

ВИВЧЕННЯ УМОВ ПЕРЕТІКАННЯ РІДИНИ В КАПІЛЯРНИХ МАТЕРІАЛАХ

Я. В. Радовенчик

Аспірант*

Контактний тел.: 093-697-62-71

E-mail: r.yar@ukr.net

В. С. Котлярова*

Контактний тел.: 093-225-44-58

E-mail: eco-paper@kpi.ua

*Кафедра екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут»
пр. Перемоги 37, корпус 4, лаб. 112, м. Київ, Україна,
03056

Наведено результати експериментів та теоретичних розрахунків основних параметрів процесу перетікання рідини по матеріалах з капілярними властивостями

Ключові слова: капіляр, капілярний ефект, фільтр

Представлены результаты экспериментов и теоретических расчетов основных параметров процесса перетекания жидкости через материалы с капиллярными свойствами

Ключевые слова: капилляр, капиллярный эффект, фильтр

Experimental results and theoretical calculations of the basic parameters for the process of fluid flowing through the materials with capillary characters were presented

Key words: capillary, capillary action, filter

1. Вступ

З давніх давен людина намагалася використовувати сили поверхневого натягу для отримання енергії, очищення води чи покращення якості різноманітних тканин та шкіри [1]. Не завжди позитивні результати пригальмували генерацію ідей в цій області, а ґрунтовні наукові дослідження обмежувалися одиничними публікаціями. В той же час, чіткі причини невдач не знайшли свого пояснення до сьогодні. З іншого боку, досить заманливо було б освоїти сили поверхневого натягу та ширше застосовувати капілярний ефект, котрий є основою транспортування рідини в будь-якому живому організмі, в системах очищення води та водо-підготовки.

Робота десятків конструкцій «вічних двигунів» базувалася на використанні того факту, що вода або інша відповідна рідина в тонких капілярах може підніматися на досить значну висоту без будь-якого зовнішнього впливу [2]. Ця висота визначається загальним рівнянням [3]:

$$h = \frac{2 \cdot \delta \cdot \cos \Theta}{\rho \cdot g \cdot r}$$

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

Винахідники вважали, що, відбираючи рідину з верхнього кінця капіляру, можна змусити його транс-

портувати рідину вгору безкінечно довго. І саме тут їх чекало найбільше розчарування, тому реалізувати жодну з конструкцій «вічного двигуна» до сьогодні не вдалося. Разом з тим, все частіше матеріали з капілярними властивостями використовуються в реальних пристроях для очищення води без серйозного наукового обґрунтування. Так, основним робочим елементом фільтру для очищення води «Аквафор» є новий волокнистий матеріал «Аквален» з капілярними властивостями [4], а в Казахстані з 2003 року експлуатується фільтр-прес, робота котрого базується на принципі капілярної фільтрації з використанням керамічних елементів [5]. Зважаючи на суттєві переваги фільтрування з використанням капілярного ефекту, увага до досліджень в даній галузі, на нашу думку, буде щорічно зростати.

2. Постановка проблеми і завдання дослідження

Метою даної роботи було вивчення умов перетікання води в капілярних матеріалах, визначення залежностей між їх основними характеристиками та експериментальне підтвердження отриманих результатів. Для практичної реалізації капілярного ефекту використовували джгут, сформований з медичного бинту, виготовленого згідно ГОСТ 1172-93. З 5 шарів бинту шириною 14 см формували пористий валик діаметром близько 1,5 см, котрий і використовувався для перевірки отриманих залежностей.

3. Викладення основного матеріалу

Як нами було раніше показано [6], зміна тиску в капілярі по висоті описується рівнянням:

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

В загальному випадку найпростішу систему транспортування води елементарним капіляром можна представити у вигляді перевернутої U - подібної конструкції, одна гілка якої виводиться за межі посудини (рис. 1).

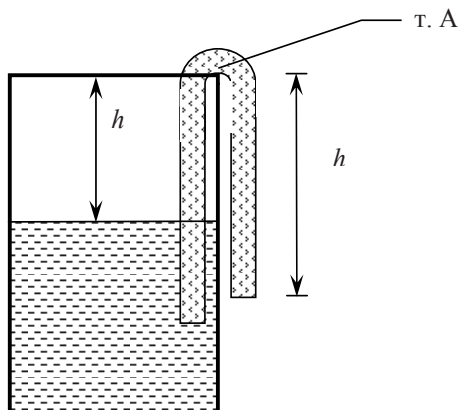


Рис. 1. Схема до розрахунку основних параметрів транспортування рідини капіляром

В такому випадку в елементарному капілярі гілки, зануреної в посудину з рідиною, буде створюватись тиск, що описується формулою (1). Під дією цього тиску та поверхневих сил буде заповнюватись і інша гілка капіляра. При цілковитому її заповненні тиск в ній буде змінюватись у відповідності із залежністю:

$$P_1 = \frac{2 \cdot \delta \cdot \cos \Theta - r \cdot h_1 \cdot \rho \cdot g}{r},$$

де h_1 – відстань між верхньою та нижньою точками капіляру.

Цілком очевидно, що рух рідини в капілярі буде спостерігатись лише у випадку, коли $P \neq P_1$. Як впливає з приведених вище міркувань, в точці капіляра на рівні краю посудини (т. А на рис. 1):

$$\begin{aligned} \Delta P &= P - P_1 = \\ &= \frac{2 \cdot \delta \cdot \cos \Theta - r \cdot h \cdot \rho \cdot g}{r} - \frac{2 \cdot \delta \cdot \cos \Theta - r \cdot h_1 \cdot \rho \cdot g}{r} = \\ &= \frac{2 \cdot \delta \cdot \cos \Theta}{r} - h \cdot \rho \cdot g - \frac{2 \cdot \delta \cdot \cos \Theta}{r} + h_1 \cdot \rho \cdot g = \\ &= h_1 \cdot \rho \cdot g - h \cdot \rho \cdot g = (h_1 - h) \cdot \rho \cdot g; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Delta P = (h_1 - h) \cdot \rho \cdot g.$$

Як видно з отриманої залежності, можливі кілька характерних режимів перетікання рідини. У випадку, коли $h_1 < h$, ΔP матиме від'ємне значення, що свідчить про вакууму в т. А та про відсутність руху води через капіляр з посудини за її межі. При цьому, занурення

кінця зовнішньої гілки капіляра в іншу посудину з водою буде супроводжуватись рухом рідини в зворотному напрямку, тобто, в основну посудину. При $h_1 = h$ обидві гілки капіляра повністю заповнюються рідиною і перебувають в рівновазі, оскільки $\Delta P = 0$, сили поверхневого натягу перешкоджають руху рідини за межі зовнішньої гілки капіляра і її транспортування не спостерігається. Очевидно, що лише у випадку $h_1 > h$ буде спостерігатись рух рідини за межі посудини. Рушійною силою в цьому випадку буде позитивне значення ΔP , котре, в свою чергу, буде викликано різницею мас стовпів рідини в обох гілках капіляра. Як видно з приведеного виразу, між різницею h_1 та h і різницею тисків (ΔP) існує лінійна залежність.

На рис. 2 приведено залежність ΔP від різниці Δh ($h_1 - h$). Розрахунки проведені при умові, що при вимірюванні величини h_1 та h виражали в м, інші величини приймали в наступних значеннях - $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, а різницю тисків отримували в паскалях $\Delta P = [\text{м} \cdot \text{кг/м}^3 \cdot \text{м/с}^2] = [\text{кг/м} \cdot \text{с}^2] = \text{Па}$.

Оскільки виміряти тиск в пористому середовищі досить важко, для перевірки достовірності отриманої залежності ми використовували вимірювання швидкості руху води в капілярах. Як показано в [6], швидкість руху води в капілярі пропорційна зміні тиску в ньому. Тому, опосередковано, швидкість руху води в капілярі можна використати для підтвердження достовірності отриманої залежності (2). Швидкість руху рідини визначали шляхом ділення витрати води, котру безпосередньо вимірювали, на площу поперечного перерізу джгута. Отримані результати нанесені на рис. 2 на теоретичну криву у вигляді окремих експериментальних точок. Як видно з рисунку, зміна швидкості та різниці тисків практично підпорядковані одній і тій же залежності.

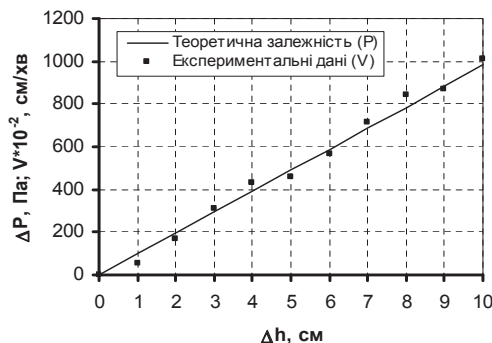


Рис. 2. Залежність різниці тисків в гілках капіляра від різниці параметрів h_1 та h (див. рис. 1)

Варто також зауважити, що висота підняття рідини в капілярі обернено пропорційна радіусу капіляра. Залежність швидкості руху води в капілярі від його радіусу більш складна [6]:

$$V = \frac{(2 \cdot \delta \cdot \cos \Theta - r \cdot h \cdot \rho \cdot g \cdot r^2)}{4 \cdot \eta \cdot h} \quad (3)$$

Очевидно, що представлена залежність (3) має екстремум, котрий відповідатиме максимальному значенню швидкості руху рідини в пористому середовищі. З практичної точки зору значення величини радіусу капіляру для максимального значення швидкості до-

зволить максимально використовувати можливості фільтрування з використанням капілярних матеріалів. Залежність (3), розрахована для значень $h=0,05$ м, $\delta=0,074$ Н/м, $\cos \Theta = 0,88$, $\nu=1,78 \cdot 10^{-6}$ м²/с, показана на рис. 3. Як видно з рисунка, на залежності дійсно спостерігається досить чіткий екстремум, а рух рідини реалізується в досить вузькому діапазоні зміни радіуса капіляра r . Залежність (3) дозволяє визначити радіус капіляра, при котрому рух води в ньому взагалі не спостерігається. Якщо припустити, що $V=0$, то:

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

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

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

Тоді:

$$r_2 = \frac{2 \cdot \delta \cdot \cos \Theta}{\rho \cdot g \cdot h}.$$

Для вказаних вище параметрів $r_2=0,265$ мм. Таким чином, рух рідини при вказаних параметрах, буде спостерігатися при зміні радіусу пор в діапазоні $r = 0 \div 0,265$ мм. Для визначення радіусу пор, при котрому спостерігається максимальна швидкість руху рідини достатньо знайти похідну $\frac{\partial V}{\partial r}$ для рівняння (3) і, прирівнявши отриманий вираз до 0, визначити значення r .

Очевидно, що:

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \left(\frac{\delta \cdot \cos \Theta}{2 \cdot \eta \cdot h} - \frac{\rho \cdot g}{2 \cdot \eta} \right) \cdot r = 0, \quad r = \frac{\delta \cdot \cos \Theta}{\rho \cdot g \cdot h}.$$

Підставивши в рівняння відповідні значення, отримаємо максимальну швидкість руху води в капілярі при $r = 0,1327$ мм. Аналогічним чином можна розрахувати оптимальний радіус пор для різних умов та матеріалів з капілярними властивостями.

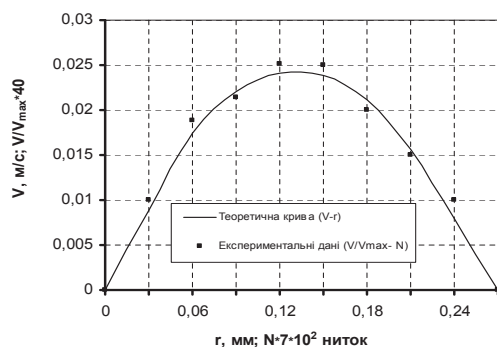


Рис. 3. Залежність швидкості руху рідини в капілярі від радіуса капіляра

Оскільки зафіксувати розмір пор матеріалів з капілярними властивостями практично неможливо, то досить важко експериментально підтвердити отриману залежність (3). Нами було проведено наступний 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 при збереженні постійними 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 при теоретичних розрахунках та виразивши всі виміряні швидкості в долях від максимального значення, отримали ряд експериментальних точок, котрі досить точно корелюють з теоретичною кривою. Тому можна вважати, що залежність (3) адекватно описує вплив радіуса капіляра на зміну швидкості руху рідини в ньому.

4. Висновки

Проведені дослідження дозволили визначити умови перетікання рідини в тонких капілярах, встановити залежність швидкості руху рідини від радіусу капіляра та підтвердити отримані теоретичні залежності експериментальними результатами. Встановлено, що перетікання рідини по капілярах реалізується лише у випадку, якщо кінець капіляра за межами посудини нижче рівня рідини в ній. При цьому, різниця тисків в найвищій точці джгута, а відповідно і інтенсивність руху рідини, прямо пропорційні різниці рівнів її в посудині та кінця капіляра за межами посудини. Визначено залежність інтенсивності руху рідини в капілярі від його радіусу, що дає можливість визначити умови максимальної швидкості руху води в пористих матеріалах.

Література

1. Способ капиллярно-сифонного фильтрования: пат. 166144 СССР: МПК В 01 D 21/00/ Басманова С. Н., заявитель и патентообладатель Басманова С. Н. – №477973/26; заявл. 30.08.88; опубл. 30.07.91, Бюл. №28.-2 с.
2. Гидравлические вечные двигатели [Электронный ресурс]/ Вечный двигатель.- Режим доступа: \www/ URL: http://pm.far-for.net/ - Загл. с экрана.
3. Сумм, Б.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания/ Сумм Б.Д., Горюнов Ю. В. - М.: Химия, 1976.-232 с.
4. Волокна Аквален [Электронный ресурс]/ Фильтры для воды АКВАФОР.- Режим доступа: \www/ URL:http://aquaphor.ua/ - Загл. с экрана.
5. Уникальный пресс-фильтр [Электронный ресурс]/ ТОО «Казцинк».- Режим доступа: \www/ URL:http://kazzinc.com/ - Загл. с экрана.
6. Радовенчик Я. В. Очищення води з використанням матеріалів з капілярними властивостями/ Радовенчик Я. В., Гомеля М. Д.// Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. - 2009.- №2.- С. 37-39.