

## **Сипкість (текучість) порошку та її вимірювання. I. Огляд попередніх робіт**

К. К. Нгуен, К. О. Гогаєв, О. К. Радченко

*Проведено огляд та аналіз робіт, присвячених методам вимірювання сипкості у різних галузях науки та техніки. Теоретичні основи сипкості розглянуто з позицій статистики сипких середовищ. Зокрема, розглянуті закон Кулона та графічна інтерпретація гіпотези О. Мора для сипких середовищ, різні випадки кривої граничних напружень при зсуві та умови течії порошку через отвір лійки. Існуючі уявлення порівняно з експериментальними результатами. Проаналізовано фактори, що впливають на сипкість порошоків. Показано, що відсутність експериментальних даних залежності сипкості від насипної маси, гранулометричного та хімічного складів, форми і стану поверхні частинок не дає змоги ранжувати їх по значимості. Існуюча феноменологічна залежність зв'язу швидкості витікання порошку з його насипною густиною, діаметром отвору лійки, діаметром та формою частинок порошку.*

### **Вступ**

Сипкість (текучість) порошку має важливе практичне значення при пресуванні та прокатуванні порошоків, оскільки визначає час і якість заповнення порошком порожнини матриці та доставку порошку через бункер до валків прокатного стану при його гравітаційній подачі [1]. Зазвичай для швидкої і безперервної подачі порошку до прес-форми і рівномірного заповнення її об'єму використовують порошки або їх суміші з гарною сипкістю. Особливого значення сипкість набуває при автоматичному пресуванні, коли швидкість заповнення прес-форм порошком визначає продуктивність пресового устаткування [2—5]. Явище сипкості відіграє важливу роль при транспортуванні, зберіганні, змішуванні та інших операціях, які проводять з зернистими, порошковими та пилоподібними матеріалами в різних галузях техніки та народного господарства [6, 7].

### **Методи вимірювання сипкості**

Сипкість характеризує здатність порошку зсипатися під дією сили тяжіння, долаючи тертя частинок між собою. Це означає, що вона є основною характеристикою, яка визначає швидкість та якість заповнення прес-форми порошком.

Термін “текучість” запозичений з реології рідин і є не зовсім вдалим стосовно порошку, який правильніше було б характеризувати сипкістю, оскільки порошок є дискретною матеріальною системою [5].

На сьогоднішній день існує декілька класифікацій методів визначення сипкості порошоків [8], найбільш повною з яких є класифікація, що запропонована М. Н. Павловим у роботі [5]. Розглянемо методи визначення сипкості та кута внутрішнього тертя порошоків, дотримуючись цієї класифікації. Павлов М. Н. вважає, що для порошоків краще застосовувати термін “сипкість” — аналог загальноприйнятого у світовій науковій літературі терміну “flowability”, а не fluidity (текучість).

© К. К. Нгуен, К. О. Гогаєв, О. К. Радченко, 2009

Перша група методів [5] в основному застосовується до сухих порошків. Вивчається здатність порошку заповнювати об'єм прес-форми. За міру сипкості приймають здатність заповнювати бічні канали, щілини рельєфно-складної конфігурації та ін. Але частіше в цій групі методів оцінюється сипкість по величині об'єму або маси порошку, що пройшов під дією власної маси через отвори лійки у визначений час. При цьому сипкість характеризується відношенням об'єму  $V$  порошку до часу витікання  $t$  —  $V/t$  або часом висипання при визначеному об'ємі —  $t/V$  або масі  $m$  —  $t/m$ .

У другій групі методів сипкість характеризується коефіцієнтом опору зрушенню, з ростом якого вона зменшується. Для оцінки сипкості тут використовується відношення бічного напруження до вертикального напруження — коефіцієнт бічного тиску (бічного розпору, підпору і т. п.). Цей коефіцієнт несуттєво змінюється у широкому діапазоні напружень, що робить методи досить універсальними. Цю групу методів застосовують і до порошків у суміші з рідкою фазою.

Третя група в основному розглядає відношення енергії зв'язку при з'єднанні частинок порошку, які покриті зв'язуючою речовиною, до енергії їхнього роз'єднання. З'єднання досягається пресуванням, а роз'єднання — дробленням зразка при його падінні або падінням неущільненого порошку визначеної маси на сітку, або розтягуванням у напрямку, що протилежне напрямку пресування. При падінні відбувається ущільнення порошку, і чим більше його залишається на сітці, тим більше розглянуте відношення. У ряді випадків оцінка сипкості визначається по насипній густині, тому що зі збільшенням насипної густини зменшується кількість енергії, що вимагається для ущільнення порошку.

Четверта група методів ґрунтується на ущільненні порошків сухих і з пластифікатором. За міру сипкості приймається величина ущільнення під дією певного тиску пресування.

Подібно до рідини порошок заповнює об'єм, приймаючи його форму, однак взаємодія між частинками виключає застосування рівняння гідравліки для руху порошкового середовища.

Сипкість порошку — складна комплексна характеристика, що виявляється як функція фізичних властивостей порошку й умов, при яких вона визначається. У тих випадках, коли умови експерименту і властивості порошків не дають можливості визначити безпосередньо сипкість, фізичною характеристикою властивостей порошку стає коефіцієнт міжчастинкового тертя, що також є технологічною властивістю порошків.

Найбільш поширений метод визначення сипкості був запропонований Холлом і набув широкого застосування з деякими варіаціями. Метод визначення сипкості металевих порошків з використанням приладу Холла стандартизований в Україні і регламентується ДСТУ 3795-98 “Порошки металеві. Визначення текучості за допомогою каліброваної лійки (приладу Холла)”. Чинний від 01.01.2000 (відповідає ГОСТ 20899-98 та ISO 4490-78).

У роботі [4] розроблено установку, яка дає можливість одночасної оцінки сипкості, насипної густини і здатності порошку заповнювати прес-форму. Вона складається із спеціального столика з отвором в його поверхні, куди знизу урівень до поверхні вмонтований набір чашок із загартованої сталі (6 штук) різного об'єму (від 16,4 до 3,3 см<sup>3</sup>). У чашки можуть поміщатися центральні стрижні, що дозволяють імітувати різні

прес-форми. Над цими ємностями по поверхні столу переміщається бункер об'ємом 82 см<sup>3</sup> з досліджуваним порошком.

Нещодавно запропонований прилад [9] для визначення сипкості порошку по обертанню в ньому лопаток, що закріплені на штоку. Такий спосіб застосовується для порошоків, які мають низьку сипкість і не течуть через лійку Холла. Це, зокрема, більшість фармацевтичних препаратів.

Існують також інші методи визначення сипкості порошоків [10, 11].

Для зіставлення даних вимірювання, що отримані в різних умовах випробування, доцільно сипкість характеризувати коефіцієнтом  $K$ , який дає можливість представити її у вигляді, не залежного від величини вихідного отвору лійки [12]:

$$K = \frac{tr^n}{F}, \quad (1)$$

де  $r$  — радіус вихідного отвору, мм;  $F$  — наважка порошку, г;  $n = 2,58$  для залізного порошку.

Коефіцієнт  $K$  є величиною, яка зворотна сипкості матеріалу, і, отже, чим він більший, тим гірше сипкість порошку, і, навпаки, чим остання вище, тим менше значення  $K$ .

### Теоретичні основи статистики сипких середовищ

Під дією зовнішнього навантаження в окремих точках (областях) сипких і в'язких середовищ ефективні напруження можуть перевершити внутрішні зв'язки між частинками, при цьому виникне ковзання (зрушення) одних частинок або агрегатів з них по інших і може порушитися їх суцільність у деякій області, тобто міцність сипкого і в'язкого середовищ буде перевершена.

Внутрішнім опором, що перешкоджає переміщенню (зрушенню) частинок в ідеально сипких тілах, до яких можна віднести чисті сухі піски, буде лише сила тертя, яка виникає в точках контакту частинок. В ідеально в'язких грунтах, таких як, наприклад, дуже в'язкі дисперсні глини, переміщенню частинок будуть пручатися тільки внутрішні структурні зв'язки і в'язкість водно-колоїдних оболонок частинок [13, 14].

Показники опору зрушенню — це основні міцнісні характеристики опору тіл зовнішнім силам; для грунтів їхня найважливіша особливість у тім, що ці характеристики змінюються і залежать від тиску й умов у точках контакту частинок, які пручаються зрушенню. Сипкий грунт при зрушенні досягає визначеного коефіцієнта пористості незалежно від того, чи мав він спочатку щільний або пухкий стан. Цей коефіцієнт одержав назву *коефіцієнта критичної пористості* для даного піщаного ґрунту *при зрушенні*, тому що пористість щільних ґрунтів при зрушенні збільшується, а більш пухких — зменшується. Надалі розглянемо лише максимальний (граничний) опір ґрунтів зрушенню, коли вичерпується цілком опір ґрунту зусиллям, що зрушують.

### Закон Кулона для сипких середовищ

Сипкі ґрунти — різного роду піски (за винятком слюдистих), великоуламкові ґрунти, галечники тощо, при збільшенні на них зовнішнього тиску (на величину порядку 0,1—10 МПа) незначно

змінюють свою густину і практично цими змінами при випробуванні сипких ґрунтів на граничний опір зрушенню можна зневажити.

Як показують результати багатьох досліджень, крива граничних опорів зрушенню для сипких ґрунтів у координатах тангенціальне напруження  $\tau$ — нормальне напруження  $\sigma$  може бути прийнята за пряму, що виходить з початку координат (для ідеально сипких ґрунтів) під кутом  $\varphi$  до осі тиску.

Згідно з кривою зрушення для сипких ґрунтів, будь-яке граничне напруження  $\tau_i$ , що зрушує, дорівнює

$$\tau_{i \text{ гран}} = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2)$$

або, позначивши коефіцієнт пропорційності

$$\operatorname{tg} \varphi = f, \quad (3)$$

одержимо

$$\tau_{i \text{ гран}} = f \sigma_i. \quad (4)$$

Тому, що опір сипких ґрунтів зрушенню є опір їхньому тертю, кут  $\varphi$  зветься кутом внутрішнього тертя, а  $f = \operatorname{tg} \varphi$  — коефіцієнтом внутрішнього тертя.

Співвідношення (4) є основною залежністю міцності для сипких ґрунтів, яка встановлена ще в 1773 р. Ш. Кулоном, і може бути сформульоване у такий спосіб: *граничний опір сипких ґрунтів зрушенню є опір тертю, який прямо пропорційний нормальному тиску*. Ця залежність у механіці ґрунтів зветься законом Кулона\*.

В'язкі ґрунти (глини, суглинки та супесі) відрізняються від ґрунтів нев'язких (сипких) тим, що їх частинки й агрегати зв'язані між собою пластичними (водно-колоїдними) і частково твердими (цементацийно-кристалізаційними) зв'язками, при цьому опір їхньому зрушенню буде багато у чому залежати від їхньої зв'язності (від сил зчеплення).

Усякий зовнішній тиск на водонасичені в'язкі глинисті ґрунти за умови вільного відтоку води, що вичавлюється зовнішнім тиском, викликає значну зміну їхньої густини-вологості, що і позначається на загальному опорі ґрунтів зрушенню.

Як показують численні дослідження, крива консолідованого зрушення в'язких ґрунтів у досить великому діапазоні тисків (від  $\sigma_0 \approx 0,05$  до  $\sigma \approx 0,5—0,7$  МПа) також добре описується рівнянням прямої лінії.

Рівняння прямої, що проведена через експериментально знайдені точки, буде мати вигляд

$$\tau_{i \text{ гран}} = c + \operatorname{tg} \varphi \cdot \sigma_i, \quad (5)$$

а тому, що  $\operatorname{tg} \varphi = f$ , то

$$\tau_{i \text{ гран}} = c + f \cdot \sigma_i. \quad (6)$$

Рівняння (6) виражає закон Кулона для в'язких ґрунтів\*\*, що може бути сформульований у такий спосіб: *граничний опір в'язких ґрунтів зрушенню при завершеній їхній консолідації є функція першого ступеня від нормального тиску (стискаючого напруження)*.

\*У фізиці тертя закон, що описує рівноважний стан тіла на похилій площині, називають законом Г. Амонтона [10], у порошковій металургії — законом Кулона—Амонтона [15].

\*\*У фізиці тертя безпористих тіл, коли є присутнім явище схоплювання (виявляється при роботі підшипників ковзання), рівняння (6) трохи змінюється і має вигляд  $F = \kappa_{\text{тр}}(N + S_{\text{ф}} \cdot P_0)$  (де  $S_{\text{ф}}$  — фактична площа доторкання;  $P_0$  — сила молекулярного притягання на одиницю площі фактичного доторкання) і зветься формулою Б. В. Дерягіна [16].

Кутовий коефіцієнт прямої ( $\operatorname{tg} \varphi = f$ ) за аналогією із сипкими ґрунтами зветься коефіцієнтом внутрішнього тертя, а параметр  $c$ , що не залежить у явному вигляді від величини зовнішнього тиску, — коефіцієнтом зчеплення.

Величини  $f$  та  $c$  варто розглядати лише як математичні параметри прямолінійної діаграми зрушення в'язких ґрунтів, що відповідають певній їхній густині. Відрізок  $c$ , який відтинається лінією зрушення на осі граничних зрушень  $\tau_{\text{гран}}$ , дорівнює сумарній силі зчеплення ґрунту, що відповідає його густині-вологості.

Запропоновано [13] сумарну величину зчеплення  $c$  вважати такою, що складається з двох доданків і може бути описана наступним виразом:

$$c = c_c + c_w, \quad (7)$$

де  $c_c$  — структурне тверде зчеплення (обумовлене міцністю цементаційно-кристалізаційних зв'язків), що необоротне при руйнуванні;  $c_w$  — пластичне зчеплення, яке обумовлене водно-колоїдними оборотними зв'язками.

### Графічна інтерпретація гіпотези О. Мора для сипких середовищ

Відзначимо, що при поступовому зростанні навантаження, що зрушує, руйнування структурних зв'язків (як в'язкопластичних, так і твердих) буде йти одночасно і для ґрунту з суто водно-колоїдними зв'язками при невеликих значеннях (менших  $\sigma_0$ ) початкового параметра опору зрушенню  $c$  може і не спостерігатися, тому що ці зв'язки починають деформуватися вже при незначному тиску (рис. 1, а). Для деяких в'язких ґрунтів (наприклад, мулів) може мати місце і незалежність їхнього опору зрушенню від зовнішнього тиску на початку навантаження, поки структурна міцність не буде подолана. Це ж явище характерне для пластичних компактних матеріалів.

Таким чином, початкова ділянка кривої зрушення вимагає для окремих видів ґрунтів спеціального вивчення. Загальна ж залежність, що описана рівнянням (6), буде справедлива з урахуванням зроблених зауважень для дуже важливого діапазону тисків (від  $\sigma_0$  до  $\sigma$ ). Відзначимо також, що якщо продовжити граничну пряму  $MC$  до перетинання з віссю тисків  $\sigma$  (рис. 1, б), тобто до точки  $O'$ , то з трикутника  $O'MC''$  значення параметра  $c$  буде дорівнювати

$$c = \operatorname{tg} \varphi p_e, \quad (8)$$

де  $p_e$  — деякий усебічний тиск, який називається тиском зв'язності, що замінює дію всіх сил зчеплення.

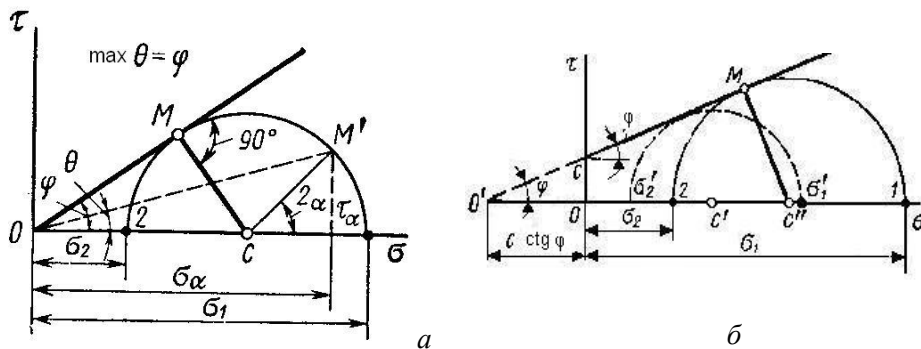


Рис. 1. Графічна інтерпретація гіпотези О. Мора для нев'язких (а) і в'язких (б) сипких середовищ.

Зі співвідношення (8) виходить, що

$$p_e = c / \operatorname{tg} \varphi, \quad (9)$$

або

$$p_e = c \cdot \operatorname{ctg} \varphi. \quad (10)$$

Вирази (9) або (10) часто використовують у задачах теорії граничної рівноваги ґрунтів для обчислення величин, що заміняють сили зчеплення в'язких ґрунтів.

### Різні випадки для кривої граничних напружень при зсуві

Закон Кулона, який описаний рівняннями (4) та (5), можна поширити і на складний напружений стан ґрунтів, якщо розглядати криві зрушення як прямолінійну огинаючу кіл граничних напружень Мора, що ідентично прийняття для ґрунтів відомої з курсу "Опір матеріалів" теорії міцності Мора [17].

Дійсно, величина напруження, що зрушує, не може бути більше граничного значення, яке зумовлене рівняннями (4) або (6), і такого, що відповідає виникненню безперервного ковзання (зрушення) однієї частини ґрунту по іншій, тобто

$$\tau_{\text{гран}} \leq \operatorname{tg} \varphi \cdot \sigma, \quad (11)$$

або

$$\tau_{\text{гран}} \leq c + \operatorname{tg} \varphi \cdot \sigma. \quad (12)$$

Коли у виразах (11) та (12) стоїть знак більше, відбувається зрушення сипкого матеріалу, тобто це є умовою його сипкості.

### Умови течії порошку через отвір лійки

Для створення можливості порівняння результатів, що одержані різними авторами, метод визначення сипкості (текучості) з використанням лійки Холла був стандартизований (ДСТУ 3795-98, ISO 4490-78). Згідно з цим методом визначається час висипання 50 г порошку через стандартну лійку з діаметром отвору 2,5 мм і кутом при вершині 60°. Однак стандартна лійка має дуже обмежене застосування й в основному може бути використана для залізних порошоків.

Сипкість порошоків залежить у першу чергу від міжчастинкового тертя і аналітична залежність між ними може бути встановлена з використанням умови граничної рівноваги, що існує в статистиці сипкого середовища. Будемо характеризувати сипкість металевих порошоків середньою швидкістю висипання порошку з лійки (мм/с):

$$v_{\text{сп}} = V/St, \quad (13)$$

де  $V$  — об'єм порошку в лійці (мм<sup>3</sup>);  $S$  — площа перетину отвору лійки, мм<sup>2</sup>.

Показано [18], що при висипанні залізного порошку об'ємом 100 см<sup>3</sup> як зі скляної лійки з розмірами отворів 10—115 мм<sup>2</sup>, так і із бункера з кутом  $\varphi = 60^\circ$  середня швидкість висипання дорівнює 200 мм/с.

Представимо сипкість у вигляді відношення середньої швидкості висипання до швидкості вільного падіння порошку з висоти  $h$ :

$$\tau_c = \frac{V}{St\sqrt{2gh}}, \quad (14)$$

де  $g$  — прискорення вільного падіння, 9800 мм/с<sup>2</sup>.

Згідно з роботою [19], швидкість витікання порошку  $W$  (г/с) визначається за формулою

$$W = K_5 \rho_b (D - K_s d_p)^{2,5} \cdot g^{0,5}, \quad (15)$$

де  $\rho_b$  — насипна густина, г/см<sup>3</sup>;  $D$  — діаметр отвору лійки, см;  $d_p$  — діаметр частинки, см;  $K_5$  — константа, згідно з роботою [20], дорівнює 0,5855;  $K_s$  — коефіцієнт, що залежить від форми частинок порошку.

В роботі [19] запропоновано форму частинки характеризувати величиною середнього квадратичного відхилення (СКВ) діаметра частинки при багаторазовому його вимірюванні у різних напрямках на профілі або в перерізі частинки. В якості такої величини для однієї частинки може бути використане СКВ середнього діаметра Фере, а для порошку середнє значення СКВ представницької вибірки частинок. Для рівновісних частинок вираз для  $K_s$  буде мати вигляд

$$K_s = 1,4 + 9,356 \text{СКВ}_F^{0,533}, \quad (16)$$

а для нерівновісних враховується СКВ повздовжнього (СКВ<sub>N</sub>) та поперечного (СКВ<sub>T</sub>) перерізів:

$$K_s = 1,4 + 9,356 \text{СКВ}_N^{0,384} \cdot \text{СКВ}_T^{0,149}. \quad (17)$$

Залежність  $K_s$  від СКВ діаметра Фере для залізного порошку наведена на рис. 2.

Тоді для рівновісних частинок  $W$  дорівнюватиме

$$W = 0,5855 \rho_b \left[ D - (1,4 + 9,356 \text{СКВ}_F^{0,533}) d_F \right]^{2,5} g^{0,5}. \quad (18)$$

Волюмометрична швидкість  $v$  (см<sup>3</sup>/с) буде дорівнювати

$$v = \frac{W}{\rho_b} = K_5 (D - K_s d_p)^{2,5} g^{0,5}. \quad (19)$$

Як уже згадувалось, стандартна лійка з діаметром отвору 2,5 мм і кутом при вершині 60° не може бути використана для визначення сипкості багатьох порошків, тому що сили зчеплення утримують порошок у лійці. Для вивчення механізму висипання з лійок і бункерів порошків з великими силами зчеплення треба дослідити, коли фіксується рух порошку на різних стадіях з бункерів різної форми. В усіх випадках у початковій стадії спостерігався рух вертикального стовпа порошку з підставкою, яка дорівнює розмірові вихідного отвору лійки або бункеру.

Для висипання з лійки діаметром  $d_1$  маємо

$$G = \rho_H \frac{\pi d_1^2}{4} h; \quad S = \pi d_1 h; \quad (20)$$

$$\sigma = \frac{G}{S} = \frac{\rho_H d_1}{4}, \quad (21)$$

де  $G$  — маса порошку;  $S$  — площа поверхні, на якій відбувається зсув порошку. Рух порошку починається, коли  $\sigma \geq K_0$ .

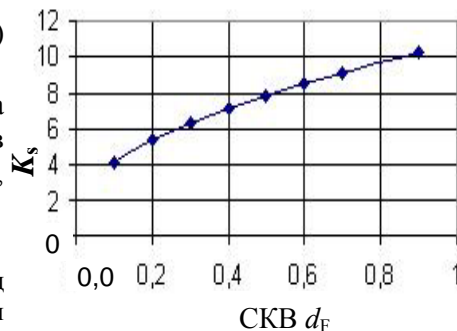


Рис. 2. Залежність коефіцієнта  $K_s$  від середньоквадратичного відхилення діаметра Фере.

Діаметр лійки, при якому можливе висипання порошків з великими силами зчеплення,

$$d_1 \geq 4K_0 / \rho_H. \quad (22)$$

Згідно з законом Кулона для статичної сипкості середовища (формула (6)), опір зрушенню складається з опору від зчеплення частинок  $c$  та опору від міжчастинкового тертя  $f\sigma_n$  при навантаженні порошку напруженням  $\sigma_n$ . Порошкове середовище, у якого  $c = 0$ , називається ідеально сипким, а середовище, у якого  $f = 0$ , — ідеально в'язким. Реальні порошки займають проміжне положення. Як було встановлено, характер висипання порошку з лійок і бункерів різний в залежності від значення  $c$ . Стандартна лійка може служити приладом, що поділяє порошки на дві групи:

- 1) ті, що мають гарну сипкість, у яких  $c$  мале (точніше,  $4c/\rho_H \leq 2,5$  мм);
- 2) ті, що мають погану сипкість, у них спостерігається “продушування” при висипанні з лійок і бункерів з великими діаметрами.

При визначенні енергосилових параметрів процесів обробки металевих порошків тиском набуває великого значення коефіцієнт зовнішнього тертя між порошками і поверхнею інструмента (прес-форми, валка і т. п.). Як показали експерименти, звичайне співвідношення  $\alpha = \beta$  ( $\alpha$  — кут тертя між матеріалом порошку та матеріалом стінки бункера;  $\beta$  — кут тертя між порошком та стінкою бункера), що використовують в цьому методі при русі металевих порошків, не може бути застосоване через великі сили електростатичної взаємодії між частинками порошку і металевою поверхнею ( $\alpha \neq \beta$ ). Сила електростатичної взаємодії  $N_e$ , що діє на порошок при його зсуві з стінки бункера, буде дорівнювати  $N_e = Q - N$ , де  $Q$  — сумарна сила нормальної та електростатичної взаємодії між порошком та стінкою бункера;  $N$  — сила, яка визначається масою порошку.

Рух порошку починається, коли  $P \geq Q \cdot \operatorname{tg} \alpha$ . Враховуючи співвідношення сил, маємо, що сила, яка діє на порошок в напрямку його зрушення, визначається за формулою

$$P = Q \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (23)$$

При відношенні  $N_3/N$ , яке близьке до нуля,  $\beta = \alpha$ . Кут нахилу площини, що відповідає початковій руху більшості металевих порошків, знаходиться в межах 44—47°.

### Експериментальні результати вимірювання сипкості порошків

В літературі існує небагато експериментальних даних щодо металевих порошків [20]. У табл. 1 приведено властивості порошків твердого сплаву марки ВТ-9, бронзи марки БрОФ-10-1 та порошків нержавіючих сталей: розпиленого марки ПРХ18Н10 та отриманого хімічним методом марки ПХ18Н15 різних фракцій. На рис. 3 наведено залежності сипкості від відносної густини порошків (табл. 1).

Для порошків марок ПХ18Н15 та ПРХ18Н10 спостерігається задовільна (коефіцієнти кореляції 1 та 0,9747) залежність між сипкістю та їх насипною густиною, а для порошків твердого сплаву марки ВТ-9 та бронзи марки БрОФ-10-1 така залежність не виявлена. Останнє пояснюється тим, що на сипкість впливає маса самої порошокинки (тобто гравітаційна сила, яка на неї діє), а для порівняння використано порошки різного розміру. Тому для з'ясування впливу різних факторів на сипкість порошків треба визначити ці фактори та ранжувати їх по значимості (впливу).



**Т а б л и ц я 1. Властивості досліджених порошків різних фракцій**

Розмір частинок, мкм	Питома поверхня, см <sup>2</sup> /г	Насипна густина, г/см <sup>3</sup>	Сипкість, с
<b>ВТ-9</b>			
63—100	157	2,58	26,04
100—160	95	2,6	27,93
160—200	81	2,61	29,07
200—315	58	2,7	29,94
315—400	49	2,67	37,04
400—630	37	2,7	
<b>БрОФ-10-1</b>			
63—100	215	5,05	15,02
100—160	112	5,03	16,18
160—200	108	4,95	17,61
200—315	64 (101)	5,15	18,80
315—400	44 (72)	5,23	22,52
400—630	41 (54)	5,2	
63—100	293	3,19	
<b>ПРХ18Н10</b>			
100—160	171	3,71	26,46
160—200	134	3,69	29,24
200—315	123	3,63	34,97
315—400	112	3,36	48,54
<b>ПХ18Н15</b>			
63—100	3710	2,33	
100—160	3340	2,24	49,50
160—200	2820	2,1	58,82
200—315	2250	1,86	74,63
315—400	1860	1,68	86,21

Із зростанням розміру частинок насипна густина і сипкість зменшуються для відновлених порошків, а для порошків вихрового помелу — збільшуються. Вплив способу виробництва порошків нержавіючої сталі і фракційного складу на властивості порошку марки 1X18H9T показано в табл. 2. Для порошків нержавіючої сталі марки 1X18H9T, що отримані методом відновлення та вихрового помелу, сипкість зростає зі збільшенням насипної густини (табл. 2).

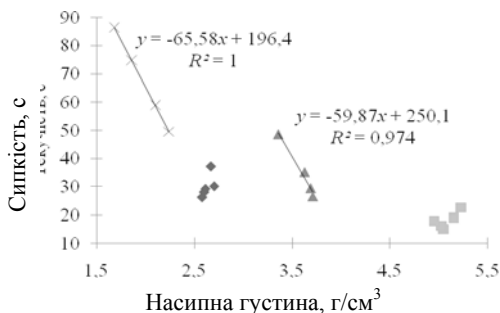


Рис. 3. Залежності сипкості порошків різних матеріалів від насипної густини [20]:  $\diamond$  — ВТ-9,  $\square$  — БрОФ-10-1;  $\Delta$  — ПРХ18Н10;  $\times$  — ПХ18Н15.

**Т а б л и ц я 2. Насипна густина та сипкість порошків нержавіючої сталі марки 1X18H9T різних фракцій та способу виробництва [18]**

Розмір фракції, мм	Відновлення		Вихровий помел	
	Насипна густина, г/см <sup>3</sup>	Сипкість, г/с	Насипна густина, г/см <sup>3</sup>	Сипкість, г/с
-0,315...+0,200	1,49	0,46	3,50	1,49
-0,200...+0,160	1,69	0,60	3,10	1,34
-0,160...+0,100	1,95	0,75	2,76	1,13
-0,100...+0,063	2,29	1,15	2,31	0,98
-0,063...+0,050	2,49	1,58	2,03	0,80

### Фактори, що впливають на сипкість порошків

Сипкість порошку має складну функціональну залежність від його фізичних властивостей: насипної маси, гранулометричного і хімічного складів, форми і стану поверхні частинок. Основними чинниками, що визначають сипкість порошку, є зчеплення частинок і сили тертя між частинками.

Більшість авторів відзначають, що сипкість залежить від форми частинок [4, 20—26] та гранулометричного складу порошку [4, 21—24, 27], а також від розміру частинок [21, 24, 27], коефіцієнта тертя [21, 22, 25], питомої поверхні [20, 24, 25], вологості [4, 21, 24, 25], стану поверхні [4, 21, 23, 25, 27], густини частинок матеріалу [4, 23, 24, 27], окисненості поверхні частинок [4, 23, 25], але експериментальні залежності не приводяться.

Сипкість порошку зазвичай зменшується (тривалість витікання проби через отвір каліброваної лійки зростає) за наявності вологи в ньому, що адсорбується у вигляді тонких плівок на поверхні частинок, при

збільшенні питомої поверхні і шорсткості частинок, при ускладненні їх форми, оскільки при цьому утруднюється відносне переміщення частинок, а також при значному вмісті дрібної фракції в порошку, коли адгезійні взаємодії співставимі з силами тяжіння, що діють на частинки порошку. Підвищити сипкість можна якісним просушуванням, обкаткою частинок, оптимізацією фракційного складу порошку. Окиснення в більшості випадків також підвищує (покращує) сипкість порошку у зв'язку із зменшенням коефіцієнта міжчастинкового тертя внаслідок зниження їх шорсткості й утворення пар тертя  $\text{MeO—MeO}$  чи  $\text{Me—MeO}$  і згладжування рельєфу поверхні частинок [2, 5, 20].

За наявності адсорбційних плівок рідкої фази, що додає зв'язаність частинкам, із зменшенням їх розміру створюється велика поверхня контакту і для зсуву потрібна більша робота, при цьому сипкість порошку знижується. При подальшому збільшенні вмісту рідкої фази ці зв'язки будуть зменшені і сипкість почне зростати. Таким чином, на сипкість порошоків, крім гранулометричного складу, впливають активність їх поверхні і вміст рідкої фази. Особливо сильно впливає на сипкість застосування поверхнево-активних речовин [18].

Сипкість суттєво залежить від фракційного складу металевих порошоків. Дрібні порошки з розвиненою питомою поверхнею мають меншу сипкість в порівнянні з крупними. Наявність оксидної плівки збільшує сипкість, бо при цьому знижується коефіцієнт тертя на поверхні частинок [5].

Згідно з законом Кулона, для в'язких порошкових систем на напруження зсуву впливають два компонента (формула (6)): коефіцієнт тертя та когезія між частинками. Для зменшення впливу когезійної взаємодії  $c$  на сипкість, зокрема, колоїдних дисперсних систем застосовують вібрацію і додавання різних поверхнево-активних речовин [6].

### Висновки

Сипкість порошку залежить від його насипної маси, гранулометричного та хімічного складів, форми і стану поверхні частинок, однак відсутність експериментальних даних щодо залежності сипкості від кожного з цих факторів не дає змоги ранжувати їх по значимості.

Феноменологічна залежність швидкості витікання порошку від його властивостей та умов вимірювання включає насипну густину, діаметр отвору лійки, діаметр та форму частинок порошку.

1. *Виноградов Г. А., Семенов Ю. Н., Катрус О. А., Каташинский В. П.* Прокатка металлических порошков. — М.: Metallurgy, 1969. — 382 с.
2. *Степанчук А. М.* Теоретичні та технологічні основи отримання порошоків металів, сплавів і тугоплавких сполук. — К.: НТУУ “КПІ”, 2006. — 353 с.
3. *Кипарисов С. С.* Порошковая металлургия. — М.: Metallurgy, 1991. — 430 с.

4. Буланов В. Я., Кватер Л. И. Диагностика металлических порошков. — М.: Наука, 1983. — 280 с.
5. Павлов Н. Н. Прессование и прокатка металлических порошков. Учебное пособие. — Ленинград: ЛПИ им. И. М. Калинина, 1980. — 65 с.
6. Schulze D. Powders and Bulk Solids Behaviour, Characterization, Storage and Flow. — Springer, 2007. — 516 p.
7. Урьев Н. Б., Потанин А. А. Текучесть суспензий и порошков. — М.: Химия, 1992. — 256 с.
8. Charu V. Navaneethan, Shahrzad Missaghi, Reza Fassih. Application of powder Rheometer to determine powder flow properties and lubrication of pharmaceutical particulate systems // AAPS Pharm. Sci. Tech. — 2005. — 6.
9. Yanbin Jiang, Shuji Matsusaka, Hiroaki Masuda, Yu Qian. Development of measurement system for powder flowability based on vibrating capillary method // Powder Technology. — 2009. — 188. — P. 242—247.
10. Abdullah E. C., Geldart D. The use of bulk density measurements as flowability indicators // Powder Technology. — 1999. — 102, No. 2. — P. 151—165.
11. Kyrre Thalberg, David Lindholm, Anders Axelsson. Comparison of different flowability tests for powders for inhalation // Ibid. — 2004. — 146, No. 3. — P. 206—211.
12. Leadbeater C., Northcott L., Hargreaves E. Some properties of engineering iron powders // Symp. Powder Met.: Spec. Rep. — 1947. — No. 38. — P. 15—34.
13. Цытович Н. А. Механика грунтов (краткий курс). — М.: Высш. школа, 1983. — 288 с.
14. Урьев Н. Б. Физико-химическая механика в технологии дисперсных систем. — М.: Знание, 1975. — 64 с.
15. Андриевский Р. А. Введение в порошковую металлургию. — Фрунзе: Илим, 1988. — 174 с.
16. Воронков Б. Д. Подшипники сухого трения. — Л.: Машиностроение, 1968. — С. 9.
17. Федосьев В. И. Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1967. — 552 с.
18. Павлов Н. Н. Исследование физико-механических свойств металлических порошков и прокатанных из них лент: Труды Ленинградского политехн. ин-та им. М. И. Калинина. — Ленинград, 1964. — № 238. — С. 25—33.
19. Guo A., Beddow J. K., Vetter A. F. A simple relationship between particle shape effects and density, flow rate and Hausner ratio // Powder Technology. — 1985. — 43, No. 3. — P. 279—294.
20. Косторнов А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. Т. 1. — К.: Наук. думка, 2002. — 573 с.
21. Федорченко И. М., Андриевский Р. А. Основы порошковой металлургии. — К.: Изд-во АН УССР, 1963. — 420 с.
22. Сердюк Г. Г., Свистун Л. И. Технология порошковой металлургии. Ч. 1. Порошки. — Краснодар, 2005. — 240 с.
23. Анциферов В. Н., Бобров Г. В., Дружинин Л. К. Порошковая металлургия и напыление покрытий. — М.: Металлургия, 1987. — 792 с.
24. Финдайзен Б. З. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы. — М.: Металлургия, 1983. — 520 с.
25. Либенсон Г. А. Основы порошковой металлургии. — М.: Металлургия, 1987. — 208 с.
26. Андриевский Р. А. Порошковое материаловедение. — М.: Металлургия, 1991. — 205 с.
27. Либенсон Г. А., Лопатин В. Ю., Комарницкий Г. В. Процессы порошковой металлургии. — М.: МИСИС, 2001. — 368 с.