

Я. В. Радовенчик, асп.; М. Д. Гомеля, д-р. техн. наук, проф.

ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ РУХУ РІДИН В КАПІЛЯРНИХ МАТЕРІАЛАХ

Здійснено аналіз результатів експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків основних параметрів процесу очищення рідини матеріалами з капілярними властивостями. Наведено основні залежності між різними параметрами цього процесу, вплив на них окремих факторів, визначено взаємозв'язок між окремими параметрами.

Вступ

Одним з перспективних напрямків в процесах водоочистки та водопідготовки є використання фізичних явищ. Найцікавішим, з цієї точки зору, є так званий капілярний ефект, використання якого дозволяє розробляти прості, автономні, енергоощадні та високоефективні системи очищення природних та стічних вод. Проведений аналіз наукових публікацій у цій галузі не виявив розробок з використанням в технологіях очистки води матеріалів з капілярними властивостями. З іншого боку, не виявлено і публікацій, які б заперечували таке використання.

В попередніх роботах нами була обґрунтована можливість та доцільність використання явища капілярного підйому рідини для процесів очищення води від твердих часток та нафтопродуктів [1].

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та практичне підтвердження математичних залежностей основних складових, що описують процес фільтрування з використанням капілярних матеріалів. Отримані результати дозволили отримати низку основних математичних закономірностей, використовуючи які можна теоретично розрахувати основні параметри та характеристики для капілярних матеріалів. Використання отриманих закономірностей дозволяє визначити ключові параметри для вибору капілярного фільтра.

Аналіз попередніх досліджень

Капілярний ефект передбачає підняття стовпчика рідини по трубках незначного діаметра (капілярах) під дією сил поверхневого натягу. Причому, чим менший діаметр капіляра, тим більша висота підняття рідини в ньому. Цей фізичний ефект є основним в забезпеченні нормального перебігу біохімічних процесів для більшості живих організмів, в тому числі і для людини. В загальному випадку висота (h), на яку піднімається стовпчик рідини в капілярі, визначається з рівняння [2]:

$$h = \frac{2\delta \cos \Theta}{\rho g r}, \quad (1)$$

де δ — коефіцієнт поверхневого натягу рідини; Θ — крайовий кут змочування рідиною стінок капіляра; ρ — густина рідини; g — прискорення вільного падіння; r — радіус капіляра.

Як видно з приведеного рівняння, при інших однакових умовах, висота підняття рідини обернено пропорційна радіусу капіляра. Зменшуючи радіус капіляра, можна збільшувати висоту підняття рідини. Досить ефективно капілярні явища реалізуються, наприклад, у ґрунтах, де вода через пори може підніматися на значні відстані від дзеркала. Так, при розмірах частинок ґрунту 0,01...0,05 мм, висота підняття води перевищує 2000 мм [3]. Разом з тим, цілком очевидно, що зменшення радіуса капіляра буде супроводжуватись зміною швидкості руху рідини в ньому, що є досить суттєвим з точки зору технології очищення води, оскільки обмежує загальну продуктивність процесу. Зважаючи на те, що до сьогодні в наукових працях оцінка таких змін не проводилась, є сенс розглянути це питання детальніше.

Викладення основного матеріалу

У разі заповнення капіляра рідиною, що змочує його стінки ($\Theta < 90^\circ$), в капілярі (в результаті взаємодії рідини з поверхнею стінок) формується ввігнута поверхня. Рух рідини в капі-

лярі буде визначатись балансом сил тяжіння (F_T) та поверхневого натягу (F_H). Очевидно, що для визначеної висоти рідини в капілярі (h) різниця тисків (P), прикладена до дзеркала води в посудині та точки в капілярі на висоті h , буде описуватись рівнянням

$$P = \frac{F_H - F_m}{S}, \tag{2}$$

де S – площа поперечного перерізу капіляра; $S = \pi r^2$.

Сила земного тяжіння буде визначатися як вага стовпчика рідини в капілярі

$$F_m = mg = \pi r^2 h \rho g. \tag{3}$$

Сила поверхневого натягу може бути визначена як $F_H = 2\pi r \delta \cos \Theta$.

Тоді

$$P = \frac{2\pi r \delta \cos \Theta - \pi r^2 h \rho g}{\pi r^2}; \quad P = \frac{2\delta \cos \Theta - r h \rho g}{r}. \tag{4}$$

Згідно з формулою Пуазейля [4], швидкість руху рідини в капілярі визначається рівнянням

$$V = \frac{Pr^2}{4\eta h}. \tag{5}$$

Підставляючи в рівняння значення P , отримуємо:

$$V = \frac{2\delta \cos \Theta \cdot r - r^2 h \rho g}{4\eta h}. \tag{6}$$

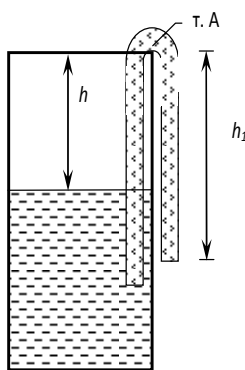


Рис. 1. Схема транспортування рідини в капілярному фільтрі

Як відомо, продуктивність одного капіляра (Q) буде визначатись залежністю $Q = VS$, яка після підстановки значень набуває вигляду

$$Q = \frac{2\delta \cos \Theta \cdot \pi r^3 - \pi r^4 h \rho g}{4\eta h}. \tag{7}$$

Для підтвердження адекватності отриманих залежностей проведена їх експериментальна перевірка. Як капілярний фільтр використовували джгут з бавовняних ниток загальною товщиною 0,9 см. В процесі експерименту змінювали значення параметра $h = h_1 - h$, визначаючи об'єм рідини, що транспортується капілярним фільтром за визначений час (рис. 1).

На основі отриманих результатів розраховували швидкість руху рідини в капілярному фільтрі та будували залежність зміни швидкості води від висоти підняття її в капілярі (рис. 2).

Для аналогічних умов побудовано на основі формули (6) теоретичну залежність між вказаними параметрами. Як впливає з рис. 2, отримана залежність адекватно описує зміну швидкості руху води в капілярі в залежності від висоти її підняття.

В загальному випадку в процесах очищення води важливою є швидкість руху води між різними резервуарами. Використовуючи модель капілярного фільтра із двох однакових капілярів, з'єднаних між собою (рис. 3), можна стверджувати, що тиск в кожному з них буде описуватись залежністю (4). При цьому будемо вважати, що ліва посудина заповнена

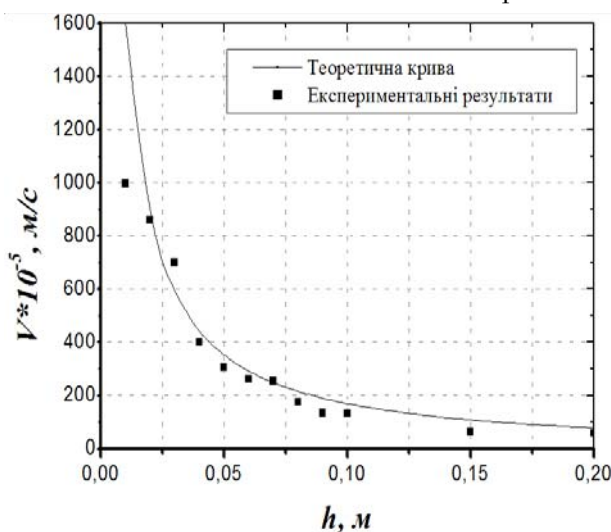


Рис. 2. Залежність швидкості руху рідини в капілярах від висоти її підняття

стічною водою, яку необхідно очистити та транспортувати в праву посудину.

Цілком очевидно, що рух рідини в капілярі буде спостерігатись лише у випадку, коли $P \neq P_1$. Як впливає з наведених вище міркувань та відповідних математичних перетворень, в точці капіляра на рівні краю посудини

$$\Delta P = P - P_1 = (h_1 - h) \rho g. \tag{8}$$

Як впливає з отриманої залежності, можливі кілька характерних режимів перетікання рідини. У випадку, коли $h_1 < h$, ΔP матиме від'ємне значення, що свідчить про вакуум у точці А та про відсутність руху води через капіляр з лівої посудини в праву. При цьому буде спостерігатись рух рідини в зворотному напрямку, тобто з правої посудини в ліву. Коли $h_1 = h$, обидва капіляри повністю заповнюються рідиною і перебувають в рівновазі. Оскільки $\Delta P = 0$, транспортування рідини не спостерігається. Очевидно, що лише у випадку $h_1 > h$ буде спостерігатись рух рідини з лівої посудини в праву. Рушійною силою в цьому випадку буде позитивне значення ΔP , яке, в свою чергу, буде викликане різницею мас стовпів рідини в обох гілках капіляра.

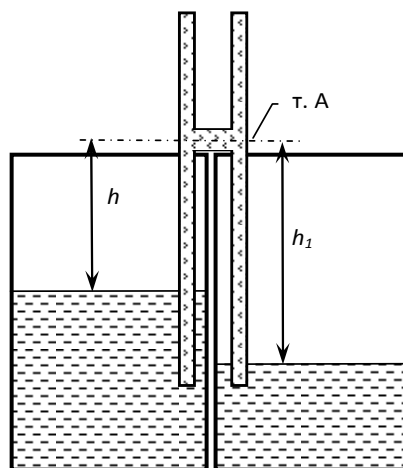


Рис. 3. Модель для розрахунку умов перетікання рідини між капілярами

На рис. 4 показано залежність ΔP від різниці $\Delta h = h_1 - h$. Оскільки виміряти тиск в пористому середовищі досить важко, для перевірки достовірності отриманої залежності автори використовували вимірювання швидкості руху води в капілярах. Як впливає з (6), швидкість руху води в капілярі пропорційна зміні тиску в ньому. Швидкість руху рідини визначали шляхом ділення витрати води, яку безпосередньо вимірювали, на площу поперечного перерізу джгута. Як впливає з рис. 4, зміна швидкості та різниці тисків практично підпорядковані одній і тій же залежності.

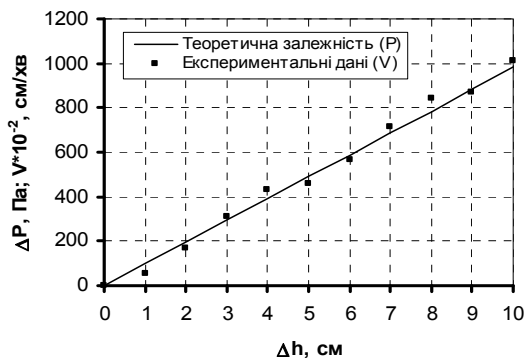


Рис. 4. Залежність різниці тисків в гілках капіляра від різниці параметрів h_1 та h

Варто також зауважити, що висота підняття рідини в капілярі обернено пропорційна радіусу капіляра. Залежність швидкості руху води в капілярі від його радіуса складніша (6). Очевидно, що залежність (6) має екстремум, який відповідатиме максимальному значенню швидкості руху рідини в пористому середовищі. З практичної точки зору, знання величини радіуса капіляра для максимального значення швидкості дозволить максимально використовувати можливість фільтрування з використанням капілярних матеріалів. Розрахована залежність (6) показана на рис. 5. Як впливає з рисунка, на залежності, дійсно, спостерігається досить чіткий екстремум, а рух рідини реалізується в досить вузькому діапазоні зміни радіуса капіляра r . Залежність (6) дозволяє визначити радіус капіляра, з яким рух води в ньому взагалі не спостерігається. Якщо припустити, що $V = 0$, то

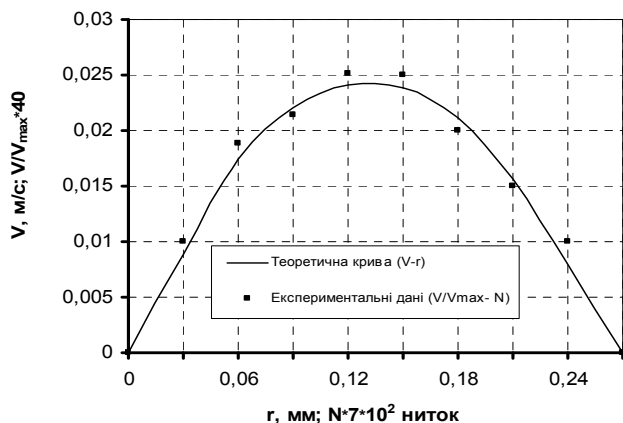


Рис. 5. Залежність швидкості руху рідини в капілярі від радіуса капіляра

$$2\delta \cos \Theta \cdot r - h\rho g r^2 = 0.$$

Очевидно, що це рівняння має два корені, одним з яких буде значення $r_1 = 0$. Провівши нескладні математичні перетворення, отримаємо:

$$2\delta \cos \Theta - h\rho g r = 0. \quad (9)$$

Тоді

$$r_2 = \frac{2\delta \cos \Theta}{\rho g h}. \quad (10)$$

Для вказаних вище параметрів $r_2 = 0,265$ мм. Таким чином, рух рідини зі вказаними параметрами, буде спостерігатися зі зміною радіуса пор в діапазоні $r = 0 \dots 0,265$ мм. Для визначення радіуса пор, при якому спостерігається максимальна швидкість руху рідини достатньо знайти похідну для рівняння (2) і, прирівнявши отриманий вираз до 0, визначити значення r .

Проведені розрахунки свідчать, що максимальна швидкість руху води в капілярі спостерігається коли $r = 0,1327$ мм. Аналогічним чином можна розрахувати оптимальний радіус пор для різних умов та матеріалів з капілярними властивостями.

Для підтвердження отриманої залежності проведено такий дослід. Перфоровану пластикову трубку діаметром 4,5 мм поступово заповнювали джгутом, сформованим з бавовняних ниток № 40. Поступово кількість ниток у джгуті збільшували, фіксуючи точку, коли починався рух рідини зі збереженням незмінними інших параметрів. Кількість ниток в джгуті збільшували до тих пір, доки рух рідини в ньому не припинився. Вимірявши витрату води, визначали швидкість її в пористому середовищі. Сумістивши шкалу кількості ниток з діапазоном зміни радіуса пор у теоретичних розрахунках та виразивши всі виміряні швидкості в долях від максимального значення, отримали низку експериментальних точок, які досить точно корелюють з теоретичною кривою. Тому можна вважати, що залежність (2) адекватно описує вплив радіуса капіляра на зміну швидкості руху рідини в ньому.

Висновки

Проведені дослідження дозволили визначити залежності для розрахунку головних параметрів процесів очищення води капілярними матеріалами. Визначено залежність інтенсивності руху рідини в капілярі від його радіуса, що дає можливість визначати умови максимальної продуктивності фільтрів на пористих матеріалах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Радовенчик Я. В. Очищення води з використанням матеріалів з капілярними властивостями / Я. В. Радовенчик, М. Д. Гомеля // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2009. — № 2. — С. 37—39.
2. Сумм Б. Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. — М. : Химия, 1976. — 232 с.
3. Радовенчик В. М. Основи гідрології суші та океанології : навч. посіб. / В. М. Радовенчик, М. Д. Гомеля, Ю. А. Омельчук. — Севастополь : СТУАЕ та П, 2008. — 176 с.
4. Ромм Е. С. Особенности электрокинетических явлений в тонких капиллярах / Ромм Е. С. // Коллоидный журнал. — 1979. — XLI, № 5. — С. 895—901.

Рекомендована кафедрою екології та екологічної безпеки

Стаття надійшла до редакції 7.11.11

Рекомендована до друку 14.11.11

Радовенчик Ярослав Вячеславович — аспірант, **Гомеля Микола Дмитрович** — завідувач кафедри.

Кафедра екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ