

В.М. Атаманюк, Р.В. Ходорівський, І.Р. Барна  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра хімічної інженерії

## ГІДРАВЛІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ РОБОТИ АПАРАТІВ ІЗ СТАЦІОНАРНИМ ШАРОМ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРІАЛУ

© Атаманюк В.М., Ходорівський Р.В., Барна І.Р., 2010

**Наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень гідродинаміки руху повітря крізь полідисперсний шар активованого вугілля. Одержано критеріальні залежності, які дають змогу використовувати результати під час проектування апаратів зі стаціонарним шаром дисперсного матеріалу.**

**In article present results of experimental and theoretical researches of air filtration hydrodynamics through polygrained layer of dry activated coal. Present criterion equations which allow using these results for planning an apparatus with stationary layer of dispersed material.**

**Постановка проблеми.** У хімічній технології значна частина технологічних процесів відбувається у стаціонарному шарі дисперсного матеріалу. Прикладом може бути фільтраційне сушіння, адсорбція і процеси розділення неоднорідних середовищ за допомогою фільтрування. Розділення газових і парогазових середовищ має важливе значення для хімічної технології. Значна частина таких технологічних процесів є неперервними в часі, тому процеси адсорбції також повинні бути неперервними. Адсорбцію здійснюють в стаціонарному або киплячому шарі. У промисловості використовують подрібнені або гранульовані адсорбенти, механічні характеристики яких характеризуються абразивністю і крихкістю. Тому реалізація процесу в киплячому шарі вимагає застосування дорогого і громіздкого очисного обладнання, внаслідок стирання частинок адсорбенту під час співударяння їх між собою і до робочих частин обладнання. Крім наведеного необхідно також враховувати ерозійне руйнування робочих поверхонь внаслідок безперервного тертя частинок до стінок апарата. Реалізація адсорбції у стаціонарному шарі усуває зазначені недоліки, однак, вимагає використання двох апаратів, у яких по чергово здійснюють сорбцію-десорбцію. Якщо щодо громіздкості і вартості такої конструкції порівняно з апаратами киплячого шару і необхідним очисним обладнанням перевага є на боці апаратів стаціонарного шару, то щодо експлуатаційних витрат, а саме, втрат тиску в стаціонарному і киплячому шарі адсорбенту, переважно можуть виникати сумніви на користь апаратів киплячого шару. Тому дослідження гідравлічного опору стаціонарного шару дисперсного матеріалу має актуальне значення для хімічної технології.

**Аналіз останніх досліджень.** Дослідженням гідравлічного опору стаціонарного шару дисперсного матеріалу присвячено дуже багато робіт [1–7]. У цих роботах автори досліджують гідродинаміку стаціонарного шару різноманітних дисперсних матеріалів. На основі експериментальних досліджень втрат тиску автори [1–5] наводять розрахункову залежність Дарсі-Вейсбаха у вигляді модифікованого двочленного рівняння Ерагана, визначаючи невідомі коефіцієнти “А” і “В”. У роботах [6, 7] експериментальні дослідження подають у безрозмірному вигляді  $Eu = A \cdot Re^{-x} \cdot \Gamma^y = A \cdot Re^{-x} \cdot (H_e/d_e)^y$ . Наведені в цих роботах результати теоретичних і експериментальних досліджень стосуються конкретних режимів фільтрування газового потоку, дисперсних матеріалів і геометричних розмірів лабораторного обладнання, і, як свідчать автори, з високою точністю дають змогу прогнозувати економічну доцільність модернізації технологічного процесу. Однак, як свідчить власна практика і дослідження інших авторів [8, 9], сьогодні не відомі універсальні розрахункові залежності, які б повною мірою враховували, в широких межах розмірів, вплив окремих частинок неправильної форми на структуру

стаціонарного шару, яка формується здебільшого стихійно на втрати тиску в стаціонарному шарі з точністю, необхідною для практичних розрахунків. Тому переважно використати відомі результати для практичних цілей, без додаткових експериментальних досліджень, є доволі важко.

**Мета роботи.** Дослідження гідродинаміки стаціонарного шару подрібненого адсорбенту і визначення коефіцієнта гідравлічного тертя і наведення результатів у зручній для практичного використання формі.

Досліджували подрібнене активоване деревне вугілля марки БАУ-А (ГОСТ 6217-74). Форма частинок подрібненого активованого вугілля (АВ) має переважно призматичну трохи видовжену форму (округлі частинки становлять менше 7 %). Гранулометричний склад активованого вугілля зображений на рис. 1, інші характеристики наведені у таблиці. Коефіцієнт форми частинок активованого вугілля “Ф” і коефіцієнт взаємного екранування поверхні частинок “К<sub>п</sub>”, яка омивається газовим потоком, прийнято відповідно до рекомендацій [9]. Усереднений розмір частинок активованого вугілля визначали просіюванням за розрахунковою залежністю [9]:

$$\frac{1}{d_q} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{d_i} \quad (1)$$

де  $X_i$  – масова частка фракції з розміром частинок  $d_i$ .

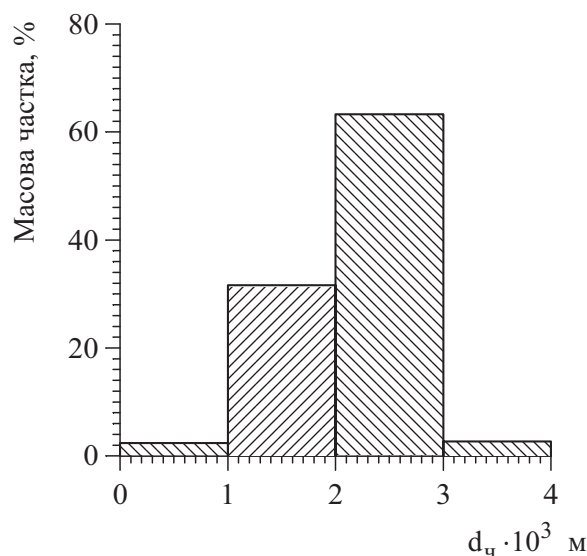


Рис. 1. Гранулометричний склад активованого вугілля

Значення вільної поверхні шару, яка омивається потоком повітря, розраховували за залежністю [9]:

$$a = a_0 \cdot (1 - \varepsilon_{ш}) \cdot K_p \quad (2)$$

де  $a_0$  – питома поверхня однієї частинки,  $\varepsilon_{ш}$  – порізність шару.

#### Основні характеристики активованого вугілля марки БАУ-А

$d_q \cdot 10^3$ , м	$\rho_{нас.}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\varepsilon$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$\varepsilon_{ш}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	$a_0$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	$a$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	Ф	К <sub>п</sub>
2,26	240	0,614	0,375	1165	597	0,8	0,82

Досліджували втрати тиску в стаціонарному шарі АВ на установці, зображений на рис. 2. Установка складається із контейнера 1, встановленого на ресивері 2, який через систему трубопроводів та ротаметр 3, запірний вентиль 4 і регулівний 5 з'єднаний із водокільцевим вакуум-

насосом 6. Розрідження під шаром матеріалу вимірюється вакуумметром 7. Схема контейнера наведена на рис. 2, а. Основа контейнера 1 виготовлена із дюралюмінію, а перфорована перегородка 8 і циліндрична вставка 9 – із теплоізоляційного матеріалу. Методика виконання експерименту була такою. Висушене до постійної ваги АВ зважували і завантажували у контейнер 1. За допомогою штангенциркуля вимірювали висоту шару АВ і уточнювали її розрахунком за насипною вагою матеріалу. Контейнер 1 встановлювали на ресивер 2. Вмикали вакуум-насос 6 і за допомогою регулівного вентиля 5 встановлювали різну витрату повітря крізь шар АВ. Величину витрати визначали за показами ротаметра 3, а втрати тиску за показами вакуумметра 7 або U-подібного манометра (на рисунку не показаний). Досліджували шість висот шару матеріалу. Кожний експеримент здійснювали не менше 3–4 рази. Для кожного експерименту брали свіжу наважку матеріалу. Похибка між отриманими значеннями у різних експериментах не перевищувала 5 %.

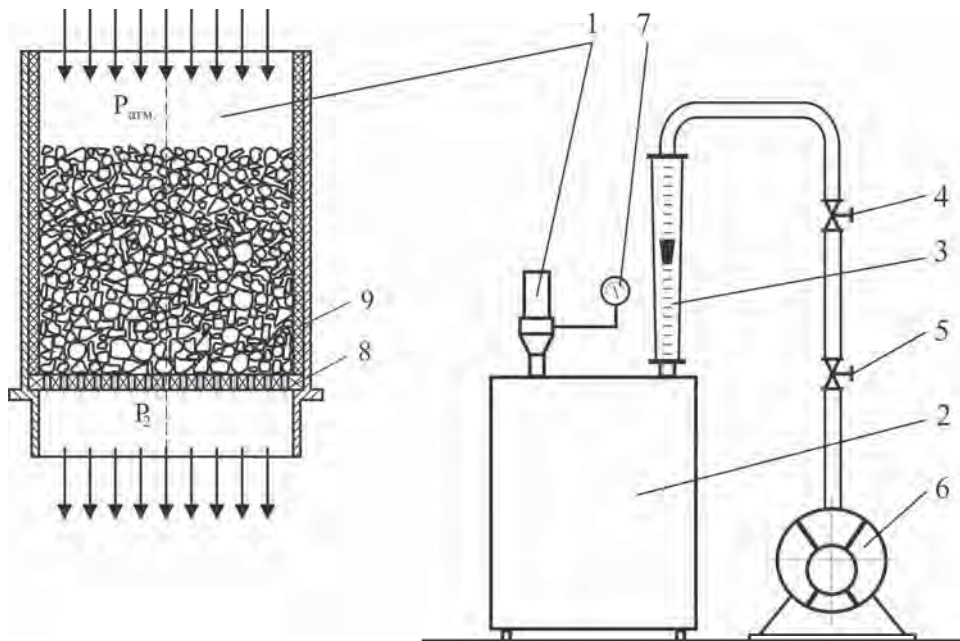


Рис. 2. Схема експериментальної установки

Результати експериментальних досліджень втрат тиску в стаціонарному шарі АВ наведено на рис. 3. Відомо [5], що коефіцієнт гідравлічного опору залежить від режиму фільтрування газового потоку і визначається із залежності

$$\lambda = \frac{A}{Re} + B, \quad (3)$$

де  $Re$  – число Рейнольдса.

Щоби визначити невідомі коефіцієнти “А” і “В” експериментальні значення подавали у вигляді  $\Delta P / (H \cdot v_0) = f(v_0)$  рис. 4, тоді залежність Дарсі-Вейсбаха матиме вигляд:

$$\frac{\Delta P}{H_e \cdot v_0} = A \cdot \frac{9 \cdot \mu}{8 \cdot d_q^2} \cdot \frac{(1 - \epsilon_{ш})^2}{\epsilon_{ш}^3} + B \cdot \frac{3 \cdot \rho}{4} \cdot \frac{1 - \epsilon_{ш}}{d_q \cdot \epsilon_{ш}^3} \cdot v_0 \quad (4)$$

для внутрішньої задачі гідродинаміки, коли  $d_e = \frac{2 \cdot d_q}{3} \cdot \frac{\epsilon_{ш}}{(1 - \epsilon_{ш})}$ .

Зображення експериментальних даних у вигляді  $\Delta P / (H_e \cdot v_0) = f(v_0)$  дало змогу записати рівняння (4) у вигляді

$$\frac{\Delta P}{H_e \cdot v_0} = 11500 + 13200 \cdot v_0. \quad (5)$$

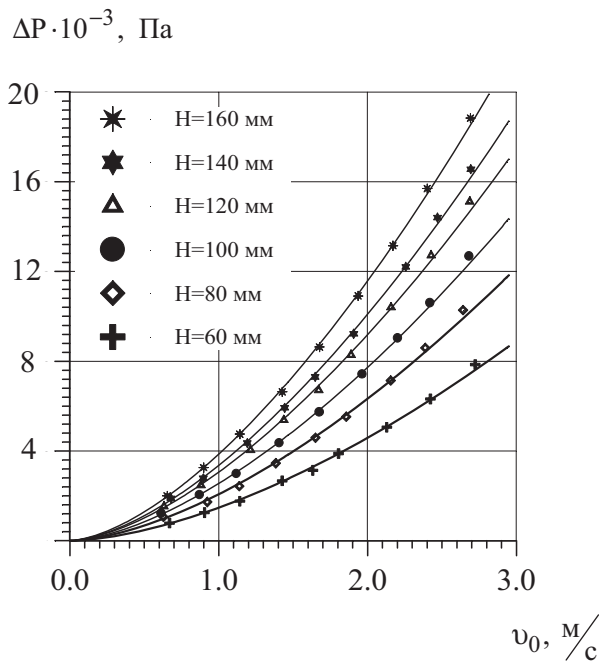


Рис. 3. Залежність втрат тиску в стаціонарному шарі АВ від фіктивної швидкості

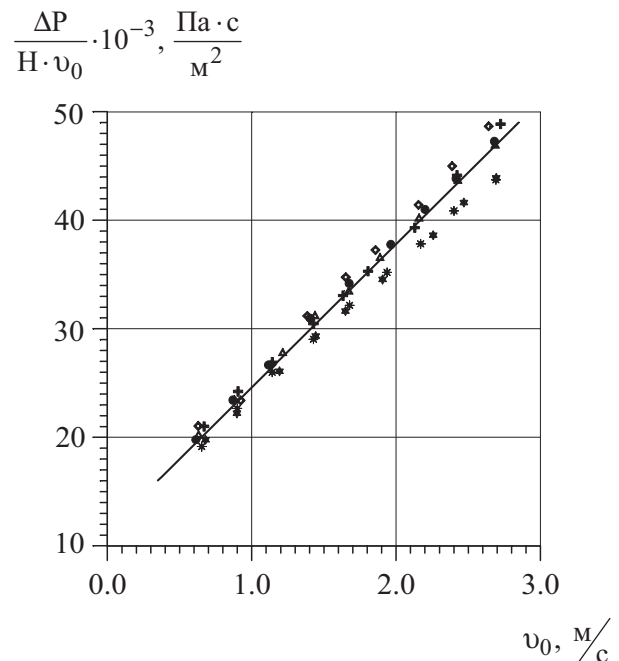


Рис. 4. Залежність  $\Delta P / (H_e \cdot v_0)$  від фіктивної швидкості

На основі залежності (5) визначені коефіцієнти “А” і “В” залежності (3), яку можна подати у вигляді

$$\lambda = \frac{208}{Re_e} + 1,4. \quad (6)$$

Розрахункові залежності (5) і (6) справедливі в межах фіктивних швидкостей  $0 < v_0 \leq 3$  ( $80 \leq Re \leq 400$ ), а максимальна відносна похибка між розрахованими за залежністю (5) значеннями та експериментальними даними не перевищує 10,22 %.

Експериментальні дані також зручно зображати у безрозмірній формі (рис. 5) у вигляді залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса. Така форма зображення експериментальних результатів дасть змогу, користуючись теорією подібності, визначити масштабні коефіцієнти у разі проектування пілотної установки. Також важливо визначити коефіцієнт гідравлічного тертя в стаціонарному шарі АВ.

Із графічної залежності рис. 6 визначаємо

$$\frac{\lambda}{2} = 10,5 \cdot Re_e^{-0,4} \quad (7)$$

звідки

$$\lambda = 21 \cdot Re_e^{-0,4} \quad (8)$$

З метою порівняння точності визначення коефіцієнта опору  $\lambda$  із вищенаведених залежностей (6) і (8) розрахуємо втрати тиску в стаціонарному шарі АВ за відомим рівнянням Дарсі-Вейсбаха

$$\Delta P_T = \lambda \cdot \frac{H_e}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot v_0^2}{2 \cdot \epsilon_{ш}} \quad (9)$$

і порівняємо отримані результати із експериментальними даними.

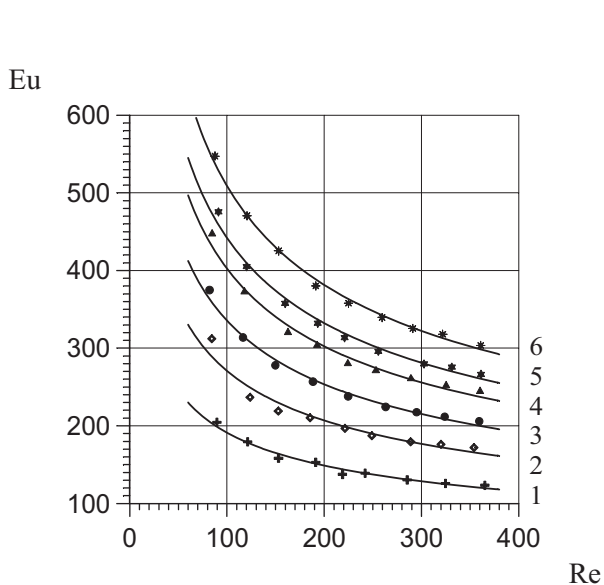


Рис. 5. Залежність числа Ейлера від числа Рейнольдса (позначення відповідають рис. 3)

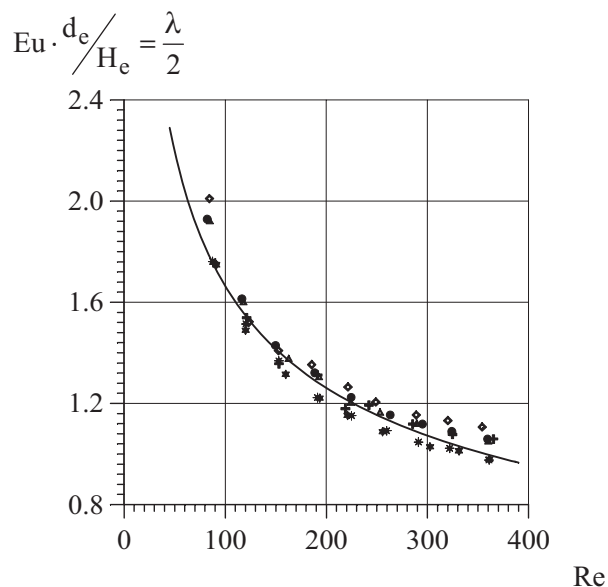


Рис. 6. Залежність коефіцієнта гідравлічного тертя від числа Рейнольдса

Результати порівняння наведемо у вигляді графічної залежності рис. 7.

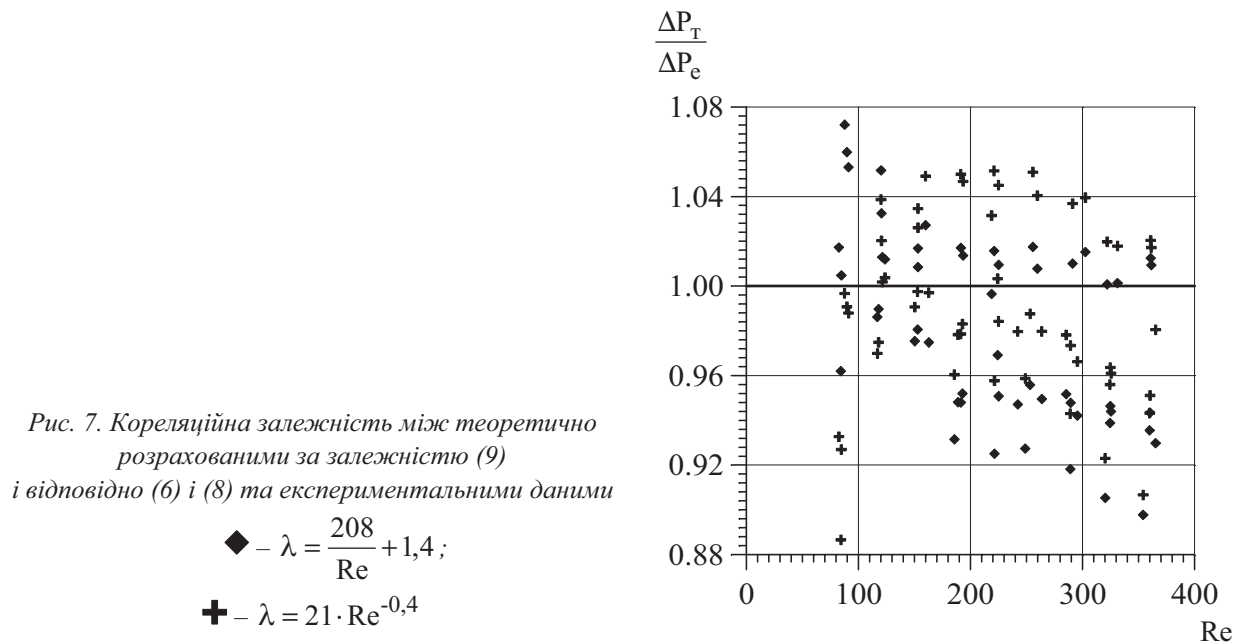


Рис. 7. Кореляційна залежність між теоретично розрахованими за залежністю (9) і відповідно (6) і (8) та експериментальними даними

$$\blacklozenge - \lambda = \frac{208}{\text{Re}} + 1,4;$$

$$\blackplus - \lambda = 21 \cdot \text{Re}^{-0,4}$$

**Висновки.** Як свідчить аналіз рис. 7 максимальна відносна похибка між розрахованими значеннями і експериментальними даними для всіх висот АВ не перевищує: для  $\lambda = 208/\text{Re} + 1,4$  – 10,22 %; а другого методу  $\lambda = 21 \cdot \text{Re}^{-0,4}$  – 11,34 % що є цілком прийнятним для проектних розрахунків технологічного обладнання.

1. Ханік Я.Н., Аксельруд Г.А., Топчий В.И. Гідродинаміка фільтраційного процесу сушки // *Инж.-физ. журн.* – 1986. – Т. 1, № 6. – С. 959–963. 2. Ханік Я.М., Аль-Ашкар Ясер. Гідродинаміка фільтраційного процесу сушіння піску // *Хімічна промисловість України.* – К., 1996. – № 6. – С. 33–37. 3. Ханік Я.М., Дулеба В. П., Атаманюк В.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння поліакриламід // *Вісн. Держ. ун-ту "Львів. політехніка".* – 1997. – № 316: *Хімія, технологія речовин і їх засто-*

сування. – С. 147–149. 4. Кіндзера Д.П., Ханик Я.М., Атаманюк В.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння торфу // Вісн. Держ. ун-ту “Львів. політехніка”. – 2001. – № 426: Хімія, технологія речовин і їх застосування. – С. 204–208. 5. Кіндзера Д.П., Ханик Я.М., Атаманюк В.М. Зернистий матеріал. Гідродинаміка полідисперсного шару // Хім. пром-сть України. – 2002. – № 6. – С. 38–42. 6. Атаманюк В.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння дисперсного матеріалу // Промислова гідравліка і пневматика: Всеукраїнський наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2006. – № 1 (11). – С. 12–17. 7. Атаманюк В.М. Гідродинаміка стаціонарного шару технічного вуглецю / В.М. Атаманюк, Я.М. Гумницький / Восточно-Европейский журнал передовых технологий // Харків: 5<sub>75</sub> (41). – 2009. – С. 29–34. 8. Протодьяконов И.О., Чесноков Ю.Г. Гидромеханические основы процессов химической технологии – Л.: Химия, 1987. – 360 с. 9. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем – Л.: Химия, 1979. – 176 с.

УДК 666.183: 661.666.2

Т.М. Вітенько\*, О.Р. Гащин\*; Я.М. Гумницький\*\*,

\*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

\*\*Національний університет “Львівська політехніка”,

кафедра екології та охорони навколишнього середовища

## ІНАКТИВАЦІЯ МІКРООРГАНІЗМІВ *E. COLI* ПІД ЧАС ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ЙОНАМИ СРІБЛА В УМОВАХ КАВІТАЦІЙНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ

© Вітенько Т.М., Гащин О.Р., Гумницький Я.М., 2010

Наведено результати експериментальних досліджень інактивуючої дії йонів срібла різної концентрації під час інактивації санітарно-показникових мікроорганізмів *Escherichia coli* у воді. Показано, що ефекти кавітаційного поля інтенсифікують дію малих концентрацій  $Ag(I)$  (0,005 і 0,01 мг/дм<sup>3</sup>), що дає змогу досягнути високого знезаражувального ефекту за короткий проміжок часу. Порівняно інтенсивність знезаражування у пристроях динамічного і статичного типів.

The results of experimental investigations of inactivating action of various concentrations silver ions while inactivating microorganisms *Escherichia coli* in water are presented in the paper. Cavitation field effects are shown to intensify the action of small concentration  $Ag(I)$  (0,005 and 0,01mg/dm<sup>3</sup>). It allows to achieve high decontamination effect in a short period of time. Decontamination intensity in the dynamic and static devices is compared.

**Вступ.** Стрімкий розвиток промислового виробництва та житлово-побутового будівництва супроводжується дефіцитом водних ресурсів. Вибір оптимальних, екологічно безпечних технологічних процесів знезараження побутових і стічних вод, що містять різні види патогенної флори, набуває все більшого народногосподарського значення.

Аналіз досліджень в напрямку удосконалення та інтенсифікації процесів знезаражування води за допомогою ефектів гідродинамічної кавітації, показав, що цей метод є доволі ефективним у технології водопідготовки [1, 4]. Серед відомих пристроїв, що дають змогу отримати кавітаційний режим, найбільший технологічний інтерес становлять гідродинамічні кавітаційні пристрої. У цих пристроях в потоці оброблюваного середовища утворюється місцеве просторове зниження тиску та виникає гідродинамічна кавітація за рахунок різкої зміни течії рідини. Енергія, необхідна для генерування кавітації, підводиться або безпосередньо технологічним потоком, або робочим