

С.Г. САВЕЛЬЄВ, д-р техн. наук, проф., М.М. КОНДРАТЕНКО, ст. викладач,
О.В. БАБАЄВСЬКА, асист.
Криворізький національний університет

ОЦІНКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВИСОТИ ШАРУ АГЛОШИХТИ НА ЙОГО СТРУКТУРНУ МІЦНІСТЬ

Відзначена важлива роль збільшення висоти шару залізородної шихти, що спікається, для поліпшення техніко-економічних показників агломераційного виробництва. Обґрунтована головна причина підвищення механічної міцності агломерату у цьому випадку, яка полягає у збільшенні кількості перенесеного тепла верхньої нагрітої частини шару до нижче розташованих шарів. Це призводить до підвищення температури в зоні формування агломерату, що викликає збільшення кількості розплаву в означеній зоні, підвищує ступінь завершення в ній фізико-хімічних перетворень. З іншого боку, збільшення висоти шару шихти, що спікається, викликає підвищення його газодинамічного опору з відповідним зниженням швидкості фільтрації газу та продуктивності агломераційної машини по спеку. Враховуючи існування критичного рівня підвищення висоти шару, що спікається, починаючи з якого відбувається непропорційне збільшення його газодинамічного опору, обумовлене погіршенням структури шихти внаслідок руйнування гранул нижнього шару, важливо мати методику визначення критичної висоти шару.

Метою роботи є дослідження можливості застосування теорії контактних напружень до вирішення питання впливу висоти шару агломераційної шихти на його структурну міцність.

Методи наукового дослідження. В роботі використані загальнологічні методи наукового дослідження – аналіз і синтез, аналогія, узагальнення.

Наукова новизна роботи. На основі проведених розрахунків встановлено, що теорія пружності та пластичної деформації при пружному зминанні не може бути застосована для дослідження деформації гранул згрудкованої агломераційної шихти під дією ваги верхніх шарів, оскільки у цьому випадку має місце невідповідність умовам застосування цієї теорії.

Практична значущість роботи полягає у необхідності розробки та застосуванні при оцінці впливу висоти шару аглошихти на його структурну міцність методів, які не базуються на теорії контактних напружень.

Результати роботи свідчать про те, що застосування теорії контактних напружень для визначення навантажень в насипному шарі гранул згрудкованої шихти на стрічці агломераційної машини та граничної висоти цього шару не коректно.

Ключові слова: агломерат, міцність, пружність, шар шихти, контакт, висота шару.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-122-128

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Парадигма сталого розвитку цивілізації, яка визначає ресурсно-екологічну стратегію промислового розвитку, встановлює певні обмеження (критерії) для вдосконалення, в тому числі процесів виробництва первинного металу: ресурсозбереження, енергозбереження, екологічні вимоги, проблеми підвищення якості сировини для доменної плавки [1, с. 4]. Останній критерій, в той же час, являє собою один з основних методів підвищення ефективності доменної плавки [2, с. 29]. Серед важливих показників якості агломерату – найбільш вагомої складової залізородної частини доменної плавки – значна роль належить так званій «холодній міцності» [3, с. 98-113].

Ефективним способом підвищення механічної міцності агломерату і зниження витрати коштовного твердого палива є спікання агломерату у високому шарі, що пов'язано зі збільшенням кількості тепла, яке надходить в нижче розташовані горизонти шихти, що спікається, а також створення більш сприятливих умов для формування мінералогічної структури готового агломерату.

При збільшенні висоти шару збільшується час контактування повітря з нагрітим спеком, який виступає в якості повітрянагрівача. Чим більше висота шару шихти, що спікається, тим вище температура повітря, що нагрівається, і тим більше тепла надходить в нижче розташований шар.

Слід відзначити, що при збільшенні висоти шару шихти якість верхньої частини спеку не покращується або покращується незначно, за рахунок зниження швидкості агломації, якщо це має місце. Корінне поліпшення якості відбувається у нижче розташованих частинах спеку. Одночасно з поліпшенням якості спеку знижується вихід звороту. [4, с. 125, 126].

Однією з причин підвищення міцності агломерату, отриманого за технологією агломерації в високому шарі, є збільшення кількості розплаву в зоні формування агломерату. Другою при-

чиною можна вважати більшу ступінь завершеності хіміко-мінералогічних перетворень, а уповільнення швидкості охолодження спеку сприяє значттю значної долі термічних і структурних напружень після завершення його кристалізації. Агломерація у високому шарі робить непотрібним використання спеціальної термообробки спеку [5, с. 327].

Однак, збільшення висоти шару шихти неминує призводить до збільшення його газодинамічного опору, зниженню швидкості фільтрації газу та відповідному зниженню продуктивності агломації по спеку. Збільшення висоти шару, що спікається до 0,4÷0,6 м з одночасним збереженням продуктивності є доволі складним технологічним заходом [6, с. 20].

Відомо [7], що при формуванні агломераційного шару, починаючи з деякої висоти, відбувається зростання газодинамічного опору шару, непропорційне збільшенню його висоти. Нижні шари шихти під дією динамічних навантажень при укладанні на палети, і під тиском ваги вище розташованих шарів більш ущільнені та чинять більший газодинамічний опір [8].

Таким чином, можна вважати, що для кожного складу і властивостей агломераційної шихти існує критична висота шару, починаючи з якої збільшення його газодинамічного опору починає змінюватись непропорційно збільшенню висоти шару, яке мало місце до цього, що пояснюється деформацією гранул шихти нижньої частини шару, тобто порушенням його структурної міцності. Визначення цієї критичної висоти шару аглошихти має важливе практичне значення, оскільки дозволяє встановити оптимальну для даної шихти висоту шару, що спікається, з точки зору його газопроникності. Тому проблема оцінки методики визначення впливу висоти шару аглошихти на його структурну міцність є актуальною практичною задачею і має важливе теоретичне значення.

Аналіз дослідження публікацій. Структурні зміни, які відбуваються в шарі шихти при її завантаженні на палету агломації і спіканні призводять до зменшення висоти шару, тобто усадки. Величина усадки характеризує якість підготовки шихти до спікання, міцність гранул, ступінь їх руйнування в процесі завантаження і агломерації, зміну порозності шару. Незважаючи на велике значення усадки шару, глибоких досліджень в цьому напрямку дуже мало [9, с. 32, 33].

Виходячи з того, що усадка є наслідком перекомпонування гранул в шарі, їх деформації та руйнування в зонах шихти, що агломерується, рядом дослідників була зроблена спроба математичного опису взаємозв'язків різних факторів, які впливають на усадку [9, с. 33, 34]. В основу математичної моделі усадки в початковий період спікання покладена залежність усадки внаслідок ущільнення гранул

$$\Delta h = H(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/(1 + \varepsilon_1), \quad (1)$$

де H – початкова висота шару, м; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – початковий і кінцевий коефіцієнти порозності шару, част. од.

Формула (1) в подальшому була вдосконалена за рахунок встановлення залежності коефіцієнтів порозності від кута, що характеризує взаємне розташування гранул відносно одна одної.

Представлені результати фізико-механічних досліджень властивостей агломераційної шихти, виконаних з використанням методів механіки суцільного середовища, в тому числі рівноважної усадки по висоті шару при просмоктуванні через нього газу. Розрахунки показали, що ступінь ущільнення шихти збільшується з глибиною її залягання в шарі, в той час як аналогічна залежність питомої усадки шихти від висоти шару має екстремальний характер.

Оцінюючи прийнятну методику, треба відзначити, що вона не може в повній мірі врахувати процеси, які відбуваються в реальних агломераційних шихтах, де усадка є незавершеною, далекою від рівноважної.

В процесі спікання збільшення висоти шару призводить до більш значущої усадки, ніж темп зростання висоти, що пояснюється більш тривалим перебуванням шихти в зоні перезволоження та більш інтенсивним руйнуванням гранул, особливо в нижніх горизонтах шару [9, с. 35]. Визначення усадки традиційним способом (періодичними замірами загальної висоти шару) без аналізу процесів, що відбуваються в шарі, не дає дійсної картини структурних змін і не здатне пояснити причини непропорційного збільшення газодинамічного опору зі збільшенням висоти шару, особливо більше 0,4÷0,5 м.

Постановка задачі. Завдання даної роботи полягає в аналізі можливості застосування теорії контактних напружень для розрахунку навантажень у шарі згрудкованої шихти на стрічці агломераційної машини, які впливають на структуру шару, та граничної висоти цього шару.

Викладення матеріалу та результати. В деяких роботах для визначення напруг, що призводять до руйнування гранул шихти, запропоновано використовувати методику вирішення задач теорії пружності та пластичної деформації про пружне зминання куль [5, с. 21-27; 8]. При цьому гранули шихти умовно вважаються такими, що мають сферичну форму з діаметром $d_{сер}$. Шар шихти, відповідно, буде сукупністю хаотично упакованих куль різного діаметру.

В основу теорії контактних напружень [10] покладено наступні припущення:

матеріал дотичних тіл в зоні контакту однорідний і відповідає закону Гука;

лінійні розміри майданчика контакту малі в порівнянні з радіусом кривизни і лінійними розмірами дотичних поверхонь в околиці точок контакту;

сили тертя між дотичними тілами мізерно малі.

При цьому знайдено, що при стискуванні двох тіл, обмежених плавними поверхнями, майданчик контакту має форму еліпса (зокрема, кола або смужки), а інтенсивність розподілу контактних напружень по цьому майданчику підпорядковується еліпсоїдному закону.

Контактні напруги – це механічні напруги, які виникають при взаємодії твердих тіл, що деформуються, на майданчиках їх стикання та поблизу цих майданчиків. Контактні напруги мають місцевий характер, тобто швидко зменшуються при достатньому віддаленні від місця контакту (стикання тіл). Розподіл контактних напруг майданчиком контакту та в його околиці нерівномірний і характеризується великими градієнтами. Важливою особливістю розподілу контактних напруг (наприклад, при стискуванні куль) є те, що максимальні дотичні напруги τ_{max} , які значною мірою зумовлюють міцність тіл, що стискаються, мають місце на деякій глибині під майданчиком контакту. Поблизу самого цього майданчика напружений стан близький до гідростатичного стискування, при якому, як відомо, дотична напруга відсутня.

Якщо вважати, що гранули шихти мають сферичну форму, майданчик контакту буде мати форму кола з радіусом a , на якому діє тиск з інтенсивністю $p(r) = p_0 \sqrt{1 - r^2/a^2}$; $r^2 = x^2 + y^2$; $0 \leq r \leq a$. Максимальна напруга, яка створюється в гранулі шихти, прямо пропорційна навантаженню і обернено пропорційна площі контакту тіл

$$p_0 = 1,5P/(\rho a^2), \quad (2)$$

де P – рівнодіюча сил, прикладених до кожної з дотичних куль.

При цьому радіус майданчику контакту буде визначатися за формулою

$$a = 0,5 \left\{ 6PR_1R_2 \left[(1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2 \right] / (R_1 + R_2) \right\}^{0,33}, \quad (3)$$

де R_1 та R_2 – радіуси кривизни дотичних поверхонь; E_i ($i = 1, 2$) – модулі Юнга матеріалу розглядуваних тіл; ν_1, ν_2 – коефіцієнти Пуассона матеріалу розглядуваних тіл.

Найбільші стискаючі контактні напруги діють у центрі майданчика і дорівнюють $\sigma_z = -p_0$, а між напругами $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ у центрі майданчика контакту існує залежність $\sigma_x = \sigma_y = (0,5 + n)\sigma_z$.

Максимальні дотичні напруження в цьому випадку рівні $\tau_{max} = 0,3 p_0$ і мають місце в точці, що віддалена від центру майданчика контакту по осі O_z на відстань $0,786a$.

Частина припущень, на яких базується теорія контактних напружень, не може бути застосована до гранул агломераційної шихти. По перше, зминання гранул шихти можна назвати пружним з великою пересторогою: пружність – це властивість тіла повертатися до первинної форми після зняття прикладеної до нього сили. Такі деформації та тіла і називають пружними. Поки що не відбувалося досліджень, які б могли підтвердити наявність властивості пружності гранул агломераційної шихти і діапазон напруг, в якому пружність зберігається, а отже і відповідність закону Гука для них залишається під питанням. По друге, матеріал в зоні контакту гранул, що стикаються, ніяк не є однорідним. По третє, сили тертя між гранулами шихти, що стикаються, не можна вважати малими до нехтування.

Очевидно, що ані модуль Юнга, ані коефіцієнт Пуассона шихти ніким ніколи не досліджувався і за визначенням не може бути обчислений для не пружних тіл. Однак відома спроба теоретичного аналізу напруг, які призводять до руйнування гранул сирової шихти, за допомогою теорії пружності та пластичної деформації про пружне зминання куль [5, с. 22-25]. Проаналізуємо результати цих досліджень.

В зазначеній роботі наводяться результати серії випробувань з визначення максимальної величини руйнуючого зусилля (P), що прикладене в точці стикання гранули, шляхом роздавлювання пуансоном зі сферичною формою наконечника радіусом 8 мм, що на думку автора імітувало взаємодію двох гранул шихти сферичної форми. На жаль, в роботі матеріал пуансона не вказаний. Скоріше за все, це легвана сталь, для якої модуль Юнга $E_1 = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, а коефіцієнт Пуассона $\nu_1 = 0,3$. Величина першого доданку в дужках формули (3) для легованих сталей складе

$$(1 - \nu_1^2) / E_1 = (1 - 0,3^2) / (2,1 \cdot 10^{11}) = 4,333 \cdot 10^{-12}.$$

Гранична висота шару шихти, за якої почнеться руйнування гранул, обчислюється за формулою [5, с. 22]

$$h_{cp} = (p_0 - p_2) / g, \quad (4)$$

де $p_2 = 8$ кПа – зусилля тиску фільтраційних газів; $\gamma = 1900$ кг/м³ = 18639 Н/м³ – насипна маса сирової шихти.

Очевидно, що фізичні параметри гранул сирової шихти будуть змінюватись в залежності від хімічного та гранулометричного складу шихти та її вологості. Але, як було зазначено вище, інформація про модулі Юнга та коефіцієнти Пуассона гранул сирової шихти будь-якого хімічного та гранулометричного складу та вологості відсутня у відомих літературних джерелах. Тому задля того, щоб не нехтувати другим доданком у формулі (3) замість шихт візьмемо аналогічні параметри ґрунтів для створення дорожніх покриттів [11, с. 28, 31; 12]: піску крупного ($E_2 = 30$ МПа, $\nu_2 = 0,3$); піску дрібного ($E_3 = 30$ МПа, $\nu_3 = 0,38$); суглинків ($E_4 = 40$ МПа, $\nu_4 = 0,33$); глини ($E_5 = 1000 \div 2000$ кг/см² = 98,1 ÷ 196,2 МПа, $\nu_5 = 0,42$). Ці матеріали за своїми фізичними властивостями та гранулометричними характеристиками найбільш подібні до залізородної агломераційної шихти.

Результати розрахунків радіусу майданчиків контакту a , максимальної напруги p_0 , яка створюється в гранулі, граничної висоти шару шихти h_{cp} , за якої почнеться руйнування гранул, для різних матеріалів наведено у табл. 1. Для більшої наочності узагальнені граничні значення параметрів шихти, розрахованих на основі теорії контактних напружень, представлені у табл. 2.

Аналіз формули (3) та результатів розрахунків, що містяться в таблицях 1 і 2, вказує на наступне.

Реальні коефіцієнти Пуансона агломераційних шихт мають знаходитись в тих межах, які були застосовані у вищеозначених розрахунках. Збільшення коефіцієнту Пуассона дуже незначною мірою збільшує граничну висоту шару матеріалу, за якої почнеться руйнування гранул.

У порівнянні з модулем пружності (Юнга) сталей ($E = (2 \div 2,1) \cdot 10^{11}$ Па) та інших металів модулі деформації природних матеріалів, що можуть входити до складу агломераційних шихт, на 3÷5 порядків менші ($2 \div 20$) $\cdot 10^9$ Па. Збільшення модуля пружності матеріалу гранул у декілька разів збільшує граничну висоту шару матеріалу, за якої почнеться руйнування гранул. Реальні модулі деформації (Юнга) агломераційних шихт мають знаходитись в тих межах, які були застосовані у наведених розрахунках.

За насипної маси шихти $\gamma = 1900$ кг/м³ та зусилля тиску фільтраційних газів $P_2 = 8$ кПа гранична висоту шару матеріалу h_{cp} , за якої почнеться руйнування гранул, буде коливатись не в межах 0,18 ÷ 1,91 м [5, с. 23, табл. 1.2], а у межах декількох сотень метрів.

Застосування теорії контактних напружень для визначення граничної висоти шару аглошихти не є коректним, на що вказують неправдоподібно величезні значення результатів розрахунків для природних матеріалів, подібних агломераційній шихті. Це пов'язано з непружною природою гранул шихти, а також з тим, що в шарі шихти сили та навантаження діють зазвичай хаотично, їх векторна сума не діє по нормалі до поверхонь гранул; точок прикладення сили до однієї гранули зазвичай більше, ніж одна.

Таблиця 1

Результати розрахунків параметрів шихти з урахуванням характеристик різних типів матеріалів

Співвідношення концентрату і руди у залізородній суміші, %	Діаметр гранул, R_i , м	Руйнівне зусилля, P , кг	Руйнівне зусилля, P , Н	Пісок крупний $E_2 = 30$ МПа, $\nu_2 = 0,3$			Пісок дрібний $E_3 = 30$ МПа, $\nu_3 = 0,38$			Суглинка $E_4 = 40$ МПа, $\nu_4 = 0,33$			Глина $E_5 = 98,1$ МПа, $\nu_5 = 0,42$			Глина $E_6 = 196,2$ МПа, $\nu_6 = 0,42$		
				$a \cdot 10^{-4}$, м	$\sigma_{max} = P_0$, МПа	h_{exp} , м	$a \cdot 10^{-4}$, м	$\sigma_{max} = P_0$, МПа	h_{exp} , м	$a \cdot 10^{-4}$, м	$\sigma_{max} = P_0$, МПа	h_{exp} , м	$a \cdot 10^{-4}$, м	$\sigma_{max} = P_0$, МПа	h_{exp} , м	$a \cdot 10^{-4}$, м	$\sigma_{max} = P_0$, МПа	h_{exp} , м
1:100	0,003	0,13	1,2753	3,99	3,83	205,23	3,90	3,99	213,86	3,60	4,71	252,21	2,60	9,02	483,69	2,06	14,32	767,80
	0,005	0,238	2,33478	5,47	3,73	199,63	5,36	3,89	208,02	4,93	4,58	245,33	3,56	8,78	470,51	2,83	13,93	746,89
	0,008	0,253	2,48193	6,09	3,19	170,98	5,97	3,33	178,17	5,49	3,92	210,14	3,97	7,52	403,08	3,15	11,93	639,88
	0,01	0,287	2,81547	6,58	3,11	166,22	6,44	3,24	173,21	5,94	3,82	204,29	4,29	7,31	391,86	3,40	11,60	622,07
	0,015	0,302	2,96262	7,06	2,84	151,89	6,92	2,96	158,28	6,37	3,49	186,68	4,60	6,68	358,12	3,65	10,61	568,54
20:80	0,003	0,059	0,57879	3,06	2,95	157,62	3,00	3,07	164,25	2,76	3,62	193,72	2,00	6,93	371,61	1,58	11,00	589,95
	0,005	0,098	0,96138	4,07	2,77	148,41	3,99	2,89	154,65	3,67	3,41	182,41	2,65	6,53	349,93	2,10	10,36	555,55
	0,008	0,137	1,34397	4,96	2,60	139,29	4,86	2,71	145,15	4,48	3,20	171,20	3,24	6,13	328,46	2,57	9,73	521,48
	0,01	0,176	1,72656	5,59	2,64	141,15	5,48	2,75	147,09	5,04	3,24	173,49	3,64	6,21	332,85	2,89	9,86	528,44
	0,015	0,251	2,46231	6,64	2,67	142,78	6,50	2,78	148,79	5,99	3,28	175,49	4,33	6,28	336,68	3,43	9,97	534,52
40:60	0,003	0,044	0,43164	2,78	2,67	142,89	2,72	2,78	148,91	2,51	3,28	175,64	1,81	6,29	336,96	1,44	9,98	534,95
	0,005	0,073	0,71613	3,69	2,51	134,49	3,61	2,62	140,15	3,33	3,09	165,31	2,40	5,92	317,17	1,91	9,39	503,56
	0,008	0,11	1,0791	4,61	2,42	129,43	4,52	2,52	134,88	4,16	2,97	159,09	3,01	5,70	305,26	2,39	9,04	484,65
	0,01	0,135	1,32435	5,12	2,42	129,17	5,01	2,52	134,61	4,62	2,97	158,78	3,33	5,69	304,65	2,65	9,02	483,70
	0,015	0,194	1,90314	6,09	2,45	131,00	5,97	2,55	136,51	5,50	3,01	161,02	3,97	5,77	308,95	3,15	9,15	490,50
60:40	0,003	0,039	0,38259	2,67	2,57	137,25	2,61	2,67	143,02	2,41	3,15	168,70	1,74	6,04	323,66	1,38	9,59	513,85
	0,005	0,067	0,65727	3,58	2,44	130,69	3,51	2,55	136,19	3,23	3,00	160,64	2,34	5,75	308,22	1,85	9,13	489,35
	0,008	0,1	0,981	4,47	2,34	125,37	4,38	2,44	130,65	4,03	2,88	154,11	2,91	5,52	295,70	2,31	8,76	469,48
	0,01	0,123	1,20663	4,96	2,34	125,21	4,86	2,44	130,48	4,48	2,88	153,92	3,23	5,51	295,33	2,57	8,75	468,90
	0,015	0,185	1,81485	5,99	2,41	128,93	5,87	2,51	134,36	5,41	2,96	158,48	3,91	5,68	304,09	3,10	9,01	482,79
80:20	0,003	0,039	0,38259	2,67	2,57	137,25	2,61	2,67	143,02	2,41	3,15	168,70	1,74	6,04	323,66	1,38	9,59	513,85
	0,005	0,064	0,62784	3,53	2,41	128,70	3,46	2,51	134,12	3,18	2,96	158,20	2,30	5,67	303,54	1,83	8,99	481,93
	0,008	0,096	0,94176	4,41	2,31	123,67	4,32	2,41	128,87	3,98	2,84	152,02	2,87	5,44	291,70	2,28	8,64	463,13
	0,01	0,12	1,1772	4,92	2,32	124,18	4,82	2,42	129,41	4,44	2,85	152,65	3,21	5,47	292,91	2,55	8,68	465,06
	0,015	0,181	1,77561	5,95	2,39	127,99	5,83	2,49	133,38	5,37	2,94	157,33	3,88	5,63	301,87	3,08	8,94	479,28
100:0	0,003	0,037	0,36297	2,62	2,52	134,85	2,57	2,63	140,53	2,37	3,10	165,75	1,71	5,94	318,02	1,36	9,42	504,91
	0,005	0,062	0,60822	3,49	2,38	127,34	3,42	2,48	132,70	3,15	2,93	156,53	2,28	5,61	300,34	1,81	8,90	476,85
	0,008	0,097	0,95157	4,42	2,32	124,10	4,33	2,42	129,32	3,99	2,85	152,54	2,88	5,46	292,71	2,29	8,67	464,74
	0,01	0,119	1,16739	4,91	2,32	123,84	4,81	2,41	129,05	4,43	2,85	152,22	3,20	5,45	292,09	2,54	8,65	463,76
	0,015	0,178	1,74618	5,92	2,38	127,28	5,80	2,48	132,64	5,34	2,92	156,45	3,86	5,60	300,20	3,06	8,89	476,62

Модуль пружності (Юнга) та руйнуюче зусилля для однієї окремої гранули не може бути застосований для розрахунків граничної висоти шару шихти, за якої почнеться руйнування гранул нижніх шарів. Потрібні дослідження фізичних властивостей та гранулометричних показників саме маси гранул різного розміру з хаотичною упаковкою в шар шихти. Для цих досліджень більше підійдуть установки та методики, застосовувані для досліджень шару дорожніх покриттів, сумішей та ґрунтів для цих покриттів.

Таблиця 2

Граничні (узагальнені) значення розрахунків параметрів шихти з різних матеріалів

Матеріал шихти	Матеріал пуансона – сталь		E_{2-5} , МПа	ν_{2-5}	a , м	$\sigma_{max} = p_0$, МПа	h_{zp} , м
	E_I , МПа	ν_I					
Пісок крупний	$2,1 \cdot 10^5$	0,3	30	0,33	$(2,62 \div 7,05) \cdot 10^{-4}$	$2,31 \div 3,83$	$123,67 \div 205,23$
Пісок дрібний			30	0,38	$(2,57 \div 6,92) \cdot 10^{-4}$	$2,41 \div 3,99$	$128,87 \div 213,86$
Суглинки			40	0,33	$(2,37 \div 6,37) \cdot 10^{-4}$	$2,84 \div 4,71$	$152,02 \div 252,21$
Глина			98,1	0,42	$(1,71 \div 4,60) \cdot 10^{-4}$	$5,44 \div 9,02$	$291,70 \div 483,69$
			196,2	0,42	$(1,36 \div 3,65) \cdot 10^{-4}$	$8,64 \div 14,32$	$463,13 \div 767,80$

Висновки та напрямок подальших досліджень. Результати проведеного дослідження свідчать про некоректність застосування теорії контактних напружень для розрахунку критичної висоти шару агломераційної шихти, починаючи з якої відбувається руйнування гранул нижнього горизонту шару з подальшим непропорційним зростанням газодинамічного опору. Цей висновок пояснюється невідповідністю властивостей гранул шихти умовам застосування теорії контактних напружень, а також складним характером навантажень на окрему гранулу в шарі шихти.

Подальший напрямок досліджень може бути пов'язаний із розробкою методики і установки для експериментального визначення зміни деформації (усадки) агломераційної шихти при збільшенні висоти шару.

Список літератури

1. Савчук Н.А. Агломерация: современный аспект / Н.А. Савчук, В.М. Чижикова // М.: Черметинформация, 2004. – 124 с.
2. Совершенствование технологии и оборудования производства железорудного сырья для современной доменной плавки / В.П. Лялюк, Н.И. Ступник, Ф.М. Журавлёв [и др.] // Кривой Рог: Дионат, 2017. – 368 с.
3. Вегман Е.Ф. Интенсификация агломерационного процесса / Вегман Е.Ф., Пыриков А.Н., Жак А.Р. – М.: Машиностроение, 1995. – 126 с.
4. Теория и практика управления агломерационным процессом / С.Б. Новак, Н.И. Гармаш, В.А. Мартыненко, А.В. Мартыненко // Кривой Рог: ЮГОК, 2006. – 340 с.
5. Петрушов С.Н. Современный агломерационный процесс: Монография / С.Н. Петрушов // Алчевск: ДонГТУ, 2006. – 360 с.
6. Агломерация рудных материалов / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Г.Н. Бездежский // Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 400 с.
7. Александров Л.И. Исследование газопроницаемости агломерационного слоя при его переувлажнении и сушке / Бюллетень ЦНИИЧермет // 1971. – № 12. – С. 18, 19.
8. Увеличение толщины слоя шихты при производстве агломерата / Е.Ф. Вегман, И.М. Мищенко, В.И. Кривоносов [и др.] // Бюллетень ЦНИИЧермет – 1972. – № 19. – С. 22-24.
9. Петрушов С.Н. Формирование слоя шихты на агломашине. Курс лекций / С.Н. Петрушов // Алчевск: ДонГТУ, 2009. – 187 с.
10. Энциклопедия физики и техники. Контактные напряжения. http://femto.com.ua/articles/part_1/1735.html
11. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость Справочное пособие // А.Б. Айнбиндер, А.Г. Камерштейн // М.: Недра, 1982. – 341 с.
12. Студопедия. Общая характеристика ґрунтов. <https://studopedia.org/13-120350.html>

Рукопис подано до редакції 25.03.2020