

УДК 66.048.5.069.834

Гомеля М.Д.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Радовенчик Я.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Побережний М.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВИПАРЮВАННЯ РІДИН

У роботі наведено результати вивчення можливості інтенсифікації процесів випарювання рідин шляхом використання матеріалів із капілярними властивостями. Досліджено вплив різноманітних чинників на ефективність процесів випаровування. Визначено інтенсивність випаровування з поверхні тканини та можливість її регулювання. Запропоновано фізичну модель процесу випаровування. Встановлено, що використання матеріалів із капілярними властивостями дає змогу більше ніж на два порядки збільшити інтенсивність випаровування з поверхні водного середовища без використання додаткових енергетичних затрат та складного обладнання.

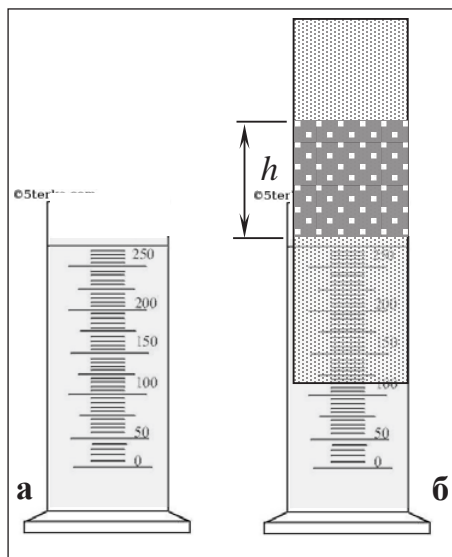
Ключові слова: капіляр, матеріали з капілярними властивостями, випарювання рідин, обробка рідких відходів.

Постановка проблеми. Сучасний стан гідросфери формується передусім антропогенною діяльністю людини. Сьогодні мінералізація поверхневих водойм є чи не найгострішою проблемою багатьох промислово розвинутих регіонів, особливо Півдня та Сходу України. Крім того, у промисловості щорічно утворюється мільйони кубічних метрів токсичних відходів у вигляді висококонцентрованих розчинів та суспензій різноманітного складу. Переважна їх більшість накопичується та зберігається в шламосховищах, наносячи непоправної шкоди довкіллю та живим організмам. Багато технологічних процесів у промисловості супроводжуються утворенням концентратів, які досить дорого зберігати через їхню токсичність чи корозійну агресивність, але ще дорожче переводити в зручний для захоронення та зберігання твердий стан. Найбільш поширеним методом знешкодження в промисловості таких розчинів є їх упарювання при високих температурах, що завжди пов'язано зі значними затратами енергії [1]. Неefективніші й хімічні методи, котрі потребують складних технологій та додаткових реагентів [2]. Тому проблеми знешкодження таких розчинів є сьогодні досить гострими і потребують термінового вирішення, а будь-які дослідження у цій галузі – актуальні та перспективні. Одним

із таких перспективних напрямів можна вважати використання в процесах випарювання волокнистих матеріалів із капілярними властивостями. Наявність останніх дає змогу створювати на основі таких матеріалів ефективні, автономні, дешеві та надзвичайно прості системи упарювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Чи не вперше використовувати матеріали з капілярними властивостями (волокнисті матеріали) для вирішення проблем токсичних рідин шламосховищ було запропоновано автором [3], однак ґрунтовних досліджень у цьому напрямі проведено не було, автор обмежився лише описом ідеї, оскільки тематика роботи мала дещо інше спрямування. Незважаючи на те що капілярні структури досить поширені в теплових насосах, апаратах перетворення фаз, в енергетичному обладнанні [4], у технологіях захисту довкілля, зазначена вище ідея подальшого розвитку не отримала. Фактично більше результатів схожих досліджень нам не вдалося знайти і в інших наукових джерелах. Разом із тим проведені нами дослідження у цій галузі показали, що використання в різноманітних технологічних процесах волокнистих матеріалів дає змогу досить легко та дешево розділяти рідку та тверду фази, видаляти з водного середовища

широку гаму різноманітних забруднювачів після відповідної обробки води, просто розділяти рідини, що не змішуються, і т. п. Основні закономірності цих процесів розглянуті нами в [5; 6]. Незважаючи на детальне вивчення процесів масо- і теплопереносу в капілярних структурах та випаровування із дзеркала водойм у природних умовах, питання транспортування рідин капілярними структурами з одночасним випаровуванням рідкої фази з їх поверхні лишилися поза увагою дослідників. Практично відсутні дані про інтенсивність та механізм випаровування в таких структурах. З іншого боку, використання різноманітних типів тканин як надзвичайно простих та ефективних випарювачів на промислових об'єктах різного призначення дасть змогу створювати дешеві автономні системи знешкодження стічних вод. Даний матеріал присвячений дослідженню особливостей переміщення рідин у матеріалах із капілярними властивостями в умовах можливості їх одночасного випаровування.



а – контрольний циліндр;
б – експериментальний циліндр

Рис. 1. Обладнання для вивчення інтенсифікації випаровування води з використанням волокнистих матеріалів

Постановка завдання. Метою роботи є вивчення можливості та ефективності використання волокнистих матеріалів у процесах інтенсифікації випаровування води в різних умовах та дослідження впливу різних чинників на процес і його характеристики.

Для вивчення процесів інтенсифікації випаровування застосовували два ідентичних градуйованих циліндри, один з яких виконував контрольну функцію, а інший слугував для створення відповідних

умов випаровування (рис. 1). В експериментальному циліндрі додатково розміщувалася смужка з тканини відповідного матеріалу (переважно бавовна, в окремому випадку – льон), що нараховувала від 1 до 21 шарів. Ширина смужки – 5 см. Довжина смужки – 50 см. Щільність бавовни – 100 г/м², льону – 171,1 г/м². Методика роботи полягала у визначенні висоти капілярного підняття рідкої фази по смужці тканини (h на рис. 1) та зменшення об'єму рідини, що випаровується за визначений час в обох циліндрах при встановлених температурах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Згідно із сучасними уявленнями, у капілярі невеликого діаметру (менше 1 мм) із водонепроникними стінками під дією сил поверхневого натягу рідина піднімається на висоту h , котра описується залежністю [7]:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r}, \quad (1)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, θ – крайовий кут змочування рідиною стінок капіляра, ρ – густина рідини, g – прискорення вільного падіння, r – радіус капіляра.

Як свідчить рівняння (1), найбільшою мірою для однакових матеріалів висота підняття рідкої фази залежить від радіусу капіляра. При цьому головною умовою є відсутність витрати рідини за межі капіляра за її переміщення вертикально. У таких умовах висота підняття рідини може сягати значних розмірів. Наприклад, у природних умовах для дрібнозернистих пісків та лисів цей показник інколи сягає 2 м і більше, а в живій природі рух водних розчинів по дрібних капілярах є основою забезпечення живих організмів поживними речовинами. Однак у цих випадках йдеться про відносно замкнуті системи. У разі ж волокнистих матеріалів ситуація дещо інша. Більшість тканин являє собою композицію із з'єднаних різними способами ниток, які, своєю чергу, формуються із джгута мікроскопічних волокон бавовни, шовку і т. п. Таким чином, тканина відповідного типу являє собою складну пористу структуру, сформовану із мікроскопічних волокон. Оскільки ці волокна мають переважно незначну довжину (наприклад, для волокон бавовни довжина коливається в межах 1–55 мм), то тканину можна представити у вигляді матеріалу з величезною кількістю мікроскопічних капілярів, які самі є такими, з'єднуються один з одним, формують капіляри із міжволоконного простору, тією чи іншою мірою контактують з атмосферою і т. д. Як впливає з викладеного вище, для волокнистих матеріалів,

що використовуються як випарювачі рідкої фази за описаних умов, одночасно характерні два процеси – транспортування рідини капілярами та випаровування її з поверхні тканини. Очевидно, що у вертикально розміщеній тканині загальний рівень, на який буде підніматися рідка фаза, визначатиметься балансом рідини, що транспортується до найвищої точки капілярами, та рідини, що випаровується з поверхні тканини шляхом транспортування. Для підтвердження цього факту сухі смужки бавовни та льону шириною 50 мм та довжиною 500 мм занурювали у воду одним кінцем та спостерігали протягом однієї години при різних температурах повітря за рухом рідини по порах тканини. За одну годину фіксували висоту змоченої зони. Результати дослідів представлені на рис. 2.

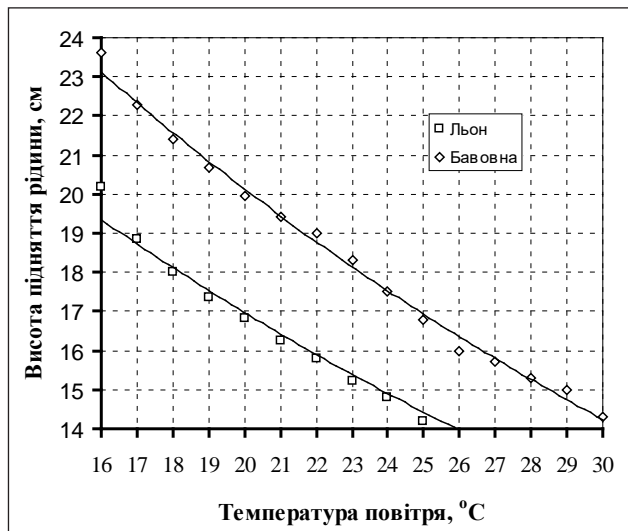


Рис. 2. Зміна висоти підняття рідини в порах різних тканин протягом 1 год. за різних температур повітря

Як видно з рис. 2, зі збільшенням температури рівень підняття рідини знижується, що цілком співпадає з викладеними вище міркуваннями. За підвищених температур інтенсивність випаровування зростає, і вся вода, що транспортується по порах тканини, випаровується значно швидше, що зумовлює зниження висоти підняття рідини. Для різних тканин таке зниження буде різним і визначається властивостями волокон тканини. За подовження дослідів довше однієї години загальна висота змоченої частини зростала несуттєво, тобто процес стабілізувався. Підтвердженням такого трактування процесів у смужці тканини є також той факт, що в досліді із цією ж бавовняною смужкою, але розміщеною між двома герметичними шарами поліетилену (тобто без можливості випаровування), рідина піднімається протягом

семи діб на висоту 84 см. Очевидно, що для збільшення висоти підняття рідини в смужках тканини необхідно підвищити кількість рідкої фази, що транспортується порами тканини. Нами для цього запропоновано використовувати смужки, складені з різної кількості шарів тканини. Із викладених вище міркувань випливає, що для підвищення ефективності випаровування необхідно забезпечити транспортування рідини порами тканини на максимально можливу висоту. Якщо смужка тканини буде складатися з трьох чи більше шарів, то середній шар буде виконувати скоріше функцію транспортування рідкої фази, аніж її випаровування. За збільшення кількості шарів тканини шар, що транспортує рідку фазу, буде товстішати, і кількість рідини, що доставляється до найвищої точки полотнища, буде також зростати, збільшуючи загальну висоту підняття рідини і, відповідно, площу випаровування. Результати дослідів із такими смужками представлені на рис. 3.

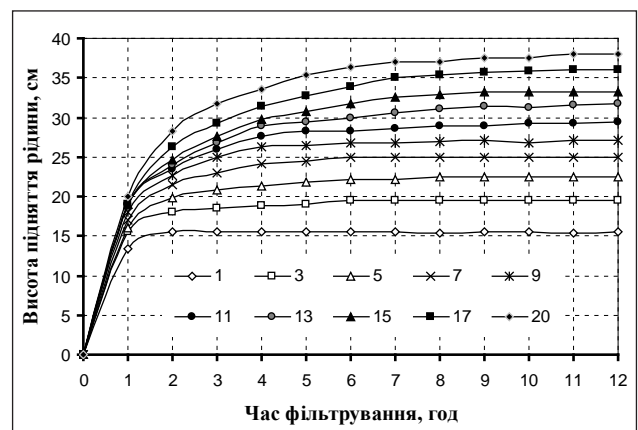


Рис. 3. Зміна висоти підняття рідини в порах смужки із бавовни за різної кількості шарів тканини

Як видно з рис. 3, за різної кількості шарів змінюється і висота підняття рідини. Однак варто зауважити, що найбільш помітно цей показник зростає за невеликої кількості шарів – 3, 5, 7. Далі приріст висоти підняття рідини знижується, і можна прогнозувати, що за подальшого збільшення кількості шарів тканини такий приріст узагалі припиниться, оскільки для кожного пористого середовища залежно від його характеристик існує максимальна висота підняття рідини, вище якої переміщення рідкої фази взагалі не фіксується. Причому в усіх випадках рівень сягає свого максимуму протягом доби і в подальшому суттєво змінюється лише залежно від температури повітря.

Очевидно, що загальний рівень підняття рідини у вертикально розміщеній смужці тканини

буде визначатися балансом рідини, що транспортується капілярами, та рідини, що випаровується з поверхні тканини (рис. 4):

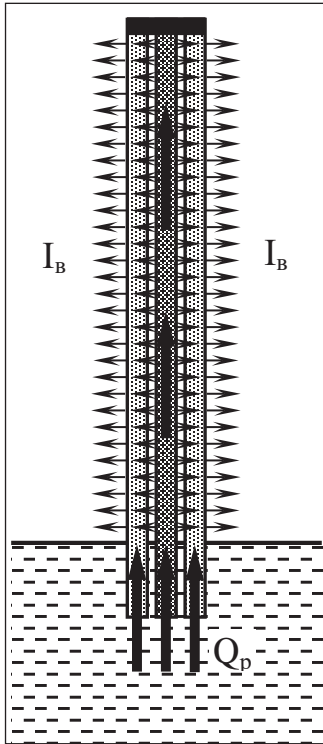


Рис. 4. Модель роботи низькотемпературного випарювача

$$Q_p = I_v \cdot 2S = 2I_v \cdot y \cdot b,$$

де Q_p – об'єм води, що забирається капілярами з ємкості, м³/год; I_v – інтенсивність випаровування з поверхні тканини, м³/м²·год; S – площа випаровування, м²; y – висота підняття рідкої фази в тканині, м; b – ширина полотнища тканини, м.

$$\text{Тоді: } I_v = \frac{Q_p}{2 \cdot y \cdot b}.$$

У даному рівнянні витрату води легко фіксувати з допомогою мірного циліндра. Ширина полотнища тканини – величина постійна для кожної серії дослідів. Змінною є також висота підняття рідини в порах тканини, котру також легко зафіксувати в кожному конкретному випадку. Таким чином, для характеристики основних параметрів під час використання процесів випаровування із застосуванням матеріалів із капілярними властивостями достатньо фіксувати рівень підняття рідкої фази в порах тканини та об'єм рідкої фази, що транспортується з ємкості в процесі випаровування. Приведену інтенсивність випаровування з поверхні полотнища легко порахувати за приведеною формулою.

Надзвичайно велике значення має визначення ефективності випаровування з використанням волокнистих матеріалів порівняно з природним випаровуванням чи випаровуванням у штучних умовах із дзеркала води. Тому на наступному етапі нами досліджено продуктивність низькотемпературного випарювання з допомогою матеріалів із капілярними властивостями. Проведені при температурі повітря і рідкої фази 20°C досліді показали, що ефективність таких інтенсифікаторів випаровування досить висока (рис. 5). Під час використання смужок бавовни шириною 5,0 см навіть застосування однієї смужки тканини дає змогу отримати суттєвий ефект. Якщо в контрольному зразку за 48 годин при даній температурі випарувалося близько 2 см³ води, то вже за встановлення полотнища з одного шару бавовни ця цифра становила 37 см³. За збільшення кількості шарів тканини об'єм випаровування також зростає: за трьох – до 61 см³, за п'яти – до 72 см³, за

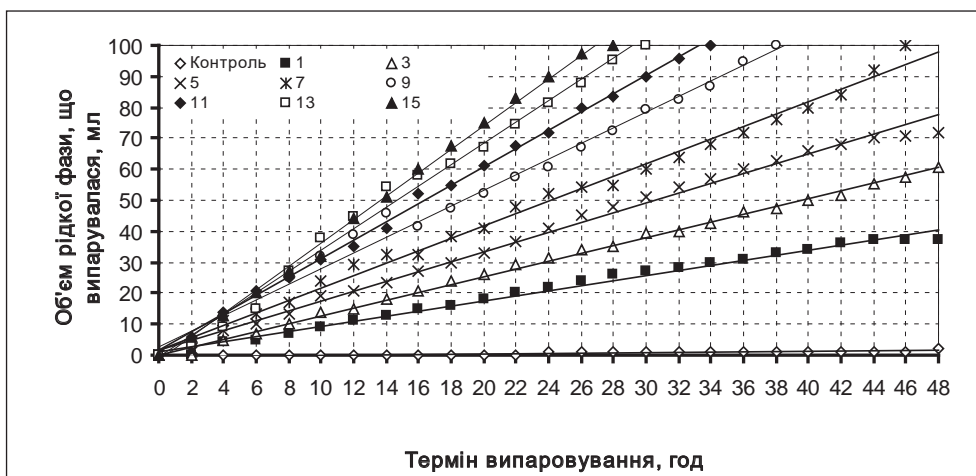


Рис. 5. Зміна об'єму випарованої рідини з поверхні смужки з бавовни за різної кількості шарів тканини ($T = 20^\circ\text{C}$)

**Питома інтенсивність випаровування при температурі 20°C
з поверхні полотнища з бавовни за різної кількості смужок**

Питома інтенсивність випаровування за різної кількості шарів, см ³ /м ² -год										
Контроль	1	3	5	7	9	11	13	15	17	20
20	58	92	119	150	180	200	230	249	252	254

семи – понад 100 см³. За 15-ми шарів 100 см³ води випаровується протягом 28 годин, тоді як у контрольному зразку об'єм рідкої фази, що випарувався за цей час, становив лише 1 см³.

Цікавою є інформація про зміну продуктивності такого способу випарювання рідкої фази в приведених одиницях. Для дзеркала води при 20°C інтенсивність випаровування в умовах відсутності руху повітря становить 20 см³/м²-год. У разі використання як випарювача шару бавовни шириною 5,0 см та довжиною 15,0 см загальна площа випарювання становитиме 1,5 дм², що більше ніж у сім разів перевищує площу дзеркала води в контрольній ємності. При цьому загальна інтенсивність випаровування становить 58 см³/м²-год. Товщина шару тканини становить лише 0,15 мм. Очевидно, що такого тонкого шару пористого середовища недостатньо для забезпечення рідкою фазою всієї площі випаровування. Підтвердженням цього є той факт, що зі збільшенням кількості шарів тканини інтенсивність випаровування також зростає і для трьох шарів становить уже 92 см³/м²-год (табл. 1). Однак порівняння збільшення площі випаровування в обох випадках показує, що інтенсивність випаровування на тканині нижча інтенсивності випаровування з поверхні дзеркала води, оскільки площа випаровування зросла більше ніж у сім разів, а інтенсивність випаровування – лише близько п'яти. Як видно із табл. 1, лише за кіль-

кості шарів тканини більше семи вдається досягнути росту інтенсивності випаровування на рівні росту інтенсивності випаровування за збільшення площі дзеркала рідини. Зі збільшенням кількості шарів вище 13–15 приріст інтенсивності випаровування практично вичерпується і за подальшого додавання смужок бавовни практично не зростає. Це свідчить про те, що в системі встановилися максимальні параметри продуктивності й потовщувати полотнище шляхом додавання шарів тканини недоцільно, оскільки воно не забезпечуватиме відповідного росту інтенсивності випаровування.

Висновки. Проведені дослідження підтверджують можливість використання матеріалів із капілярними властивостями як інтенсифікатора процесу випаровування з поверхні рідини. При цьому інтенсифікація відбувається за рахунок суттєвого збільшення площі випаровування. Причому процес не потребує додаткових пристроїв, оскільки таке збільшення площі відбувається за рахунок капілярного ефекту. Тому для реалізації описаної технології значну увагу необхідно приділяти вибору тканин із максимальною висотою підняття рідкої фази. Збільшення інтенсивності випаровування за окремих умов більше ніж на 2–2,5 порядки є суттєвим чинником для подальших досліджень та впровадження технології на промислових об'єктах.

Список літератури:

1. Выпарные аппараты с рекомпрессией водяного пара – энергосберегающая технология и оборудование (ЭСВА) / А.А. Поворов и др. URL: <http://www.zaobmt.com/index.php/articles/153-vacuum-evaporator-article.html> (дата звернення: 24.01.2019).
2. Белобаба А.Г., Маслий А.И., Гусев А.А. Выделение хлорида натрия из растворов минерализации экзометаболитов человека и растительных отходов применительно к замкнутым экосистемам. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2013. № 3. С. 291–297.
3. Михайловська М.В. Знешкодження екологічно небезпечних рідких відходів коксохімічних виробництв : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.01. Київ : НТУУ «КПІ», 2009. 21 с.
4. Кисеев В.М. Тепломассоперенос и фазовые превращения в мелкопористых капиллярных структурах : автореф. дис. ... док. физ.-мат. наук. : 01.04.14. Екатеринбург, 2001. 43 с.
5. Радовенчик Я.В. Використання матеріалів з капілярними властивостями в процесах зневоднення осадів та очищення води : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.01. Київ : НТУУ «КПІ», 2013. 23 с.
6. Радовенчик Я.В., Гомеля М.Д. Основні закономірності руху рідин в капілярних матеріалах. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2012. № 2. С. 31–34.
7. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. Москва : Химия, 1976. 232 с.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВЫПАРИВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

В работе приведены результаты изучения возможности интенсификации процессов выпаривания жидкостей путем использования материалов с капиллярными свойствами. Исследовано влияние разнообразных факторов на эффективность процессов выпаривания. Определена интенсивность испарения из поверхности ткани и возможность ее регулирования. Предложена физическая модель процесса выпаривания. Установлено, что использование материалов с капиллярными свойствами позволяет более чем на два порядка увеличить интенсивность испарения из поверхности водной среды без использования дополнительных энергетических затрат и сложного оборудования.

Ключевые слова: капилляр, материалы с капиллярными свойствами, выпаривание жидкостей, обработка жидких отходов.

INTENSIFICATION OF LOW TEMPERATURE LIQUID EVAPORATION

The results of the study of the possibility for intensifying the liquids evaporation processes by use of materials with capillary properties are presented in this work. The influence of various factors on the efficiency of evaporation processes is investigated. The intensity of evaporation from the surface of the tissue and the possibility of its regulation are determined. The physical model of evaporation process is proposed. It was established that the use of materials with capillary properties allows increasing more than two orders the rate of evaporation from the surface of the aquatic environment without the use of additional energy and complex equipment.

Key words: capillary, materials with capillary properties, liquids evaporation, liquid waste treatment.