

**УДК 66.045**

**В. М. АТАМАНЮК**, докт.техн.наук, проф., зав.каф., НУ “Львівська політехніка”, Львів

**І. Р. БАРНА**, асп., НУ “Львівська політехніка”, Львів

**І. Я. МАТКІВСЬКА**, асп., НУ “Львівська політехніка”, Львів

### **ТЕПЛОМАСООБМІН ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ СИРЦЕВИХ ГРАНУЛ ШЛАКОВОГО ГРАВІЮ**

В роботі наведені теоретичні і експериментальні дослідження тепломасообміну фільтраційного сушіння сирцевих гранул шлакового гравію. Запропоновано розрахункові залежності для визначення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі від теплового агенту до сирцевих гранул шлакового гравію.

**Ключові слова:** сирцеві гранули, дисперсний матеріал, стаціонарний шар, фільтраційне сушіння, тепломасообмін, коефіцієнт тепловіддачі, коефіцієнт масовіддачі.

В работе приведены теоретические и экспериментальные исследования тепломассообмена фильтрационной сушки сырцовых гранул шлакового гравия. Предложены расчетные зависимости для определения коэффициентов тепло- и массоотдачи от теплового агента к сырцовым гранулам шлакового гравия.

**Ключевые слова:** сырцовые гранулы, дисперсный материал, стационарный шар, фильтрационная сушка, тепломассообмен, коэффициент теплоотдачи, коэффициент массоотдачи.

Experimental and theoretical investigation of process of heat exchange during filtration drying of source granules of slag gravel is shown in work. Calculative dependences for researching of coefficients heat and mass transfer from heat agent to source granules of slag gravel is proposed.

**Keywords:** source granules, dispersion material, stationary layer, filtration drying, heat and mass transfer, heat transfer coefficient, mass transfer coefficient.

#### **Постановка проблеми**

Враховуючи істотне подорожчання паливних ресурсів, в Україні гостро стоїть питання про виробництво та використання теплоізоляційних матеріалів, що забезпечують зниження енерговитрат для опалення будинків, промислових будівель, теплових апаратів тощо. У той же час золи і шлаки теплових електричних станцій можна ефективно використовувати у виробництві різних будівельних матеріалів (зокрема теплоізоляційних), що підтверджується численними науковими дослідженнями і практичним досвідом. Перспективним напрямком утилізації золошлакових відходів є виробництво з них шлакового гравію. Технологія виробництва шлакового гравію передбачає попереднє сушіння сировини (шлаку та глини) та сирцевих гранул. На даний час сирцеві гранули сушать в сушильному барабані, який відноситься до малоефективного і громіздкого обладнання.

Одним із високоінтенсивних методів сушіння є фільтраційне, суть якого полягає у профільтровуванні теплового агенту крізь пористу структуру вологого

матеріалу в напрямку “шар матеріалу – перфорована перегородка”. Даний метод сушіння відповідає вимогам, які ставляться до сучасних технологій.

Для призначення оптимальних режимів фільтраційного сушіння сирцевих гранул необхідно визначити коефіцієнти тепло- і масообміну і їх залежність від швидкості фільтрування теплового агента. Інтенсивність процесу тепло- та масообміну між тепловим агентом і вологим матеріалом визначає тривалість процесу та енергозатрати на його реалізацію [1].

Тому, **метою** даної роботи є вивчення особливостей тепломасообміну під час фільтраційного сушіння сирцевих гранул.

**Сирцеві гранули** отримують шляхом гранулювання шихти, яка складається із подрібнених і висушених шлаку і глини. Усереднений діаметр сирцевих гранул шлакового гравію становить 12 мм. Вологість утворених сирцевих гранул становить приблизно 13 – 15%, тому згідно технологічного регламенту процесу їх необхідно сушити до вологості 2% перед випалом у печі.

#### **Аналіз останніх публікацій**

Дослідженням процесу тепломасообміну між твердими тілами і тепловим агентом присвячено ряд наукових робіт, зокрема [1 – 5]. В роботі [2], автор наводить методику розрахунку коефіцієнта тепловіддачі під час охолодження срібної кульки у рідкому середовищі на основі густини теплового потоку і температури на поверхні частинки. В роботах [1, 3 – 5] наведено результати дослідження тепломасообміну під час фільтраційного сушіння, узагальнення яких представлено у вигляді безрозмірних комплексів. Проте дані дослідження стосуються конкретних матеріалів та режимів тепломасообміну і застосувати їх для інших матеріалів є важко, внаслідок того, що форма, розміри і шорсткість зовнішньої поверхні досліджуваних частинок значно відрізняються від гранульованих частинок шлакового гравію.

#### **Експериментальна частина**

Під час фільтраційного сушіння сирцевих гранул тепловий агент фільтрується крізь стаціонарний шар матеріалу, при цьому теплота до поверхні гранул передається конвективно, а в самих гранулах – шляхом теплопровідності.

Для наукового обґрунтування режимів процесу фільтраційного сушіння сирцевих гранул, необхідним є дослідження впливу дійсної швидкості руху теплового агента на значення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі до сирцевих гранул, та встановлення залежностей, які б давали змогу розрахувати ці коефіцієнти для промислового обладнання за подібних умов.

Дослідження зовнішнього теплообміну між тепловим агентом сухими і вологими гранулами під час фільтраційного сушіння виконували за методикою та на установці, опис яких наведено в [6]. Для дослідження зовнішнього теплообміну висушену до постійної ваги наважку сухих сирцевих гранул завантажували в контейнер циліндричної форми, який виготовлений із теплоізоляційного матеріалу (рис. 1).

Для досягнення однакової температури верхніх і нижніх шарів сирцевих гранул та рівномірного фільтрування теплового агента по всій площині контейнера дослідження проводили в “короткому шарі” матеріалу, висота якого становила  $5 \cdot d_{ч}$ . На висоті 20 мм над матеріалом і 20 мм під перфорованою перегородкою встановлювали термопари для вимірювання температури теплового агента. Вимірювання температури проводилися автоматично за допомогою восьмиканального перетворювача температури ПТ-108 з виводом інформації на комп’ютер.

Температура теплового агента вимірювалась на виході з шару сирцевих гранул в шести точках: у центрі контейнера і на відстані 5, 10, 15, 20, 25, 30 мм від стінки і визначалась як середнє арифметичне з шести значень. Температура над шаром матеріалу підтримувалась постійною  $80^{\circ}\text{C}$  з точністю  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  за допомогою терморегулятора РТ-100 і двох термопар, які були розміщені над шаром матеріалу в різних точках (в центрі контейнера і 30 мм від його стінки).

Відомо [7], що фільтраційне сушіння носить зональний характер і в шарі одночасно існують сухий і вологий матеріал, який бере участь у теплообміні (сухий матеріал нагрівається від температури мокрого термометра до температури теплового агента) і на його нагрівання затрачається частина теплоти теплового агента. Тому для опису процесу фільтраційного сушіння сирцевих гранул шлакового гравію необхідно визначити коефіцієнти теплообміну між сухими та вологими гранулами.

### **Зовнішній теплообмін між тепловим агентом і сирцевими гранулами**

Для визначення усереднених коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агента до шару сухих сирцевих гранул, із заданою швидкістю і температурою профільтровували тепловий агент. Зафіксовані значення температури теплового агента на виході із шару сирцевих гранул наведені на рис. 2.

Значення коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$  для сухих сирцевих гранул розраховували на основі експериментальних даних наведених на рис. 2, згідно методики наведеної у [6]. Вважали, що температура теплового агента однакова з усіх сторін частинки. Приймали, що розподіл температурного поля по об’єму частинки має параболічний характер. Кількість теплоти, яка залишається в шарі гранул розраховували згідно теплового балансу.

Дослідження теплообміну сирцевих гранул під час фільтраційного сушіння проводили в “короткому шарі”, щоб виключити переміщення зони масообміну [7]. Сушіння проводили шляхом профільтрування теплового агента в напрямку “вологий матеріал – перфорована перегородка” протягом 15с. Час між завершенням сушіння і його зважуванням складав не більше 10 – 15с. Для

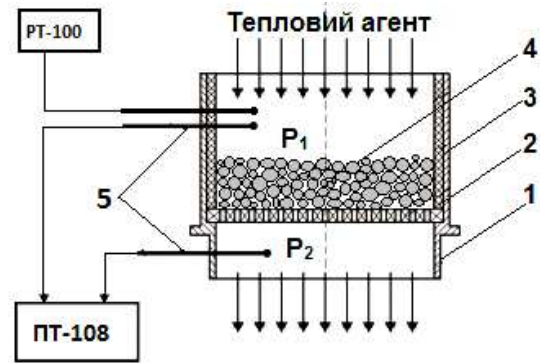


Рис. 1. Схема контейнера для дослідження процесів тепло- і масообміну: 1 – корпус контейнера; 2 – перфорована перегородка; 3 – теплоізоляційна вставка; 4 – сирцеві гранули; 5 – термопара ХК

уникнення випаровування вологи під час зважування контейнер з матеріалом закривали кришкою.

Під час фільтраційного сушіння відбувається одночасно передача тепла від теплового агента до поверхні висушуваного матеріалу та передача вологи з поверхні частинок до теплового агента. Обидва процеси належать до конвективних: конвективний теплообмін та конвективний масообмін.

Коефіцієнти тепловіддачі від теплового агента до вологих сирцевих гранул визначали із залежності наведених у [8]:

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} \cdot r = \alpha \cdot F \cdot \left( \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вих}}}{2} - t_{\text{м.т}} \right), \quad (1)$$

де  $\Delta W$  – кількість вологи, кг;  $\Delta \tau$  – час проведення експерименту, с;  $r$  – питома теплота пароутворення, Дж/кг;  $F$  – ефективна поверхня гранул, яка омивається тепловим агентом,  $\text{м}^2$ ;  $t_{\text{вх}}$ ,  $t_{\text{вих}}$ ,  $t_{\text{м.т}}$  – температура теплового агента на вході, виході із шару і мокрого термометра відповідно,  $^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 3 наведено залежність коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$  від дійсної швидкості фільтрування теплового агента для сухих і вологих сирцевих гранул. Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  для вологих сирцевих гранул, аналогічно як і для сухих, лінійно зростає з ростом дійсної швидкості руху теплового агента, однак для вологого матеріалу коефіцієнт тепловіддачі є приблизно на 40% більшим, ніж для сухого матеріалу, за однакових гідродинамічних умов, що пояснюється кращою теплопровідністю вологого матеріалу. Отримані значення коефіцієнтів тепловіддачі є усередненими по шару.

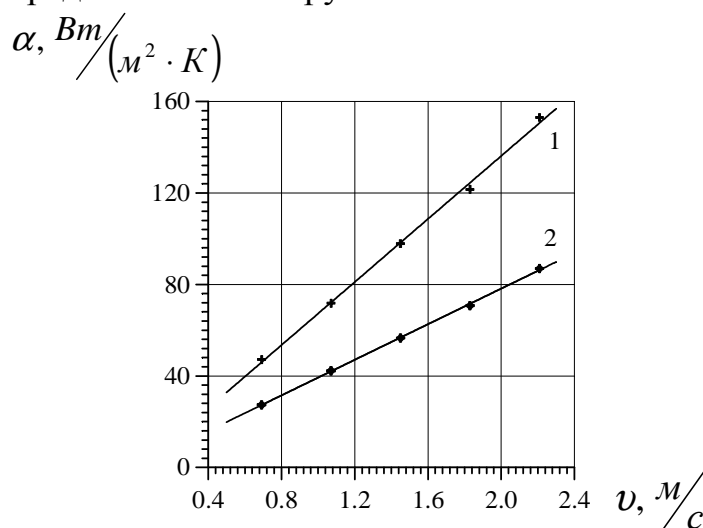


Рис. 3. Залежність коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha$  від дійсної швидкості  $v$  фільтрування теплового агента крізь шар сирцевих гранул: 1 – вологі; 2 – сухі

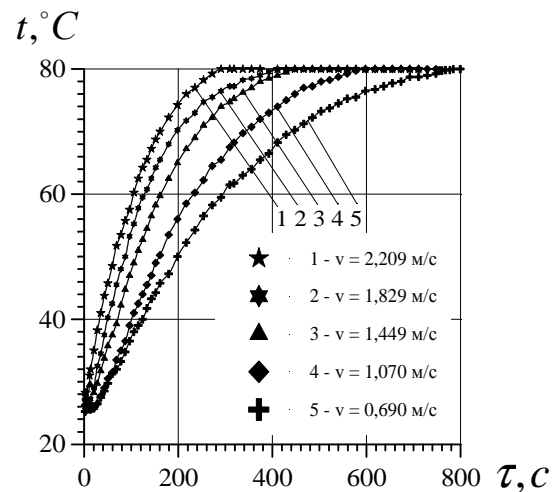


Рис. 2. Зміна температури теплового агента на виході із шару сухих сирцевих гранул

### Зовнішній масообмін під час фільтраційного сушіння сирцевих гранул

Під час фільтраційного сушіння сирцевих гранул інтенсивність масообміну визначається гідродинамікою омивання вологих гранул тепловим агентом і його сушильним потенціалом, а також характером зв'язку вологи з твердим матеріалом. Дослідження масообміну сирцевих гранул аналогічно, як і теплообміну також проводили в “короткому шарі” протягом 15с.

Коефіцієнти масовіддачі під час фільтраційного сушіння визначали із залежності наведеної у [8]:

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} = \beta \cdot F \cdot \left( x_{\text{нас}} - \frac{x_{\text{нас}} + x_0}{2} \right) \cdot \rho, \quad (2)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі,  $\text{м/с}$ ;  $x_0, x_{\text{нас}}$  – відповідно початковий вологовміст теплового агента і в стані насичення,  $\text{кг } H_2O / \text{кг сух.м.}$ ;  $\rho$  – густина теплового агента,  $\text{кг/м}^3$ .

Експериментальні значення коефіцієнту масовіддачі  $\beta$  від дійсної швидкості  $v$  фільтрування теплового агента наведено на рис. 4.

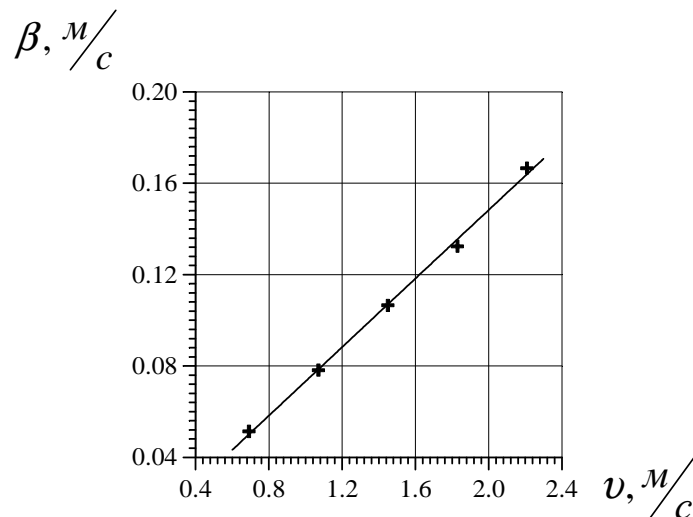


Рис. 4. Залежність коефіцієнту масовіддачі  $\beta$  від дійсної швидкості  $v$  фільтрування теплового агента крізь шар сирцевих гранул

### Узагальнення результатів дослідження тепло- і масообміну між тепловим агентом і сирцевими гранулами шлакового гравію

Узагальнення експериментальних результатів наведених на рис. 3 і 4 проводили за рівнянням [8]:

$$Nu = A \cdot Re_e^n \cdot Pr^m \quad (3)$$

та

$$Sh = A \cdot Re_e^n \cdot Sc^m, \quad (4)$$

де  $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}$  – критерій Нусельта;  $A$  – коефіцієнт, який визначають експериментально;

$Re_e = \frac{v \cdot d_e}{\nu}$  – критерій Рейнольдса;  $Pr = \frac{\nu}{a}$  – критерій

Прандтля;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $m^2/c$ ;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності,  $m^2/c$ ;  $v$  – дійсна швидкість фільтрування теплового агенту,  $m/c$ ;  $d_e$  – еквівалентний діаметр каналів між частинками,  $m$ ;  $n$  і  $m$  – показники степеня, які визначають експериментально;  $Sh = \frac{\beta \cdot d_e}{D}$  – критерій Шервуда;  $D$  – коефіцієнт дифузії водяної пари у повітря,  $m^2/c$ ;  $Sc = \frac{\nu}{D}$  – критерій Шмідта.

Враховуючи, те що фізичні параметри повітря змінюються у вузькому діапазоні, згідно з рекомендаціями [8] приймаємо:  $Nu \approx Pr^{0,33}$  та  $Sh \approx Sc^{0,33}$ .

Для визначення невідомих коефіцієнтів "А" та "n" в залежності (3) і (4) експериментальні дані представляли у логарифмічній системі координат (рис. 5) у вигляді:  $\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re)$  та  $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$ , кожна точка є середнім арифметичним значенням мінімум трьох експериментів.

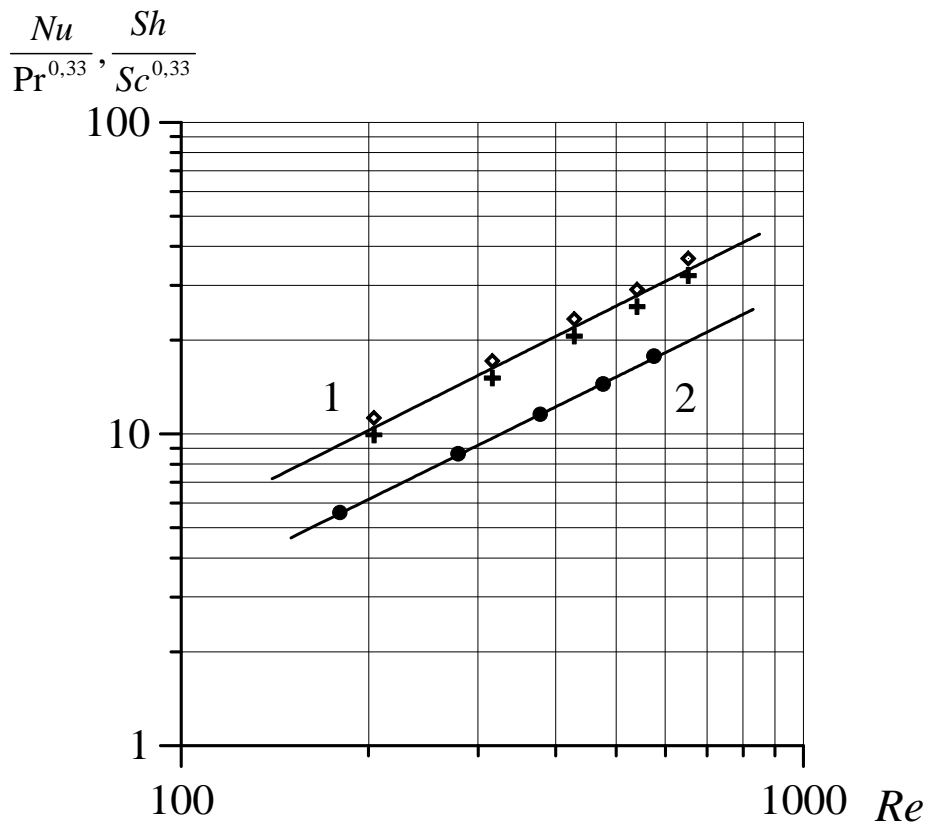


Рис.5. Залежність  $\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re)$  та  $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$  (1) для вологих та  $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$  (2) для сухих сирцевих гранул ( $H=72$  мм) за температури  $80^\circ C$

Визначивши із графічної залежності рис. 5 невідомі коефіцієнти "А" та "n" рівняння (3), (4) можна представити у вигляді:  
 - для сухих сирцевих гранул

$$Nu = 0,06 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \quad (5)$$

- для вологих сирцевих гранул

$$Nu = 0,06 \cdot Re \cdot Pr^{0,33} \quad (6)$$

$$Sh = 0,06 \cdot Re \cdot Sc^{0,33} \quad (7)$$

Узагальнення експериментальних даних теплообміну і масообміну за допомогою критеріальних залежностей показало, що для обох випадків рівняння в безрозмірних комплексах (6) та (7), характеризуються однаковими показниками степеня біля числа Рейнольдса, що вказує на однаковий вплив гідродинаміки на ці коефіцієнти.

Абсолютне значення максимальної відносної похибки між експериментальними значеннями і розрахованими за залежністю (5) – (7) не перевищує  $\pm 10,4 \%$ , в межах чисел Рейнольдса  $180 \leq Re_e \leq 650$ .

### Висновки

Отримані розрахункові залежності (5) – (7) дають змогу визначити з достатньою точністю коефіцієнти тепловіддачі і масовіддачі під час фільтраційного сушіння в стаціонарному шарі сирцевих гранул, а також прогнозувати затрати теплової енергії, розрахувати оптимальні параметри процесу, та експлуатаційні затрати на сушіння і визначити основні конструктивні розміри сушильної установки на етапі її проектування.

**Список літератури:** 1. Атаманюк В.М. Теплообмін в стаціонарному шарі сухого дрібнодисперсного капілярно-пористого матеріалу [Текст] / В.М. Атаманюк, Д.П. Кіндзера, І.О. Гузьова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий // Харків: – 2010, – 3/7(45), – С.21-25. 2. Зотов Е.Н. Методика определения коэффициента теплоотдачи охлаждающих сред в условиях нестационарного теплообмена [Текст] / Е.Н. Зотов, А.А. Москаленко, Л.Н. Проценко, О.В. Разумцева // Промышленная теплотехника.–К.: – 2003, Т. 25, – №4, – С.315-317. 3. Симак Д.М. Тепломасообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів, що протікає у першому періоді [Текст] /Д.М. Симак, В.М. Атаманюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий // Харків: –2011, – 1/9 (49), – С. 23-26. 4. Атаманюк В.М. Зовнішній тепло- і масообмін під час фільтраційного сушіння подрібненої енергетичної верби [Текст] / В.М. Атаманюк, Я.М. Гумницький, М.І. Мосюк // [Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2011, – № 700, – С. 290-296.](#) 5. Атаманюк В.М. Теплообмін під час фільтраційного сушіння гранульованого і осадженого поліакриламідю [Текст] / В.М. Атаманюк, М.С. Мальований, В.П. Дулеба // Науковий вісник НЛТУ України. – 2010. – Вип. 20.6 –С.113-121. 6. Атаманюк В.М. Зовнішній тепломасообмін під час фільтраційного сушіння [Текст] /В.М. Атаманюк/ Промышленная теплотехника. –К.: –2006, Т. 28, –№5, –С.47-54. 7. Ханьк Я.Н. Фильтрационная сушка плоских проницаемых материалов [Текст] : дис... док. техн. наук: 05.17.08 /Я.Н. Ханьк . –Львов, 1992. – 426 с. 8. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии./Н. И.Гельперин / В двух книгах. – М.: Химия, 1981. –812 с.

Поступила в редколлегию 12.04.2012