

© Кравченко В.П.¹, Таранина О.В.², Десятський С.П.³,
Кіпчарська О.М.⁴

ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЕНЕРГОНОСІЙНОЇ ФАЗИ ПРИ ДРОБЛЕННІ СТРУМЕНЯ ШЛАКОВОГО РОЗПЛАВУ

Розглянуто питання наукового обґрунтування переробки шлакових розплавів шляхом дроблення струменя шлаку з метою отримання гранул певного розміру і виконано аналіз процесу деформації і дроблення (розпаду) шлакового струменя при взаємодії з енергоносією фазою – швидкісним газовим (повітряним) потоком. Встановлено, що в умовах динамічної взаємодії з повітряним швидкісним потоком струмінь шлаку поводить себе як квазіпружне тіло, виявляючи властивості, характерні для твердого тіла. З урахуванням цього підібрані математичні моделі і виконані розрахунки величини руйнівного тиску і відповідної для цього швидкості повітряного потоку в залежності від температури і діаметра струменя шлакового розплаву. Встановлено, що величина тиску і швидкості повітряного потоку ростуть зі збільшенням діаметру струменя шлаку і знижуються при збільшенні температури шлаку. Проведена апроксимація залежності граничного тиску повітряного потоку від фізичних параметрів шлакового розплаву і отримані квадратична і степенева залежності з високим коефіцієнтом детермінації, що перевищує 0,98.

Ключові слова: струмінь шлаку, граничний тиск, швидкісний повітряний потік, математична модель, фізичні параметри, деформація, квазіпружність, дроблення (розпад) струменя.

Кравченко В.П., Таранина О.В., Десятський С.П., Кипчарская О.Н. Физические параметры энергонесущей фазы при дроблении струи шлакового расплава. В данной работе рассмотрены вопросы научного обоснования переработки шлаковых расплавов путем дробления струи шлака с целью получения гранул определенного размера и выполнен анализ процесса деформации и дробления (распада) шлаковой струи при взаимодействии с энергонесущей фазой – скоростным газовым (воздушным) потоком. Установлено, что в условиях динамического взаимодействия с воздушным скоростным потоком струя шлака на деформируемом участке ведет себя как квазиупругое тело, проявляя свойства, характерные для твердого тела. С учетом этого установлены величины разрушающего давления и соответствующей этому скорости воздушного потока в зависимости от температуры и диаметра струи шлакового расплава. Установлено, что величина давления и скорости воздушного потока растут с увеличением диаметра струи шлака и снижаются при увеличении температуры шлака. Подобраны математические модели для полученных зависимостей с аппроксимацией зависимости предельного давления воздушного потока от физических параметров шлакового расплава и получены квадратичная и степенная зависимости с высоким коэффициентом детерминации, превышающим 0,98.

Ключевые слова: струя шлака, предельное давление, скоростной воздушный поток, математическая модель, физические параметры, деформация, квазиупругость, дробление (распад) струи.

¹ канд. техн. наук, ПП «Ера плюс», м. Маріуполь

² ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, avalonn777@ukr.net

³ канд. фіз.-мат. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

⁴ асистент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

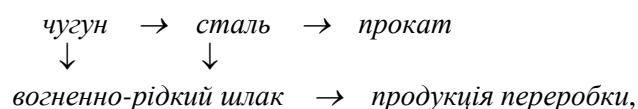
V.P. Kravchenko, O.V. Taranina, S.P. Desyatskiy, O.M. Kipcharskaya. Physical parameters of the energy-carrying phase during crushing of a jet of slag melt. In this paper, the possibility of introducing slag in the fiery-liquid state into the metallurgical cycle with the production of different products depending on the processing technology (binders, slag, pumice, etc.) is considered. The scientific substantiation of the processing of slag melts by crushing a slag stream in order to obtain granules of a certain size is considered, and the process of deformation and crushing (decay) of a slag stream during interaction with the energy-carrying phase - high-speed gas (air) stream is analyzed. It has been established that under conditions of dynamic interaction with an air high-speed flow, the slag jet in the deformable section behaves like a quasi-elastic body, exhibiting properties characteristic of a solid, which explains the destruction of the jet under the action of a longitudinal tensile and deforming slag stream due to the pressure of the gas stream. Taking into account the sizes of destroying pressure and corresponding for this purpose speed of current of air are set depending on a temperature and diameter of stream of slag fusion. It was found that the pressure and air flow rate increase with increasing diameter of the slag stream and decrease with increasing temperature of the slag. The got performances hired can be used for the choice of optimal parameters of slag fusion and energy-carrying phase at development of technological processes of processing of metallurgical slags with the forecast receipt of friction composition of eventual products. Mathematical models are neat for the got dependences with approximation of dependence of maximum pressure of current of air from the physical parameters of slag fusion and the quadratic is got and sedate to dependence with the high coefficient of determination, exceeding 0,98.

Keywords: *slag jet, ultimate pressure, high-speed air flow, mathematical model, physical parameters, deformation, quasi-elasticity, crushing (decay) of the jet.*

Постановка проблеми. Проблема переробки шлаків, неминучого продукту металургійних циклів, є важливою у зв'язку з накопиченням металургійних шлаків у вигляді відвалів, що містять більше 2 млрд. тонн. Для виключення зростання і накопичення у відвалах шлаків разом з переробкою відвальних шлаків [1] необхідно включати в металургійний цикл як завершальний етап переробку шлаків у вогненно-рідкому стані і отримання додаткових матеріалів, що знижують собівартість основної продукції – металу – і є затребуваними в інших галузях виробництва [2].

З проведенням так званої «оптимізації» в металургійному процесі залишений технологічний ланцюг: чавун-сталь-прокат. Переробка шлаків зникла. Шлаки стали поповнювати відвали, створюючи екологічні проблеми. А для такого металургійного комбінату як «Азов-сталь», притиснутого містом до Азовського моря, єдиним виходом за відсутності шлакопереробки було зливання шлаків у море, внаслідок чого в морі виросла ціла шлакова гора, яка отруєє флору і фауну моря. Навіть у разі повної переробки цієї шлакової гори проблема залишиться – куди дівати поточний вихід шлаків?

Проблема може бути розв'язана при впровадженні в металургійне виробництво технологічного процесу за схемою:



тобто впровадження в металургійний цикл переробки шлаків у вогненно-рідкому стані з отриманням різної продукції залежно від технології переробки (в'язучі матеріали, шлаковата, пемза та ін.).

Авторами вирішуються питання наукового обґрунтування переробки шлакових розплавів шляхом дроблення струменя шлаку з метою отримання гранул певного фракційного складу, що вимагає встановлення необхідних фізичних параметрів енергоносісної фази (повітряного потоку), таких як необхідний для руйнування шлакового струменя тиск повітряного потоку (P) і швидкість (V) цього потоку, що забезпечує дроблення шлакового струменя і отримання крапель (гранул) прогнозованого певного розміру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При вирішенні поставлених завдань виходимо з умови, що шлаковий розплав є високотемпературною рідиною і має визначені фізичні характеристики, такі як в'язкість, щільність, поверхневе натягнення, температура та ін., що є властивими рідинам, які роблять істотний вплив, наприклад, при сухій грануляції на процес дроблення струменя шлаку. Експериментально встановлено, що під дією на струмінь шлаку газодинамічного потоку, що витікає з сопла зі швидкістю 110-120 м/с, відбувається ділення струменя на краплі (частки) [2].

Під впливом щільного газового потоку струмінь шлаку обертається за напрямом потоку газу, згинається, подовжується, внаслідок чого утворюється деформована ділянка, яка під постійною дією швидкісного потоку газу розпадається на окремі частки.

У динамічних умовах струмінь шлаку поводить ся як квазітверде тіло, проявляючи при цьому властивості твердого тіла, такі як розтягування, пружна деформація, модуль пружності, зусилля розриву при граничному деформуючому навантаженні. Тому руйнування струменя можна пояснити дією поздовжньої сили, що розтягує і деформує струмінь шлаку, яка викликається тиском газового потоку. В результаті такої взаємодії відбувається крихке руйнування плинного середовища, тобто струменю шлаку. Уперше явище руйнування плинного середовища було продемонстроване М.Й. Корнфельдом при механічній дії газовим потоком зі швидкістю 28-30 м/с на струмінь розчину каніфолі в трансформаторній олії в'язкістю $5 \cdot 10^2$ П·с [3]. Таким чином, явище крихкого руйнування плинного середовища під механічною ударною дією швидкісного газового потоку можна вважати встановленим.

На жаль, ця тема досліджена недостатньо, чим пояснюється відсутність літературних джерел за останні роки.

Мета статті – визначити шляхом теоретичних розрахунків фізичні параметри енергоносійної фази, для чого розглянути рішення наступних завдань:

- 1) встановити величину граничного навантаження, що руйнує струмінь шлаку різного діаметру і температури;
- 2) шляхом апроксимації отриманих результатів підібрати відповідні математичні моделі з найбільшим коефіцієнтом детермінації;
- 3) встановити розрахунковим шляхом швидкості енергоносійної фази при різних діаметрах і температурах струменя шлакового розплаву.

Виклад основного матеріалу. Визначимо аналітично (розрахунковим шляхом) величини тиску газового (повітряного) потоку і його швидкості, що викликають розпад струменя шлаку з утворенням часток певних розмірів з урахуванням фізичних параметрів шлакового розплаву.

Швидкісний потік повітря чинить ударну дію на струмінь шлакового розплаву. Силу удару можна визначити з умови рівності імпульсу сили у напрямі руху повітряного потоку зміні кількості руху. За момент часу dt імпульс сили удару рівний Pdt , де P – сила удару повітряного потоку об струмінь шлакового розплаву.

За момент часу dt відбувається також і приріст кількості руху у напрямі руху повітряного потоку при зміні швидкості з V до 0 , що дорівнює:

$$mV = \rho_g Q dt V = \rho_g \omega V^2 dt, \quad (1)$$

де m – маса повітря, що поступає за час dt ; $Q = \omega V$ – витрата повітря; ω – площа поперечного перерізу струменя повітря; ρ_g – щільність повітряного потоку.

З рівняння кількості руху (1) можна отримати вираження для сили удару:

$$P dt = \rho_g \omega V^2 dt, \quad (2)$$

звідки

$$P = \rho_g \omega V^2 = \rho_g Q V. \quad (3)$$

З рівняння (3) визначимо питому силу тиску

$$p = \frac{P}{\omega} = \rho_g \omega^2 = 2\rho_g g \frac{V^2}{2g} = 2\gamma_g \frac{V^2}{2g}, \quad (4)$$

де γ_g – питома вага повітря.

З рівняння (4) виходить, що питома сила удару в 2 рази більше швидкісного натиску. Виходячи з цього, сила тиску дорівнюватиме подвоєному статичному тиску:

$$P = 2\omega\gamma_e \frac{V^2}{2g} \tag{5}$$

Як встановлено, струмінь шлаку в динамічних умовах проявляє властивості твердого тіла, яке має властивість чинити опір руйнуванню (розділенню на частини) при дії сили, що перевищує F_T . Напруга, що виникає під впливом сили F_T , є теоретичною міцністю на розрив σ_T , яка згідно з джерелом [4] дорівнює:

$$\sigma_T \approx 0,1 E, \tag{6}$$

де E – модуль пружності (Юнга).

На практиці руйнування тіла спостерігається при навантаженні P , що відповідає напрузі:

$$\sigma = \frac{P}{S}, \tag{7}$$

де S – площа поперечного перерізу струменя шлаку; напруга σ в 100-1000 разів менша за σ_T [4].

Причиною цього являється неоднорідність структури матеріалу, що виникає за наявності сторонніх включень, які обумовлюють нерівномірність розподілу навантаження P по поперечному перерізу тіла, що деформується. Оскільки структура шлакового розплаву неоднорідна і містить безліч оксидів, тобто має поліоксидну структуру і при деформації в динамічних умовах поводитиметься як квазітверде тіло, допускаємо, що руйнування струменя шлаку (розпад на частки) настає при граничному навантаженні та, виходячи з прийнятого $\sigma_T = 0,001E$, визначається:

$$P = \sigma_T \cdot S = 0,001 \cdot E \cdot S, \tag{8}$$

де E – модуль пружності струменя шлаку; $S = \frac{\pi}{4} d^2$ – площа поперечного перерізу струменя шлаку; d – діаметр струменя шлаку.

Результати розрахунку граничного руйнівного навантаження P по формулі (8) наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків граничного руйнівного тиску P повітряного потоку на струмінь шлакового розплаву

Фізичні характеристики шлакового розплаву		Граничний тиск P , кгс							
		$\frac{d}{S}$, где d – діаметр струменя шлакового розплаву, мм S – площа поперечного перерізу струменя шлаку, $\times 10^{-6} \text{ м}^2$							
Модуль пружності $E, \times 10^9 \text{ Н/м}^2$	Температура $T, \text{ }^\circ\text{C}$	5	10	15	20	25	30	40	50
12,92	1280	19,6	76,5	176	314	490	706	1256	1962
12,235	1300	25,35	101,4	227,4	405,7	694,4	912,0	1623,0	2535,0
10,97	1350	24,00	96,0	215,3	384,2	559,5	863,8	1537,0	2401,0
9,71	1400	21,53	86,1	193,0	344,5	537,5	774,5	1377,8	2152,0
8,45	1450	19,05	76,2	170,9	304,5	475,8	688,5	1219,5	1905,7
7,145	1500	16,57	66,3	148,6	265,2	413,8	596,0	1060,6	1656,9
6,51	1600	14,02	56,1	125,7	224,4	350,0	504,4	977,4	1401,8
		12,77	51,1	114,5	204,4	319,6	459,6	817,6	1271,2

Результати розрахунків величини руйнівного навантаження на струмінь шлаку представлені графічно на рисунках 1 і 2 у вигляді залежності руйнівного навантаження P від температури шлакового розплаву і діаметру струменя шлаку.

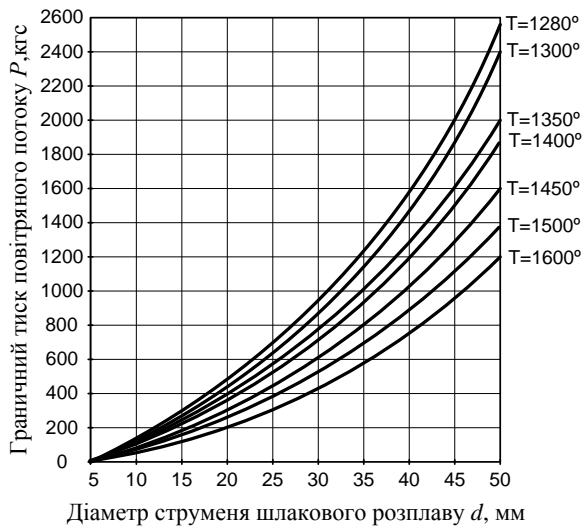


Рис. 1 – Граничний (руйнівний) тиск повітряного потоку на струмінь шлаку залежно від діаметру струменя шлакового розплаву при різних температурах розплаву

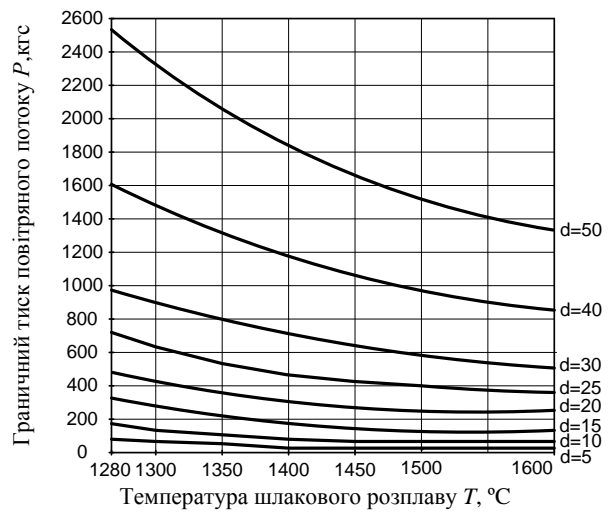


Рис. 2 – Граничний (руйнівний) тиск повітряного потоку на струмінь шлаку залежно від температури шлакового розплаву при різних діаметрах струменя розплаву

Як випливає з рис. 1 і 2, тиск P росте зі збільшенням діаметру струменя шлаку (рис. 1) і знижується при збільшенні температури шлаку (рис. 2).

Оскільки дроблення струменя шлаку під ударною дією повітряного потоку є процесом динамічним, тиск повітряного потоку на струмінь шлаку можна представити наступним виразом:

$$P_0 = \frac{\rho \cdot V^2}{2g}, \tag{9}$$

де P_0 – динамічний тиск, який приймаємо рівним граничному тиску P , що руйнує шлаковий струмінь (наведено в таблиці 1); $\rho = 1,3$ – щільність повітря, кг/м^3 ; V – швидкість повітряного потоку; g – прискорення сили тяжіння.

З вираження (9) швидкість повітряного потоку складе:

$$V = \sqrt{\frac{P \cdot 2g}{\rho}}. \tag{10}$$

Розрахунок необхідних швидкостей повітряного потоку для діаметру струменів шлаку 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50 мм проводимо за формулою (10). Результати розрахунків наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Швидкість повітряного потоку при руйнівному тиску на струмінь шлаку

Температура шлаку $T, ^\circ\text{C}$	Швидкість повітряного потоку $V, \text{ м/с}$							
	Діаметр струменя шлаку $d, \text{ мм}$							
	5	10	15	20	25	30	40	50
1280	19,50	39,10	58,55	78,20	102,30	117,30	160,00	195,50
1300	19,02	38,04	57,00	76,10	91,85	114,10	152,20	190,20
1350	18,02	36,03	53,90	72,10	90,00	108,10	144,10	180,10
1400	16,95	33,89	50,76	67,76	84,70	101,88	135,60	169,50
1450	15,81	31,62	47,33	63,23	78,99	94,79	126,50	158,10
1500	14,54	29,08	43,53	58,16	72,64	87,20	121,40	145,40
1600	13,90	27,83	41,55	55,51	69,42	83,24	111,03	138,40

Результати розрахунків необхідних швидкостей повітряного потоку для дроблення струменя шлаку різних діаметрів (табл. 2) представлені графічно у вигляді залежностей швидкостей повітряного потоку від діаметру струменя d і температури шлакового розплаву T на рисунках 3 і 4.

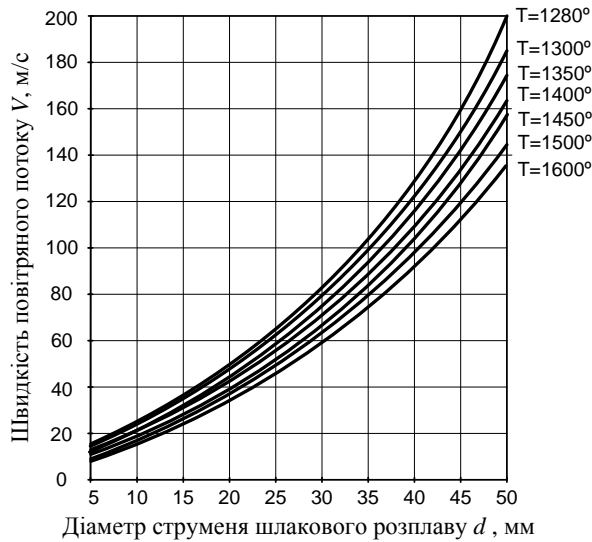


Рис. 3 – Швидкість повітряного потоку залежно від діаметра струменя при різних температурах шлакового розплаву

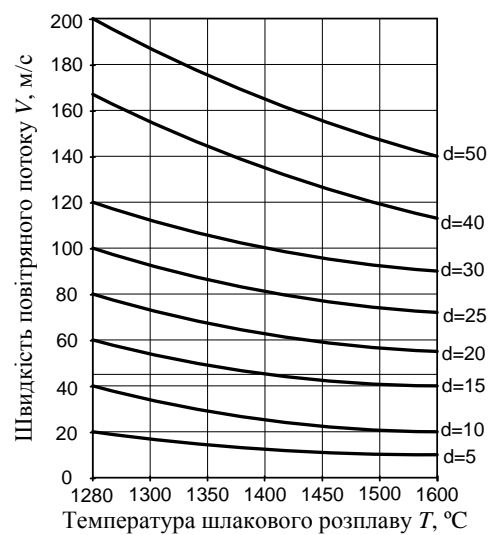


Рис. 4 – Швидкість повітряного потоку залежно від температури шлакового розплаву при різних діаметрах струменя

З рисунків 3 і 4 витікає, що зміна швидкості повітряного потоку, яка створює тиск P , що руйнує шлаковий струмінь, відбувається подібно до зміни тиску (рис. 1 і 2): зі збільшенням діаметру струменя швидкість V як і P зростає (рис. 1 і 3), зі збільшенням температури шлаку – знижується (рис. 2 і 4).

Була розроблена математична модель для визначення залежності значень граничного тиску повітряного потоку.

Для розрахунку початкові дані були перетворені у вибірку $\{(T_i, d_i, P_i)\}_{i=1}^n$, $n = 56$ з подальшим пошуком найбільш відповідної регресійної залежності $P = P(T, d)$. Використовувані для розрахунку значення температури і діаметру струменя шлакового розплаву наведені в табл. 1.

Для кожної із залежностей було розглянуто більше 100 нелінійних моделей. Побудова регресійної залежності проводилася чисельною мінімізацією по алгоритму Нелдера-Мида [5] функції

$$L(A, B, \dots) = \sum_{i=1}^n (P_i - P(T_i, d_i; A, B, \dots))^2$$

з подальшим обчисленням коефіцієнту детермінації

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P(T_i, d_i; A, B, \dots) - \bar{P})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}, \tag{11}$$

де $\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$.

Як відомо [6], $0 \leq R^2 \leq 1$, причому $R^2 = 1$ тільки у разі, коли підібрана залежність є точною для усіх точок (T_i, d_i, P) , і $R^2 \approx 0$, якщо зв'язок між змінними відсутній. Найкращою вважається лінія, для якої величина R^2 була ближча до одиниці.

Найбільш простими виявилися степенева регресія виду $P(T, d) = AT^B d^C$ і повна квадратична регресія $P(T, d) = AT^2 + BTd + Cd^2 + DT + Ed + F$.

Значення коефіцієнтів A, B, C для обчислення степеневі моделі граничного тиску $P(T, d) = AT^B d^C$ вказані в таблиці 3. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9986$.

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів для розрахунку по степеневій моделі

Коефіцієнти	Значення
A	2,0293871E+10
B	-3,315631
C	2,000763

Для розрахунку тиску як функції від температури і діаметру по квадратичній моделі $P(T, d) = AT^2 + BTd + Cd^2 + DT + Ed + F$ використовувалися значення коефіцієнтів, наведені в таблиці 4. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9946$.

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів для розрахунку по квадратичній моделі

Коефіцієнти	Значення
A	4342,509076
B	-6,951674
C	127,460746
D	0,002730
E	0,763978
F	-0,090346

Отримані наступні результати, представлені у вигляді рівнянь найкращих з отриманих залежностей, їх графіків (рис. 5, 6) у вигляді сімейств ліній $P = P(T_k, d)$ і $P = P(T, d_m)$, де T_k та d_m – задані в таблиці 1 значення відповідних змінних. Крім того, для отриманих залежностей побудовані лінії рівня відповідних функцій $P = P(T, d)$, тобто лінії, що відповідають фіксованим значенням $P = P_k$ (відповідні значення зображені на рисунках 5, 6).

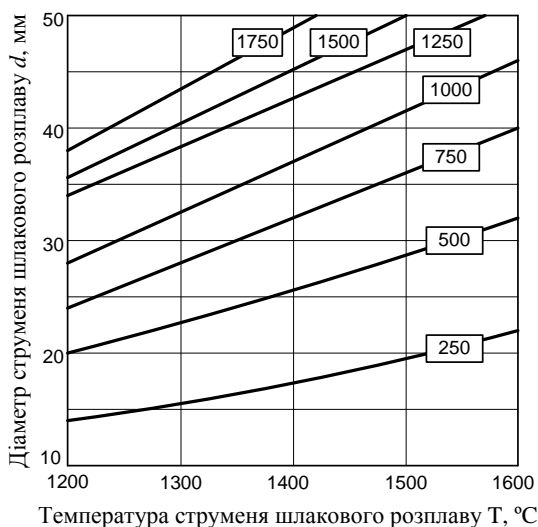


Рис. 5 – Лінії рівня $P = P(T, d) = P_k$ для степеневі моделі. Значення P_k вказані на лініях

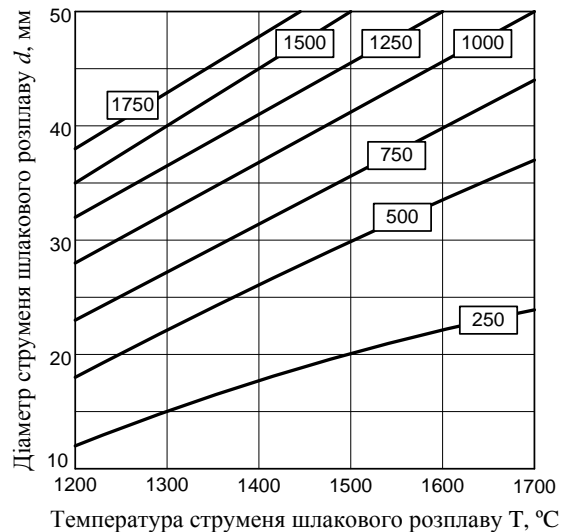


Рис. 6 – Лінії рівня $P = P(T, d) = P_k$ для квадратичної моделі. Значення P_k вказані на лініях

В усіх випадках значення коефіцієнта детермінації (11) було більше ніж 0,99. Це означає, що отримана модель описує більш ніж 99% зміни відповідної залежної змінної. Отримана залежність може бути проілюстрована графіками, представленими на рис. 7-10.

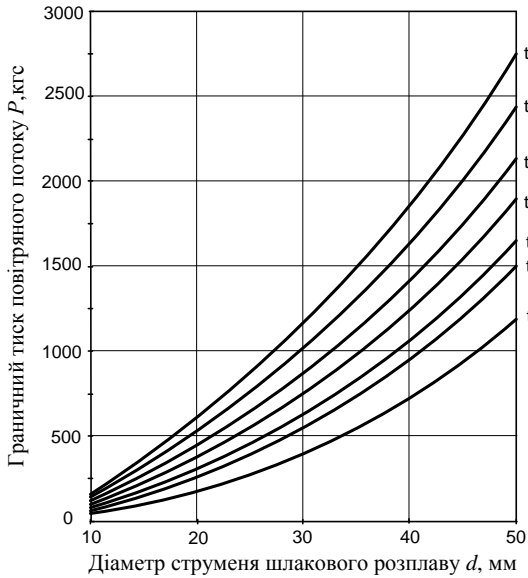


Рис. 7 – Залежність граничного тиску від діаметра струменя шлаку для степеневі моделі

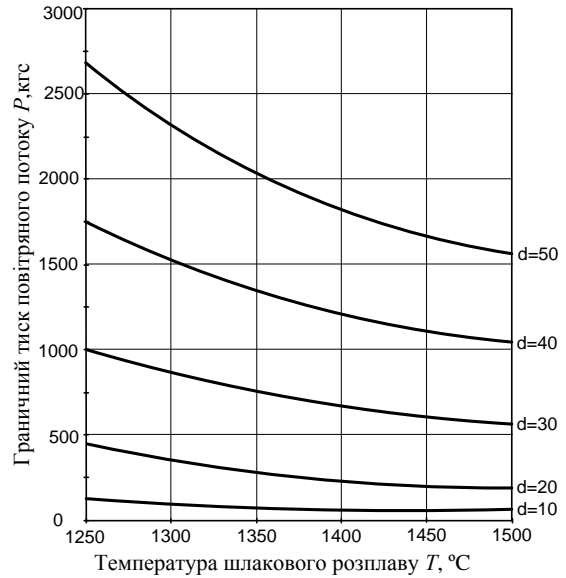


Рис. 8 – Залежність граничного тиску від температури шлакового розплаву для степеневі моделі

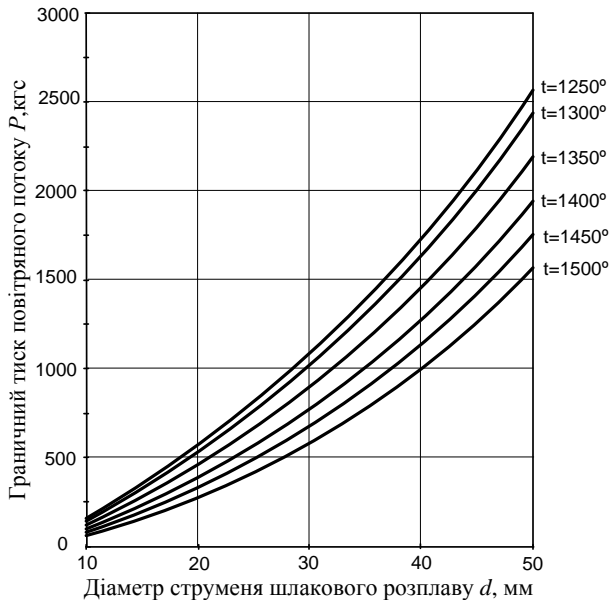


Рис. 9 – Залежність граничного тиску від діаметра струменя шлаку для квадратичної моделі

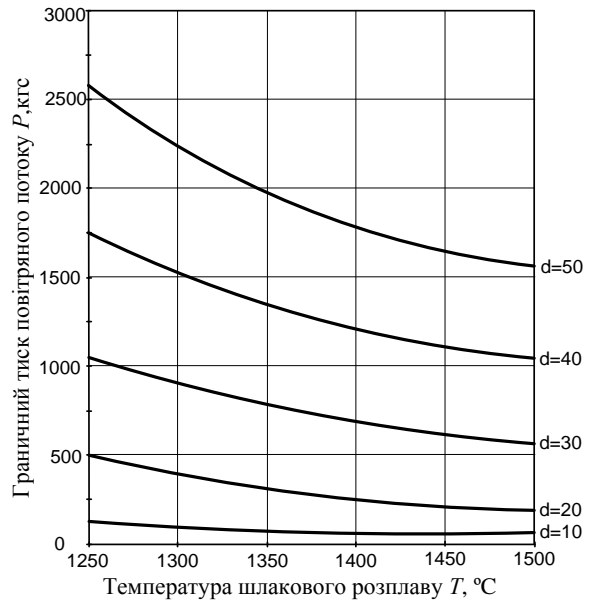


Рис. 10 – Залежність граничного тиску від температури шлаку для квадратичної моделі

Була також проведена перевірка значущості отриманих коефіцієнтів. Для цього для рівня значущості $\gamma = 0,99$ були побудовані довірчі інтервали для параметрів моделей. Вони не містили нульового значення, а це означає, що з вірогідністю помилки, меншої ніж $\alpha = 1 - \gamma = 0,01$, відповідний параметр повинен входити в модель.

Висновки

1. Проведений опис процесу деформації і дроблення (розпаду) струменя шлаку на частки. Встановлено, що в умовах динамічної взаємодії шлакового струменя зі швидкісним повітряним потоком струмінь на ділянці, що деформується, поводить як квазіпружне тіло, проявляючи властивості, характерні для твердого тіла.

2. Підібрані математичні моделі для визначення руйнівного тиску на струмінь шлаку і швидкісного повітряного потоку залежно від температури і діаметру струменя шлаку.

3. В результаті проведених обчислень встановлені величини руйнівного тиску на струмінь шлаку і необхідної для цього швидкості повітряного потоку.

4. Встановлено, що величини тиску і швидкості повітряного потоку ростуть зі збільшенням діаметру струменя шлаку і знижуються при збільшенні температури шлаку.

5. Проведена апроксимація залежності граничного тиску повітряного потоку від фізичних параметрів шлакового розплаву і отримані квадратична і степенева залежності з високим коефіцієнтом детермінації, що перевищує 0,98.

Перелік використаних джерел:

1. Пат. 36800 Україна, МПК С 04 В 7/00. Технологічна лінія виготовлення цементу / С.А. Матвієнков, В.П. Кравченко, В.А. Струтинський, В.І. Трубніков, О.В. Савощенко. – № u200806294; заявл. 13.05.2008; опубл. 10.11.2008, Бюл. № 21. – 4 с.
2. Пат. 116052 Україна, МПК С 04 В 7/14. Установа для отримання портландцементного клінкеру з вогненно-рідких доменних шлаків / В.П. Кравченко, В.П. Руських. – № u201610482; заявл. 17.10.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 19. – 4 с.
3. Корнфельд М.О. Упругость и прочность жидкостей / М.О. Корнфельд. – М.-Л. : Гостехиздат, 1951. – 107 с.
4. Прохоров А.М. Физический энциклопедический словарь / А.М. Прохоров. – М. : Советская энциклопедия, 1983. – 594 с.
5. Химмельблау Д.М. Прикладное нелинейное программирование / Д.М. Химмельблау. – М. : Мир, 1975. – 536 с.
6. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач : учебное пособие для ВУЗов / Ф.П. Васильев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1988. – 552 с.

References:

1. Matvienkov S.A., Kravchenko V.P., Strutinsky V.A., Trubnikov V.I., Savoschenko O.V. *Tekhnologichna liniia vigotovlennia tseментu* [Technological line for cement production]. Patent UA, no. 36800, 2008. (Ukr.)
2. Kravchenko V.P., Russkikh V.P. *Ustanovka dlia otrimannia portlandtseментnogo klinkeru z vognenno-ridkikh domennikh shlakiv* [Setting for the receipt of portlandcement clinker from fierily-liquid domain slags]. Patent UA, no. 116052, 2016. (Ukr.)
3. Kornfeld M.O. *Uprugost' i prochnost' zhidkosteі* [Resilience and durability of liquids]. Moscow, Gostechizdat Publ., 1951. 107 p. (Rus.)
4. Prokhorov A.V. *Fizicheskii entsiklopedicheskii slovar'* [Physical Encyclopedic Dictionary]. Moscow, Soviet encyclopedia Publ., 1983. 594 p. (Rus.)
5. Himmelblau D.M. *Prikladnoe nelineinoe programmirovaniie* [Applied Nonlinear Programming]. Moscow, Mir Publ., 1975. 536 p. (Rus.)
6. Vasiliev F.P. *Chislennye metody resheniia ekstremal'nykh zadach* [Numerical methods for solving extreme problems]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 552 p.

Рецензент: В.О. Маслов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття поступила 24.10.2019