УДК 66.048.5.069.834

РАДОВЕНЧИК Я. В.*, КРИСЕНКО Т. В., ПОБЕРЕЖНИЙ М. В.
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ВИПАРЮВАННЯ РІДИН ПРИ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В роботі приведені результати дослідження ефективності використання матеріалів з капілярними властивостями в процесах інтенсифікації випаровування для концентрування чи кристалізації розчинів. Показано, що вже при температурах довкілля близьких до 0 °С спостерігається значне прискорення процесу випаровування при використанні простого інтенсифікатора у вигляді смужок тканини. Відмічено зниження ефективності інтенсифікатора при підвищенні температури рідкої фази при постійній температурі навколишнього середовища. Досліджено умови ефективного використання матеріалів з капілярними властивостями в досить перспективних для впровадження в промислових масштабах простих за конструкцією, низьких за загальною вартістю процесу обробки води, без значних затрат енергії установках для концентрування чи кристалізації розчинів.

Ключові слова: *капіляр, концентрати, випаровування, кристалізація, відходи*

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2021.248947

*Corresponding author: r.yar@ukr.net
Received 21 Juny 2021; Accepted 31 August 2021

Постановка проблеми. Сучасні зміни на Землі в результаті глобального потепління супроводжуються багатьма негативними наслідками, серед яких як мінімум два пов'язані із гідросферою. З одного боку, в результаті танення льодових покривів, підвищується рівень Світового океану та затоплюються величезні прибережні території, а з іншого – спостерігається глобальний перерозподіл атмосферних опадів із катастрофічним зниженням їх кількості на окремих територіях. Вже сьогодні на території України відчуваються такі зміни, особливо багато територій потерпає від перерозподілу опадів. За таких умов раціональне використання водних ресурсів повинно стати основною стратегією антропогенної діяльності людства. Разом з тим, лише на підприємствах України щорічно утворюється мільйони кубічних метрів мінералізованих вод, що скидаються в поверхневі водойми та мільйони кубічних метрів висококонцентрованих розчинів та суспензій різноманітного складу, які накопичуються та зберігаються в спеціальних шламосховищах. І якщо перші викликають підвищення мінералізації природних вод, то останні негативно впливають на живі організми та наносять непоправної шкоди довкіллю. Поглиблює існуючі проблеми той факт, що в промисловості багато технологічних процесів продукують рідкі концентрати, зберігання котрих вимагає значних коштів котрі через їх токсичність. Найбільш зручним є переведення таких концентратів в твердий стан. Однак упарювання при високих температурах, що є сьогодні найбільш придатним для такої мети, завжди потребує значних затрат енергії [1]. Окремі види концентратів можливо обробляти хімічними методами, однак і вони потребують складних технологій та значної витрати додаткових реагентів [2]. Тому проблеми переробки таких розчинів і сьогодні залишаються досить актуальними і потребують простого та ефективного рішення. Відносно недавно було запропоновано використовувати в процесах випарювання промислових концентратів волокнисті матеріали з капілярними властивостями [3]. Використання таких матеріалів дозволяє створювати на їх основі ефективні, автономні, дешеві та надзвичайно прості системи упарювання різноманітних рідин та концентратів.

Аналіз попередніх досліджень. Використовувати матеріали з капілярними властивостями (волокнисті матеріали) для зменшення об'єму токсичних розчинів раніше було запропоновано автором [4]. Однак, оскільки робота автора більше була спрямована на застосування хімічних методів, детальних досліджень в напрямку застосування матеріалів з капілярними властивостями проведено не було, а в роботі автор обмежився лише описом ідеї. Разом з тим, капілярні структури отримали достатнє поширення в теплових насосах, апаратах для перетворення фаз, в різноманітних елементах енергетичного обладнання [5], в технологіях захисту навколишнього середовища описана вище ідея подальшого розвитку не отримала. При проведенні літературного огляду нам не вдалося відшукати результатів подібних досліджень інших авторів. Проведені нами раніше дослідження в цій галузі показали, що застосування в промисловості в різних

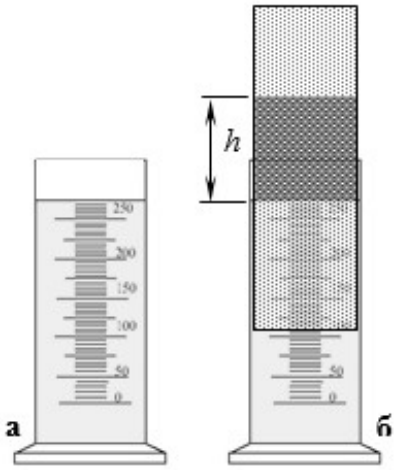
© The Author(s) 2021. Published by Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.This is an Open Access article distributed under the terms of the license CC BY 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits re-use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

технологічних процесах волокнистих матеріалів дозволяє 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 [6, 7]. Незважаючи на те, що випаровування із поверхні води в природних водоймах та процеси масо- і теплопереносу в капілярних структурах на сьогодні досить детально вивчені, питання одночасного випаровування рідкої фази з поверхні капілярних структур з транспортуванням рідини по капілярах лишилися поза увагою дослідників. Не вдалося нам знайти дані про інтенсивність та механізм випаровування в таких структурах. Перші дослідження в цьому напрямку нами описані в [3]. В [6, 7] нами було показано, що використання різноманітних типів тканин для формування пористого середовища дозволяє створювати дешеві автономні системи знешкодження стічних вод.

Даний матеріал присвячений подальшому дослідженню особливостей переміщення рідин в матеріалах з капілярними властивостями в умовах можливості їх одночасного випаровування.

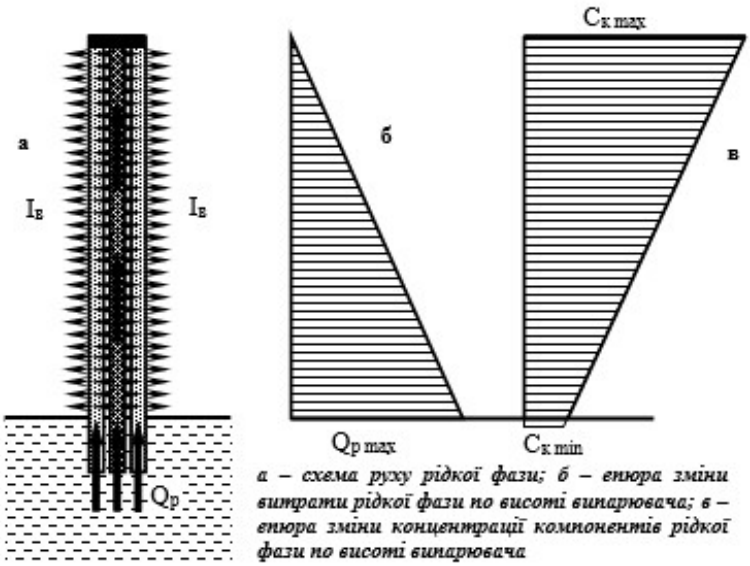
Метою нашої роботи є подальше вивчення можливості та ефективності використання волокнистих матеріалів в процесах інтенсифікації випаровування води в різних умовах та дослідження впливу різних факторів на процес і його характеристики в умовах навколишнього середовища.

Викладення основного матеріалу. Методика досліджень полягала в наступному. Для проведення досліджень застосовували два градуйовані циліндри однакового діаметру. Один з циліндрів заповнювали рідкою фазою до визначеного рівня і використовували для контролю випаровування з поверхні водного середовища (рис. 1). В другий експериментальний циліндр додатково занурювали та розміщали вертикально стрічку із бавовни, що нараховувала від 1 до 21 шарів тканини. Ширина смужки – 5 см. Довжина смужки – 50 см. Щільність бавовни складала 100 г/м^2. 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. Різниця в зменшенні об'ємів рідини в експериментальному та контрольному циліндрах приймалася як об'єм рідини, що випарувалася з поверхні смужки тканини.



а – контрольний циліндр;
б – експериментальний циліндр

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



а – схема руху рідкої фази; б – епюра зміни витрати рідкої фази по висоті випарювача; в – епюра зміни концентрації компонентів рідкої фази по висоті випарювача

Рис. 2 – Модель роботи низькотемпературного випарювача

Попередніми дослідженнями було встановлено, що інтенсивність процесу випаровування в такій конструкції визначається балансом рідини, що транспортується порами тканини та рідини, що випаровується з поверхні стрічки (рис. 2а). Варто зауважити, що швидкість рідкої фази в капілярах суттєво залежить від висоти над дзеркалом рідкої фази і сама по собі має досить складну залежність [8]. Однак, на даному етапі досліджень її досить важко врахувати, але, оскільки ми виходимо лише із двох факторів і не враховуємо

впливу висоти на швидкість рідини, то в першому приближенні можливо обмежитись прямо пропорційною залежністю між змоченою висотою стрічки та витратою рідкої фази (рис. 2б). Відповідно, при зменшенні об'єму рідкої фази концентрації всіх домішок в ній будуть пропорційно зростати, що зумовлюватиме їх кристалізацію чи осадження на поверхні тканини у вигляді твердої фази. Такий процес буде визначатися розчинністю домішок, але, оскільки в максимальній точці підняття рідкої фази вона взагалі випаровується, то накопичення твердої фази на поверхні полотнища спостерігатиметься обов'язково (рис. 2в).

Оскільки при значній площі дзеркала рідини в ємність можна занурити одночасно кілька смужок тканини, то необхідно визначити, як впливає відстань між ними на інтенсивність випаровування. Як видно з рис. 3, при зміні відстані між смужками від 1 до 20 мм інтенсивність випаровування також зростає. Але якщо на початку цього діапазону цей ріст досить інтенсивний, то на верхній межі він практично зникає. Криві для відстаней між полотнищами 10 – 15 мм накладаються одна на одну, тому на рис. 3 не представлені. Таким чином, можна зробити висновок, що в умовах відсутності вітру відстані між вертикально розміщеними полотнищами в 7-15 мм цілком достатньо для забезпечення максимальної інтенсивності випаровування.

Для подальших досліджень експериментальне обладнання було доповнено пристроями для однакового та одночасного нагрівання обох циліндрів. В цьому випадку смужка тканини знаходилася в середовищі повітря з температурою 20 °С і нагрівалася до деякої температури лише за рахунок нагрітої рідкої фази, що піднімалась по порах. Як показали експерименти, навіть за таких умов можна отримати досить хороші результати (рис. 4). Якщо при температурі рідкої фази 20 °С з поверхні дзеркала в циліндрі за 38 годин випаровується 1 см^3 рідини, то з використанням бавовняної смужки із 9 шарів ця цифра зростає до 100 см^3. При температурі рідкої фази 46 °С цей же об'єм рідини випаровується вже за 20 годин, а при температурі рідкої фази 57 °С – за 16 годин. Для випаровування 100 см^3 рідкої фази при температурі 75 °С достатньо вже менше 6 годин. Очевидно, що отримані результати свідчать про можливість влаштування на основі матеріалів з капілярними властивостями високоефективних низькозатратних пристроїв для випарювання різноманітних технологічних розчинів. При цьому варто памятати, що при нагріванні рідкої фази випаровування із дзеркала зростає швидше, ніж із поверхні тканини, оскільки остання має значно нижчу температуру.

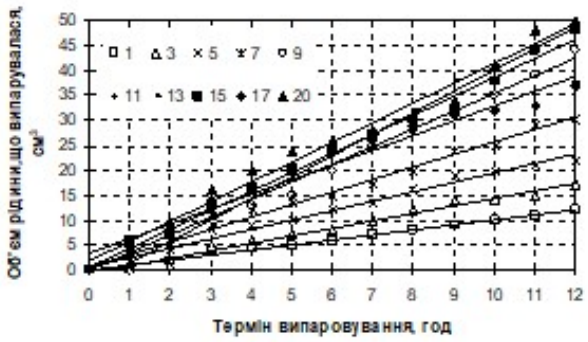


Рис. 3 – Інтенсивність випаровування з поверхні смужок із бавовни при різній відстані між ними (мм, Т=20 °С)

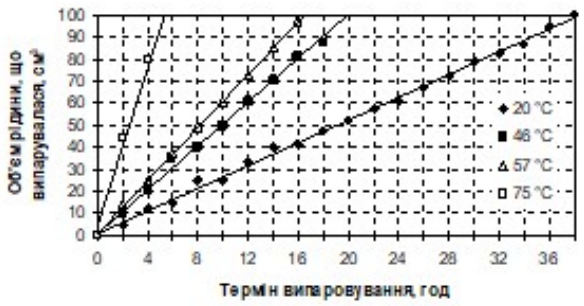


Рис. 4 – Термін випаровування 100 см^3 води з поверхні смужки із бавовни із 9 шарів тканини при різних температурах

Експерименти, проведені в природних умовах, підтвердили високу ефективність використання інтенсифікаторів випарювання у вигляді смужок тканини з відповідними властивостями. Результати цих досліджень представлені нижче (табл. 1).

Інтенсифікатори випарювання представляли собою смужки із бавовни, що складалися із 9 та 21 шару і одним кінцем були занурені в рідку фазу. В якості модельного розчину використовували 1%-ий розчин хлориду натрію. Всі ємкості розміщували на відкритій місцевості з доступом сонячного випромінювання. В процесі експерименту фіксували зменшення об'єму рідини в кожній ємкості протягом доби, а також середню температуру та швидкість вітру. Отримані дані розміщені по мірі росту середньодобової температури, тому не відповідають хронології.

Цілком очевидно, що із збільшенням середньодобової температури інтенсивність випаровування з поверхні смужок тканини також зростає, скорочуючи тривалість процесу випарювання. Разом з тим, зростає

інтенсивність випаровування і з поверхні дзеркала води. Тому важливо оцінити ефективність випарювання з використанням матеріалів з капілярними властивостями і в природних умовах. Очевидно також, що на природних водоймах і в складі промислового обладнання умови випаровування досить різні. В довкіллі і рідка фаза, і смужки тканини перебувають при однакових температурах, що не перевищують, зазвичай, 50 °С. Проведені нами протягом тривалого періоду експерименти в природних умовах показали, що (табл. 1) підтвердили високу ефективність запропонованого методу вже при середній добовій температурі повітря 2,3 °С протягом доби спостерігається суттєве випаровування з поверхні тканини (19.03.2017 р.). При цьому випаровування із водної поверхні зафіксувати на вдалося. Варто відмітити, що інтенсивність випаровування в природних умовах залежить від значної кількості факторів (температура, швидкість вітру, освітленість, вологість і т.п.), тому виявити пряму залежність між окремими з них досить важко.

Таблиця 1 - Результати випробування інтенсифікаторів випаровування в природних умовах

Дата	Випарувалося за добу, $см^3$ при кількості шарів тканини в смужці			Середньодобова температура, °С	Середньодобова швидкість вітру, м/с	Примітки
	0	9	21			
19.03.2017	0	2,5	12,5	**2,3**	2,9	дощ зранку
20.03.2017	2,5	20,0	37,0	**2,9**	4,5	дощ зранку
21.03.2017	5,0	37,0	50,0	**4,1**	1,7	дощ зранку
30.03.2017	15,0	105,0	165,0	**4,5**	3,9	сонячно
23.04.2017	20,0	85,0	122,5	**5,5**	2,1	сонячно
25.03.2017	4,5	32,5	50,0	**6,0**	4,1	перемінно
28.03.2017	20,0	145,0	190,0	**7,1**	5,6	сонячно
31.03.2017	15,0	90,0	162,5	**7,7**	7,0	сонячно
22.03.2017	10,0	70,0	101,0	**7,9**	3,6	сонячно
12.04.2017	30,0	125,0	185,0	**8,0**	3,7	сонячно
13.04.2017	10,0	72,5	110,0	**9,3**	3,3	дощ
10.04.2017	15,0	112,5	167,5	**10,3**	3,0	сонячно
14.05.2017	7,5	30,0	45,0	**11,1**	2,0	мряка
23.03.2017	30,0	150,0	200,0	**12,2**	3,6	дощ зранку
04.04.2017	25,0	122,5	200,5	**13,5**	3,4	сонячно
27.05.2017	**20,0**	**100,0**	**151,5**	**14,6**	**2,2**	**дощ**
02.04.2017	**25,0**	**162,5**	**260,0**	**14,6**	**4,1**	**сонячно**
21.05.2017	15,0	80,5	109,5	**15,7**	3,5	дощ
01.06.2017	40,5	144,5	220,5	**16,2**	5,2	перемінно
06.05.2017	45,5	139,5	221,5	**16,7**	0,8	сонячно
29.04.2017	35,0	135,5	201,5	**17,6**	1,7	сонячно
27.04.2017	35,0	170,0	270,5	**17,8**	3,1	сонячно
28.05.2017	7,5	110,0	170,0	**18,2**	2,0	сонячно
23.05.2017	25,0	135,5	190,5	**19,1**	2,1	сонячно
05.06.2017	20,0	100,5	170,0	**19,6**	1,7	перемінно
07.05.2017	37,5	147,5	220,5	**20,2**	2,1	сонячно
04.06.2017	30,0	99,5	180,5	**20,2**	3,1	перемінно
29.05.2017	40,0	145,5	220,5	**21,1**	3,1	сонячно

Наприклад, 27.05.2017 р. та 02.04.2017 р. середньодобова температура склала 14,6 °С. В той же час, інтенсивність випаровування в ці дні різниться на 20 – 50 %. На нашу думку, значну роль в значенні інтенсивності в ці дні відіграла різна швидкість вітру, різна вологість повітря та інші фактори. Разом з тим, підтверджена висока ефективність таких низькотемпературних випарювачів навіть при близьких до 0°С температурах. В цілому, порівнюючи інтенсивність випаровування без та із смужкою тканини з 21 шару, варто відмітити, що при температурі 2,3 °С різниця між цими показниками сягає 12,5 $см^3$, при 10,3 °С – 152,5

$см^3$, при 20,2 °С – 182,5 $см^3$. Оскільки при зміні температури навколишнього середовища змінюється і висота підняття рідкої фази і, відповідно, площа випаровування, то ми вважали за доцільне в таблиці 1 привести абсолютні значення об'ємів випаруваної рідкої фази, не переводячи її в інтенсивність випаровування.

Подальше збільшення середньої температури довкілля не супроводжується відповідним збільшенням цього показника, що, на нашу думку, пов'язано із інтенсивним випаровуванням з поверхні тканини та зниженням рівня підняття рідкої фази і, площі випаровування, відповідно.

В лабораторних умовах є можливість регулювати температуру у відповідності з вимогами технологічного регламенту. Разом з тим, особливістю такої промислової системи є різні температури рідкої фази та смужок тканини.

Як видно із табл. 2, з підвищенням температури лише рідкої фази ефективність випаровування знижується. Якщо при температурі 20 °С встановлення смужки бавовни із 15 шарів зумовлює ріст інтенсивності випаровування більше ніж на 2 порядки, при 46 °С – в 5 разів, при 57 °С – майже в 3 рази, то при 75 °С – лише біля 67 %. Це можна пояснити тим, що нагрівання лише рідкої фази менше впливає на процес випаровування з поверхні смужки тканини, яка швидко охолоджується в атмосфері із значно нижчою температурою. Тому очевидно, що для підвищення інтенсивності випаровування пропорційно росту температури необхідно її підвищувати для всієї системи *рідина – тканина*.

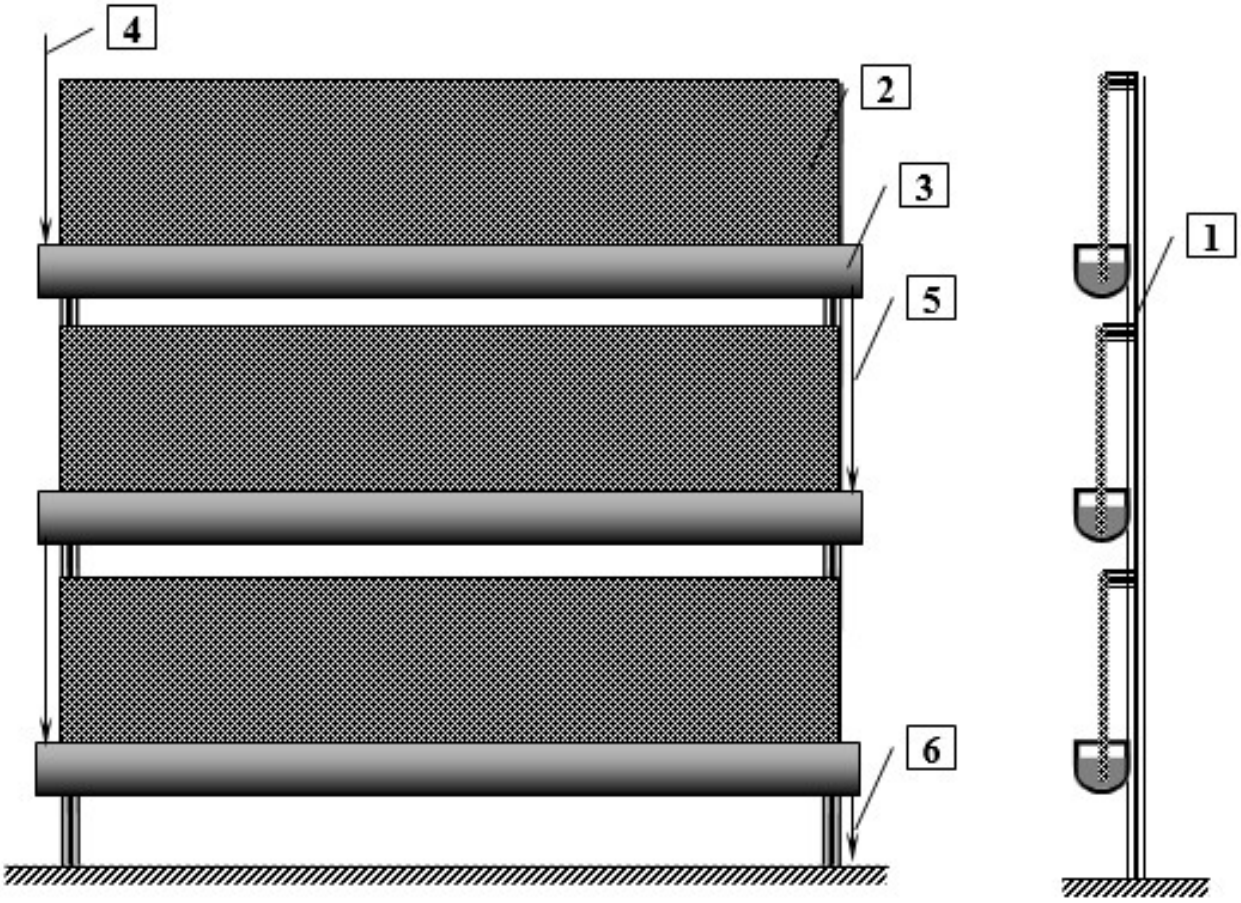
Таблиця 2 – Інтенсивність випаровування з поверхні тканини при різних температурах розчину

Інтенсивність випаровування при різних температурах розчину (° С), $см^3/м^2 \cdot год$				
	20	46	57	75
Смужка із 15 шарів	192	545	690	1750
Контроль	2	91	250	1050

В найпростішому випадку в якості випарювача може бути використане полотнище із тканини *2* з відповідними властивостями, натягнуте між двома металевими стійками *1* та занурене в рідку фазу нижнім кінцем (рис. 5).

Для збільшення площі випаровування полотнища розміщують каскадом, влаштовуючи додаткові ємкості у вигляді жолобів *3*. Вихідний розчин подається патрубком *4* у верхній жолоб, звідки по патрубку *5* переливається в жолоб, розміщений нижче. З нижнього жолоба патрубком *6* надлишок рідкої фази зливається у водойму чи повертається у верхній жолоб з допомогою насосу. Більш складними є полотнища на каркасах різної форми із металу чи пластику. Всі особливості конструкції вирішуються в кожному конкретному випадку, але принцип роботи випарювача залишається однаковим.

Проведені дослідження підтверджують можливість використання матеріалів з капілярними властивостями в якості 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 з максимальною висотою підняття рідкої фази. Збільшення інтенсивності випаровування за окремих умов більше ніж на 2 – 2,5 порядки, є суттєвим фактором для подальших досліджень та впровадження технології на промислових об'єктах. При цьому конструкція та склад обладнання визначається конкретними умовами його експлуатації. Незважаючи на те, що термін ефективної роботи випарювача протягом року в природних умовах визначається наявністю плюсових температур, постійне зростання останнім часом середніх температур в літній період та зниження періоду від'ємних температур в зимовий період здатні забезпечувати необхідну ефективність обладнання. Причому, обладнання не потребує складних додаткових пристроїв, складного обслуговування і може працювати в автоматичному режимі. При використання окремої ємкості для подачі рідкої фази у верхній жолоб робота насосу може обмежуватися нетривалим періодом протягом доби.



1- металева стійка; 2 – полотнище тканини; 3 – жолоб для подачі розчинів; 4 – подача розчину на випарювач; 5 – перелив розчинів між каскадами; 6 – злив залишків після випарювання

Рис. 5 – Схема каскадного інтенсифікатора випарювання токсичних розчинів із шламосховищ

Разом з тим, існує кілька суттєвих недоліків такої технології. Перш за все, при експлуатації виникає необхідність періодичного промивання полотнищ від твердої фази, що утворюється в процесі випаровування рідини. Це можливо проводити шляхом їх занурення в розчини, що випарюються. По друге, висота підняття рідкої фази по порах волокнистих матеріалів навіть при значній їх товщині складає 15 – 30 см, що суттєво збільшує матеріалоємність конструкції в результаті необхідності реалізації її у вигляді каскаду. Однак, для варіанту низькоконцентрованих розчинів та малопродуктивного обладнання і така конструкція буде цілком прийнятною.

Висновки. Проведені дослідження показали, що використання в процесах обробки рідких розчинів матеріалів з капілярними властивостями дозволяє створювати прості, дешеві та ефективні апарати для випарювання води та перетворення рідких відходів в тверду фазу. При цьому встановлено, що для ефективного випаровування рідкої фази з поверхні тканинних смужок достатньо забезпечувати відстань між ними на рівні 7 – 15 мм. Збільшення температури лише рідкої фази дозволяє дещо збільшити ефективність випаровування, однак з підвищенням її до 50 °С вона знижується за рахунок інтенсивного охолодження в атмосфері. Разом з тим, навіть при температурах, близьких до 0 °С вдалося зафіксувати відносно значну інтенсивність випаровування. Запропонована проста та ефективна конструкція випарювача для використання в умовах природного середовища при позитивних температурах. Відсутність рухомих елементів, простота конструкції та обслуговування дозволяє використовувати таке обладнання для випарювання невеликих об’ємів розчинів.

Перспективи подальших досліджень. Одним із можливих шляхів покращення ефективності випаровування з поверхні стрічок може бути підбір тканин з іншими фізико-хімічними властивостями, розробка більш продуктивних конструкцій випалювачів, дослідження умов кристалізації компонентів різних розчинів на поверхні стрічок та умови та можливість їх видалення. В цілому, зважаючи на простоту конструкції фільтру, низьку загальну вартість процесу обробки води, відсутність втрат енергії досліджений спосіб є досить перспективним для впровадження в промислових масштабах і заслуговує на більш детальне та глибоке вивчення.

Список використаної література

1. Поворов А. А. Выпарные аппараты с рекомпрессией водяного пара – энергосберегающая технология и оборудование (ЭСВА) / А. А. Поворов, В. Ф. Павлова, Н. В. Корнилова, Н. А. Шиненкова. URL: http://www.zaobmt.com/index.php/articles/153-vacuum-evaporator-article.html (дата звернення 24.01.2019).
2. Белобаба А. Г. Выделение хлорида натрия из растворов минерализации экзометаболитов человека и растительных отходов применительно к замкнутым экосистемам / А. Г. Белобаба, А. И. Маслий, А. А. Гусев. *Химия в интересах устойчивого развития*. - 2013. - №3. - С. 291-297.
3. Гомеля М. Д. Інтенсифікація низькотемпературного випарювання рідин / М.Д. Гомеля, Я.В. Радовенчик, М.В. Побережний. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. – 2019. – №2. – С. 86-91.
4. Михайловська М.В. Знешкодження екологічно-небезпечних рідких відходів коксохімічних виробництв: автореф. дис. … канд. техн. наук: 21.06.01. Київ: НТУУ "КПІ", 2009. 21 с.
5. Кисеев В. М. Тепломассоперенос и фазовые превращения в мелкопористых капиллярных структурах: автореф. дисс. … док. физ.-мат. наук. 01.04.14. Екатеринбург, 2001. 43 с.
6. Радовенчик Я. В. Використання матеріалів з капілярними властивостями в процесах зневоднення осадів та очищення води: автореф. дис. … канд. техн. наук: 21.06.01. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. 23 с.
7. Радовенчик Я. В. Основні закономірності руху рідин в капілярних матеріалах / Я. В. Радовенчик, М. Д. Гомеля. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. - 2012. - №2. - С. 31-34.
8. Радовенчик Я. В. Волокнисті матеріали в процесах захисту гідросфери від забруднення. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 141 с.

Yaroslav Radovenchyk, Tamara Krysenko, Maksym Poberezhnyi

EVAPORATION OF LIQUIDS AT LOW TEMPERATURES

Ukrainian enterprises annually generate millions cubic meters of mineralized water, which is discharged into surface reservoirs, and millions cubic meters of highly concentrated solutions and suspensions, which are accumulated and stored in special sludge storages. This waste water causes irreparable damage to the environment. A new method for the evaporation of industrial concentrates by fibrous materials with capillary properties was proposed not so long ago. The use of such materials allows an effective, autonomous, cheap, and extremely simple system to be created for the evaporation for various liquids and concentrates.

The research methodology was as follows. Two graduated cylinders of the same diameter were used in our research. One cylinder was filled with the liquid phase to a certain level and used to control evaporation from the surface of the aqueous medium. In the other, experimental cylinder, a vertical cotton strip was additionally placed (from 1 to 21 layers of fabric). The width of the strip was 5 cm. The length of the strip was 50 cm. The density of cotton was 100 g/m^2. The research method was to determine the height of liquid phase capillary rise along the strip of fabric and to evaluate reduction in the volume of liquid that evaporates in both cylinders at set temperatures.

It was found that in the absence of wind and the distance between the vertically placed strips of 7–15 mm were sufficient to ensure the maximum evaporation intensity. Our long-term experiments in natural conditions confirmed the high efficiency of the proposed method. At an average daily air temperature of 2.3 °C, there was a significant evaporation from the surface of the fabric during the day. In this case, evaporation from the water surface was not observed. It should be noted that the intensity of evaporation under natural conditions depends on a significant number of factors (temperature, wind speed, luminosity, humidity, etc.), so it is difficult to detect a direct relationship between some of them.

With increase only in the liquid phase temperature, the evaporation efficiency decreased. At a temperature of 20 °C, the laboratory installation (15 layers of cotton strip) increased the evaporation intensity by more than 2 times, at 46 °C by more than 5 times, at 57 °C by almost 3 times, but at 75 °C only by about 67 %. It is obvious that heating of the liquid phase alone less influences the evaporation process from the surface of the fabric strip, which was cooled rapidly in the atmosphere at a much lower temperature. Therefore, to increase the evaporation intensity, it is necessary to increase temperature for all components of the liquid–fabric system.

A fabric with suitable properties, stretched between two metal racks and immersed into the liquid phase with the lower end, can be used as a simple evaporator.

Our research has shown that the use of materials with capillary properties in the treatment of liquid solutions allows simple, cheap, and efficient devices to be created for evaporating water and converting liquid waste into a solid phase.

Keywords: *capillary, concentrates, evaporation, crystallization, waste*

References:

1. Povorov A.A., Pavlova V.F., Kornilova N.V., Shinenkova N.A. (2019). “Evaporators with water vapor recompression - energy-saving technology and equipment (ESVA)”. URL: http://www.zaobmt.com/index.php/articles/153-vacuum-evaporator-article.html.
2. Belobaba A.G., Masliy A.I., Gusev A.A. (2013). “Isolation of sodium chloride from solutions of mineralization of human exometabolites and plant waste in relation to closed ecosystems”. *Chemistry for sustainable development*. - №3. - P. 291-297.
3. Gomely M.D., Radovenchik I.V., Poberezhnyy M.V. (2019). “Intensification of low-temperature evaporation of liquids”. *Scientific notes of TNU named after V.I. Vernadsky. Series: Technical Sciences*. - №2. - P. 86-91.
4. Mikhailovskaya M.V. (2009). “Neutralization of ecologically dangerous liquid waste of coke production”: author's ref. dis. … cand. tech. Science: 21.06.01. Kyiv: NTUU "KPI". - 21 p.
5. Kiseev V.M. (2001). “Heat and mass transfer and phase transformations in fine-pore capillary structures”: author's ref. diss. … doc. phys. - math. Science: 04.01.14. Yekaterinburg. - 43 p.
6. Radovenchyk I.V. (2013). “The use of materials with capillary properties in the processes of sludge dewatering and water purification”: author's ref. dis. … cand. tech. Science: 21.06.01. Kyiv. - 23 p.
7. Radovenchik I.V., Gomely M.D. (2012). “Basic laws of fluid motion in capillary materials”. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute.* - №2. - P. 31-34.
8. Radovenchyk I.V. (2021). “Fibrous materials in the processes of protection of the hydrosphere from pollution”. - Bila Tserkva: Vydavnytstvo O.V. Pshonkivskyi. - 141 p.