

1. Singh R. P. *Characteristics of so polymer – polymer, polymer – fibre combinations and grafted polymers as drag reducing agents and their industrial applications* / R. P. Singh, P. Chang, G. V. Reddy, etc. // *Drag Reduct. 3rd Int. Conf. Bristol, 1984.* – P. D4/1 – D4/5. 2. Liberman M. W. *Shear – induced structure formation in solutions of drag reducing polymers* / M. W. Liberman, E. J. Pollauf, A. J. J. Mchungh // *Non – Newton. Fluid Mech, 2003.* – Vol. 113. – № 2 – 3. – P. 193 – 208. 3. Ступин А. Б. *Гидродинамически-активные композиции в энергосбережении и экологии* / Ступин А. Б., Симоненко А. П., Асланов П. В. – Донецк : ДонГУ, 1999. – 240 с. 4. Ступин А.Б. *Гидродинамически – активные композиции в пожаротушении* / Ступин А.Б., Симоненко А. П., Асланов П. В., Быковская Н. В. – Донецк: ДонНУ, 2001. – 149 с. 5. *Проблемы экологии и техногенно-экологической безопасности: моногр.* / Под общ. ред. д. т. н., проф. Ступина А. Б. – Донецк : ДонНУ, 2010. – 503 с.

УДК 66.047

І.О. Гузьова, В.М. Атаманюк, М.М. Грегораши  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра хімічної інженерії

## ГІДРОДИНАМІКА СТАЦІОНАРНОГО ШАРУ ГРАНУЛЬОВАНИХ СИНТЕТИЧНИХ ПОЛІМЕРІВ

© Гузьова І.О., Атаманюк В.М., Грегораши М.М., 2012

Наведено результати дослідження впливу швидкості руху теплоносія та геометричних параметрів сухих шарів гранульованих синтетичних полімерів на їх гідравлічний опір. Узагальнено результати дослідження з гідродинаміки стаціонарного сухого шару полістиролу, поліметилметакрилату, арилоксу.

Ключові слова: полістирол, поліметилметакрилат, арилокс, гідродинаміка, коефіцієнт опору, стаціонарний шар, фільтраційне сушіння, гідравлічний опір.

In the article the results of researches of influence of the heatcarrier velocity, geometrical parameters and physical properties of environment on hydraulic resistance of a dry layer the dispersive material are presented. The methods of the generalized of results of research the hydrodynamics of the heatcarrier movement through a dry layer of polystyrene, polimethylmetakrylatu, aryloksu.

Key words: polystyrene, prolimethylmetakrylat, aryloks, hydrodynamics, the drag coefficient, stationary layer, drying filtration, hydraulic resistance.

Найпоширенішими матеріалами, які застосовуються майже у всіх галузях промисловості та побуті, є полімери, світовий обсяг виробництва яких у 2010 р. сягав 300 млн. т [11]. В основу класифікації полімерів покладено різні ознаки: походження, склад, методи утворення, структура, галузі використання. Так, за походженням полімери поділяють на: природні, або натуральні, синтетичні та штучні.

Синтетичні полімери є найпоширенішими та ефективно використовуються практично в усіх галузях світового господарства, їх синтез дає змогу цілеспрямовано регулювати склад і властивості. Річке зростання виробництва та споживання органічних матеріалів відбулося за рахунок синтетичних полімерів. Найпоширенішими синтетичними полімерами є полістирол, поліметилметакрилат, арилокс.

Полістирол виробляють з рідкого стирулу, вихідною сировиною для якого є нафта та кам'яне вугілля. З полістиролу одержують пластичні маси, які широко застосовують в електротехнічній промисловості, для виготовлення предметів побутового призначення (посуд, дитячі іграшки тощо),

оптичних лінз, різнокольорових облицювальних плиток для будівництва тощо. Також з полістиролу виготовляють ізоляцію для високочастотних кабелів зв'язку.

Поліметилметакрилат-синтетичний полярний термопластичний полімер, один з видів полімерів ефірів метакрилової кислоти, продукт полімеризації метилметакрилату. Поліметилметакрилат отримують переважно радикальною полімеризацією метилметакрилату за помірних температур у присутності пероксидних ініціаторів. Полімеризація здійснюється переважно у блоці чи суспензії, а також в емульсії, рідше в розчині. Застосовується в автобудуванні, машинобудуванні, авіаційній, медичній промисловості, будівництві, приладобудуванні та побутових виробках.

Арилокс — теплостійкий аморфний конструкційний матеріал. Характеризується високою міцністю, стійкістю, має хороші діелектричні властивості. Застосовується в автомобілебудуванні, хімічній та медичній промисловості, побутових виробках.

### Постановка проблеми

Виробництво синтетичних полімерів відбувається під дією високих температур та тисків у результаті реакції полімеризації в розплаві, емульсії, суспензії або розчині за радикальним механізмом. Кінцевою стадією такого виробництва є гранулювання, охолодження, механічне зневоднення та сушіння гранул в основному в сушарках з «киплячим» шаром або віброосушарках. Процеси зневоднення та сушіння є енергоємними стадіями виробництва та потребують значних капіталовкладень.

Вищевказані полімери належать до групи матеріалів, розміри пор яких співрозмірні з розмірами молекул рідини, що видаляється. Такі матеріали містять в основному зв'язану вологу і характеризуються довготривалим другим періодом сушіння. Процес сушіння цих полімерів може тривати декілька годин [5]. Саме тому з метою вдосконалення енергоощадних технологій важливим є правильний вибір методу сушіння, а також типового апарата для реалізації цього методу, який би надавав можливість підвести необхідну кількість теплоти для руйнування зв'язку вологи з матеріалом. Протягом останніх років все більшого застосування набуває метод сушіння гранульованих полімерів у вакуумних сушарках [5]. Такий метод дає змогу скоротити час сушіння, проте він є надзвичайно енергоємним.

Автори статті запропонували метод поєднання процесу механічного зневоднення та сушіння профільтруванням теплового агента в напрямку «шар гранульованого полімеру – перфорована перегородка» під дією перепаду тисків. Такий метод передбачає механічне винесення поверхневої вологи та рівномірність проходження теплоносія по всіх каналах між гранулами, що дає змогу якісно висушити матеріал до заданої вологості. Також фільтраційний метод сушіння, за рахунок великої площі контакту фаз, дає змогу зменшити тривалість сушіння.

Першим етапом вивчення цього методу сушіння є дослідження впливу витрати теплового агента на гідравлічний опір шару сухого полістиролу, поліметилметакрилату, арилоксу.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Узагальнення експериментальних даних з гідродинаміки стаціонарних шарів дисперсних матеріалів, якщо залежність  $\Delta p = f(w_0)$  має параболічний характер, проводять на основі рівняння Дарсі–Вейсбаха:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{H_e}{d_e} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho}{2}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору стаціонарного шару дисперсного матеріалу;  $H_e$  – довжина каналів у шарі матеріалу, м;  $H_e = 1.5 \cdot H$ , згідно з рекомендаціями [1–2];  $H$  – висота шару матеріалу, м;  $d_e$  – еквівалентний діаметр каналів між частинками, м;  $\rho$  – густина теплового агента, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – дійсна швидкість руху теплового агента, м/с;  $d_e = \frac{4 \cdot e}{a}$ ;  $w = \frac{w_0}{e}$ ;  $e$  – вільний об'єм шару, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $a$  – питома поверхня шару, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $\omega_0$  – фіктивна швидкість руху теплового агента, м/с.

Дослідженню гідродинаміки стаціонарного шару дисперсного матеріалу присвячені праці багатьох дослідників [1 – 4, 10]. Наведені в цих роботах результати теоретичних та експериментальних досліджень стосуються конкретних дисперсних матеріалів, режимів руху теплового агента, геометричних розмірів обладнання.

Теорії, яка б однозначно давала змогу розрахувати гідравлічний опір шару довільно взятого дисперсного матеріалу не існує, оскільки виникають значні труднощі у визначенні коефіцієнта опору  $I$ .

Проаналізувавши літературні джерела [1–3], коефіцієнт опору ( $I$ ) можна розрахувати згідно із залежністю  $\lambda = \frac{133}{Re} + 2.34$ , де критерій Рейнольдса лежить у межах  $50 \div 7000$ . Тоді розв'язком рівняння (1) є модифіковане рівняння Ергана (2), що рекомендується застосувати на практиці:

$$\Delta p = \left( \frac{133}{Re} + 2.4 \right) \cdot \frac{H_e}{d_e} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho}{2}. \quad (2)$$

Проте розрахунок втрат тиску за рівнянням (2) дуже часто дає похибку порівняно з експериментальними значеннями [3, 4, 10].

На підставі аналізу літературних джерел [1–3] гідравлічний опір шару дисперсного матеріалу можна розрахувати за рівнянням:

$$\Delta p = \left( \frac{A}{Re} + B \right) \cdot \frac{H_e}{d_e} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho}{2}. \quad (3)$$

У рівнянні (3) коефіцієнт опору ( $I$ ) розраховують згідно із залежністю  $\lambda = \frac{A}{Re} + B$ , де  $A$  та  $B$  – коефіцієнти, що враховують вплив інерційних та в'язкісних сил, залежать від форми частинок, структури шару дисперсного матеріалу та що знаходять експериментально.

### Формулювання мети статті

Аналізуючи наукові дослідження, автори статті виявили, що необхідно на основі експериментальних досліджень встановити залежність коефіцієнта опору ( $I$ ) від числа Рейнольдса ( $Re$ ), на основі узагальнення експериментальних даних вивести рівняння для розрахунку гідравлічного опору стаціонарного шару гранульованих полістиролу, поліметилметакрилату та арилоксу. Порівняти експериментально визначений гідравлічний опір з розрахованим за виведеним рівнянням.

### Виклад основного матеріалу

Об'єктами дослідження були гранульований полістирол, поліметилметакрилат, арилокс з середнім діаметром частинок для першого полімеру відповідно 4 мм, другого 2 мм, третього 4 мм, фотографії зразків яких наведено на рис. 1–3.

Для дослідного визначення коефіцієнта опору ( $I$ ) автори проводили експеримент. У контейнер циліндричної форми з перфорованим дном засипалися досліджувані матеріали. Висоту шару підбирали з таких міркувань: структура дисперсного матеріалу в об'ємі апарата і безпосередньо біля стінок, що обмежують його, дещо відрізняється. Тому висоту шару матеріалу  $H$  під час проведення досліджень доцільно вибирати залежно від діаметра частинки  $d_{cep}$ , користуючись таким співвідношенням  $H > 20 \cdot d_{cep}$  [1]. За допомогою вакуумного насоса і регулюючого вентиля встановлювалася різна витрата і відповідно фіктивна швидкість профільтрування теплоносія у напрямку «шар гранульованого полімеру – перфорована перегородка». Під час встановлення певної витрати, яка вимірювалася за допомогою ротаметра, одночасно фіксувалася зміна гідравлічного опору сухого матеріалу вакууметром.

Результати залежності втрат тиску в шарі полістиролу, поліметилметакрилату, арилоксу від фіктивної швидкості теплового агента для різних висот наведено на рис.4.



*Рис. 1. Гранульований полістирол з середнім діаметром частинок 4 мм*



*Рис. 2. Гранульований поліметилметакрилат з середнім діаметром частинок 2 мм*



*Рис. 3. Гранульований арилокс з середнім діаметром частинок 4 мм*

Втрати тиску в шарі сухого гранульованого полістиролу, поліметилметакрилату, ариксу є невисокими, з рис. 4 видно, що опір шару висотою 80 мм за швидкості теплового агента 1.5 м/с не перевищує 1,5 кПа для полістиролу; опір шару висотою 160 мм за швидкості теплового агента 1.0 м/с не перевищує 2,5 кПа для поліметилметакрилату; опір шару висотою 120 мм за швидкості теплового агента 2.0 м/с не перевищує 1,2 кПа для арилоксу. Таке явище пояснюється тим, що під час профільтрування теплоносія відсутнє явище «зсідання» матеріалу, відповідно пористі між частинками рівномірно розподілені в об'ємі, еквівалентний діаметр шару не змінюється та є співрозмірним із середнім діаметром частинок. Як видно з рис. 4, отримані криві мають параболічний характер і для їх опису можна використати рівняння Дарсі – Вейсбаха (1).

Втрати тиску в шарі сухого гранульованого полістиролу, поліметилметакрилату, ариксу є невисокими, з рис. 4 видно, що опір шару висотою 80 мм за швидкості теплового агента 1.5 м/с не перевищує 1,5 кПа для полістиролу; опір шару висотою 160 мм за швидкості теплового агента 1.0 м/с не перевищує 2,5 кПа для поліметилметакрилату; опір шару висотою 120 мм за швидкості теплового агента 2.0 м/с не перевищує 1,2 кПа для арилоксу. Таке явище пояснюється тим, що під

час профільтрування теплоносія відсутнє явище «зсідання» матеріалу, відповідно пористі між частинками рівномірно розподілені в об'ємі, еквівалентний діаметр шару не змінюється та є співрозмірним з середнім діаметром частинок. Як видно з рис. 4, отримані криві мають параболічний характер і для їх опису можна використати рівняння Дарсі – Вейсбаха (1).

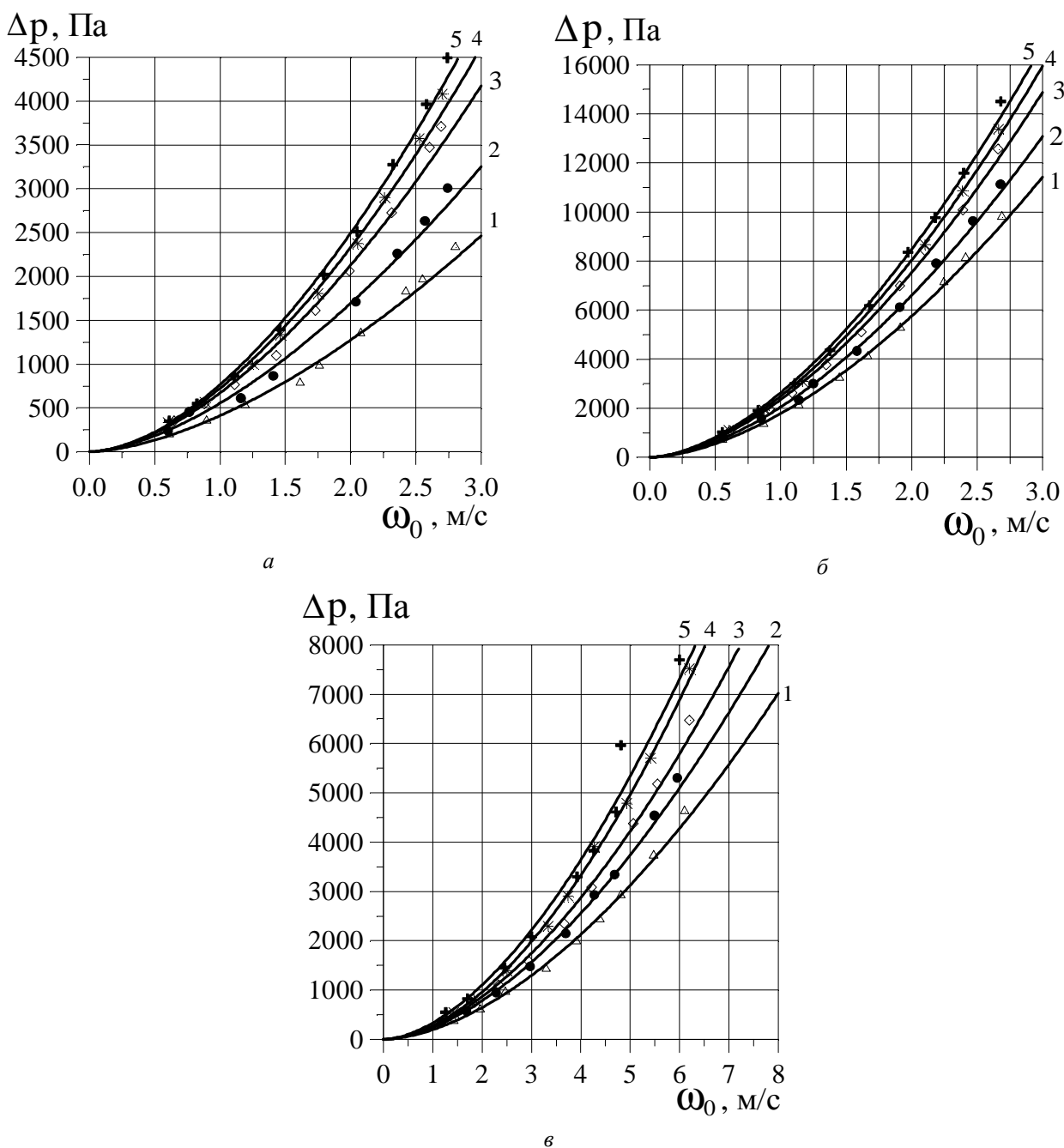


Рис. 4. Залежність втрат тиску в шарі сухих гранульованих полімерів від фіктивної швидкості руху теплоносія для різних висот:

- а – полістирол 1 –  $40 \cdot 10^{-3}$  м, 2 –  $50 \cdot 10^{-3}$  м, 3 –  $60 \cdot 10^{-3}$  м, 4 –  $70 \cdot 10^{-3}$  м, 5 –  $80 \cdot 10^{-3}$  м;  
 б – поліметилметакрилат 1 –  $80 \cdot 10^{-3}$  м, 2 –  $100 \cdot 10^{-3}$  м, 3 –  $120 \cdot 10^{-3}$  м, 4 –  $140 \cdot 10^{-3}$  м, 5 –  $160 \cdot 10^{-3}$  м;  
 в – арилокс 1 –  $60 \cdot 10^{-3}$  м, 2 –  $75 \cdot 10^{-3}$  м, 3 –  $90 \cdot 10^{-3}$  м, 4 –  $105 \cdot 10^{-3}$  м, 5 –  $120 \cdot 10^{-3}$  м

Узагальнити результати залежності зміни гідравлічного опору полістиролу, поліметилметакрилату, арилоксу від швидкості руху теплоносія та геометричних параметрів шару автори статті вирішили таким методом.

Коефіцієнт гідравлічного опору з рівняння (1) можна подати у вигляді:

$$\lambda = 2 \cdot \frac{d_e}{H_e} \cdot \frac{\Delta p}{\rho \cdot \omega^2}$$

Використовуючи дослідні дані втрат тиску ( $\Delta p$ ) та дійсної швидкості теплового агента ( $\omega$ ), можна знайти експериментальні значення коефіцієнта опору ( $\lambda$ ). Критерій Рейнольдса визначається із загальновідомої залежності для випадку внутрішньої задачі гідродинаміки.

Графіки залежностей коефіцієнта опору  $\lambda$  від критерію Рейнольдса  $Re$  наведено на рис. 5.

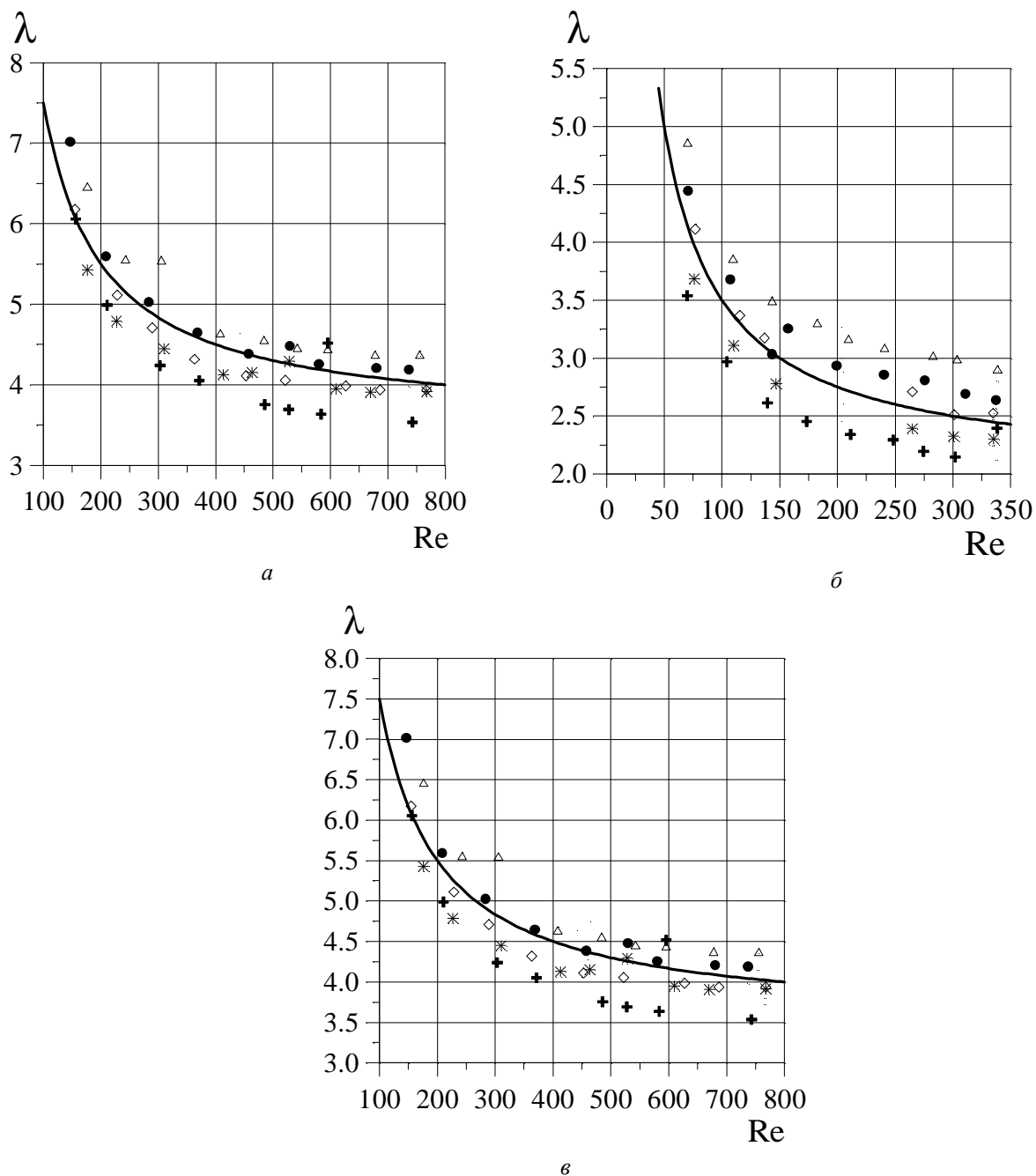


Рис. 5. Залежність коефіцієнта опору  $\lambda$  від величини  $Re$  при русі теплоносія крізь шар сухих гранульованих полімерів для різних висот шару:

- а – полістирол (від  $40 \cdot 10^{-3}$  м, до  $80 \cdot 10^{-3}$  м);
- б – поліметилметакрилат (від  $80 \cdot 10^{-3}$  м, до  $160 \cdot 10^{-3}$  м);
- в – арилокс (від  $60 \cdot 10^{-3}$  м, до  $120 \cdot 10^{-3}$  м)

Як видно з рис. 5, залежність коефіцієнта опору  $I$  від критерію Рейнольдса  $Re$  можна узагальнити степеневою залежністю. Запишемо коефіцієнт опору у вигляді  $\lambda = \frac{A}{Re} + B$ . Тоді рівняння для поліметилметакрилату має вигляд:

$$I = \frac{150}{Re} + 2 \quad (4)$$

для полістиролу та для арилоксу:

$$I = \frac{400}{Re} + 3.5. \quad (5)$$

Отже, отримані узагальненням експериментальних даних рівняння (4), (5) дають змогу теоретично визначити коефіцієнт опору  $\lambda$ .

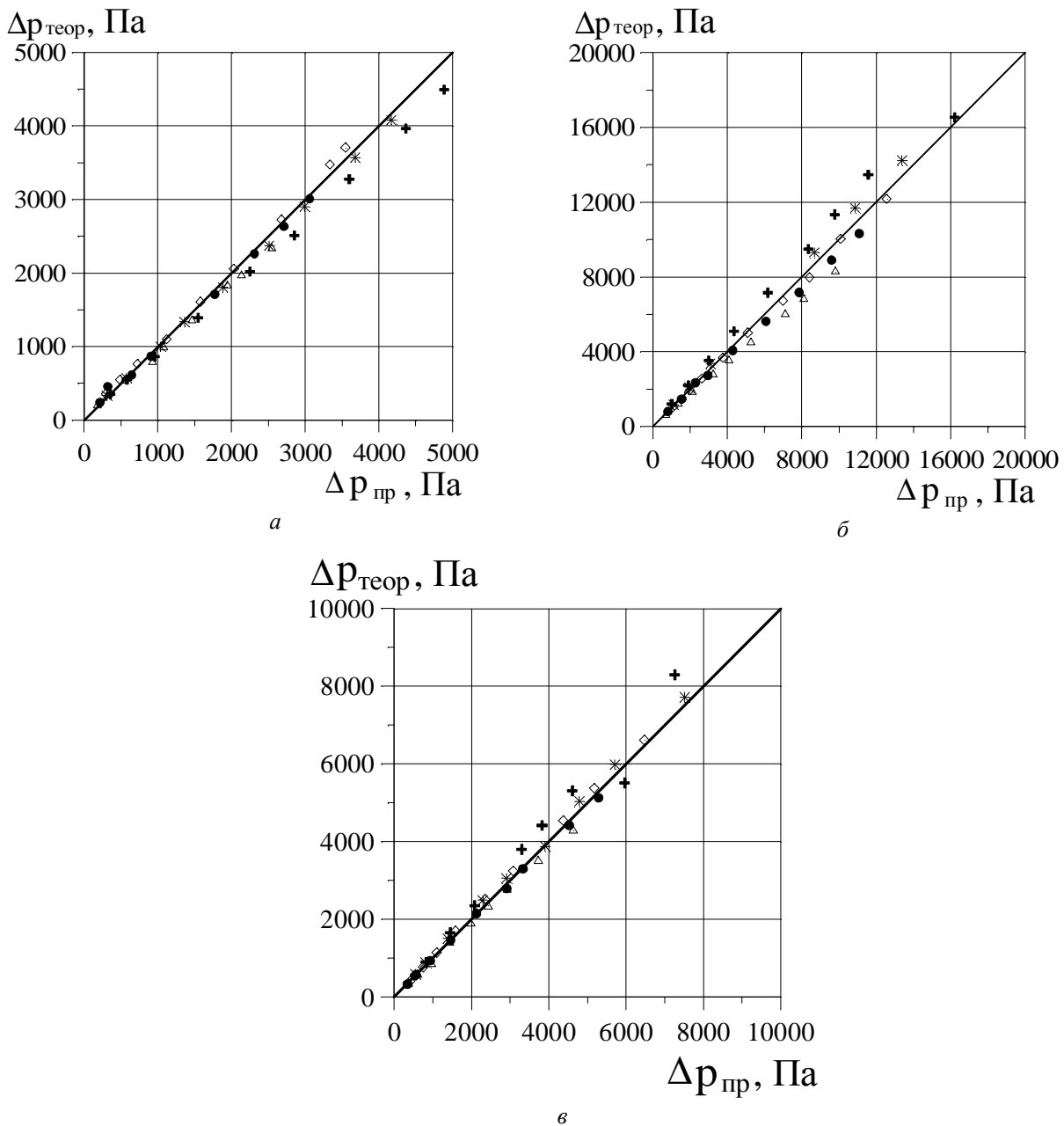


Рис. 6. Кореляційна залежність між розрахованими за рівняннями (6), (7) значеннями гідравлічного опору сухих гранульованих полімерів і експериментальними значеннями для різних висот шару:

а – полістирол (від  $40 \cdot 10^{-3}$  м, до  $80 \cdot 10^{-3}$  м);

б – поліметилметакрилат (від  $80 \cdot 10^{-3}$  м, до  $160 \cdot 10^{-3}$  м); в – арилокс (від  $60 \cdot 10^{-3}$  м, до  $120 \cdot 10^{-3}$  м)

Із наведених залежностей можна побачити, що рівняння (4) є узагальнюючим як для полістиролу, так і для арилоксу. Таке явище пояснюється тим, що ці полімери мають однакову (дископодібну) форму та середній діаметр частинок (рис. 1, 3), а поліметилметакрилат має призматичну форму та менший середній діаметр частинок (рис. 2).

На підставі узагальнень рівняння (1) можна подати у вигляді відповідно для поліметилметакрилату:

$$\Delta p = \left( \frac{150}{Re} + 2 \right) \cdot \frac{H_e}{d_e} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho}{2} \quad (6)$$

для полістиролу та арилоксу:

$$\Delta p = \left( \frac{400}{Re} + 3.5 \right) \cdot \frac{H_e}{d_e} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho}{2} \quad (7)$$

Отримані рівняння (6), (7) дають змогу теоретично розраховувати гідравлічний опір шару сухого гранульованого полістиролу, поліметилметакрилату, арилоксу під час профільовування теплового агента у напрямі «шар матеріалу – перфорована перегородка». Отримані рівняння можна застосовувати при висотах шару 40 – 160 мм у межах значення числа Рейнольдса  $100 \leq Re \leq 800$  для гранульованого полістиролу та арилоксу, і  $50 \leq Re \leq 350$  для поліметилметакрилату.

Для перевірки отриманих результатів на рис. 6 подано кореляційні залежності між теоретично розрахованими за рівняннями (6), (7) значеннями гідравлічного опору відповідно полістиролу, поліметилметакрилату, арилоксу й отриманими експериментальними значеннями.

### Висновки

Отримані залежності дають змогу розрахувати гідравлічний опір гранульованого шару полістиролу, поліметилметакрилату та арилоксу, а теоретичні залежності добре узгоджуються з експериментальними даними та мають важливе значення для прогнозування кінетики фільтраційного сушіння з урахуванням енергетичних затрат на процес. Як видно із графічних залежностей, експериментальні й розрахункові значення добре узгоджуються між собою, а максимальна похибка не перевищує  $\pm 15\%$ .

1. Аэров М.Э., Годес О.М., Наринский Д.А. *Аппараты со стационарным зернистым слоем* // *Химия*, 1979 – 176 с. 2. Чудновский А.Ф. *Теплообмен в дисперсных средах* – *Л. Химия*, 1979 – 436 с. 3. Атаманюк В.М. *Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів: дис. ... д-ра техн. наук.* – Львів, 2007. 4. Гузьова І.О. *Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння матеріалів кристалічної та аморфної структури: дис. ... канд. техн. наук.* – Львів, 2002. 5. Рудобаишта С. *Сушка гранулированных полимеров.* *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, 2008. – 329 с. 6. Протодьяконов И.О., Чесноков Ю.Г. *Гидромеханические основы процессов химической технологии.* – Л.: Химия, 1987. – 360 с. 7. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. *Теория тепло- и массопереноса.* – М.: ГЭИ, 1963. – 353 с. 8. Членов В.А. *Виброкипяющий слой* / В.А.Членов, Н.В. Михайлов. – М.: Наука, 1972. – 343 с. 9. Рудобаишта С.П. *Массоперенос в системах с твердой фазой.* – М.: Химия, 1980. – 248 с. 10. Дулеба В.П. *Фільтраційне сушіння осажденного поліакриламиду: дис. ... канд. техн. наук.* – Львів, 1997. 11. Balsam M., Simon C.-J. *Kunststoff – der Werkstoff des 21 Jahrhunderts* // *Kunststoffe*. – 2001. 91. – № 8. – S. 46.