальним дослідження процесу дозування дрібнодисперсних матеріалів. Дуже важливо при моделюванні поведінки сипкого продукту враховувати сили зчеплення. Часто взаємодію між частинками СМ зводять до показників міцності, однак такий підхід є неточним, оскільки сила аутогезії залежить не лише від властивостей сипкого матеріалу, а й від умов навколишнього середовища, часу пролежування, технології процесу дозування. Головна ціль дослідження сил аутогезії полягає у прогнозуванні властивостей і керуванні поведінкою дрібнодисперсного матеріалу під час його переробки, транспортування і зберігання. Запропонована модель дозволяє визначити необхідні параметри дозуючого обладнання, що забезпечують рівномірне витікання і підвищують ефективність процесу об'ємного дозування.

References

- [1] E. V. Dzenike, Skladirovanie i vypusk sypuchih materialov [Storage and Production of Bulk Materials]. Moskva: Wiley, 1968.
- [2] G. Kache, Verbesserung des Schwerkraftflusses kohäsiver Pulver durch Schwingungseintrag. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg : Dissertation B, 2009.
- [3] J. Tomas, Modellierung des Fließverhaltens von Schüttgütern auf der Grundlage der Wechselwirkungen zwischen den Partikeln und Anwendung bei der Auslegung von Bunkeranlagen. TU Bergakademie Freiberg: Dissertation B, 1991.
- [4] Іу. P. Sholovii, N. I. Prokopets, "Osoblivosti dozuvannja dribnodispersnih materialiv" ["Features of Bulk Materials Dosage"], in Proceedings of thFeatures of Bulk Materials Dosage IX scientific and practical. conf. young Scientists: New technologies Packaging, April 12, 2013, Kyiv, Ukraine. Kyiv: Upakovka Publ., 2013. pp. 27-29.
- [5] A. D. Zimon, Autogezija sypuchih materialov [Autohesion of Bulk Materials]. Moskva: Khimiia Publ, 1978.
- [6] Іу. I. Makarov, Apparaty dlja smeshenija sypuchih materialov [Machines for Mixing Bulk Materials]. Moskva: Mashinostroenie Publ, 1973.