

М. О. Псюк, З. Я. Гнатів, Т. А. Кузьмінчук, А. Р. Денисюк

Національний університет "Львівська політехніка",

кафедра хімічної інженерії

zoriana.y.hnativ@lpnu.ua

ГІДРОДИНАМІКА ФІЛЬТРУВАННЯ ТЕПЛОГО АГЕНТУ КРІЗЬ СТАЦІОНАРНИЙ ШАР ГРАНУЛЬОВАНОЇ КРЕЙДИ

<https://doi.org/10.23939/ctas2023.01.018>

Наведено експериментальні результати гідродинаміки фільтрування теплового агента в стаціонарному шарі гранульованої крейди. В результаті проведених експериментальних досліджень були отримані нові розрахункові залежності для визначення гідравлічного опору шару гранульованої крейди, залежно від швидкості фільтрування теплового агента і висоти стаціонарного шару матеріалу. Також запропоновано розрахункові залежності, що дозволяють визначити значення коефіцієнта гідравлічного тертя від числа Рейнольдса. Отримані залежності дозволяють визначити втрати тиску в шарі матеріалу під час проектування обладнання та прогнозувати економічну доцільність модернізації виробничих процесів.

Ключові слова: фільтраційне сушіння; гранульована крейда; гідродинаміка; тепловий агент.

Вступ

Гранульована крейда (карбонат кальцію) широко застосовується у хімічній, харчовій промисловості, а також у будівництві, виробництві побутових хімічних речовин та пластмас.

У будівництві: гранульована крейда використовується як наповнювач для фарб та покриттів. Вона також може бути використана для зменшення кислотності бетону та як компонент для виробництва штукатурки.

У сільському господарстві: гранульована крейда (ГК) застосовується як розкислювач для підвищення родючості ґрунту. Використання гранульованого карбонату кальцію для нормалізації рівня кислотності ґрунту широко відоме різним господарствам і активно застосовується, оскільки має ряд переваг. Ступеневе вивільнення гранул крейди дозволяє поступово розкислювати ґрунт, уникнувши руйнування структури ґрунту. Гранульована крейда має вищу ефективність, у порівнянні з іншими матеріалами, такими як вапно, а також крейда є стійкішою до вимивання. Важливим фактором є також її екологічність, оскільки ГК є екологічно чистим матеріалом і не має негативного впливу на навколишнє середовище [1].

Під час виробництва багатьох мінеральних добавок та добрив використовується сировина з

значним вмістом вільної води. Готова продукція поставляється споживачу в порошкоподібному або в гранульованому вигляді, і однією з найважливіших завершальних стадій технології є процес сушіння. Як відомо, виготовлення гранульованих мінеральних добрив та добавок, зокрема гранульованої крейди, є досить енергоємним та дорогим процесом, що тісно пов'язаний з великими витратами природного газу та теплової енергії.

Сушіння переважно проводять із використанням сушильних газів. У великомасштабних сушильних агрегатах існує варіант комплексів підготовки сушильних газів та сушіння і грануляції мінеральних добрив [2]. Процес сушіння є найбільш енергоємним серед всіх технологічних процесів і тому, вибираючи технологію сушіння, особливо увагу доцільно приділити енергетичним показникам процесу. Раніше оцінка енергетичних показників апарату для сушіння включала лише оцінку інтенсивності роботи. Однак при сучасному темпі розвитку науки і техніки, з урахуванням економіки і потреб ринку, доцільно доповнити поняття ефективності такими параметрами: економічність, якість одержуваного продукту, безпека (зокрема екологічна і виробнича) [3].

У промисловості для сушіння дисперсних матеріалів використовуються різні типи сушильного обладнання. Найпоширенішими є сушарки

колонного типу і барабанні. Барабанні сушарки, зазвичай, використовують для сушіння різноманітних гранульованих матеріалів. До недоліків таких агрегатів можна зарахувати пошкодження твердих частинок, низький коефіцієнт корисної дії, високу металоємкість та низьку продуктивність. Останнім часом популярності набули апарати з псевдозрідженим шаром. Їхня перевага полягає в мінімальному градієнті температури у всьому об'ємі апарату, де відбувається сушіння та активному тепломасообміні. Проте сушарки такого типу мають значний гідравлічний опір, а також можливе подрібнення частинок або їх винесення з об'єму апарату [4].

Для сушіння дисперсних матеріалів можливе застосування фільтраційного сушіння. Цей спосіб має високу інтенсивність, низьку температуру процесу, що суттєво економить енергію та є екологічним. Відомо, що таке сушіння є ефективнішим та дешевшим за конвективне.

Фільтраційний метод сушіння має низьку перевагу, порівняно з іншими методами, а саме: частина вологи видаляється механічно (в деяких матеріалах до 70 %), без затрат теплової енергії на фазове перетворення вологи на пару; реальна швидкість омивання тепловим агентом вологих частинок є значно більшою, ніж при конвективному сушінні, відповідно, коефіцієнти тепломасовіддачі та коефіцієнти дифузії будуть також більшими; втрати тиску в стаціонарному шарі ГК під час фільтраційного сушіння є меншими, порівняно із сушінням у киплячому шарі; потенціал сушильного агента використовується практично повністю, що, своєю чергою, інтенсифікує процес сушіння [5, 6]. Аналізуючи літературні джерела [7–10], встановлено, що першим етапом дослідження фільтраційного сушіння є дослідження гідродинаміки стаціонарного шару дисперсного матеріалу.

Мета статті – теоретичний аналіз і експериментальне дослідження гідродинамічних характеристик фільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар гранульованої крейди і подання результатів експериментальних досліджень у безрозмірній формі.

Матеріали і методи досліджень

Як об'єкт дослідження використана гранульована крейда для сільськогосподарського використання ТУ У 20.1-37012467-001:2016. Гра-

нулометричний склад ГК визначали ситовим методом [11], результати наведені на рис. 1. Гідродинаміку процесу проходження теплового агенту крізь шар ГК досліджували на експериментальній установці фільтраційного сушіння, за методиками, наведеними у роботі [12]. Висота шару матеріалу змінювали в межах 0,12–0,36 м, а швидкість теплового агенту в межах 0,1–0,45 м/с.

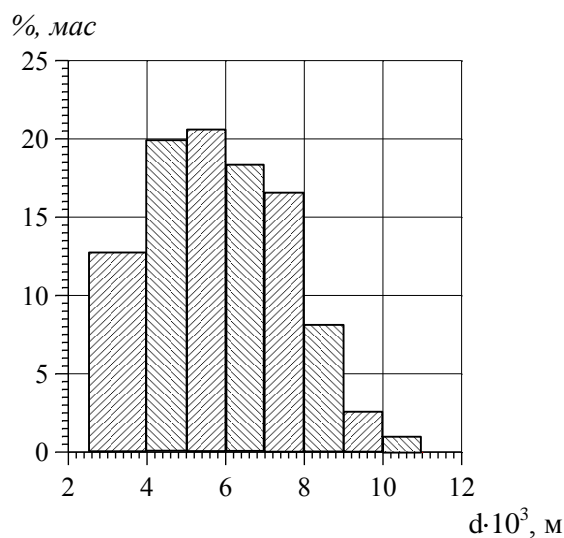


Рис. 1. Гранулометричний склад ГК

Результати досліджень та їх обговорення

Рушійною силою процесу фільтрування теплового агенту крізь шар ГК є перепад тисків, тому першим етапом дослідження фільтраційного сушіння ГК є експериментальне визначення залежності втрат напору у стаціонарному шарі від швидкості фільтрування теплового агенту. Перепад тисків визначає швидкість фільтрування газового потоку крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу і, відповідно, величини коефіцієнтів тепло- і масовіддачі, а також товщину гідродинамічного, теплового і дифузійного пограничних шарів, які, своєю чергою, впливають на інтенсивність тепло- і масоперенесення під час фільтраційного сушіння.

Результати експериментальних досліджень втрат тиску як функції фіктивної швидкості фільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар ГК наведено на рис. 2.

Як видно з рис. 2, зі збільшенням висоти шару гранульованої крейди, гідравлічний опір зростає, і його значення є відносно невеликим, що є позитивним для організації процесу сушіння

ГК фільтраційним методом. Також варто зазначити, що залежність втрат тиску від фіктивної швидкості має параболический тип, та чим більша витрата теплового агенту, тим більший кут нахилу кривої до осі абсцис.

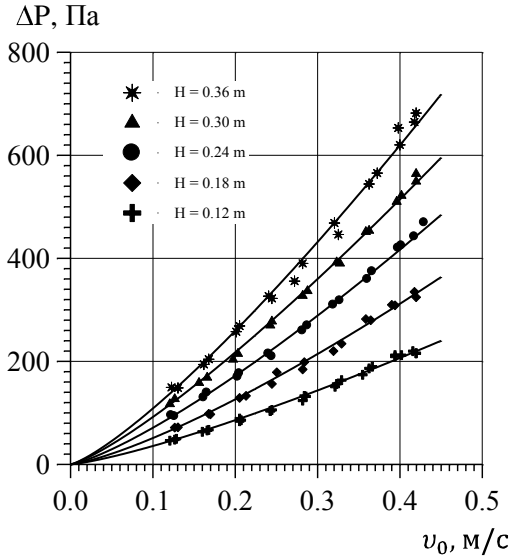


Рис. 2. Залежність втрати тиску ΔP у стаціонарному шарі ГК від фіктивної швидкості для різних висот шару матеріалу H

Для прогнозування втрат тиску в стаціонарному шарі матеріалу у технічній літературі використовують модифіковане двочленне рівняння Ергана, яке лінеаризують відносно фіктивної швидкості фільтрування газового потоку у вигляді:

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

де H – висота шару, м; ΔP – втрати тиску в шарі матеріалу, Па; ρ – густина газового потоку, кг/м³; $\varepsilon_{ш}$ – пористість шару, м³/м³; a – активна питома поверхня, м²/м³; v_0 – фіктивна швидкість фільтрування теплового агенту, м/с; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості газового потоку, Па·с; d_c – усереднений розмір частинки, м.

Позначимо:

$$A \cdot \frac{9 \cdot \mu}{8 \cdot d_c^2} \cdot \frac{1 - \varepsilon_{ш}^2}{\varepsilon_{ш}^3} = A^*; \quad (2)$$

$$B \cdot \frac{3 \cdot \rho}{4 \cdot d_c} \cdot \frac{1 - \varepsilon_{ш}}{\varepsilon_{ш}^3} = B^*. \quad (3)$$

Тоді рівняння набуде вигляду:

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

Значення невідомих коефіцієнтів A^* та B^* можна визначити тільки експериментальним методом. На практиці також рекомендують використовувати напівемпіричну формулу Ергана, яка дає змогу в широкому діапазоні чисел Рейнольдса і усереднених діаметрів частинок, щоб приблизно розрахувати втрати тиску в шарі дисперсного матеріалу:

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150 \cdot \mu \cdot v_0}{d_c^2} \cdot \frac{1 - \varepsilon_{ш}^2}{\varepsilon_{ш}^3} + \frac{1,75 \cdot \rho \cdot v_0^2}{d_c} \cdot \frac{1 - \varepsilon_{ш}}{\varepsilon_{ш}^3}. \quad (5)$$

Залежність 5 є справедливою для руху потоку в напрямку: перфорована перегородка – шар дисперсного матеріалу. Як стверджує автор [13], вказану залежність використати для прогнозування втрат тиску під час руху газового потоку в полідисперсному шарі дисперсного матеріалу, що утворений частинками неправильної форми, які мають внутрішню пористу структуру, є неможливо, з огляду на велику похибку між розрахованими та експериментальними значеннями.

Побудуємо залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ та порівняємо результати експериментального визначення втрат (пряма 2) тиску з теоретичними, розрахованими за рівнянням 5 (пряма 1) (рис. 3).

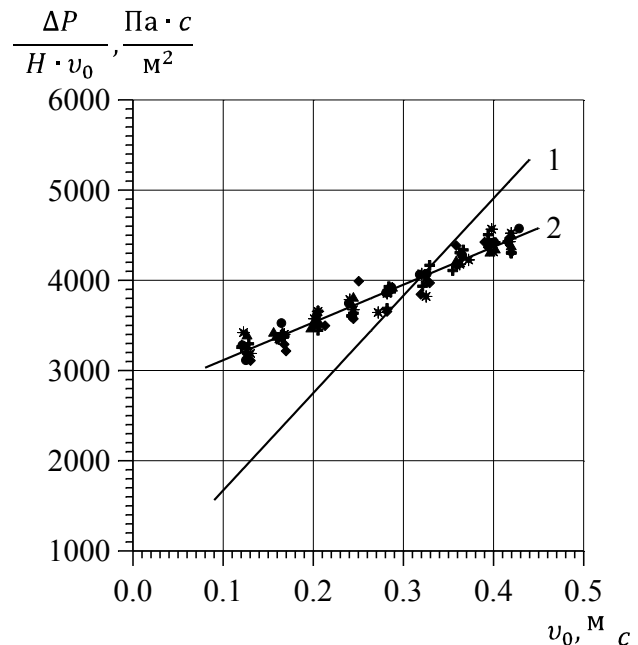


Рис. 3. Графічна залежність $\Delta P/(H \cdot v_0)$ від фіктивної швидкості (позначення відповідають рис. 2)

Аналізуючи графік 3, бачимо суттєве розходження фактичних значень втрат напору в шарі ГК із теоретично розрахованими. З графічної

залежності (рис. 3) коефіцієнт A^* визначали за відрізком, що відтинає пряма на осі ординат, а коефіцієнт B^* – за тангенсом кута нахилу прямої до осі абсцис. Отже, визначивши невідомі коефіцієнти, рівняння (4) можна подати у такому вигляді:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = 2700 + 4200 \cdot v_0 \quad (6)$$

В розрахунковій залежності (6) коефіцієнт гідравлічного тертя виражений у неявній формі. Вона є справедливою лише для обладнання на якому проводили дослідження за вказаних умов експерименту та за значень швидкості потоку 0,1–0,45 м/с та висот шару 0,12–0,36 м.

Для поширення використання результатів експериментальних досліджень під час проектних розрахунків промислових установок фільтраційного сушіння необхідно визначити коефіцієнт гідравлічного тертя λ у явній формі. Коефіцієнт опору λ можна визначити, беручи за основу залежність Дарсі-Вайсбаха [13] і виразивши складову $\frac{\Delta P \cdot \varepsilon_m^2}{\rho \cdot v_0^2}$ як критерій Ейлера. Таким чином, залежність для визначення коефіцієнту опору визначається так:

$$\lambda = 2 \frac{d_e}{H} \cdot Eu = f Re \quad (7)$$

де d_e – еквівалентний діаметр каналів, крізь який рухається тепловий агент, м.

Для використання безрозмірної форми узагальнення результатів необхідно знайти коефіцієнти A , x та y із залежності:

$$Eu = A \cdot Re^{-x} \cdot \left(\frac{H_e}{d_e}\right)^y \quad (8)$$

або:

$$Eu = A^* \cdot Re^{-x} \quad (9)$$

де

$$A^* = A \cdot \left(\frac{H_e}{d_e}\right)^y \quad (10)$$

Щоб визначити невідомий коефіцієнт y , побудовано залежність критерію Ейлера від числа Рейнольдса $Eu = f(Re)$.

Як видно з рис. 4, криві мають вигляд гіперболи, і їх можна апроксимувати степеневою функцією $Eu = A^* \cdot Re^{-0,73}$. Графічна залежність дає змогу прогнозувати втрату тисків за відомих режимів руху теплового агенту крізь стаціонарний шар гранульованої крейди різної висоти. Для визначення невідомого коефіцієнту A з рівняння 8 та встановлення залежності критерію Ейлера від геометричного симплексу H/d_e визначимо

значення коефіцієнту A^* для різних висот H та значень геометричного симплексу, відповідно (табл. 1).

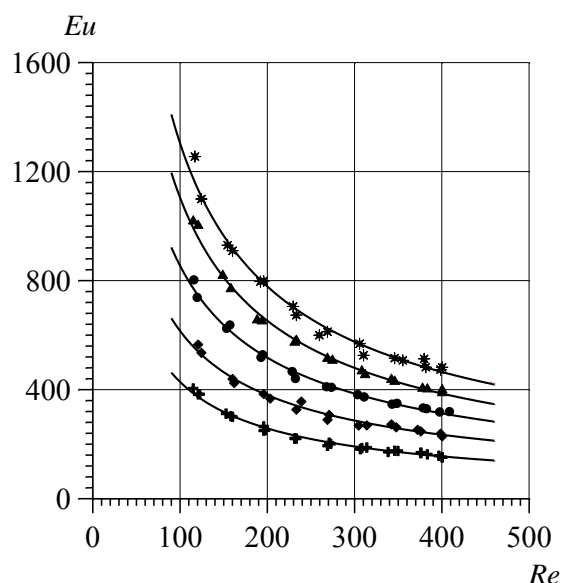


Рис. 4. Залежність числа Ейлера від чисел Рейнольдса для ГК (позначення відповідають рис. 2)

Таблиця 1

Значення коефіцієнту A^* для різних значень висоти шару та відношення H/d_e

H, m	H/d_e	A^*	x
0,120	21,16	12500	0,73
0,180	31,75	18100	
0,240	42,33	24600	
0,300	52,91	31200	
0,360	63,49	37400	

За даними табл. 1 побудуємо графічну залежність (рис. 5).

Залежність A^* від геометричного симплексу H/d_e виражається прямою і значення коефіцієнту A буде рівне кутовому коефіцієнту ($\tan \alpha$), а степінь біля симплексу буде рівний 1, тоді рівняння (10) можна записати як:

$$A^* = 575 \cdot \frac{H}{d_e} \quad (11)$$

а рівняння (8) тоді представимо у вигляді:

$$Eu = 575 \cdot Re^{-0,73} \cdot \frac{H}{d_e} \quad (12)$$

Тоді рівняння (7) для визначення коефіцієнту опору λ , враховуючи рівняння (12), можна записати так:

$$\lambda = 1150 \cdot Re^{-0,73} \quad (13)$$

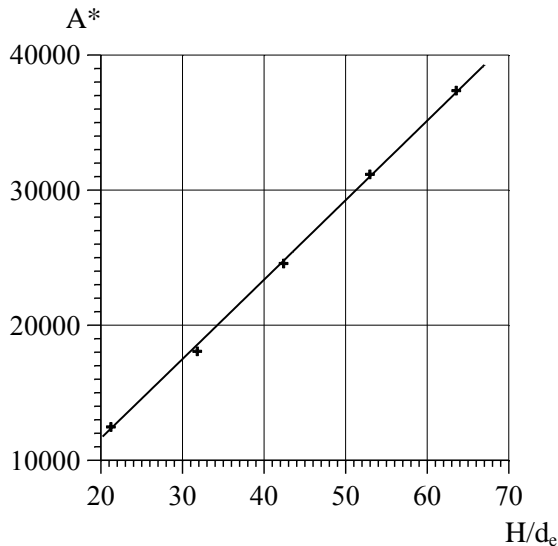


Рис. 5. Залежність значення коефіцієнту A^* від геометричного симплексу H/d_c

Також побудована кореляційна залежність (рис. 6) для порівняння експериментально визначених значень ΔP_{exp} та теоретично розрахованих втрат тиску ΔP_{theor} .

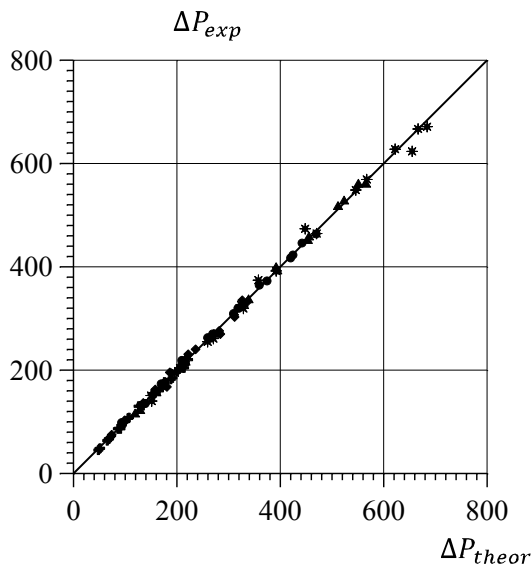


Рис. 6. Кореляційна залежність між розрахованими із залежності (12) значеннями та експериментальними даними (позначення відповідають рис. 2)

Максимальне значення відносної похибки між теоретичними та експериментальними даними складає 8 %, що підтверджує правильність визначення залежності та дозволяє використовувати отримані залежності для подальшого розрахунку витрат тиску та проектування сушильного обладнання на основі отриманих рівнянь.

Висновки

Досліджено гідродинаміку фільтрування газового потоку крізь шар гранульованої крейди і визначено невідомі коефіцієнти модифікованого рівняння Ергана. Отримано розрахункову залежність у безрозмірних комплексах $Eu = 575 \cdot Re^{-0.73} \cdot H/d_c$, яка буде справедливою в межах значень чисел Рейнольдса $100 \leq Re \leq 400$. Ця залежність дасть змогу прогнозувати втрату тиску під час фільтраційного сушіння. Визначений коефіцієнт опору $\lambda = 1150 \cdot Re^{-0.73}$, в тих самих межах значень числа Рейнольдса, дозволить прогнозувати енергетичні затрати на створення перепаду тисків і на етапі проектування сушильного обладнання оцінити економічну доцільність використання цього методу. Встановлено що відносна похибка не перевищує 8 %, що прийнятно для проектних розрахунків сушильного обладнання.

References

1. Tkachenko, M., Borys, N., Kovalenko, Y. (2020). The effectiveness of granular chalk use for growing winter wheat on Grey Forest Soil. *Agrobiologîa*, 1(157), 181–191.
2. Monastyrskiy, D. I., Kulikova, M. A., Kolesnikova, T. A., Volchek, A. P. (2022). *Studies of the features of vacuum drying of organic-mineral fertilizers. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 981(2), 022015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/2/022015>.
3. Zamytsky, O. V., Omelchuk, D. V. (2018). Current methods of drying fine materials. *Mining Journal of Kryvyi Rih National University*, (103), 190–196.
4. Fesenko, A. V. (2006). *Improving the efficiency of drying process of crops*: dis. kan. tehn. sciences: 05.05.11/ Andrey Fesenko. Lugansk, 170.
5. Susianto, S., Altway, A., Kuswandi, K., Margono, M. (2010). Effect of Particle Size Distribution on Ammonium Sulphate Dried in a Rotary Dryer. *IPTEK: The Journal for Technology and Science*. <https://doi.org/10.12962/j20882033.v2i1i3.37>.
6. Beigi, S., Sobati, M. A., Jahanbakhsh, S. (2017). Drying of calcium carbonate in a batch spouted bed dryer: optimization and kinetics modeling. *Journal of Particle Science & Technology*, 3(2), 89–99. <https://doi.org/10.22104/jpst.2017.2257.1087>.
7. Kindzera, D. P., Khanyk, Ya. M., Atamaniuk, V. M. (2002). Zernystyi material. *Hidrodynamika polidispersnoho sharu. Khimichna promyslovist Ukrainy*, (6), 38–42.
8. Atamaniuk, V. M. (2004). Filtratsiine sushinnia. *Hidrodynamichniy opir polidispersnoho sharu zernystoho materialu. Khimichna promyslovist Ukrainy*, (6), 47–51.
9. Atamaniuk, V. M. (2006). *Hidrodynamika filtratsiinoho sushinnia dyspersnoho materialu. Promyslova hidravlika i pnevmatyka: vseukr. nauk.-tehn. zhurnal*, 1(11), 12–17.

10. Atamaniuk, V. M., Humnytskyi, Ya. M. (2009). Hidrodynamika statsionarnoho sharu tekhnichnoho vuhletsiiu. *Vostochno-Evropskyi zhurnal peredovukh tekhnolohyi*, 5/5(41), 29–34.

11. *Mala hirnycha entsyklopediia*: u 3 t. (2013). za red. V. S. Biletskoho. T. 3. Dnipro: Skhidnyi vydavnychiy dim.

12. Atamaniuk, V., Humnytskyi, Ya. (2013). *Naukovi osnovy filtratsiinoho sushinnia dyspersnykh materialiv*. Lviv: Vyd-vo Lviv. politekhniky, 255.

13. Atamaniuk, V. M., Kindzera, D. P., Hosovskiy, R. R. (2012). Rozrakhunok koefitsiienta hidravlichnoho oporu pid chas rukhu teplovoho ahenta kriz statsionarnyi shar podribnenykh stebel soniashnyka. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 22(9), 112–118.

M. O. Psiuk, Z. Ya. Hnativ, T. A. Kuzminchuk, A. R. Denysiuk

Lviv Polytechnic National University,
Department of Chemical Engineering

HYDRODYNAMICS OF FILTRATION OF HEATING AGENT THROUGH STATIONERY LAYER OF BEETPULP

The experimental results of the hydrodynamics of filtration of the thermal agent in a stationary layer of granular chalk are given. As a result of the conducted experiments, new calculation dependencies were obtained for determining the hydraulic resistance of a layer of granular chalk depending on the filtering speed of the heat agent and the height of the material layer. Calculation dependencies for determining the coefficient of hydraulic friction were also proposed and its dependence on the Reynolds number was established. This will make it possible to determine pressure losses in the material layer during equipment design and the economic feasibility of modernizing production processes.

Key words: filtration drying; granular chalk; hydrodynamics; heat agent.