

ГІДРОДИНАМІКА СТАЦІОНАРНОГО ШАРУ ЗАЛІЗНОГО КУПОРОСУ

Цюра Н.Я., Атаманюк В.М., д-р. техн. наук, професор
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

У статті представлено критеріальні залежності, отримані на основі результатів експериментальних і теоретичних досліджень гідродинаміки руху теплового агента крізь шар кристалів залізного купоросу

The article presents the dimensionless dependences obtained on the basis of the results of experimental and theoretical studies of the hydrodynamics of the transfer of the heat agent through the layer of crystals of ferrous sulfate.

Ключові слова: залізний купорос, стаціонарний шар, фільтраційне сушіння, гідродинаміка.

Вступ. Залізний купорос (феруму (II) сульфат гептагідрат - $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) – кристали світло-зелено-блакитного кольору, які добре розчиняються у воді. Застосовується у багатьох галузях народного господарства, зокрема в хімічній (для отримання феррону та ферро-гіпсу, очищення промислових та стічних вод від хромових та ціаністих солей, приготуванні мінеральних фарб, виробництві залізо-нікелевих акумуляторів, для консервування дерева), в гірничо-збагачувальній (для збагачення вугілля, вилучення корисних компонентів з руд), будівельній (під час виготовлення будівельних плит, теплової ізоляції хімічної апаратури), сільському господарстві (як популярний інсектицидний та фунгіцидний засіб, мінеральне добриво), медичній (для лікування і профілактики залізодефіцитної анемії) тощо.

Залізний купорос у великих кількостях утворюється як побічний продукт виробництва Титану (IV) оксиду з титанового концентрату або титанових шлаків сульфатним способом [1–6]. На сьогоднішній день на ВАТ «Суміхімпром» цих відходів накопичено більше 1 млн. т., під звалище яких зайнято понад 1,2 га орної землі. Тому використання відходів виробництва Титану (IV) оксиду як вторинної сировини для виробництва залізно-оксидних пігментів є актуальною задачею.

Постановка проблеми. На сьогодні відомі різні способи утилізації та переробки відходів виробництва діоксиду титану, зокрема залізного купоросу. Одним із напрямів використання залізного купоросу є виробництво залізооксидних пігментів. Дана технологія передбачає висушування та прожарювання купоросу за різних температур, часто з додаванням модифікаторів, з метою отримання пігментів різних кольорів. Внаслідок того, що сировина зберігається на відкритих площадках і має високу вологість (25–30 %), прожарювання її за температури 800–900°C призводить до утворення твердої спеченої маси, що стає причиною неоднорідності готового продукту. Щоби запобігти утворенню спечених грудочок сировину висушують за температури 200–300°C. Оскільки остання молекула видаляється дуже складно і за температури 450–550°C, тому обмежуються одержанням моногідрату $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, що містить до 10,6 % H_2O .

Сушіння залізного купоросу є доволі складним та енергоємним технологічним процесом, який в більшості випадків здійснюють у барабанних сушарках, які є великогабаритними, малоефективними та потребують встановлення очисного обладнання. Одним із високоінтенсивних процесів сушіння вважається фільтраційне, суть якого полягає у профільтровуванні теплового агента крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу під дією перепаду тисків. Тепловий агент, фільтруючись крізь пористу структуру шару, механічно видаляє частину вологи, яка утримується силами поверхневого натягу без затрат теплової енергії, а кількість цієї вологи в окремих випадках може становити до 70 % від початкової вологості матеріалу. Однак на створення перепаду тисків затрачається енергія і її величина залежить від фізико-механічних характеристик матеріалу, висоти стаціонарного шару дисперсного матеріалу та швидкості фільтрування, тому важливим є дослідження гідродинаміки стаціонарного шару.

Аналіз останніх джерел та публікацій. В сучасних джерелах літератури міститься значний обсяг інформації щодо дослідження гідродинаміки стаціонарних зернистих шарів різних дисперсних матеріалів, адже велика кількість технологічних процесів в промисловості пов'язана з рухом рідких чи газових середовищ крізь такі шари (адсорбція, фільтрування крізь зернисті фільтри, рух рідин та газів крізь насадкові апарати під час ректифікації чи абсорбції тощо). До них належить і процес фільтраційного сушіння, який має багато переваг перед класичними методами сушіння дисперсних матеріалів, частка яких сягає понад 80% від усіх матеріалів, що підлягають висушуванню. Узагальнення результатів гідродинамічних досліджень більшість авторів здійснюють у безрозмірній формі або визначають коефіцієнт гідралічного

опору шару та залежність Дарсі – Вейсбаха. В табл. 1 і табл. 2 наведено результати узагальнень гідродинаміки, які отримали автори [8–12].

Таблиця 1 – Рівняння для розрахунку чисел Ейлера

Матеріал	$d_e \cdot 10^3, м$	$d_{\text{ч}} \cdot 10^3, м$	$Eu = f(Re, \Gamma)$
Пісок	0,112	0,259	$Eu = 280 \cdot Re_e^{-0,8} \cdot (H/d_e)^{0,9}$
Пісок	0,357	0,648	$Eu = 555 \cdot Re_e^{-0,7} \cdot (H_e/d_e)^{0,9}$
Кавовий шлам	0,44	1,34	$Eu = 2,78 \cdot Re_e^{-0,18} \cdot H/d_{\text{ч}}$
Торф	1,02	1,16	$Eu = 7,5 \cdot Re_e^{-0,05} \cdot H/d_{\text{ч}}$
Технічний вуглець	2,94	3,795	$Eu = 212 \cdot Re_e^{-0,43} \cdot H/d_{\text{ч}}$
Амофос	1,27	2,95	$Eu = 26 \cdot Re_e^{-0,33} \cdot H/d_{\text{ч}}$
Суперфосфат	0,88	2,1	$Eu = 21 \cdot Re_e^{-0,33} \cdot H/d_{\text{ч}}$
Енергетична верба	4,09÷4,44	0,17÷3,17	$Eu = 36 \cdot Re_e^{-0,22} \cdot H_e/d_e$
Шлак ТЕЦ	0,747	2,08	$Eu = 19 \cdot Re_e^{-0,55} \cdot H_e/d_e$
Зерно пшениці сорту «Золотоколоса»	1,56	3,493	$Eu = 3,8 \cdot Re_e^{-0,2} \cdot H_e/d_e$

Таблиця 2 – Розрахункові залежності для визначення коефіцієнту опору стаціонарного шару

Матеріал	$\lambda = f(Re)$	$\lambda = A/Re_e + B$
Шлак	$\lambda = 38 \cdot Re_e^{-0,55}$	$\lambda = 115/Re_e + 2$
Глина	$\lambda = 20 \cdot Re_e^{-0,50}$	$\lambda = 80/Re_e + 1,1$
Сирцеві гранули	$\lambda = 10 \cdot Re_e^{-0,23}$	$\lambda = 190/Re_e + 2$
Енергетична верба	$\lambda = 25 \cdot Re_e^{-0,25}$	$\lambda = 2200/Re_e + 15$
Зерно пшениці сорту «Золотоколоса»	$\lambda = 8,5 \cdot Re_e^{-0,22}$	$\lambda = 145/Re_e + 1,9$

Аналіз табл. 1 і 2 вказує на велику розбіжність у розрахункових залежностях, які отримані різними авторами, та неможливості їх застосування до дисперсних матеріалів, які мають інший гранулометричний склад, іншу форму частинок та структурну будову стаціонарного шару, тому дослідження гідродинаміки стаціонарного шару залізного купоросу є актуальною задачею.

Мета та завдання досліджень. Метою роботи є дослідження гідродинаміки стаціонарного шару залізного купоросу залежно від геометричних параметрів шару та швидкості фільтрування газового потоку, узагальнення отриманих результатів у безрозмірних комплексах, а також встановлення можливості використання існуючих розрахункових залежностей для прогнозування втрат тиску.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання:

встановити параметри стаціонарного шару залізного купоросу та його фізико-механічні характеристики;

дослідити залежність втрат тиску в стаціонарному шарі залізного купоросу від фіктивної швидкості фільтрування теплового агенту;

узагальнити отримані результати експериментальних досліджень у безрозмірній формі;

порівняти отримані розрахункові залежності для прогнозування втрат тиску із відомими, які отримані іншими авторами.

Результати досліджень.

Основні характеристики стаціонарного шару залізного купоросу. Об'єктом дослідження обрано відходи титанового виробництва (залізний купорос) ПАТ «Суміхімпром». Відбори проб здійснювали за стандартною методикою [3]. Загальна маса матеріалу становила 18 кг. Визначення гранулометричного складу залізного купоросу здійснювали шляхом ситового аналізу, для чого 8 кг висушеного матеріалу просіювали через стандартний набір сит з розмірами вічок 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,16 мм, залишки на ситах зважували та обчислювали вміст купоросу на кожному з сит.

За результатами просіювання розраховували:

а) часткові залишки на кожному ситі, мас. %:

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100\% \quad (1)$$

де m_i – маса залишку на даному ситі, кг; m – маса просіюваної наважки, кг.

б) повні залишки на кожному ситі, мас. %:

$$A_i = a_{2,5} + a_{1,25} + \dots + a_i \quad (2)$$

де $a_{2,5}, a_{1,25}, a_i$ – часткові залишки на ситах з розмірами отворів, більшими від того, на якому визначають повний залишок, мас. %.

Результати досліджень гранулометричного складу залізного купоросу представлені у таблиці 3.

Таблиця 3 – Гранулометричний склад залізного купоросу

Розміри вічок сит, мм	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16
Часткові залишки, %	0,9	4,2	69,1	21,6	4,2
Повні залишки, %	0,9	5,1	74,2	95,8	100

Для полідисперсних зернистих шарів усереднений діаметр частин матеріалу обчислювали згідно із залежністю [9]:

$$d = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}}, \quad (3)$$

де x_i – об'ємна або масова частка частинок з діаметром d_i ,

d_i – це середній діаметр частинок відповідної фракції.

Насипна густина дисперсного матеріалу залежить від форми частинок, гранулометричного складу і його вологості, тому її визначали за методикою, наведеною у ГОСТ 25699.14-93 із розрахункової залежності:

$$\rho_n = \frac{m_k}{V}, \quad (4)$$

де m_k – маса проби залізного купоросу в циліндрі, кг;

V – об'єм проби в циліндрі, м³.

Результати визначення насипної густини залізного купоросу представлені у таблиці 4.

Таблиця 4 – Визначення насипної густини залізного купоросу

$m_k \cdot 10^3$, кг	120,1	119,7	120,1	120,9	119,9	119,2	119,7	119,9
$V \cdot 10^6$, м ³	133							
ρ_n , кг/м ³	903	900	903	909	901	905	900	901
ρ_n , сер., кг/м ³	902,75							

Пористість шару залізного купоросу розраховували на основі попередньо встановлених значень насипної густини купоросу за формулою:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_{icm}}\right) \quad (5)$$

Істинна густина залізного купоросу $\rho_{icm} = 1890$ кг/м³.

Для розрахунку питомої поверхні шару використовували усереднені значеннями розмірів частинок, враховуючи коефіцієнт форми частинок купоросу та коефіцієнт взаємного екранування поверхні:

$$a = f_{ум.} \cdot k_e, \quad (6)$$

де $f_{ум.}$ – умовна питома поверхня шару дисперсного матеріалу, м²/м³;

k_e – коефіцієнт взаємного екранування, $k_e = 0,71$ [13].

$$f_{\text{ум}} = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon_{\text{ш}})}{d_{\text{ч}} \cdot \Phi}, \quad (7)$$

де Φ коефіцієнт форми частинок, $\Phi=0,767$ [13].

Еквівалентний діаметр каналів між частинками шару визначали із залежності [5]:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a} \quad (8)$$

Результати розрахунку основних характеристик шару залізного купоросу зведені в таблиці 5.

Таблиця 5 – Характеристики шару залізного купоросу

ріст, кг/м ³	$\rho_{\text{ш}}$, кг/м ³	$d_e \cdot 10^3$, м	$d_{\text{ч}} \cdot 10^3$, м	a , м ² /м ³	ε , м ³ /м ³
1890	902,75	0,4	0,77	3750	0,48

Гідродинаміка стаціонарного шару залізного купоросу. Дослідження гідродинаміки проводили на лабораторній експериментальній установці та за розробленою методикою, наведеною [5] для висот шару матеріалу 6.10-2, 9.10-2, 12.10-2 та 15.10-2 м в межах фіктивної швидкості фільтрування газового потоку $0 < v_0 \leq 2,0$ м/с.

Результати експериментальних досліджень наведені на рис.1. Аналіз рис. 1 показує, що криві носять параболічний характер, а це вказує на те, що на величину гідравлічного опору шару має вплив як в'язкісна, так і інерційна складові. Для опису втрат тиску в стаціонарному шарі дисперсного матеріалу використовують внутрішню або зовнішню задачу гідродинаміки. Характерним розміром у випадку зовнішньої задачі приймається усереднений діаметр частинок дисперсного матеріалу, а внутрішньої задачі – еквівалентний діаметр каналів між частинками. Для узагальнення експериментальних даних багато авторів використовують критерії гідравлічної подібності Ейлера, Гагена, Лагранжа, Лейбензона, Дарсі, Сліхтера та інші. Аналіз узагальнення експериментальних даних за допомогою критеріїв Гагена, Лагранжа, Дарсі та Сліхтера показав велику розбіжність між теоретично розрахованими та експериментальними даними, що пояснюється в одному випадку врахуванням лише в'язкісної складової, а в іншому відсутністю єдиної методики визначення коефіцієнту проникності. Для узагальнення результатів, наведених на рис. 1 застосуємо критерії Ейлера та Лейбензона з метою порівняння їх точності для опису гідродинаміки стаціонарного шару залізного купоросу.

Зовнішню задачу гідродинаміки представимо у вигляді критеріальної залежності $Eu = f(Re_{\text{зовн}})$ рис. 2.

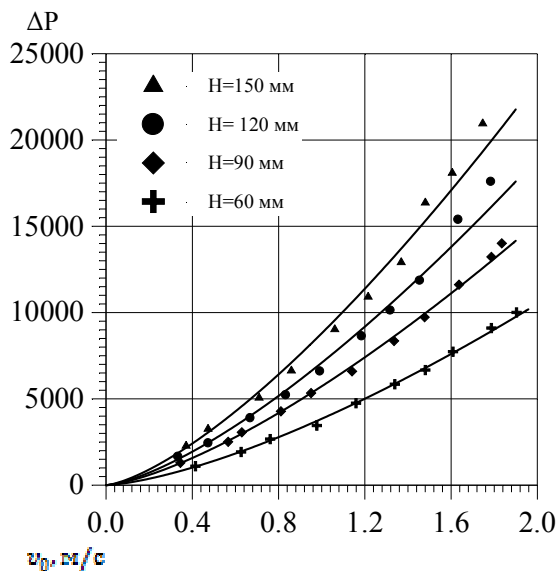


Рис. 1 – Залежність втрат тиску від фіктивної швидкості руху теплового агента.
 $\Delta P = f(v_0)$

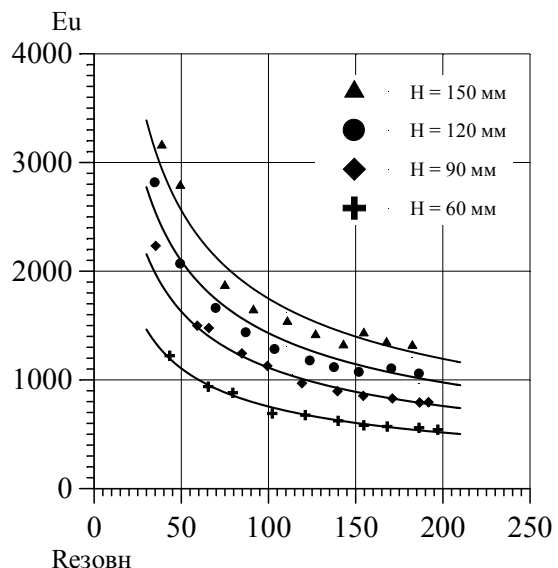


Рис. 2 – Залежність критерію Ейлера від критерію Рейнольдса.
 $Eu_{\text{зовн}} = f(Re_{\text{зовн}})$

Представлення експериментальних даних (рис.2) в логарифмічних координатах та їх апроксимація степеневою функцією дала змогу отримати розрахункову залежність:

$$Eu_{\text{внн}} = 155 \cdot Re_{\text{внн}}^{-0.55} \cdot \frac{H}{d_e} \quad (8)$$

Внутрішню задачу гідродинаміки представимо у вигляді залежності числа Ейлера від геометричного симплексу (рис.3) за різних чисел Рейнольдса. Аналогічно, як і в першому випадку критерій Ейлера представимо у вигляді критеріальної залежності $Eu_{\text{внн}} = A \cdot Re_{\text{внн}}^x \cdot H_e/d_e$. Представивши експериментальні дані у вигляді графічної залежності (рис.4) невідомого коефіцієнта А від числа Рейнольдса, де визначальним розміром є еквівалентний діаметр каналів d_e , крізь які фільтрується газовий потік, та апроксимували їх степеневою функцією отримаємо:

$$Eu_{\text{внн}} = 29 \cdot Re_{\text{внн}}^{-0.6} \cdot \frac{H_e}{d_e} \quad (9)$$

де H_e – еквівалентна висота каналів, крізь які фільтрується тепловий агент. Згідно рекомендацій, які наведені у технічній літературі, $H_e = 1.5 \cdot H$.

Для опису гідродинаміки стаціонарного шару дисперсних матеріалів використовують і критерій Лейбензона (Ω). У випадку чисто в'язкісного режиму $\Omega \sim Re$, а для квадратичного закону опору $\Omega \sim Re$. На рис. 5, представлені експериментальні дані у вигляді графічної залежності числа Лейбензона від числа Рейнольдса у логарифмічних координатах.

Апроксимували експериментальні дані степеневою функцією дало змогу отримати розрахункову залежність:

$$\Omega = 27 \cdot Re^{1.42} \quad (10)$$

Відомо [14], що для розрахунку втрат тиску широко застосовується залежність Дарсі-Вейсбаха, у якій невідомою величиною є коефіцієнт гідравлічного опору λ . Тому нами на основі експериментальних даних, наведених на рис. 1, визначено коефіцієнт гідравлічного опору λ (рис. 6).

$$\lambda = \frac{160}{Re_{\text{внн}}} + 2.2 \quad (11)$$

Розбіжність між коефіцієнтами опору, визначеними згідно з розрахунковою залежністю (11) та відомою ($\lambda = \frac{133}{Re_{\text{внн}}} + 2.34$) пояснюється тим, що частинки залізного купоросу мають неправильну форму, а єдина методика визначення усереднених розмірів частинок неправильної форми відсутня.

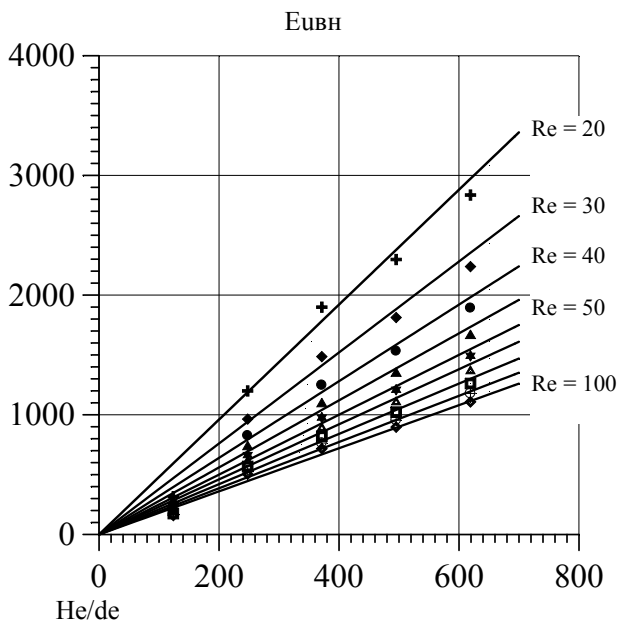


Рис. 3 – Залежність числа Ейлера від геометричного симплексу за різних значень числа Рейнольдса. $Eu_{\text{внн}} = f(He/de)$

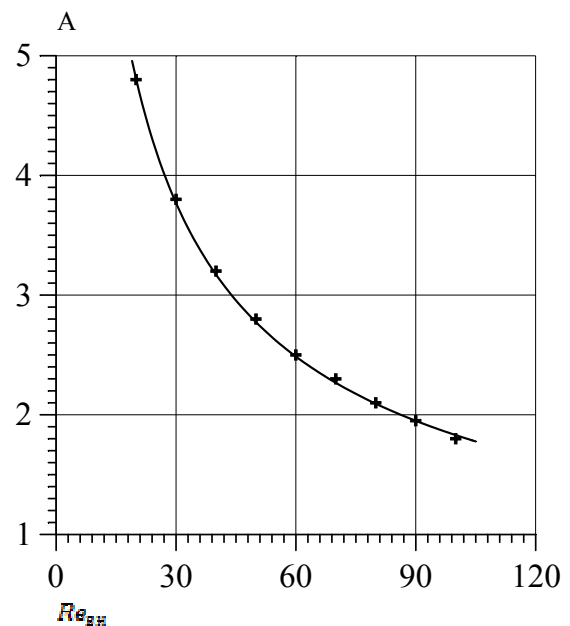


Рис. 4 – Залежність коефіцієнта А від критерію Рейнольдса. $A = f(Re_{\text{внн}})$

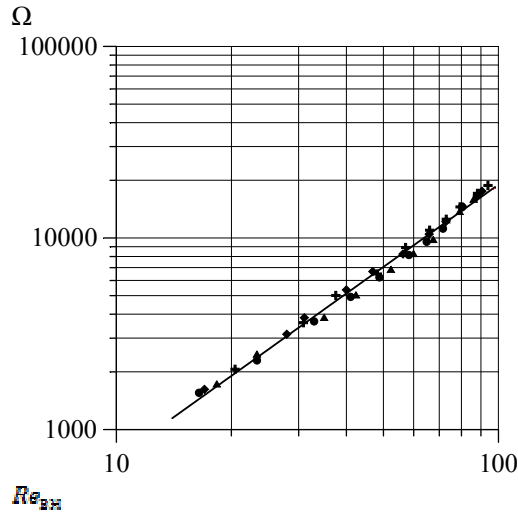


Рис. 5 – Залежність критерію Лейбенсона від критерію Рейнольдса. $\Omega = f(Re_{жн})$. (Позначення відповідають рис.1)

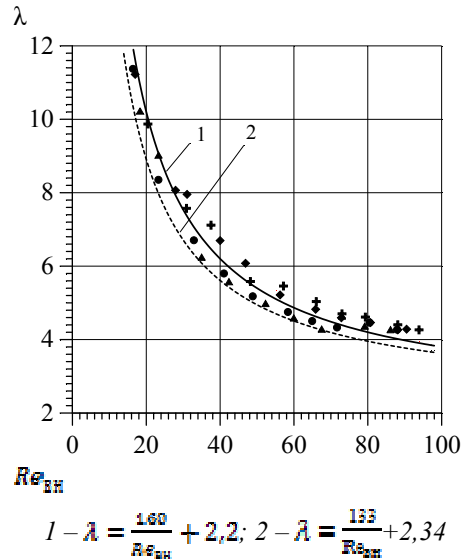


Рис. 6 – Залежність коефіцієнту гідравлічного опору шару залізного купоросу від критерію Рейнольдса. $\lambda = f(Re_{жн})$

Для прогнозування втрат тиску в шарі дисперсного матеріалу в широких межах числа Рейнольдса також використовується модифікована формула Ергана:

$$\Delta P = H \cdot \frac{150 \cdot \mu \cdot v_0}{d_q^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2} + \frac{1,75 \cdot \rho \cdot v_0^2}{d_q} \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}, \quad (12)$$

яку ми також використали для прогнозування втрат тиску в шарі залізного купоросу.

На рис. 7 наведена кореляційна залежність між розрахованими згідно з наведеними вище розрахунковими залежностями та експериментальними даними для порівняння їх точності.

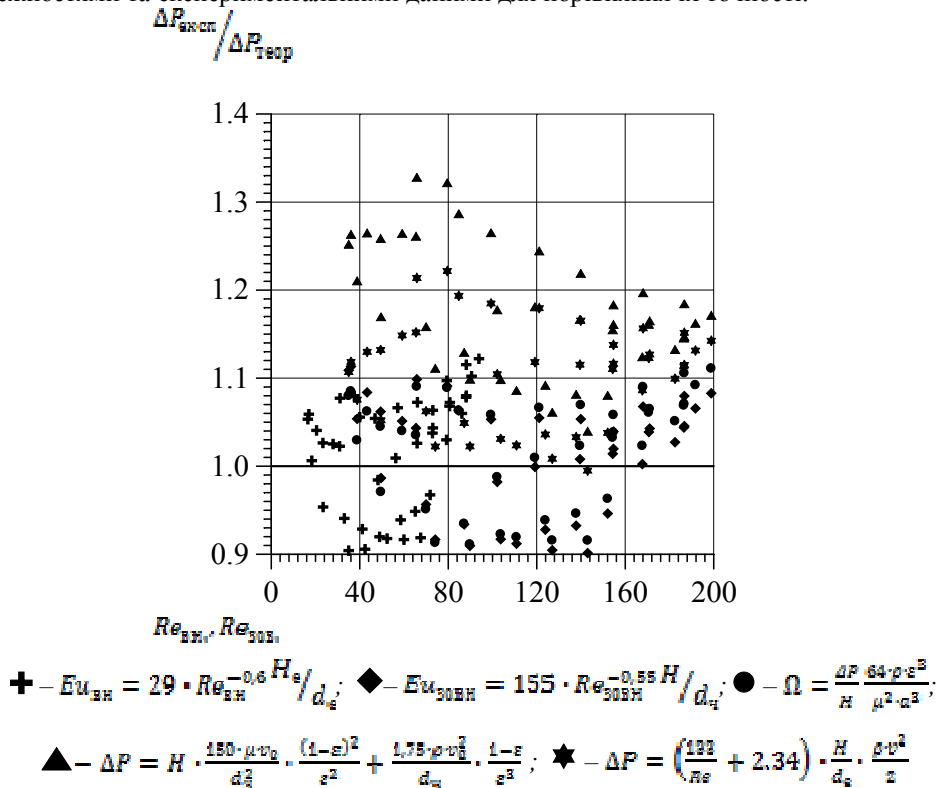


Рис.7 – Кореляційна залежність між експериментальними даними і теоретично розрахованими

Висновок. Визначено гранулометричний склад залізного купоросу та його основні характеристики стаціонарного шару, що є важливим для узагальнення результатів досліджень. Досліджена гідродинаміка фільтрування теплового агенту крізь шар залізного купоросу. Встановлено, що за фіктивної швидкості фільтрування теплового агенту 1,75 м/с і висоти шару 15·10⁻² м гідравлічний опір рухові теплового агента не перевищує 21 кПа, що вказує на доцільність застосування фільтраційного сушіння як енергозберігаючого методу. Проаналізовано розрахункові залежності для прогнозування втрат тиску в стаціонарному шарі залізного купоросу і встановлено, що максимальна похибка між розрахованими значеннями і експериментальними даними складають: згідно залежності (8) – 10,7%, (9) – 9,3%, (10) – 8,7%, (11) – 9,8%, (12) – 20,8%. Як бачимо чотири перших розрахункових залежностей дають приблизно однакову похибку і їх можна рекомендувати для використання на практиці. Залежність (12) дає найбільшу похибку, що пояснюється відсутністю єдиної методики щодо визначення усередненого діаметру частинок неправильної форми.

Література

1. Карпович Э.А. О возможности комплексной утилизации железного купороса: збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне використання сировини, енергота ресурсозберігаючі технології у виробництві неорганічних речовин», Ч.: — 2004. — 178 с.
2. Полински К. О получении красного железистоокисного пигмента из железного купороса: ЖПХ, №2, 1969.—с.272.
3. Потенциальная опасность отхода производства пигментной двуокиси титана и пути его обезвреживания: Сборник научных трудов XVIII Международной заочной научно-практической конференции, 20 февраля. 2013 г., Новосибирск /Технические науки - от теории к практике.-Новосибирск: СибАК, 2013. – С. 178–180.
4. Вовлечение в производство удобрений кислого железного купороса: Сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции, 5 июня. 2001 г., Щелкино/ Казантип-ЭКО-2001.- Щелкино: ГП «Укр НТЦ «Энергосталь», 2001. – С. 396–397.
5. Соколов И.Д. Пути переработки серно кислого железа.- Черкасы: ПО НИИ ТЕХИМ, Всес. н.-и. и прокт.институт металлургии, 1976. – 19 с.
6. Карпович Э.А., Вакал С.В. Разработка технологии утилизации закислоченного железного купороса и установка для ее реализации // Научно-производственный журнал «Экология и промышленность».- Харьков: Укр НТЦ «Энергосталь», 2005. – Вып. 4. – С. 61–65.
7. Метод отбора проб: ГОСТ 13586.3-83. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 14 с.
8. Атаманюк В.М., Матківська І.Я., Мосюк М.І. Гідродинамічні особливості фільтраційного сушіння зерна пшениці. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. Випуск 43, Т. 2, 2013, С.10–16.
9. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. Атаманюк В. М., Гумницький Я. М. Монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 276 с.
10. Гідродинаміка і темломасообмін під час фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію: автореф. дис ... канд. техн. наук / І. Р. Барна . – Львів, 2013. – 22 с.
11. Гідродинаміка і темломасообмін під час сушіння подрібненої "енергетичної" верби в стаціонарному шарі : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.17.08 / М. І. Мосюк . – Львів : 2012 . – 22 с.
12. Механізм і кінетичні закономірності фільтраційного сушіння зерна пшениці: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.14.06 / І. Я. Матківська . – Львів : 2015 . – 20 с.
13. Аэров М.Э., Тодес О. М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым флоем: Гидравлические и тепловые основы работы. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.
14. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В двух книгах – М.: Химия, 1981. – 812 с.