

хімічної та хімічної взаємодії у рідинному середовищі. В цьому випадку спостерігається більш швидке вивільнення компонентів мінеральних добрив, покритих полімерною оболонкою на основі ефірів целюлози у лужному середовищі. Експерименти показали певну відмінність залежності швидкості вивільнення компонента від рН середовища порівняно з раніше проведеними експериментами, що корелюється з відмінністю у будові полімерів. Згідно з експериментальними дослідженнями можна зробити висновок, що добрива, покриті оболонкою на основі ефірів целюлози будуть ефективними на ґрунтах з  $\text{pH} \geq 7$ , оскільки є можливість регулювання оптимального вивільнення компонента за допомогою товщини оболонки залежно від рН ґрунту. Крім того, внаслідок здатності полімеру до поступового розчинення при  $\text{pH} \geq 7$ , ліквідовується проблема забруднення ґрунту залишками оболонки, причому оболонка виступає регулятором кислотності ґрунтового розчину.

1. Гумницький Я.М., Мельничук В.В., Нагурський О.А. Вплив фізико-хімічних показників середовища на швидкість розчинення мінеральних добрив // *Екотехнологія и ресурсосбережение*. – 2004. – № 6. – С. 64–58. 2. Гумницький Я.М., Мельничук В.В., Нагурський О.А. Вплив рН середовища на швидкість вивільнення корисного компоненту з капсульованих частинок // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2002. – № 447. – С. 185–187. 3. Домбровський А.В. *Органічна хімія*. – К.: Вища школа, 1989. – 503 с. 4. Мороз А.С. Ковальова А.Г. *Фізична та колоїдна хімія*. – Львів: Світ. – 1994. – 280 с.

УДК 66.045

В.М. Атаманюк

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра хімічної інженерії

## ГІДРОДИНАМІКА ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ГРАНУЛЬОВАНОГО ПОЛІАКРИЛАМІДУ

© Атаманюк В.М., 2005

**Подано результати експериментальних досліджень гідродинаміки руху повітря крізь полідисперсний шар поліакриламід. Одержано критеріальні залежності, які дозволяють використовувати результати для проектування нового сушильного обладнання.**

**Present results of experimental researches of air filtration hydrodynamics through polygrained layer of dry poliakrylamid. Present criterion equations which allow to use these results for planning a new drying equipment.**

**Постановка проблеми.** Поліакриламід (ПАА) є недорогим водорозчинним полімером і високоактивним флокулянт, який широко застосовується в гірничовидобувній, металургічній, нафтогазовій, вугільній, для флотації різного роду домішок у стічних водах, очищенні питної води, легкій, паперово-целюлозній, харчовій та фармацевтичній промисловості, сільському господарстві, медицині тощо.

В Україні ПАА виробляють у вигляді низькоконцентрованих (6–8 %) водних розчинів (Оріана, м. Калуш). Транспортування, складування і використання водних розчинів ПАА є незручним і трудомістким, тому в даний час у розвинених країнах в основному виготовляють і застосовують сухі порошкоподібні або гранульовані водорозчинні полімери акриламід.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сухий ПАА є твердою аморфною білою або частково прозорою речовиною без запаху, яка добре розчиняється у воді. Молекулярна маса ПАА

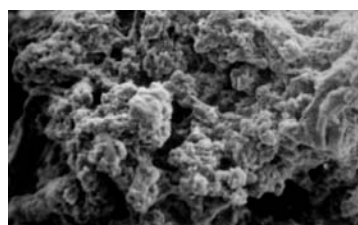
складає від 1 200 000 до 5 500 000 одиниць і залежить від умов полімеризації. Дослідження отримання сухого гранульованого ПАА розглядається в багатьох наукових роботах закордонних і вітчизняних вчених [1–3]. Як відзначають автори [3], найбільш енергоємним процесом отримання сухого поліакриламиду є його сушіння. Сушити 8 % гелеподібний ПАА економічно не вигідно [4], тому автор рекомендує спочатку осадити ПАА, після осадження його гранулювати, а тоді сушити.

Одним із найефективніших методів сушіння пористих матеріалів є фільтраційне сушіння. Відомо [5], що першим етапом дослідження процесу фільтраційного сушіння є гідродинаміка фільтрування теплового агента крізь пористу структуру матеріалу, оскільки гідродинаміка визначає інтенсивність процесу та енергетичні затрати на його організацію.

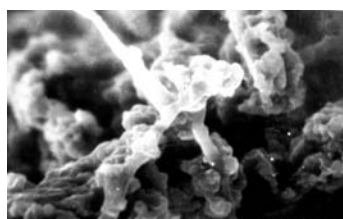
В опублікованих дослідженнях гідродинаміки фільтраційного сушіння гранульованого ПАА [6–8] подано експериментальні дослідження залежності втрат напору від швидкості руху повітря крізь зернистий шар різних фракцій матеріалу. У цих роботах автори для визначення втрат напору в шарі ПАА використовують модифіковане рівняння Ергана. Авторами визначені невідомі коефіцієнти А і В, наведено їх залежність від гранулометричного складу матеріалу, подано розрахункові залежності втрат напору від фіктивної швидкості руху теплового агента крізь пористу структуру матеріалу. Отримані авторами результати стосуються конкретного лабораторного обладнання і конкретних фіктивних швидкостей руху повітря крізь пористу структуру ПАА. Вплив режиму руху на втрати тиску авторами не досліджувався, тому використати ці результати для проектування нового промислового сушильного обладнання, без додаткових експериментальних досліджень, досить важко.

**Метою роботи** є дослідження гідродинаміки сухого гранульованого ПАА і подання результатів експериментальних досліджень у безрозмірній формі, зручній для використання в інженерній практиці для проектування нового сушильного обладнання.

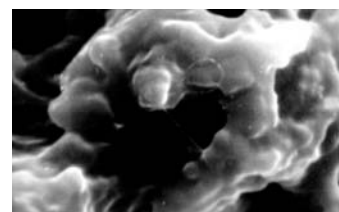
Осаджений та гранульований ПАА (рис. 1) являє собою губчастий матеріал з високорозвиненою структурою мікро- і макропор, а також великих і малих наскрізних каналів і тупикових заглиблень (впадин). На рис. 1, *а* і *б* добре видно наявність мікро- і макропор (темний колір), а в центрі фотографії і в нижньому правому куті рис. 1, *а* – наявність великих каналів. Наявність коротких наскрізних і тупикових пор, заглиблень і випуклостей бачимо на рис. 1, *в*.



*а*



*б*



*в*

*Рис. 1. Структура гранули ПАА збільшена: а – у 30 разів; б – у 150 разів; в – у 700 разів*

Істинна густина ПАА становить  $1302 \text{ кг/м}^3$  [9], а насипна густина і повна пористість шару залежить від гранулометричного складу і наведено у табл. 1.

Діаметр гранул ПАА розраховували як середнє арифметичне між діаметрами отворів сита, через які проходить матеріал і на яких він залишається. Загальну пористість визначали пікнометричним методом. Для визначення пористості шару досліджували кількість витісненої вологи за 15, 20, 25 і 30 с за температури 20, 35, 50 і  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Як показав експеримент, кількість випаруваної вологи є незначною щодо витісненої (близько 1,3–1,5 % при  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  щодо  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ), і нею можна нехтувати за температури теплоносія  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Пористість шару визначали за різницею між максимально можливою вологістю шару і вологістю на початок першого періоду сушіння. Результати досліджень подано на рис. 2.

## Характеристика ПАА

$d \cdot 10^3, \text{ м}$	$\rho_{\text{нас.}}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\varepsilon, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$	$\varepsilon_{\text{ш}}, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$
0,375	482,3	0,6296	0,6001
0,75	468,1	0,6405	0,6076
1,5	442,0	0,6605	0,6102
2,75	398,4	0,6940	0,6341

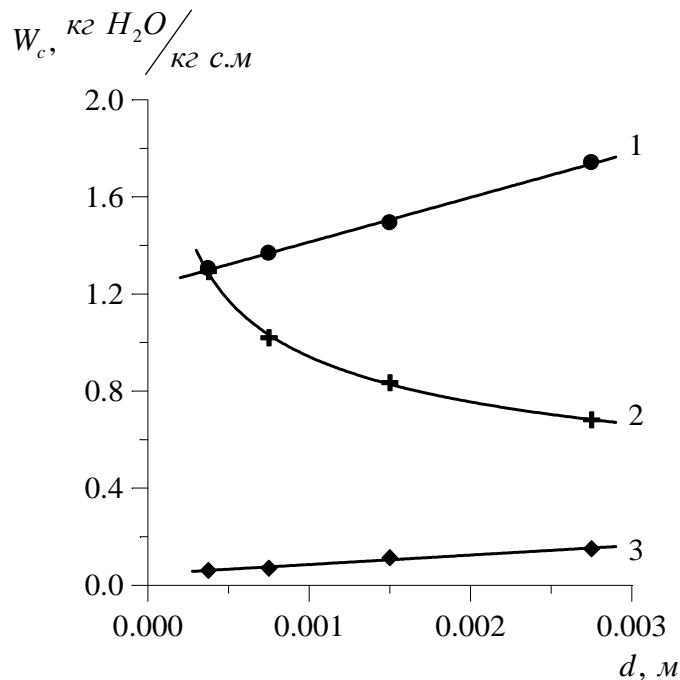


Рис. 2. Залежність вологості шару ПАА від діаметра гранул:

1 – максимально можлива вологість, розрахована на основі загальної пористості шару;  
 2 – вологість, яка механічно утримується шаром; 3 – вологість шару на початок першого періоду

Велика розгалуженість мікро- і макропор, їх взаємне розташування і зв'язок між собою є випадковими, тому структура шару гранульованого ПАА є дуже складною, з точки зору дослідження гідродинаміки. Гранули ПАА мають неправильну трохи витягнуту (овальну) форму. Випуклі елементи однієї гранули можуть розташовуватися у впадинах іншої, ущільнюючи шар та зменшуючи його пористість в цьому місці, або збільшувати її, якщо опуклі елементи гранули віддаляють гранули між собою, утворюючи великі макропори і канали, що призводить до неоднорідності шару як у площині контейнера, так і по висоті шару матеріалу. Причому неоднорідність шару зростає з ростом розмірів гранул.

Порівняння втрат тиску в шарі ПАА і в шарі вугілля однакової висоти і однакового діаметра вказує на те, що гранули ПАА мають велику кількість наскрізних капілярів, які проходять через гранули. Дійсно, при швидкості фільтрування 1 м/с і висоті шару 40 мм для гранул ПАА, еквівалентний діаметр яких 2,7 мм, згідно з розрахунковими залежностями, які подані в [7], втрати тиску становитимуть 123 Па, а в шарі вугілля за тих самих умов, згідно з [10], становитимуть –1306 Па. Це означає, що взаємне екранування гранул ПАА між собою є незначним, а розміри наскрізних каналів між гранулами є значними.

Шар ПАА формується стихійно при засипанні гранул в контейнер експериментальної установки, тому втрати тиску однієї і тієї самої наважки (у випадку декількох завантажень у контейнер) відрізнялися між собою на 8–10 %, що, в свою чергу, також ускладнювало дослідження та узагальнення гідродинаміки.

Відомо [11], що для узагальнення гідродинаміки руху повітря крізь пористу структуру матеріалу використовують теорію подібності та критеріальні рівняння вигляду:

$$Eu = f(Re, Fr, Ho, \Gamma). \quad (1)$$

Це рівняння можна спростити, якщо потік повітря вважати встановленим, а вплив сил земного тяжіння на рух повітря незначним, тобто критеріями гомохромності  $Ho$  і Фруда  $Fr$  можна знехтувати, а рівняння (1) переписати у вигляді:

$$Eu = f(Re, \Gamma)$$

або як степеневу функцію

$$Eu = A \cdot Re^{-x} \cdot \Gamma^y = A \cdot Re^{-x} \cdot \left( \frac{H_e}{d_e} \right)^y. \quad (2)$$

Безрозмірна форма поданих результатів досліджень дозволить поширювати знайдені залежності на групу подібних між собою процесів, тобто отримані результати на експериментальному обладнанні можна буде використати для проектування нового сушильного обладнання, за умови, що визначальні критерії в обох випадках будуть подібними.

На рис. 3 подано експериментальні дослідження гідродинаміки руху повітря крізь шар різних фракцій гранульованого ПАА у вигляді  $Eu = f(Re)$ . Як видно із рис. 3, криві 1–5 не паралельні між собою. Це вказує на нелінійний вплив на значення критерію Ейлера та Рейнольдса висоти шару матеріалу. Порівняння залежностей  $Eu = f(Re)$  для різних фракцій між собою також вказує на нелінійний вплив діаметра гранул і означає, що показники степенів у рівнянні (2) будуть залежати від гранулометричного складу і будуть змінюватися також нелінійно.

Для визначення невідомих коефіцієнтів “А”, “х”, “у” у рівнянні (2) використаємо експериментальні дані наведені на рис. 3, складемо систему із трьох рівнянь, для різних фракцій і висот шару гранульованого ПАА та прологарифмуємо їх.

Результати розв’язання цієї системи наведено у табл. 3.

Таблиця 3

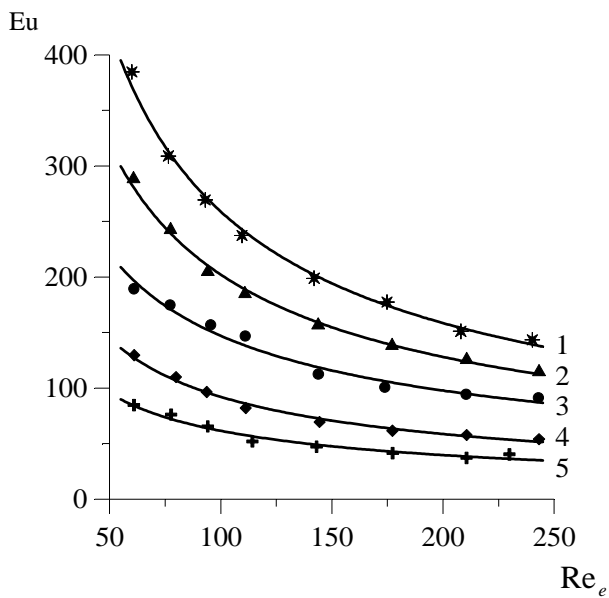
**Значення коефіцієнтів у рівнянні (2) для різних фракцій гранульованого ПАА**

$d \cdot 10^3, м$	$d_e \cdot 10^3, м$	A	x	y
0,375	0,375	80	0,67	0,9
0,75	0,774	54	0,53	
1,5	1,54	33	0,42	
2,75	3,18	20	0,32	

Як видно із табл. 3, із збільшенням діаметра гранул зростає еквівалентний діаметр каналів між гранулами. Експериментальні дослідження проводилися при зміні фіктивної швидкості в межах 1,4–6,0 м/с для всіх фракцій і висот ПАА. Дійсна швидкість при цьому змінювалась в межах 2,5–10,0 м/с. Враховуючи невелику різницю між пористістю різних фракцій, дійсна швидкість від фракції до фракції також змінювалась незначно. Однак еквівалентний діаметр каналів між гранулами від фракцій до фракції зростає більше ніж вдвічі. Тому вирішальний вплив на втрати тиску в шарі ПАА та значення критерію Рейнольдса, як видно із рис. 3, має еквівалентний діаметр. Підтвердженням цього впливу є також зменшення коефіцієнта А та зростання впливу режиму руху повітря (показник степені “х”) із зростанням еквівалентного діаметра.

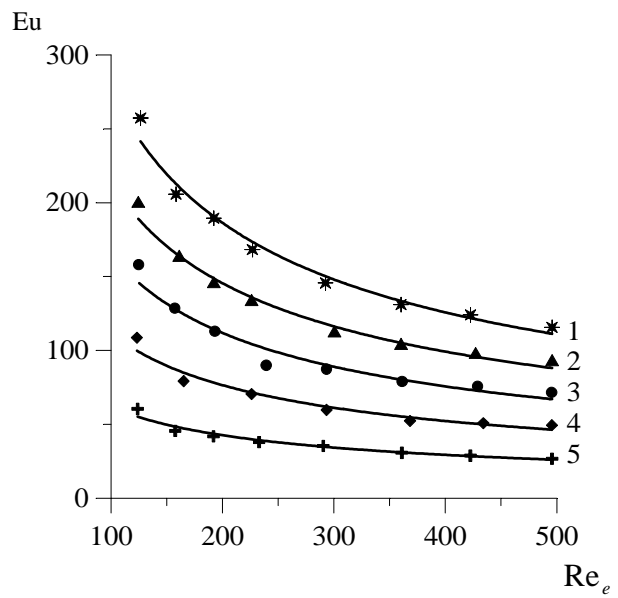
На основі табл. 3 запишемо рівняння (2) у розгорненому вигляді для всіх фракцій ПАА, які ми досліджували:

$$d = 0.375 \cdot 10^{-3}, м - Eu = 80 \cdot Re_e^{-0.67} \cdot \left( \frac{H_e}{d_e} \right)^{0.9}; \quad (3)$$



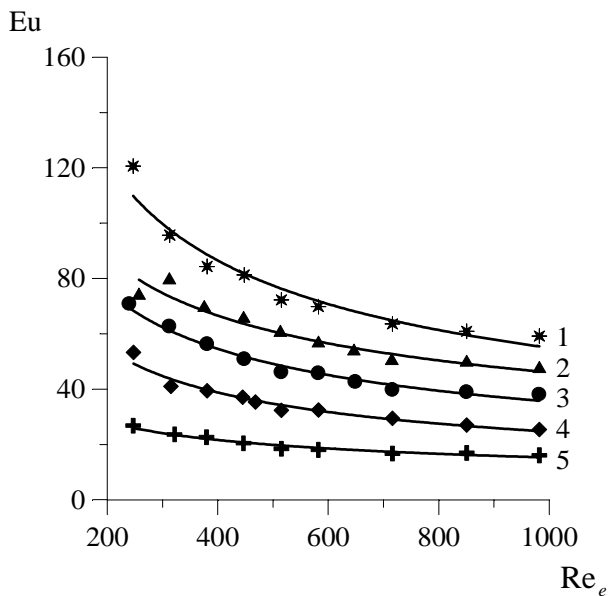
а

1 –  $H = 25 \cdot 10^{-3}$  м; 2 –  $H = 20 \cdot 10^{-3}$  м;  
3 –  $H = 15 \cdot 10^{-3}$  м; 4 –  $H = 10 \cdot 10^{-3}$  м  
5 –  $H = 5 \cdot 10^{-3}$  м



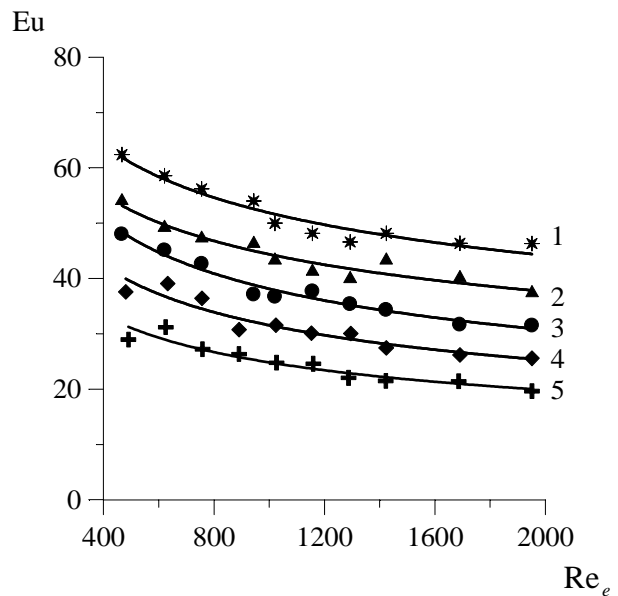
б

1 –  $H = 50 \cdot 10^{-3}$  м; 2 –  $H = 40 \cdot 10^{-3}$  м;  
3 –  $H = 30 \cdot 10^{-3}$  м; 4 –  $H = 20 \cdot 10^{-3}$  м;  
5 –  $H = 10 \cdot 10^{-3}$  м



в

1 –  $H = 50 \cdot 10^{-3}$  м; 2 –  $H = 40 \cdot 10^{-3}$  м;  
3 –  $H = 30 \cdot 10^{-3}$  м; 4 –  $H = 20 \cdot 10^{-3}$  м;  
5 –  $H = 10 \cdot 10^{-3}$  м



г

1 –  $H = 70 \cdot 10^{-3}$  м; 2 –  $H = 60 \cdot 10^{-3}$  м;  
3 –  $H = 50 \cdot 10^{-3}$  м; 4 –  $H = 40 \cdot 10^{-3}$  м;  
5 –  $H = 30 \cdot 10^{-3}$  м

Рис. 3. Залежність критерію  $Eu$  від критерію  $Re$  для різних фракцій ПАА  
а –  $d = 0.375 \cdot 10^{-3}$  м; б –  $d = 0.75 \cdot 10^{-3}$  м; в –  $d = 1.5 \cdot 10^{-3}$  м; г –  $d = 2.75 \cdot 10^{-3}$  м

$$d = 0.75 \cdot 10^{-3}, \text{ м} - Eu = 54 \cdot Re_e^{-0.54} \cdot \left( \frac{H_e}{d_e} \right)^{0.9}; \quad (4)$$

$$d = 1.5 \cdot 10^{-3}, m - Eu = 36 \cdot Re_e^{-0.42} \cdot \left(\frac{H_e}{d_e}\right)^{0.9}; \quad (5)$$

$$d = 2.75 \cdot 10^{-3}, m - Eu = 24 \cdot Re_e^{-0.32} \cdot \left(\frac{H_e}{d_e}\right)^{0.9}. \quad (6)$$

Однак користуватися залежностями (3), (4), (5) і (6) в інженерній практиці ще не зовсім зручно, бо вказані рівняння відповідають конкретним діаметрам гранул, а на практиці вони можуть бути більшими або меншими за вказані, і скористатися такими залежностями уже буде неможливо. Тому доцільно встановити залежність вище перелічених коефіцієнтів від безрозмірного комплексу, який би характеризував розміри апарату та розміри гранул ПАА. Таким комплексом може бути співвідношення площі контейнера  $\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)$ , у якому проводили експерименти, до площі каналу,

$\left(\frac{\pi \cdot d_e^2}{4}\right)$  яким рухається повітряний потік. Для цього на рис. 4 подамо залежність коефіцієнтів “А” та “х” від  $\frac{D^2}{d_e^2}$ .

Як видно із рис. 4, експериментальні значення досить добре апроксимуються степеневими залежностями.

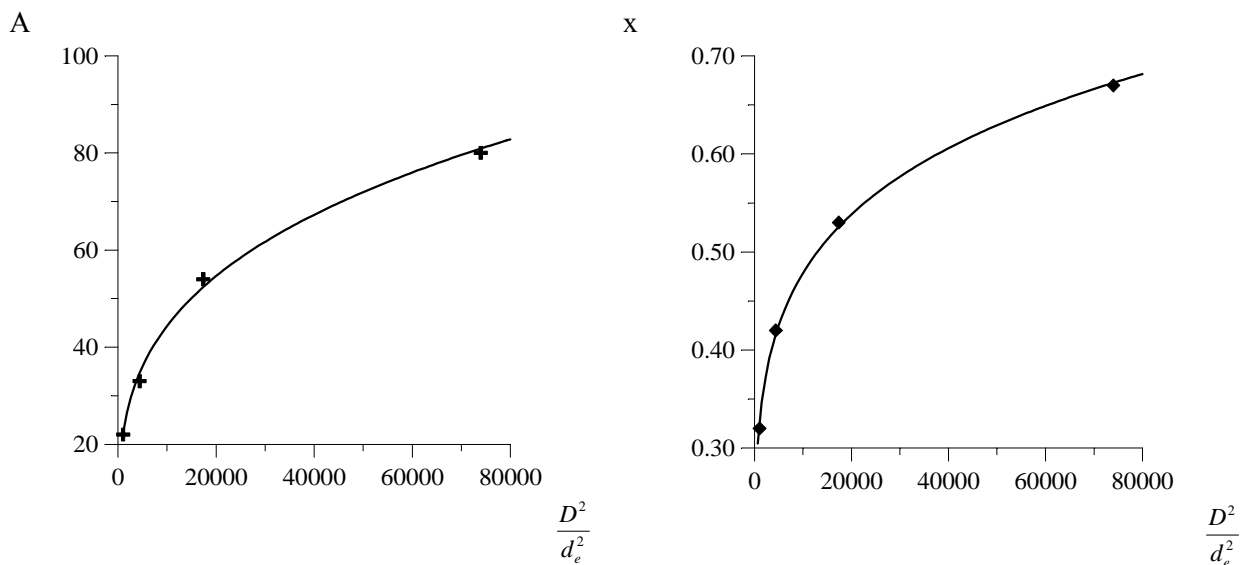


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів “А” та “х” від співвідношення  $\frac{D^2}{d_e^2}$

Звідки:

$$A = 2,8 \cdot \left(\frac{D^2}{d_e^2}\right)^{0,3}; \quad (7)$$

$$x = 0,1 \cdot \left(\frac{D^2}{d_e^2}\right)^{0,17}. \quad (8)$$

Формули (7) і (8) дозволяють застосовувати наведені залежності (3), (4), (5) і (6) і для інших значень еквівалентного діаметра гранул ПАА, однак цей діаметр не повинен виходити за вказані межі  $0.375 \cdot 10^{-3} < d_e < 3.18 \cdot 10^{-3}$  м більше ніж на 10–15 %. На практиці максимальний діаметр

гранул не перевищує  $d = 4 \cdot 10^{-3}$  м [4], а кількість таких гранул у загальній масі гранульованого ПАА не перевищує 5 %, тому експериментальні дослідження для таких гранул нами не проводились.

На рис. 5, а наведено кореляційну залежність між експериментальними і розрахованими за рівняннями (3), (4), (5) і (6) значеннями критерію Ейлера. Як видно із рис. 5, значення досить добре збігаються між собою, а максимальна похибка не перевищує 14 % для гранул діаметром  $d = 0.375 \cdot 10^{-3}$ , м і 10 % для решти фракцій.

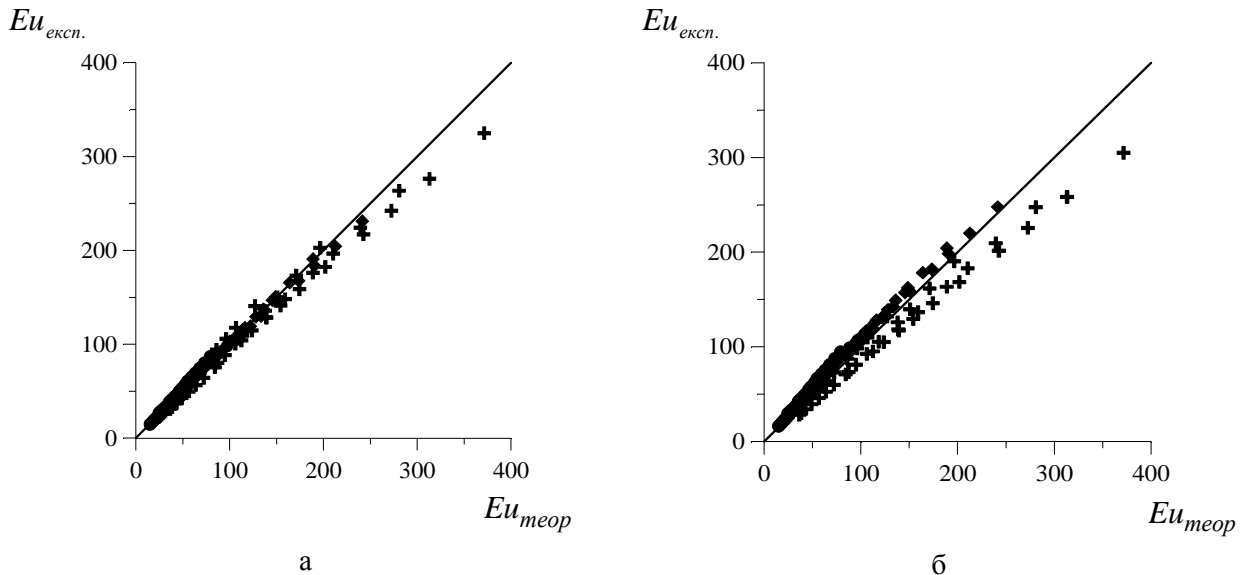


Рис. 5. Кореляційна залежність між експериментальними та:  
а – розрахованими за формулами (3), (4), (5) і (6) значеннями,  
б – розрахованими за формулою (2) з урахуванням (7) і (8)

Як видно із рис. 5, б, значення розраховані за формулою (2) та (7) і (8), досить добре збігаються із експериментальними, а максимальна відносна похибка не перевищує 17,5 % для найдрібнішої фракції, для решти – 14 %. Ця величина похибки зумовлена стихійністю формування шару зернистого матеріалу, неоднорідністю структури шару та заокругленням коефіцієнтів до одного–двох значень після коми.

**Висновок.** У наведених залежностях (3), (4), (5), (6) величина  $A \cdot Re^{-x}$  являє собою узагальнене значення коефіцієнта опору шару гранульованого ПАА. А отримані критеріальні рівняння (3), (4), (5), (6) та (2), (7) і (8) дозволяють використовувати експериментальні дослідження наведені в роботі для проектних розрахунків сушильного обладнання осадженого поліакриламід у різного гранулометричного складу ( $d = 0.375 \div 2.75 \cdot 10^{-3}$  м), без проведення додаткових експериментальних досліджень у широкому діапазоні значень критерія Рейнольдса ( $Re_e = 50 \div 2000$ ) з достатньою для проектних розрахунків точністю.

Умовні позначення:

$A, x, y$  – константи, які характеризують вплив гранулометричного складу зернистого матеріалу;

$Re_e = \frac{\omega \cdot d_e \cdot \rho}{\mu}$  – еквівалентний критерій Рейнольдса;

$\omega$  – дійсна швидкість руху повітря крізь зернистий шар,  $\frac{м}{с}$ ;

$d_e = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon \cdot d}{1 - \varepsilon}$  – еквівалентний діаметр каналів між гранулами ПАА, м;

$\rho$  – густина повітря,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$\mu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;

$d = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2}$  – середній діаметр гранул, м;

$d_{\max}$ ,  $d_{\min}$  – діаметри отворів сита, через які проходять гранули ПАА і на яких залишаються, м;

$\Gamma_1 = \frac{H_e}{d_e}$  – симплекс геометричної подібності;

$H_e = 1.5 \cdot H$  – еквівалентна довжина каналів у шарі зернистого матеріалу, м;

$H$  – висота шару ПАА, м;

$\Gamma_2 = \frac{D^2}{d_e^2}$  – симплекс геометричної подібності (відношення площі апарата до площі каналу крізь

який рухається повітряний потік);

$D$  – діаметр апарата, м;

$Ei = \frac{\Delta P}{\rho \cdot \omega^2}$  – критерій Ейлера;

$\Delta P$  – втрати тиску в шарі зернистого матеріалу, Па.

1. Пат. 56–33706. Японія. Метод сушки водних гелей водорозчинних полімерів акриламідну / Камада Асамо, Ватанабе Катаміцу, Морі Кендзі. – Опубл. 1981. РЖХ. – 1982. – 23 т. – 438 н.
2. Дулеба В.П., Гумницький Я.М., Михайлишин І.О., Мокривський Т.М. Одержання сухих поліакриламідних полімерів з водних розчинів. – Деп. в ДНТБ.– Україна: 1994. – № 1047– ІК. 94. – 19 с.
3. Ханік Я.М., Дулеба В.П., Атаманюк В.М. Кінетика сушіння поліакриламідну // УкрДЛТУ: Наук. вісн. – 1997. – Вип. 7. – С. 110–113. 4. Дулеба В.П. Фільтраційне сушіння осажденного поліакриламідну: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Львів, 1997. – 16 с. 5. Ханік Я.М. Фильтрационная сушка плоских проницаемых материалов: Дис. ... д-ра техн. наук. – Львов, 1992. – 401 с. – Машинопис.
6. Ханік Я.М., Дулеба В.П., Атаманюк В.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння поліакриламідну // Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”. – 1997. – № 31. – С. 147–149. 7. Ханік Я.М., Дулеба В.П., Атаманюк В.М. Гідродинаміка під час руху повітря через шар сухого зернистого поліакриламідну // Хімічна промисловість України. – 1997. – № 2. – С. 16–19. 8. Атаманюк В.М., Ханік Я.Н. Гідродинаміка фільтраційної сушки зернистих матеріалів // Тр. 1-й Междунар. конф. “Современные энергосберегающие тепловые технологии”. – М., 2002. – Т. 4. – С. 148–152. 9. Хімічеська енциклопедія. Т. 3. – М.: Большая рос. энцикл., 1992. – С. 1194–1195. 10. Кіндзера Д.П., Ханік Я.М., Атаманюк В.М. Зернистий матеріал. Гідродинаміка полідисперсного шару // Хімічна промисловість України. – 2002. – № 6. – С. 38–42. 11. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2 кн. – М.: Химия, 1981. – 812 с.