

### 3. ТЕХНОЛОГІЯ ТА УСТАТКУВАННЯ ЛІСОВИРОБНИЧОГО КОМПЛЕКСУ

УДК 66.047.75

Проф. В.М. Атаманюк, д-р техн. наук; асист. І.Р. Барна; магістр І.В. Філіпович; магістр Н.В. Свішевецька – НУ "Львівська політехніка"

#### ГІДРОДИНАМІКА ТА КІНЕТИКА ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ СИРОВИННИХ МАТЕРІАЛІВ ВИРОБНИЦТВА ШЛАКОВОГО ГРАВІЮ

Представлено результати експериментальних і теоретичних досліджень гідродинаміки і кінетики фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію. Досліджено вплив технологічних параметрів теплового агента на швидкість фільтраційного сушіння.

**Ключові слова:** гідродинаміка, кінетика, шлак, глина, вологовміст, швидкість фільтраційного сушіння.

**Вступ.** У наш час провідне місце у структурі виробництва електроенергії посідає теплоенергетика, внаслідок діяльності якої, утворюється велика кількість відходів. Золошлаки, що утворюються від спалювання вугілля на ТЕС, є великотоннажними відходами, які нагромаджуються у відвалах, негативно впливаючи на підземні та поверхневі води, і відповідно, здоров'я населення [1]. Незважаючи на переваги і перспективи широкого застосування золошлакових відходів, обсяг їх використання в нашій країні не перевищує 10 %

Одним з перспективних напрямків утилізації золошлакових відходів є виробництво з них пористого наповнювача – шлакового гравію. Аналіз технологічного процесу виробництва шлакового гравію показав, що одним із найбільш затратних етапів виробництва шлакового гравію є сушіння сировинних матеріалів (шлаку, глини). Як відомо, існуючі методи сушіння характеризуються значними енергетичними затратами, що відповідно впливає на собівартість отриманих будівельних виробів, тому дослідження процесу сушіння сировинних матеріалів для виробництва шлакового гравію, з метою зменшення енергетичних затрат, є актуальною задачею.

Ми пропонуємо фільтраційний метод сушіння, який належить до високоінтенсивних методів, фізична суть якого полягає у профільтруванні теплового агента крізь пористу структуру шару дисперсного матеріалу, який розміщений на перфорованій перегородці в напрямку "шар дисперсного матеріалу – перфорована перегородка" [2, 3]. Основними перевагами цього методу є: наявність механічного витіснення вологи, максимальне насичення теплового агента парами вологи, високі коефіцієнти тепло- й масовіддачі, які обмежені лише економічною доцільністю процесу, що дає змогу використовувати низькотемпературний тепловий агент, а також не потребує встановлення додаткового очисного обладнання. Метою роботи є теоретичне та експериментальне дослідження фільтраційного сушіння шлаку ТЕС та глини.

**Об'єкти та методика дослідження.** Об'єктами дослідження обрано сировинні матеріали виробництва шлакового гравію, а саме шлак Бурштинської ТЕС та глину Калуського родовища.

**Шлак** – це полідисперсна суміш частинок неправильної форми та, як об'єкт сушіння, є пористим матеріалом з системою пор і капілярів, які відрізняються між собою за розмірами та взаємним розташуванням. Пори у шлаку є переважно закритими, тому волога є переважно зовнішньою і становить приблизно 8-20 %.

**Глина** є колоїдним пластичним матеріалом вторинного походження, що утворився внаслідок розпаду і розкладання деяких видів первинних порід. Початкова вологість глини становить 20-40 %. Вода в глині знаходиться у механічній суміші з глиною і в хімічному зв'язку. Важливими технологічними властивостями цих природних полімінеральних сумішей є: пластичність, вогнетривкість, спікливість, спучування, а також набухання, вогневе "сідання", сорбційна та в'язуча здатність, властивість утворювати стійкі суспензії з надлишком води, хімічна інертність [4].

Табл. 1. Основні технологічні властивості глини [5]

Показник	Одиниці виміру	Значення
Число пластичності	в.б.	8,9-15,0
Вологість формування	%	26,4-39,9
Повітряне "сідання"	%	8,7-10,9
Загальне лінійне "сідання"	%	6,8-13,7
Вологопоглинання	%	12,2-13,4
Границя механічної міцності:		
під час стиснення	кгс/см <sup>2</sup>	294-429
під час згинання	кгс/см <sup>2</sup>	32-65

Основні фізико-механічні характеристики досліджуваних матеріалів наведено в табл. 1 [6].

Табл. 2. Основні характеристики досліджуваних матеріалів

Матеріал	$d_v \cdot 10^3, м$	$d_e \cdot 10^4, м$	$\rho_{нас}, кг / м^3$	$\epsilon, м^3 / м^3$	$\varphi_c$	$f_{ум}, м^2 / м^3$	$K_n$	$a, м^2 / м^3$
Шлак	2,08	7,47	1350	0,35	0,6	3125	0,72	2250
Глина	3,35	12,03	1170	0,35	0,75	1552	0,76	1180

Експериментальні дослідження гідродинаміки та кінетики фільтраційного сушіння шлаку та глини проводили на установці та за методикою, наведеною у роботі [7].

#### Результати досліджень.

**1. Гідродинаміка фільтраційного сушіння шлаку та глини.** Результати експериментальних досліджень втрат тиску як функції фіктивної швидкості в стаціонарному шарі шлаку та глини наведено на рис. 1.

Як видно із графічної залежності рис. 1, залежність втрат тиску від фіктивної швидкості має параболічний характер, та чим більша витрата теплового агента, тим більший кут нахилу кривої до осі абсцис.

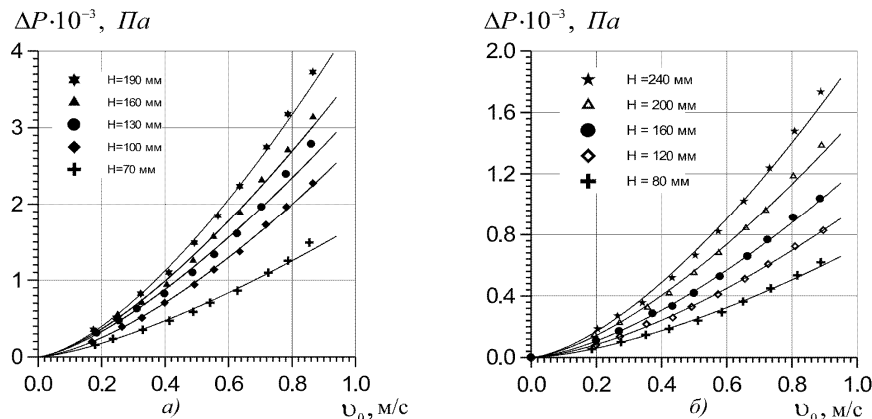


Рис. 1. Залежність втрат тиску ( $\Delta P$ ) від фіктивної швидкості ( $v_0$ ) в стаціонарному шарі: а) шлаку; б) глини

Для опису гідродинаміки фільтрування теплового агента крізь криволінійні ділянки шару дисперсного матеріалу використовували відому залежність Дарсі – Вейсбаха, яку представляли у вигляді двочленного рівняння Ергана:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = A \cdot \frac{9 \cdot \mu}{8 \cdot d_4^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{ш})^2}{\varepsilon_{ш}^3} + B \cdot \frac{3 \cdot \rho}{4} \cdot \frac{1 - \varepsilon_{ш}}{d_4 \cdot \varepsilon_{ш}^3} \cdot v_0, \quad (1)$$

де:  $\varepsilon_{ш}$  – пористість шару,  $m^3/m^3$ ;  $a$  – активна питома поверхня шару,  $m^2/m^3$ ;  $v_0$  – фіктивна швидкість фільтрування теплового агента,  $m/c$ ;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості газового потоку,  $Pa \cdot c$ ;  $d_4$  – усереднений розмір частинки,  $m$ ;  $\rho$  – густина теплового агента,  $kg/m^3$ .

Для визначення невідомих коефіцієнтів "А" і "В" рівняння (1) експериментальні дослідження рис. 1 представляли у вигляді функціональної залежності  $\Delta P/H \cdot v_0 = f(v_0)$ , наведеної на рис. 2.

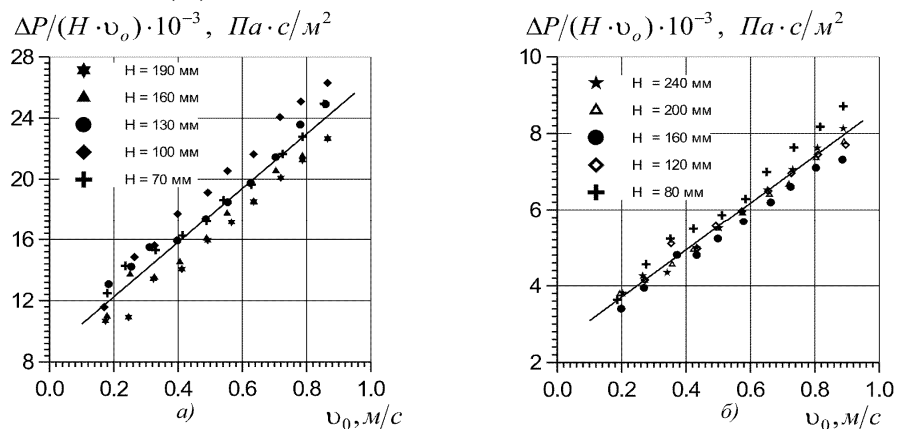


Рис. 2. Залежність  $\Delta P/H \cdot v_0 = f(v_0)$  від фіктивної швидкості ( $v_0$ ) в стаціонарному шарі: а) шлаку; б) глини

Позначимо:

$$A \cdot \frac{9 \cdot \mu}{8 \cdot d_4^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} = A^*, \quad (2)$$

$$B \cdot \frac{3 \cdot \rho}{2} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{d_4 \cdot \varepsilon^3} = B^*. \quad (3)$$

Тоді формула (1) набуде вигляду:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = A^* + B^* \cdot v_0. \quad (4)$$

Значення невідомих коефіцієнтів "А\*" та "В\*" для шлаку та глини наведено у табл. 3.

Табл. 3. Значення невідомих коефіцієнтів "А\*" та "В\*"

Невідомі коефіцієнти	Шлак	Глина
A*	8600	2500
B*	18000	6200

Максимальна відносна похибка між експериментальними  $\Delta P_{експ.}$  і розрахованими значеннями  $\Delta P$  не перевищує 10,6 % для шлаку, 10,5 % для глини. Отримана величина похибки є припустимою для проектних розрахунків сушильного обладнання і прогнозування енергетичних затрат на процес фільтраційного сушіння.

**2. Кінетика фільтраційного сушіння.** Кінетика сушіння описує зміну вологості матеріалу впродовж процесу сушіння, залежно від властивостей висушувачого матеріалу, та найпростіше її дослідження є експериментальне. Ми досліджували вплив температури  $T$ , швидкості фільтрування теплового агента  $v_0$  і висоти шару матеріалу  $h$  на кінетику фільтраційного сушіння. Експериментальні дослідження кінетики фільтраційного сушіння наведено на рис. 3 у вигляді кінетичних кривих зміни вологовмісту  $w^c$  в часі  $\tau$  за різної температури теплового агента.

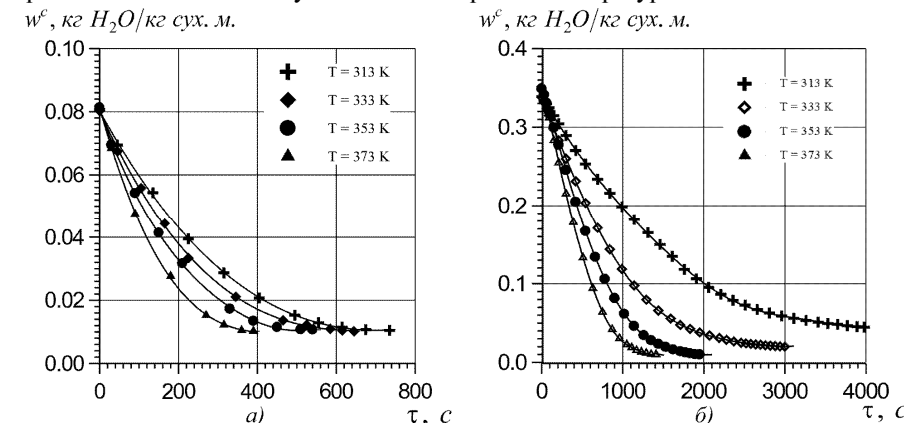


Рис. 3. Зміна вологовмісту в часі за різної температури теплового агента стаціонарного шару: а) шлаку ( $v_0 = 1,33 m/c$ ,  $H = 120 mm$ ); б) глини ( $v_0 = 1,34 m/c$ ,  $H = 120 mm$ )

Аналіз рис. 3 показує, що, за однакової висоти шару глини та швидкості фільтрування теплового агента, інтенсивність видалення вологи залежить від температури теплового агента та з її ростом зростає. Це пояснюється тим, що збільшення температури теплового агента приводить до зростання його сушильного потенціалу.

Швидкість сушіння вологого матеріалу визначає енергетичні затрати на процес та продуктивність сушильного обладнання. Тому важливо є встановити залежність швидкості сушіння від його середнього вологовмісту, з метою встановлення основних закономірностей фільтраційного сушіння. У теорії сушіння експериментальні дані представляють у вигляді залежності  $dw^c/d\tau = f(w^c)$ , які дають змогу встановити швидкість сушіння залежно від вологовмісту матеріалу та характер її зміни [8]. На рис. 4 показано залежність швидкості сушіння шлаку та глини залежно від їх вологовмісту за різної температури теплового агента.

Аналіз рис. 4 показує, що швидкість фільтраційного сушіння залежить від структурної будови шару вологого матеріалу і температури теплового агента. Лінія "а – b" (рис. 4 а) характеризує перший етап фільтраційного сушіння – механічне витіснення і винесення міжзернової вологи із шару шлаку. Аналіз рис. 4 (б) показує, що під час фільтраційного сушіння глини механічного витіснення немає, що пояснюється відсутністю в шарі вільної вологи, яка утримується силами поверхневого натягу.

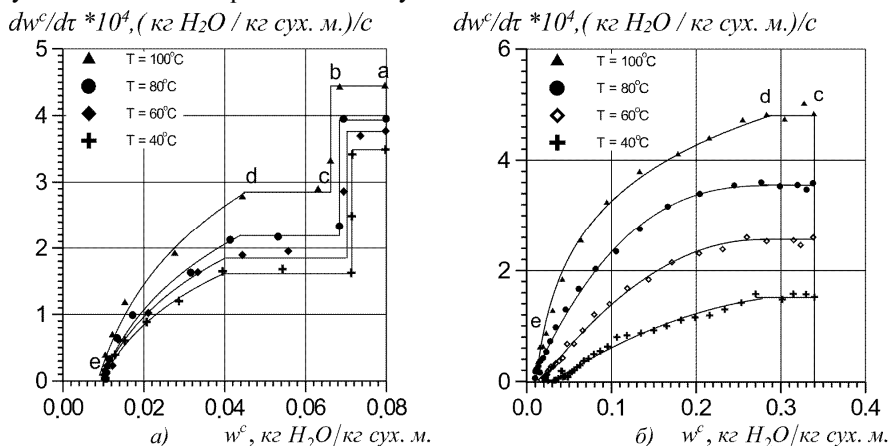


Рис. 4. Зміна швидкості фільтраційного сушіння від вологовмісту за різної температури теплового агента: а) шлак ( $v_0 = 1,33 \text{ м/с}$ ,  $H = 120 \text{ мм}$ ); б) глина ( $v_0 = 1,34 \text{ м/с}$ ,  $H = 120 \text{ мм}$ )

Лінії "с – d" (рис. 4) характеризують період повного насичення теплового агента вологою, під час якого з шару за одиницю часу виділяється однакова кількість вологи, яка визначається сушильним потенціалом теплового агента. Лінії "d – e" характеризують третій етап фільтраційного сушіння – період часткового насичення теплового агента вологою, який настає після досягнення

кормовою частиною фронту масообміну перфорованої перегородки. Швидкість фільтраційного сушіння шлаку та глини зростає із ростом температури теплового агента, адже збільшення температури приводить до зростання сушильного потенціалу теплового агента.

**Висновки.** Досліджено гідродинаміку та кінетику фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію. Визначено невідомі коефіцієнти двочленного рівняння Ергана для шлаку та глини, що дає змогу передбачити втрати тиску в стаціонарному шарі матеріалу. Проаналізовано залежність швидкості фільтраційного сушіння від технологічних параметрів теплового агента.

### Література

1. Papastefanou C. Escaping radioactivity from coal-fired power plants (CPPs) due to coal burning and the associated hazards: a review / C. Papastefanou // J. of Environmental Radioactivity. – 2010. – Vol. 101, Is. 3. – Pp. 191-200.
2. Ханьк Я.Н. Фильтрационная сушка плоских проницаемых материалов : дисс. ... д-ра техн. наук: спец. 05.17.08 / Я.Н. Ханьк. – Львів, 1992. – 426 с.
3. Атаманюк В.М. Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.17.08. "Процеси та обладнання хімічної технології" / В.М. Атаманюк. – Львів, 2007. – 38 с.
4. Осипов В.І. Мікроструктура глинистих порід / В.І. Осипов, В.Н. Соколов, Н.А. Румянцев. – М.: Изд-во "Надра", 1989. – 211 с.
5. Строительные материалы Украины. Ивано-Франковская область. Государственный геологический комитет СССР. – К.: Изд-во "Будівельник", 1965. – 235 с.
6. Барна І.Р. Гідродинаміка під час фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію / І.Р. Барна, В.М. Атаманюк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Хімія, технологія речовин і їх застосування. – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2012. – № 726. – С. 201-212.
7. Атаманюк В.М. Гідродинаміка стаціонарного шару полідисперсного матеріалу під час фільтраційного сушіння / В.М. Атаманюк, І.Р. Барна, Р.В. Ходорівський // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів: РВВ НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.9. – С. 104-110.
8. Атаманюк В.М. Кінетика фільтраційного сушіння шлаку теплових електростанцій / В.М. Атаманюк, І.Р. Барна // Збірник наукових праць ОНАХТ. – 2012. – Т. 2, вип. 41. – С. 89-93.

### Атаманюк В.М., Барна І.Р., Филипович І.В., Свишевська Н.В. Гідродинаміка і кінетика фільтраційної сушки сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований гидродинамики и кинетики фильтрационной сушки сырьевых материалов производства шлакового гравия. Исследовано влияние технологических параметров теплового агента на скорость фильтрационной сушки.

**Ключевые слова:** гидродинамика, кинетика, шлак, глина, влагосодержание, скорость фильтрационной сушки.

### Atamaniuk V.M., Barna I.R., Filipovuch I.V., Svishevskaya N.V. Hydrodynamics and kinetics of filtration drying of raw materials for production of slag gravel

In the article are the results of experimental and theoretical research in hydrodynamics and kinetics of filtration drying of raw materials for production of slag gravel. Researched is the influence of technological parameters of the thermal agent on rate of filtration drying.

**Keywords:** hydrodynamics, kinetics, slag, clay, moisture, rate of filtration drying.