

УДК 622.7

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІННОСТІ МОДУЛЯ ЮНГА ПІД ЧАС ОБ'ЄДНАННЯ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

Міхал Бембенек

AGH Науково-технічний університет, Краків, Польща

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2018-12-64-57>

Агломерація під тиском є одним з основних методів злиття порошкоподібних і дрібнозернистих матеріалів. Цей процес відбувається під дією сили тиску, який досягає інколи декількох сотень МПа. Даний процес можна розділити на два етапи. На першому етапі, відбувається зміна ущільнення частинок матеріалу, виникають порівняно високі ступені ущільнення при застосуванні малих значень зовнішніх сил. Натомість в другому етапі, частинки зливаються в одне ціле і утворюють так звані цілі “квазі”-безперервне тіло. Це призводить до значного зниження ступенів ущільнення під впливом високих значень зовнішніх сил. В обох етапах відбувається безперервна зміна параметрів, що описують сипучий матеріал, зокрема: модуль Юнга, коефіцієнт зовнішнього та внутрішнього тертя, а також коефіцієнт бічного натиску. В праці піднята проблема моделі змінності модуля Юнга для дрібнозернистих матеріалів при їх ущільненні під дією сили тиску та їх злитті.

Ключові слова: дрібнозернисті матеріали, злиття, брикетування, агломерація під тиском, модуль Юнга.

Постановка проблеми. У статті представлено завдання розробки моделі модуля Юнга для дрібнозернистих матеріалів при їх ущільненні та злитті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Злиття дрібнозернистих матеріалів широко використовується в багатьох галузях промисловості [4; 7; 11; 13; 15; 17; 20]. Існує багато методів інтеграції, таких як спікання, гранулювання (включаючи агломерацію нарощування) і агломерацію під тиском [14]. Агломерація тиску добре працює в тих випадках, коли вищезгадані способи не можуть об'єднати деякі матеріали [1; 2; 5; 12]. Оскільки процес спікання відбувається під впливом температури, можна застосовувати його до вузького діапазону матеріалів. Неможливо поєднати, наприклад різні типи палива або легкозаймисті матеріали. Щоб застосувати процес гранулювання, необхідна відповідна дезінтеграція матеріалу. Крім того, не всі види матеріалів можуть бути сформовані за допомогою агломерації нашарування, тому цей процес може вимагати використання додаткових зв'язуючих речовин. Використання агломерації тиску вирішує всі вищезазначені проблеми [2]. Процес злиття відбувається шляхом створення тиску на об'єднаний матеріал. Завдяки цьому продукт характеризується високою щільністю і довговічністю. Серед пресів для агломерації під тиском можна виділити штампіві, черв'ячні та валькові. Їх вибирають в залежності від властивостей матеріалу, ефективності, яку необхідно отримати при ущільненні і формоутворенні виробу [1; 3; 7]. Зроблено численні спроби моделювання процесу інтеграції в різних пресах, насамперед для полегшення проектної роботи пристроїв. Це, як правило, емпіричні моделі, засновані на досвіді [17; 18; 19]. Сучасні комп'ютерні програми на основі методу кінцевих елементів не містять змін у Модуль Юнга. Це стало основою для розробки власної моделі змінності модуля Юнга. Ці дані в майбутньому можуть бути використані для поліпшення цього методу.

Математична модель злиття дрібнозернистого матеріалу на прикладі валькових пресів.

В даний час існує багато математичних моделей, що демонструють хід процесів брикетування в валькових пресах. Так, перша математична модель процесу ущільнення дрібнозернистих

матеріалів у валькових пресах, Д.Р. Йохансон [8]. Він використовував емпіричну формулу (1), яку розробив завдяки дослідженню брикетування багатьох дрібнозернистих матеріалів у закритій матриці. Математична модель Йохансона використовується для визначення одиничного тиску на будь-якій стадії ущільнення, знаючи густину матеріалів на різних фазах процесу злиття [8].

$$P_{\alpha_y} = P_{\alpha_0} \left(\frac{\rho_{\alpha_y}}{\rho_{\alpha_0}} \right)^K \quad (1)$$

де P_{α_y} – одиничний тиск в довільній фазі процесу ущільнення;

P_{α_0} – одиничний тиск в кінцевій фазі процесу ущільнення;

$\rho_{\alpha_y}, \rho_{\alpha_0}$ – густина матеріалу в визначених фазах процесу ущільнення;

K – стала Йохансона.

Модель Йохансона каже, що матеріал, ущільнюється під час брикетування і є послідовним та ізотропним, також володіє однорідною структурою. Отримана модель на основі емпіричних формул має лише аналітичну частину. Матеріальні параметри, що змінюються при консолідації в валькових пресах, включають константу K . На рисунку 1 показано спрощену схему процесу

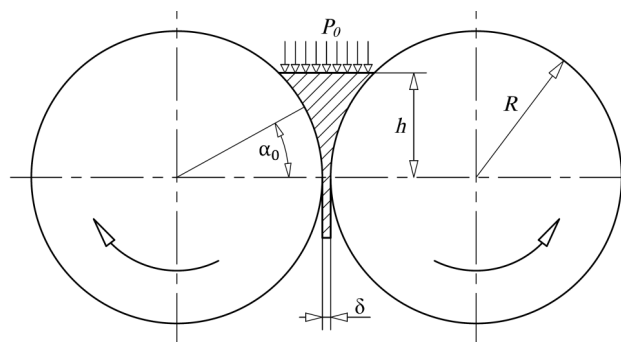


Рис. 1. α_0 – кут зачеплення, δ – зазор між вальцями, R – радіус вальків, h – висота матеріалу, P_0 – тиск матеріалу

Модель ущільнення тонкозернистого матеріалу Йохансона у вальковому пресі з гладкими формувальними колесами [8]

ущільнення, яку використовує Йохансон. Цей метод припускає, що між поверхнею валків і зернами немає прослизання. Весь матеріал, розміщений в зоні ущільнення, повинні бути об'єднані в зоні зазору між робочими валами [8].

В даний час ця математична модель використовується для визначення деяких властивостей дрібнозернистих матеріалів у валкових пресах за допомогою гравітаційного засипу. Даний тип корисно відображається для пресування матеріалів з використанням великих робочих коліс, діаметри яких досягають розмірів більше 500 мм. Йохансон використовував багато спрощень у своїй моделі. Одним з них є брак формування кінцевого продукту у формі брикету. Модель не враховує можливість виготовлення поглиблення на робочих колесах, оскільки брикетування замінюється прокаткою матеріалу. При моделюванні ущільнення матеріалів з хорошою прийнятністю, особливо при високих одиничних тисках, тобто вище 100 МПа, часто створюються великі розбіжності між результатами теоретичних розрахунків і результатами експериментів.

У наступних роках були створені інші математичні моделі. Використовуючи залежність маси (2) від щільності після процесу пресування дрібнозернистого матеріалу [10]. Перешкодою у використанні цієї формули є відсутність надійного визначення коефіцієнта прийому сипучих матеріалів [10].

$$\rho_w = \frac{\rho_0}{\tau} \left(1 + \frac{\alpha_p R}{h_w} \right) \quad (2)$$

де ρ_w – густина полотна після пресування матеріалу у валковому пресі;
 ρ_0 – густина щільності порошку;
 α_p – кут зачеплення (прокатування);
 R – радіус валків;
 h_w – товщина полотна;
 τ – коефіцієнт втягування [10].

Густина і товщина полотна при брикетуванні утворюються в результаті взаємодії всіх геометричних і фізико-хімічних параметрів, а їх математичний опис ускладнюється. Тому експериментально було введено співвідношення (3) для розрахунку густини полотна після процесу пресування, вводячи коефіцієнт C , який поєднує вплив геометричних та фізико-хімічних параметрів [10].

$$\rho_w = 0,5 \frac{C^2}{h_w} \quad (3)$$

де ρ_w – густина полотна після стиснення у валковому пресі;

C – експериментальний фактор, що характеризує комбінований вплив геометричних і фізико-хімічних параметрів;

h_w – товщина полотна [10].

На іншій zasadі заснована модель В.П. Каташинського [9], який запропонував розділити ділянки ущільнення у валковому пресі на плоскі ділянки. На рисунку 2, показаний хід розрахунків безперервного ущільнення порошку з параметрами і трьома призначеними зонами: I – заповнення, II – прилипання, III – стиснення [9]. Знаючи, що щільність полотна залежить від максимального тиску пресування, отримано рівняння 4 [10]:

$$P_x = P_{max} \frac{h_p (f_w + \varphi) - 2f_w h_x + h_p \left(\frac{h_p}{h_x} \right)^\varepsilon (f_w - \varphi)}{h_p (f_w + \varphi) - 2f_w R + h_p \varepsilon (f_w - \varphi)} \quad (4)$$

де P_x – тиску в зоні утримання;
 P_{max} – максимальний тиск пресування;
 h_p – товщина поперечного перерізу матеріалу;
 f_w – коефіцієнт внутрішнього тертя;
 ε – ступінь стиснення;
 φ – внутрішній кут зсуву матеріалу визначений через тиску P [9].

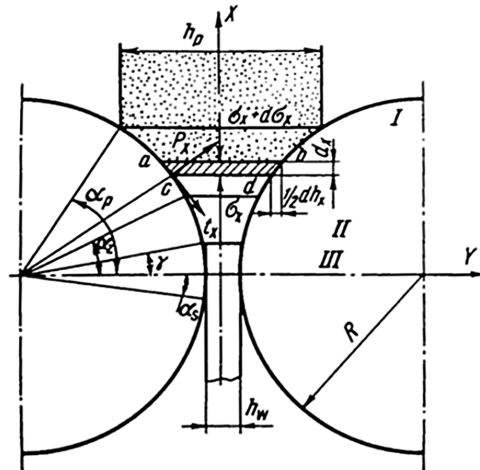


Рис. 2. Схема процесу безперервного ущільнення порошку в валковому пресі [9]

У моделі В.П. Каташинського, поперечний переріз має трапецієподібну форму і уточнені умови рівноваги сил. Каташинський у своїй ідеї не робив ніяких відмінностей між дією прокатки безперервних центрів і брикетування сипучих матеріалів у валковому пресі. Це було прийнято М. Гриневичем, який у своїй роботі запропонував перехід від процесу брикетування сипучого середовища до процесу прокатки, додавши до моделі так звану "систему заміни розміщення валків" (5). На рисунку 3 представлена ідея позначення 4-х зон у валковій прес-системі ущільнення: I – зона заповнення, II – зона подачі, III – зона ущільнення, IV – зона зворотного розширення [6].

$$R_0 = \sqrt{R^2 - \frac{kV_b}{2\pi B}} \quad (5)$$

де R_0 – радіус валів в системі заміни;

R – фактичний радіус валів;

k – кількість заглиблень робочого валу;

V_b – об'єм брикету;

B – ширина валу.

У моделі Гриневича остаточна форма рівняння ущільнення у валковому пресі має вигляд (6).

$$\frac{dp_y}{dh_y} + p_y \frac{\mu \operatorname{ctg}(\alpha_o / 2)}{h_y} = \frac{g}{h_y} + \frac{d\vartheta}{dh_y} \quad (6)$$

Також були проведені експериментальні дослідження, і на підставі загальних результатів, були визначені у вигляді емпіричних формул, що виражають змінність одиничного ущільнення та коефіцієнта зовнішнього тертя в процесі брикетування, які наведені нижче:

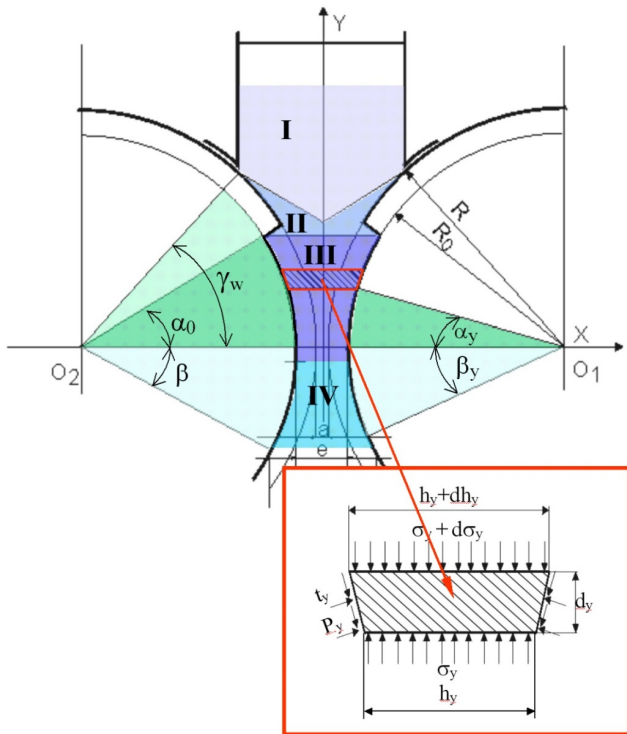


Рис. 3. Математична модель М. Гриневича для вальцових пресів [6]:

I – засип, II – заповнення, III – ущільнення, IV – розширення зворотного зв'язку, α_0 – кут нахилу, α_y – кут ущільнення, β – кут, що визначає зону розширення брикетування, β_y – кут розширення брикету, γ_w – кут, який визначає початок зони подачі матеріалу, σ_y – середнє нормальне напруження, a – ширина зазору між валами у фактичній системі ущільнення, e – ширина зазору між валами в системі заміни робочих коліс, h_y – відстань між валками від кута α_y , t_y – сила тертя, p_y – одиничний тиск, який впливає на брикетований матеріал у центральній зоні формувальної порожнини, R_0 – радіус вальців в системі зміни ущільнення, R – фактичний радіус валів

$$\vartheta = Cs^D w^E \quad (7)$$

$$\mu = Fs + Gw + K \quad (8)$$

Одиничного тиску в зоні релаксації описаний у рівнянні 9. Її форма була заснована на результатах експериментальних досліджень, які проводилися для кільканадцяти тонкозернистих матеріалів з різними властивостями.

$$p_y = p_{\max} \left[1 - \left(\frac{\beta_y}{\beta} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Як показано, ця модель не враховує змінності модуля Юнга в формулах. Це стало підставою для проведення досліджень, на основі яких була розроблена модель варіативності модуля Юнга при ущільненні дрібнозернистих матеріалів.

Визначення змінності модуля Юнга при ущільненні дрібнозернистих матеріалів.

Найпершим необхідно було визначити характеристики ущільнення матеріалів. Випробування мінливості одиничної сили ущільнення бурого вугілля проводилися з використанням лабораторної установки ZDM-1 та циліндричної закритої плити з внутрішнім діаметром 20 [мм] (рис. 4).

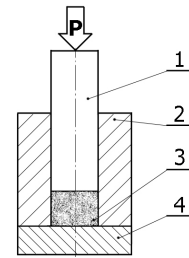


Рис. 4. Схема матриці для визначення зміни модуля Юнга

1 – штамп, 2 – матриця, 3 – дрібнозернистий матеріал, 4 – матрична рухома основа

Для випробувань були використані наступні матеріали:

- мідний концентрат з сульфїтним лугом, що характеризується показником вологості 3,74%, 4,00%, 4,59%;
- суміш залізоносного пилу, окалини та коксу з вмістом вологості 2,5%, 3,5%, 4,5%, 5,5%;
- гідроксид кальцію з вологою 15,2%, 17,0%, 18,7%.

Суміші, що використовуються для випробувань, мають такий склад, як суміші, що використовуються для брикетування. Характеристики ущільнення виконуються з різним вмістом вологи матеріалу, та як відповідає вмісту вологи матеріалів для брикетування у вальцових пресах.

Експериментально, кількість матеріалу визначалася таким чином, щоб при додаванні до нього максимального тиску висота отриманого брикету у формі циліндра відповідала приблизно 1/4 її діаметру.

Під час випробувань сила поступово збільшувалася до 50 кН, що відповідало тиску 140 МПа. Швидкість подачі пуансона здійснювалася верхньою основою преса: 6 [мм/хв]. Пуансон зменшив об'єм матеріалу під тиском – він зміцнів його коли досягнув максимальної сили. Дослідження отримало круглі брикети висотою близько 5 мм (рис. 5). Під час ущільнення за допомогою комп'ютера одночасно вимірювали тиск і зміщення пуансона. Потім визначали характеристики ущільнення (рис. 6) за допомогою формули (10).

$$s = \frac{l_0}{l_0 - \Delta l} \quad (10)$$

де l_0 – початкова висота ущільненого матеріалу, Δl – переміщення штампа.



Рис. 5. Брикети, отримані при визначенні характеристик ущільнення в штампівому пресі

Далі, використовуючи характеристики ущільнення, перетворюючи формулу (10) на (11) підставляючи її на закон Гука (12) і розглядаючи формулу (13), отримали кінцевий вигляд формулу (14), за допомогою якої було визначено змінність модуля Юнга. Результати наведені в таблицях 1-3 і на рисунках 7-9.

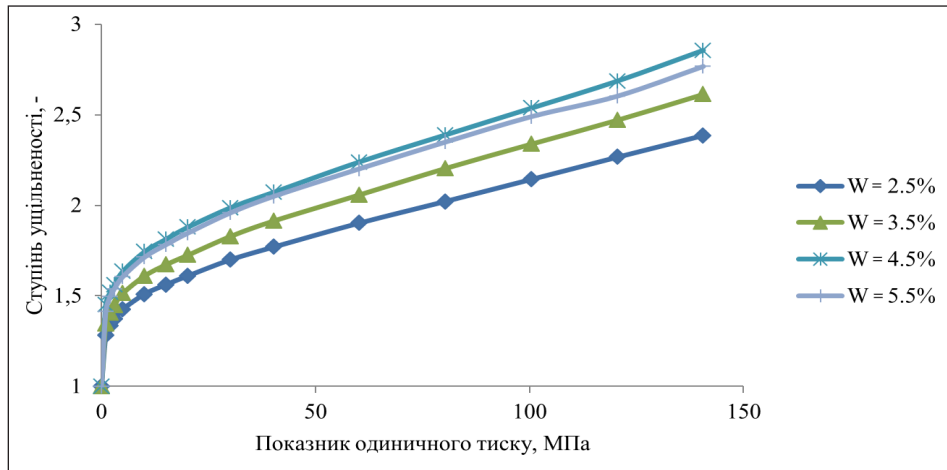


Рис. 6. Характеристики ущільнення залізоносного пилу, окалини та коксу з різною вологістю

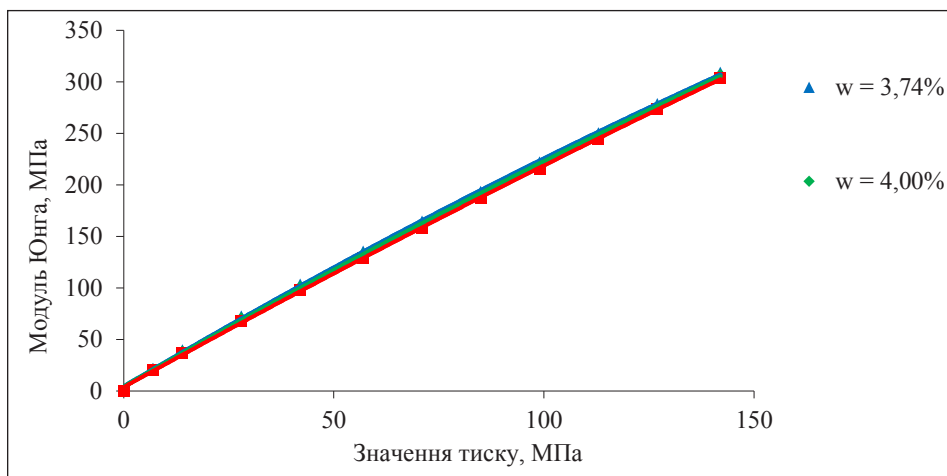


Рис. 7. Вплив змінності модуля Юнга в функції тиску для мідного концентрату з різною вологістю

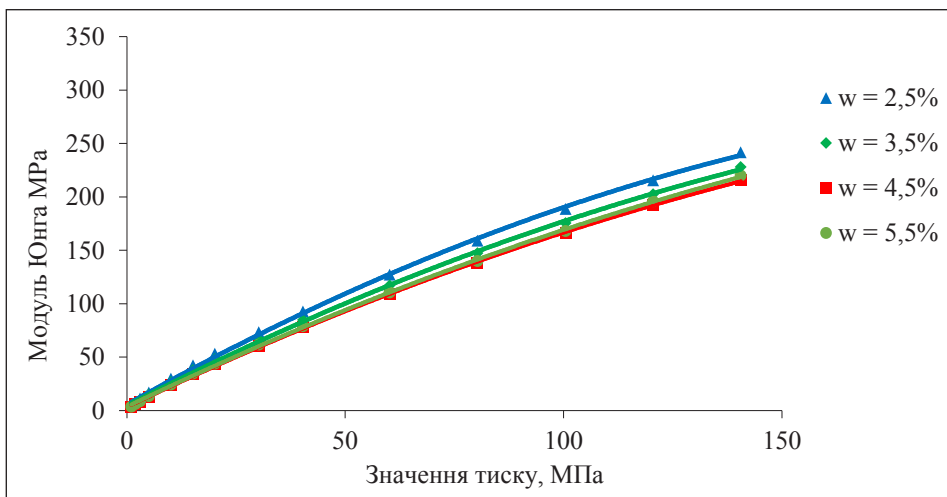


Рис. 8. Вплив змінності модуля Юнга в функції тиску залізоносного пилу, окалини та коксу

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

$$\Delta l = \frac{l_0(s-1)}{s} \tag{11}$$

$$P = E\varepsilon \tag{12}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{13}$$

$$E = \frac{Ps}{s-1} \tag{14}$$

де s – ступінь ущільнення,
 A – площа поверхні штампу,
 F – сила, що діє в даний момент на штамп,
 P – тиск в момент ущільнення.

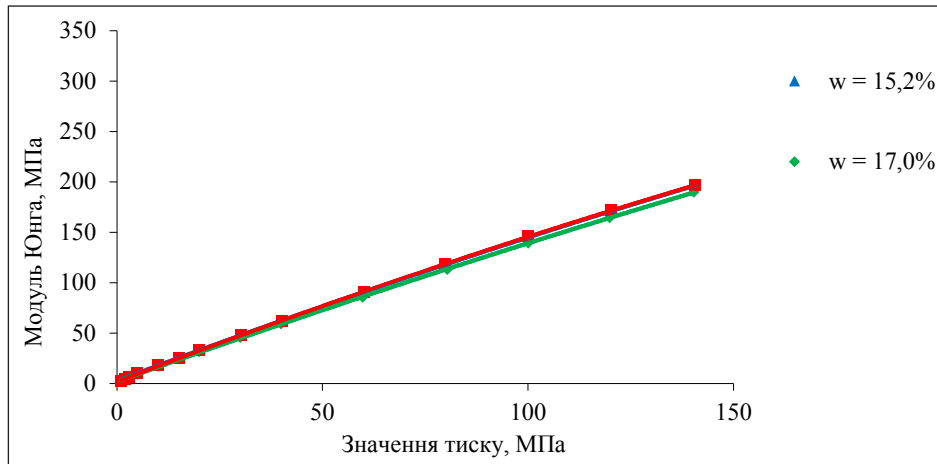


Рис. 9. Вплив зміності модуля Юнга в функції тиску для гідроксиду кальцію різної вологості

Таблиця 1

Значення ступеня ущільнення і модуля Юнга в залежності від вологості і тиску на мідний концентрат

	Тиск, МПа	7	14	28	42	57	71	85	99	113	127	142
3,74%	Ступінь ущіл., -	1,47	1,54	1,63	1,68	1,73	1,76	1,78	1,81	1,82	1,84	1,85
	М.Юнга, МПа	21,8	39,8	72,6	103,4	135,4	164,7	193,4	221,9	250,3	278,6	308,9
4,00%	Ступінь ущіл., -	1,50	1,57	1,66	1,71	1,75	1,78	1,80	1,82	1,84	1,85	1,86
	М.Юнга, МПа	21,0	38,5	70,6	101,0	132,8	161,9	190,6	219,2	247,7	276,3	307,0
4,59%	Ступінь ущіл., -	1,54	1,61	1,70	1,75	1,79	1,82	1,84	1,85	1,86	1,87	1,88
	М.Юнга, МПа	19,9	36,9	68,1	98,0	129,2	158,1	186,7	215,3	244,0	273,0	304,0

Таблиця 2

Значення ступеня ущільнення і модуля Юнга в залежності від вологості і тиску, що діють на суміш залізоносного пилу

	Тиск, МПа	1	2	3	5	10	15	20	30	40	60	80	100	120	140
2,5%	Ступінь ущіл., -	1,28	1,34	1,37	1,43	1,51	1,56	1,61	1,7	1,77	1,9	2,02	2,14	2,27	2,39
	М.Юнга, МПа	4,7	8,0	11,3	16,7	29,9	42,3	53,3	73,3	92,8	127,1	159,1	188,7	215,4	241,7
3,5%	Ступінь ущіл., -	1,35	1,41	1,45	1,51	1,61	1,67	1,72	1,83	1,91	2,06	2,2	2,34	2,47	2,61
	М.Юнга, МПа	3,9	7,0	9,8	14,9	26,7	37,8	48,2	66,6	84,7	117,0	147,3	175,5	202,5	227,9
4,5%	Ступінь ущіл., -	1,45	1,52	1,56	1,64	1,74	1,81	1,88	1,99	2,07	2,24	2,39	2,54	2,69	2,86
	М.Юнга, МПа	3,3	5,9	8,5	12,9	23,7	33,9	43,1	60,7	78,1	108,7	138,1	165,8	191,8	216,1
5,5%	Ступінь ущіл., -	1,41	1,5	1,54	1,61	1,71	1,78	1,85	1,96	2,05	2,2	2,35	2,49	2,6	2,77
	М.Юнга, МПа	3,5	6,1	8,7	13,3	24,3	34,6	43,9	61,7	78,8	110,4	139,8	167,9	195,8	220,0

Таблиця 3

Значення ступеня ущільнення і модуля Юнга в залежності від вологості і тиску, що діють на гідроксид кальцію

	Тиск, МПа	1	2	3	5	10	15	20	30	40	60	80	100	120	140
15,2%	Ступінь ущіл., -	1,58	1,72	1,81	1,95	2,20	2,35	2,46	2,63	2,75	2,98	3,15	3,26	3,37	3,49
	М.Юнга, МПа	2,7	4,8	6,7	10,3	18,4	26,1	33,6	48,6	63,1	90,6	117,1	144,4	170,9	197,1
17,0%	Ступінь ущіл., -	1,76	1,93	2,05	2,21	2,45	2,62	2,74	2,94	3,10	3,33	3,45	3,57	3,70	3,84
	М.Юнга, МПа	2,2	4,1	5,8	9,1	16,9	24,3	31,4	45,5	59,0	85,4	113,1	139,1	164,3	189,7
18,7%	Ступінь ущіл., -	1,61	1,77	1,87	2,03	2,27	2,42	2,54	2,70	2,82	2,94	3,07	3,20	3,32	3,46
	М.Юнга, МПа	2,5	4,6	6,4	9,8	17,9	25,3	33,0	47,8	61,8	91,0	118,4	146,2	171,5	196,5

На основі отриманих аналізів в результаті досліджень розроблена модель зміності модуля Юнга у функції тиску на речовину. Його формула приймає вигляд (15):

$$E = AP^2 + BP + C \quad (15)$$

де E – модуль Юнга, МПа;

P – тиск на матеріал, МПа;

A, B, C – константи матеріалу які визначають емпірично.

Значення констант матеріалу A, B, C , визначені емпірично для досліджуваних матеріалів, представлені в таблиці 4.

**Значення констант матеріалу А, В, С,
які визначаються емпірично для досліджуваних матеріалів**

Вологість, %	Концентрат міді			суміш залізозмісного пилю				wodortlenek wapnia		
	3,74	4,00	4,59	2,50	3,50	4,50	5,50	15,20	17,00	18,70
А	-0,0019	-0,0016	-0,0011	-0,0046	-0,0038	-0,0032	-0,0031	-0,0011	-0,0009	-0,0013
В	2,4038	2,3427	2,2619	2,3067	2,1015	1,9512	1,9642	1,5361	1,4641	1,5643
С	4,3215	3,9811	3,5926	5,5958	4,6209	3,3531	3,6555	2,5039	1,781	1,7419

Висновки і пропозиції. Дослідження в роботі, були проведені на матеріалах, що характеризуються різними властивостями, а також різним вмістом вологи, які дозволяють інтегрувати їх у вальцові преси. Експериментально показано, що модуль Юнга ущільнених матеріалів змінюється в функція тиску значним чином. Доведено,

що він залежить не тільки від типу матеріалу, але і від його вологості. За результатами дослідження розроблена модель змінності значень модуля Юнга в функції тиску. Це буде корисним у подальшому для розвитку теорії ущільнення зернистих матеріалів, особливо з урахуванням комп'ютерних методів моделювання.

Список літератури:

- Bembenek M.: Badania i perspektywy nowych obszarów stosowania pras walcowych. Przemysł Chemiczny, t. 96 nr 9, 2017, 1845-1847. [Дослідження та перспективи нових напрямів використання рулонних пресів].
- Bembenek M., Hryniewicz M. Badania i opracowanie metody doboru układu zagęszczania prasy walcowej. Wydawnictwa AGH. Kraków, 2010. [Дослідження та розробка методу вибору системи стискання рулонного преса].
- Bembenek M., Romanyshyn T. Operation of Briquetting Roller Presses with an Asymmetrical Compaction Unit. Journal of Machine Construction and Maintenance, nr 2, 2018, 117-122.
- Borowski G. Wykorzystanie brykietów do zagospodarowania odpadyw. Monografia, Lublin, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 2011 [Використання брикетів для поводження з відходами].
- Drzymała Z. Industrial Briquetting – Fundamentals and Methods. Elsevier Science Publishers, 1993.
- Hryniewicz M. Metoda doboru pras walcowych oraz opracowania założeń do ich modernizacji lub konstrukcji. Kraków, Wydawnictwa AGH, 1997 [Метод вибору циліндричних пресів та розробка припущень для їх модернізації або будівництва].
- Hryniewicz M., Bembenek M., Janewicz A., Kosturkiewicz B. Brykietowanie materiaływ drobnodziarnistych w prasach walcowych z niesymetrycznym układem zagęszczania. Przemysł Chemiczny, t. 94, nr 12, 2015, 2223-2226. [Брикетування дрібнозернистих матеріалів у циліндричних пресах з несиметричною системою ущільнення].
- Johanson J.R. A Rolling Theory for Granular Solids. Journal of Applied Mechanics, Vol. 32, Issue 4, 1965, 842-848.
- Katashinskii V.P. Analytical determination of specific pressure during the rolling of metal powders, Sov. Powder Metall. Metal Ceram. 5 (10) (1966) 765-772.
- Klassien P.W., Griszajew I.G. Podstawy technik granulacji. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1989.
- Kosturkiewicz B. Metoda doboru konfiguracji układu zagęszczania pras walcowych do scalania mieszanek komunalnych osadyw ściekowych. Kraków, Wydawnictwa AGH, 2018 [Метод вибору конфігурації системи ущільнення для циліндричних пресів для комбінування міських стічних мулових сумішей].
- Kosturkiewicz B., Janewicz A., Magdziarz A., Hryniewicz M., Bembenek M., Gara P. Zagadnienie brykietowania węgla kamiennego koksowego. Rynek Energii, z. 2, 2014, 104-109 [Проблема брикетування коксівного вугілля].
- Kumar D.S., Sah R., Sekhar V.R., Vishwanath S.C. Development and use of mill scale briquettes in BOF. Ironmaking & Steelmaking, Vol. 44, Issue 2, 2017, 134-139.
- Swarbrick J. Handbook of Pharmaceutical Granulation Technology. Taylor & Francis Group, LLC, 2005.
- Teng Y., Qiu Z., Wen H. Systematical approach of formulation and process development using roller compaction. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, vol. 73, 2009, 219-229.
- Yaman S., Sahan M., Haykiri-Acma H., Secen K., Kucukbayrak S. Fuel briquettes from biomass-lignite blends. Fuel Processing Technology, vol. 72, 2001, 1-8.
- Yehia K.A. Estimation of roll press design parameters based on the assessment of a particular nip region. Powder Technology, Vol. 177, Issue 3, 2007, 148-153.
- Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Бабайлов Н.А. Влияние формы инструмента при валковом брикетировании. Сталь, 9, 2000, 87-91.
- Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А. and Первухина Д.Н. (2015). Физическое моделирование валкового прессования при несимметричном воздействии на уплотняемый материал. Известия Высших Учебных Заведений. Черная Metallургия, 58(3), с. 186-191.
- Полянский Л.И., Кобелев М.В., Ветошкин А.В. Оборудование для брикетирования отсева металлургической извести. Новые огнеупоры, (3), 2014, 99-100.

Михал Бембенек

AGH Научно-технический университет, Краков, Польша

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕННОСТИ МОДУЛЯ ЮНГА ВО ВРЕМЯ ОБЪЕДИНЕНИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

Агломерация под давлением является одним из основных методов слияния порошкообразных и мелкозернистых материалов. Процесс происходит под давлением, достигая даже нескольких сотен МПа. Вы можете разделить его на два этапа. На первом этапе, происходит изменение уплотнения частиц материала, возникают сравнительно высокие степени уплотнения при применении малых значений внешних сил. Во втором этапе, частицы сливаются вместе и образуют так называемые "квази"-непрерывное тело. Это приводит к значительно более низким степеням уплотнения под воздействием высоких значений внешних сил. В обоих этапах происходит непрерывное изменение параметров, описывающих сыпучий материал, в частности: модуль Юнга, коэффициент внешнего и внутреннего трения, а также коэффициент бокового давления. Рассмотрена проблема разработки модели сменности модуля Юнга для мелкозернистых материалов при их уплотнении.

Ключевые слова: слияние, брикетирования, агломерация под давлением, модуль Юнга.

Bembenek Michal

AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland

MODELING THE VARIABILITY OF THE VIRTUAL YOUNG MODULE DURING THE CONSOLIDATION OF FINE-GRAINED MATERIALS

Summary

Pressure agglomeration is one of the basic methods of merging powdery and fine-grained materials. The process takes place under pressure reaching even several hundred MPa. You can divide it into two phases. In the first stage in which there is a change in the packing of the material particles, comparatively high degrees of compaction are obtained under the application of small values of external forces. In the second phase, however, the particles merge together and the formation of a quasi-continuous body. This results in much lower degrees of compaction under the influence of high values of external forces. In both phases there is continuous change of parameters describing bulk material, among others: Young's modulus, coefficient of external and internal friction, and lateral thrust coefficient. The paper deals with the problem of developing a Young's modulus variability model for fine-grained materials during their pressure.

Keywords: fine grained materials, consolidation, briquetting, pressure agglomeration, Young's module.