

УДК 621.798(088.8)

Ю.П. Шоловій, Н.І. Прокопець
Національний університет “Львівська політехніка”

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛУНКИ ДОЗАТОРА ДЛЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

© Шоловій Ю.П., Прокопець Н.І., 2013

Обґрунтовано конструктивні параметри лунки дозатора для дрібнодисперсного матеріалу, вибір яких оснований на дослідженні силових факторів, що діють на матеріал у випускній лунці, а також наведено графічні залежності для встановлення впливу властивостей продукту на розмір лунки.

The batcher hole design parameters for the fine disperse material, which choice is based on the power factors investigation, that act on material in the nozzle place, are grounded in the article, also the graphical dependence for the installation of the product properties impact on the hole size is given.

Вступ. Дрібнодисперсні сипкі матеріали (СМ) сьогодні посідають чільне місце серед великого розмаїття товарів на ринку. Однак особливістю цих СМ є залежність їх властивостей від навколишнього середовища, терміну та умов зберігання, переробки та транспортування, що створює певні труднощі в дозуванні. Під час витікання СМ з отвору ємкості дуже важливо забезпечити стабільність їх властивостей, щоб гарантувати задані параметри технологічного процесу. Це особливо актуально для дрібнодисперсних СМ із розміром частинок $d \leq 50$ мкм, поведінка яких у процесі витікання часто має випадковий і невпорядкований характер. Використання спеціальних пристроїв для покращення показників текучості таких СМ потребує додаткових витрат, однак результат не завжди позитивний. Тому сьогодні актуальним є дослідження впливу властивостей дрібнодисперсного продукту на конструктивні параметри лунки дозатора з метою забезпечення належних параметрів процесу дозування.

Аналіз останніх досліджень. Вивчаючи поведінку дрібнодисперсного матеріалу в процесі витікання, основну увагу приділяють конструкції дозувального обладнання, впливу його параметрів на СМ. Значний внесок у методику вибору параметрів лунки бункера зробив Дженіке Е.В., який на основі розрахунку напружень у випускній лунці визначив розмір випускного отвору та кут нахилу лунки бункера [1]. Теорія Дженіке ґрунтується на основних характеристиках текучості: ефективному куті внутрішнього тертя, куті тертя до стінки лунки та функції текучості. Визначаються ці показники у місці потенційного утворення склепіння. Альтернативу цьому підходу запропонував П. Арнольд, який аналітично вивів залежності для знаходження як фактора текучості, так і напруження у випускній лунці [2]. На основі відомих параметрів, він встановив фактор витікання для симетричної лунки. Найбільшу відповідність між теорією Дженіке і Арнольда отримано під час проектування бункера із конічною лункою. Однак класичне конструювання бункера для дрібнодисперсних матеріалів веде до значного завищення розмірів критичної ширини випускного отвору [3], оскільки у розглянутих теоріях не враховано у повному обсязі сил зчеплення між частинками дрібнодисперсного матеріалу, а також вплив їх на конструктивні параметри бункера. Тому сьогодні важливо дослідити параметри, що впливають на конструктивні розміри бункера, щоб підвищити ефективність процесу дозування дрібнодисперсного матеріалу.

Постановка проблеми. Під час розвантаження бункерів, а також під час використання їх як дозувального обладнання є потреба у рівномірному витіканні СМ з ємкості, у керованості процесом його руху. Тому ставилась мета дослідити вплив конструктивних параметрів лунки дозатора на процес витікання СМ, а також встановити закономірність впливу властивостей дрібнодисперсного СМ на вибір цих параметрів.

Виклад основного матеріалу. Для встановлення оптимальних розмірів бункера застосовують два способи. Перший використовує форми бункерів з циліндричним перерізом і конічною лункою або всі варіанти цих конструкцій. До другого належать спеціальні конструкції бункерів з різноманітними способами та пристроями покращення умов витікання. В останньому випадку форма бункера суттєво залежить від способу випорожнення ємкості. Однак обидва ці методи потребують дослідження впливу властивостей матеріалу на розміри випускного отвору, а також вивчення взаємозв'язку параметрів лунки з характеристиками потоку. На практиці найчастіше використовують два типи канали витікання СМ: через круглий отвір у конічній лунці та щілинний у пірамідальній зі співвідношенням сторін $l : b > 3$ (рис. 1).

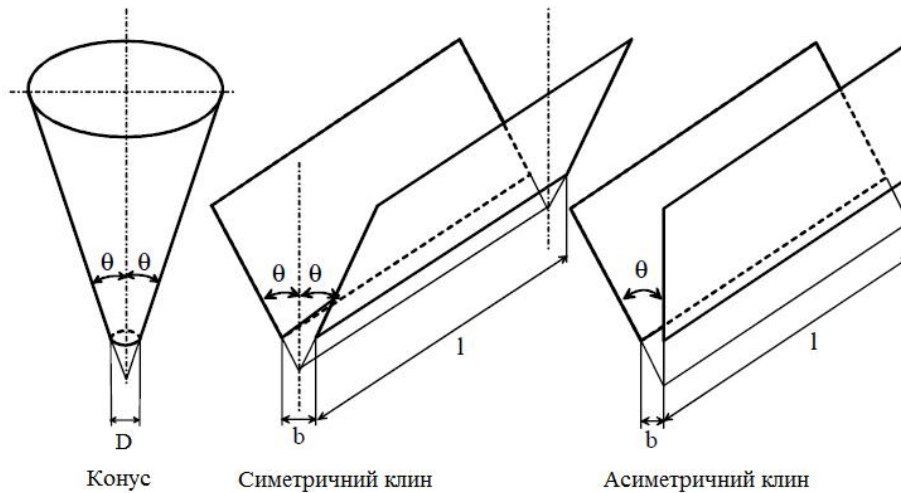


Рис. 1. Форми випускних лунок дозатора

Для правильного вибору параметрів дозатора важливо дослідити їх взаємозалежність, а також вплив на них властивостей СМ. Під час витікання з отвору ємкості на СМ діють різні сили, викликані як геометрією випускної лунки, так і характеристиками СМ, що призводить до утворення склепіння над вихідним отвором, яке протидіє руху СМ. Для аналізу поведінки СМ у вихідній лунці ємкості розглянемо модель (рис. 2), в якій враховано усі силові фактори, що діють на дрібнодисперсний СМ у склепінні.

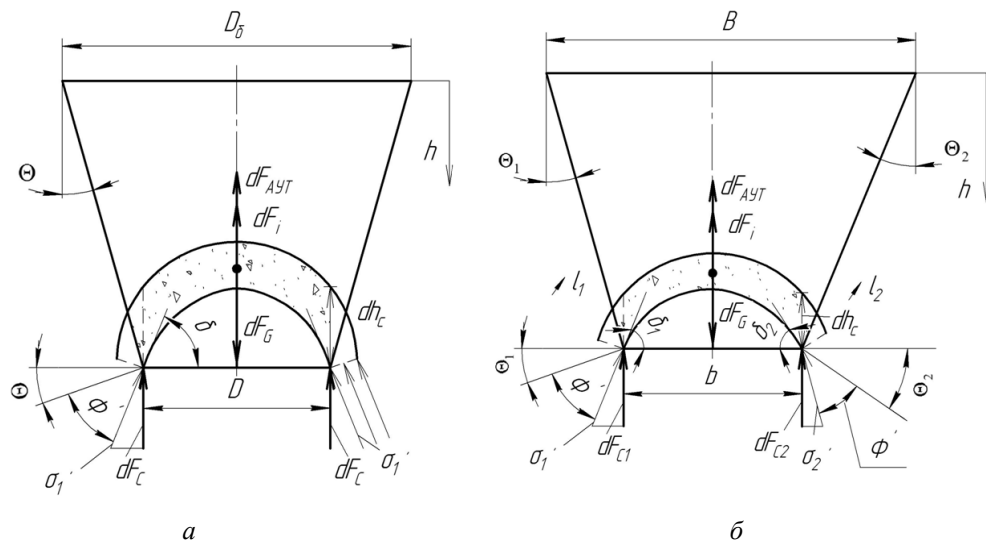


Рис. 2. Модель поведінки дрібнодисперсного матеріалу під час витікання із:
а – конічної лунки; б – асиметричної пірамідальної лунки

Рівняння балансу сил для конічної лунки (рис. 2, а) таке:

$$dF_{AVT} + dF_i + dF_C = dF_G, \quad (1)$$

де dF_{AVT} – приріст сили аутогезії, що діє на елементарний об’єм склепіння; dF_i – приріст сили інерції; dF_C – приріст сили реакції стінок; dF_G – приріст сили ваги.

У випадку асиметричної пірамідальної лунки (рис. 2, б) рівняння балансу сил виглядатиме так:

$$dF_{AVT} + dF_i + dF_{C1} + dF_{C2} = dF_G. \quad (2)$$

Визначаємо усі необхідні прирости силових факторів:

$$dF_G = r_{0B} \cdot g \cdot dh_C \cdot S, \quad (3)$$

де r_{0B} – об’ємна щільність СМ; $S = p \cdot \frac{D^2}{4}$ – площа перерізу елементарного об’єму склепіння у

конічній лунці; $S = b \cdot \frac{l_1 + l_2}{2}$ – площа перерізу елементарного об’єму склепіння в асиметричній пірамідальній лунці; l_1 і l_2 – розміри випускного отвору пірамідальної лунки; dh_C – висота елементарного об’єму склепіння.

Приріст сили реакції стінок для конічної лунки:

$$dF_C = s_1' \cdot \sin(d) \cdot dh_C \cdot \cos(d) \cdot p \cdot D. \quad (4)$$

Приріст сил реакції стінок для пірамідальної лунки:

$$dF_{C1} = s_1' \cdot \sin(d_1) \cdot dh_C \cdot \cos(d_1) \cdot l_1, \quad (5)$$

$$dF_{C2} = s_2' \cdot \sin(d_2) \cdot dh_C \cdot \cos(d_2) \cdot l_2, \quad (6)$$

де s_1' , s_2' – напруження вільного витікання СМ; $d = \Theta + \Phi'$, $d_1 = \Theta_1 + \Phi'$, $d_2 = \Theta_2 + \Phi'$ – сумарні кути; Θ , Θ_1 , Θ_2 – кути нахилу лунки; Φ' – кут тертя до стінки

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

де a – пришвидшення СМ у лунці.

Використавши залежності для визначення цих приростів сил і підставивши їх у рівняння балансу (1) і (2), отримаємо вираз для визначення діаметра випускного отвору (D) конічної лунки і ширини випускного отвору (b) у випадку асиметричної пірамідальної лунки:

$$D = - \frac{\sqrt{p} \cdot \sqrt{dh_c(p \cdot dh_c \cdot s_1'^2 \cdot \cos(d)^2 \cdot \sin(d)^2 - 4r_{0B} \cdot dF_{AVT}(a-g) + p \cdot dh_c \cdot s_1' \cdot \cos(d) \cdot \sin(d))}}{2p \cdot dh_c \cdot r_{0B}(a-g)}, \quad (8)$$

$$b = \frac{dF_{AVT} + dh_c \cdot l_1 \cdot s_1' \cdot \cos(d_1) \cdot \sin(d_1) + dh_c \cdot l_1 \cdot s_1' \cdot \cos(d_2) \cdot \sin(d_2)}{dh_c \cdot \frac{l_1 + l_2}{2} \cdot r_{0B}(a-g)}. \quad (9)$$

Оскільки вектор пришвидшення витікання СМ з лунки напрямлений у протилежну сторону від вектора сили інерції, то вираз (8) зі знаком “мінус”. Значення сили аутогезії у рівнянні балансу так і залишаємо у вигляді приросту відповідної сили, оскільки зчеплення між частинками продукту повною мірою визначається властивостями конкретного матеріалу, і для загального випадку його неможливо виразити однією формулою. Числові значення, необхідні для моделювання залежності конструктивних параметрів дозатора від властивостей СМ, для борошна вибираємо такі [4]: $\Phi = 35^\circ$ – середнє значення кута внутрішнього тертя; $\Phi' = 28,8^\circ$ – середнє значення кута тертя до стінки (сталь); $r_{0B} = 0,5 \cdot 10^6$ кг/м³ – об’ємна щільність вологого матеріалу; $d = 30 \cdot 10^{-6}$ м – умовний діаметр частинки СМ.

Під час визначення розміру випускного отвору нехтування силами аутогезії призводить до завищення діаметра випускного отвору (D) у випадку конічної лунки чи ширини щілини (b) – для

пірамідальної лунки. Аутогезія визначає характер руху матеріалу всередині бункера, умови його витікання чи зависання всередині ємкості, допустимий термін зберігання сипких матеріалів тощо [5]. З використанням рівняння (8) і (9), а також необхідних значень властивостей борошна встановлено графічну залежність розміру випускного отвору від значення сили аутогезії (рис. 3).

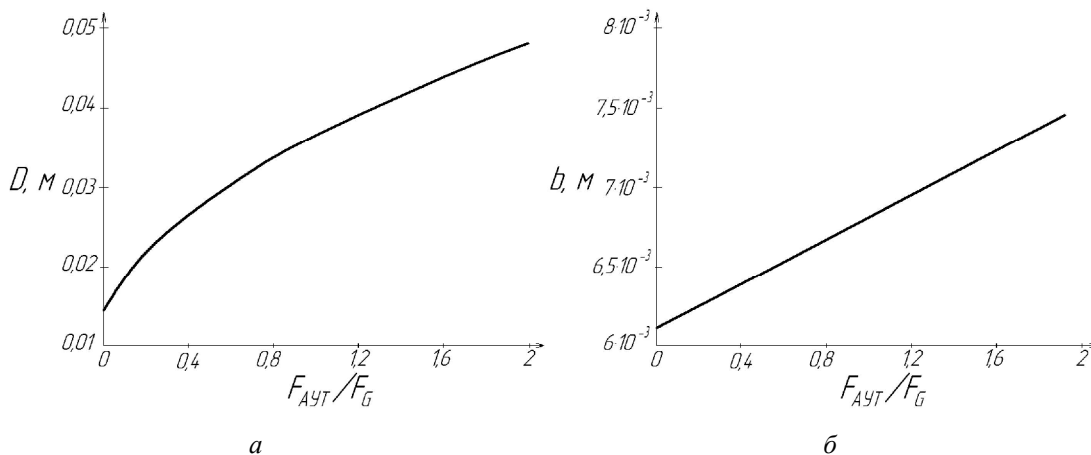


Рис. 3. Залежність розміру випускного отвору лунки бункера для борошна від сили аутогезії: а – конічна лунка; б – асиметрична пірамідальна лунка

Із графічних залежностей бачимо, що за відсутності сили аутогезії мінімальний діаметр випускного отвору становить $D=0,015$ м, а у випадку пірамідальної лунки – $b=6 \cdot 10^{-3}$ м. У разі збільшення сил зчеплення зростає мінімальний розмір випускного отвору, що забезпечує неперервне витікання. У момент $F_{AUT} = F_G$ діаметр випускного отвору конічної лунки зростає до значення $D=0,035$ м, а у випадку пірамідальної лунки – $b=6,8 \cdot 10^{-3}$. Оскільки у дрібнодисперсних матеріалах сила аутогезії може перевищувати силу тяжіння [6], то з рис. 3 можна встановити, як позначиться це на розмірі випускного отвору.

Ще одним важливим параметром бункера є кут нахилу його стінок (Θ). Оптимальне його значення для дрібнодисперсних матеріалів за теорією Дженіке лежить у межах $\Theta \leq 65^\circ - \Phi'$ [1]. Однак дрібнодисперсні СМ відрізняються властивостями і їх зміною у процесі експлуатації, тому важливо встановити їх вплив на параметри лунки дозатора. Із виразів (8) і (9) бачимо, що розмір випускного отвору певною мірою залежний від кута нахилу лунки. Тому дослідимо його вплив на діаметр конічної та ширину пірамідальної лунок (рис. 4).

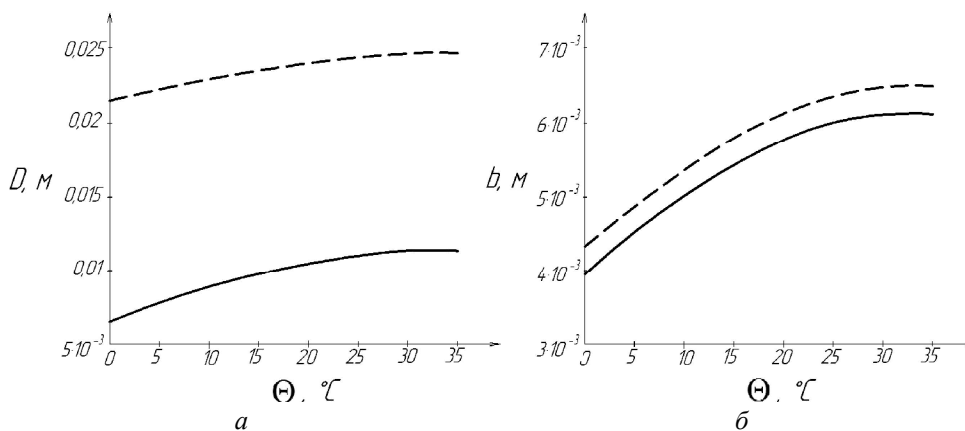


Рис. 4. Залежність розміру випускного отвору лунки бункера для борошна від кута її нахилу

(— — — для $\frac{F_{AUT}}{F_G} = 0$, - - - для $\frac{F_{AUT}}{F_G} = 0,5$): а – конічна лунка, б – асиметрична пірамідальна лунка

Як бачимо, зміна кута нахилу лунки впливає на розмір випускного отвору. Це пояснюється тим, що зі збільшенням кута нахилу лунки зростає значення щільності в області випускного отвору, що призводить до зростання зчеплення між частинками. Тому необхідний мінімальний розмір випускної лунки, що забезпечить безперервне витікання, також зростає. Максимальне значення кута нахилу лунки дозатора для борошна – $\Theta \leq 65^\circ - \Phi' = 65^\circ - 28,8^\circ \approx 36^\circ$.

Основною властивістю, що впливає на процес дозування, є сипучість, яка характеризує рух матеріалу в області випускного отвору. Вільно насипаний розрихлений СМ насичений повітрям і не чинить опору витіканню. Якщо ж продукт завантажити в бункер чи іншу ємкість (де неможливе бокове розширення), то ситуація різко змінюється. Під тиском ваги верхніх шарів у матеріалі виникають напруження. Пористість його зменшується, що призводить до зростання об'ємної густини СМ. Під час ущільнення матеріалу з нього витісняється повітря і зростають сили зчеплення між частинками. В результаті витікання СМ утруднюється і утворюються стійкі склепіння над випускним отвором. Тому при проектуванні лунки дозатора важливо досліджувати вплив властивостей СМ на конструктивні розміри лунки з метою унеможливлення утворення склепіння.

Висновки. Результати проведених досліджень такі:

1. Розроблено математичну модель поведінки дрібнодисперсного матеріалу під час витікання його із лунки, а також наведено вирази для визначення силових факторів, що діють на СМ.
2. Проаналізовано вплив властивостей СМ (F_{AVT}) на конструктивні параметри випускного отвору (D, b). Подано графічні залежності, що характеризують зв'язок між цими параметрами.
3. Проаналізовано вплив кута нахилу лунки (Θ) на розмір випускного отвору (D, b), а також наведено відповідні графіки, що характеризують їх взаємозв'язок.

1. Дженике С. В. *Складирование и выпуск сыпучих материалов / пер. с англ. под ред. М. И. Агошкова. М.: Мир, 1968. 164 с. с ил.* 2. Arnold, P. C. und McLean, A. G. 1976. *Improved analytical flow factors for massflow hoppers // Powder Technology. 1976, Bde. 15, S.279–281.* 3. Großstück, M. und J., Schwedes. 2003. *Untersuchungen des kritischen Auslaufdurchmessers einer Siloanlage für hochdisperse Schüttgüter durch Maßstabsübertragung in einer Silozentrifuge // Chemie Ingenieur Technik. 2003, Bde. 75, S. 891–893.* 4. Катальмов А.В. *Дозирование сыпучих и вязких материалов / Катальмов А.В., Любартович В.А. – Ленинград: Химия, 1990. – 240 с.* 5. Шоловій Ю.П. *Особливості дозування дрібнодисперсних матеріалів / Ю.П. Шоловій, Н.І. Прокопець // Новітні технології пакування: IX наук.-практ. конф. молодих вчених: матеріали доповідей. Київ, 12 квітня 2013 р. – Упаковка. – 2013. – №3. – С. 27–29.* 6. Зимон А. Д. *Аутогезия сыпучих материалов. – М.: Химия, 1978. – 287 с.*