УДК 66.021.4

В.К. Лукашов [а], Є.В. Костюченко [а, б], В.І. Середа [а]

КОНЦЕНТРУВАННЯ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ МАЛОЛЕТКИХ РІДИН В СТІКАЮЧІЙ ПЛІВЦІ ВИПАРОВУВАННЯМ У ПЕРЕХРЕСНИЙ ГАЗОВИЙ ПОТІК

[а] Шосткинський інститут Сумського державного університету, м. Шостка, Україна
[б] Сумський державний університет, м. Суми, Україна

У статті наведені результати дослідження процесу концентрування розчинів малолетких рідин в стікаючій плівці в умовах випаровування в перехресний потік нейтрального газу, метою якого було встановлення закономірностей зміни складу розчину за довжиною плівки. Дослідження здійснювали на розробленій математичній моделі з експериментальним визначенням параметрів моделі – коефіцієнтів тепло- і масовіддачі. Математична модель являє собою раніше отриману систему диференціальних рівнянь, що описують гідродинаміку та теплоперенесення у стікаючій плівці рідини, що випаровується в газовий потік, яка була доповнена рівнянням матеріального балансу за випаровуваним компонентом (водою). Зазначену систему рівнянь вирішували чисельно з використанням методу явної схеми Ейлера, що дозволило враховувати залежність характеристик плівки (густини, в'язкості, питомої теплоємності) від температури й складу розчину. У результаті дослідження було встановлено, що на початку плівки зміна концентрації розчину має характер близький до лінійного, потім концентрація різко зростає до повного випаровування розчинника. Показано, що така закономірність зміни складу розчину пов'язана з розподілом температури розчину за довжиною плівки. Інтенсивність процесу концентрування зростає зі зменшенням початкової витрати розчину та його початкової концентрації, а також зі збільшенням початкової температури розчину, початкової температури газу й температури поверхні стінки, на якій стікає плівка. Зі збільшенням швидкості газу, що надходить у простір над плівкою, інтенсивність концентрування падає. Зіставлення результатів розрахунку, виконаного для водного розчину гліцерину, з експериментальними даними показало їх досить гарну відповідність. Отримані в статті дані дозволяють розраховувати висоту насадки плівкового концентратора, за якою забезпечується задана концентрація розчину.

Ключові слова: концентрування, малолетка рідина, стікаюча плівка, випаровування, перехресний потік, нейтральний газ.

DOI: 10.32434/0321-4095-2021-136-3-113-120

Вступ

Процес концентрування водних розчинів малолетких рідких речовин широко розповсюджений у хімічній промисловості (виробництво кислот, лугів, багатоатомних спиртів, вибухових речовин). Ці розчини можна концентрувати різними способами: випарюванням, виморожуванням, електродіалізом, зворотним осмосом [1–4]. Промислове значення має тільки спосіб випарювання більш летючого розчинника в середовище його власних парів під час нагрівання розчину. Введення в систему «розчин–пар розчинника» нейтрального (інертного) щодо компонентів розчину газу дозволяє проводити процес концентрування за температури нижче температури кипіння розчину. Це дає можливість зменшити розкладання чутливої до нагрівання розчиненої речовини та використовувати менш дефіцитні теплоносії для нагрівання розчину, що має, як правило, високу температуру кипіння. Необхідну продуктивність такого процесу можна забезпечити збільшуючи поверхні випаровування, що найбільш ефективно досягається під час використання плівкових апаратів. Перспек-

© В.К. Лукашов, Є.В. Костюченко, В.І. Середа, 2021

тивними, з точки зору введення нейтрального газу, є плівковий апарат з перехресною взаємодією потоків [5].

У літературі є відносно обмежені відомості про процеси в плівкових апаратах з перехресною взаємодією газового потоку та рідкої плівки. У роботі [6] на основі розробленої математичної моделі розглядається стійкість спільного руху стікаючої плівки рідини й турбулентного потоку газу для довільного кута між ними. Виконані розрахунки показують, що наявність поперечного газового потоку збільшує область нестійкості руху плівки, пов'язаної з утворенням тривимірних хвиль на її поверхні. Водночас відомо, що тривимірне хвилеутворення інтенсифікує теплоперенесення у рідкій плівці [7]. Процеси тепломасоперенесення в контактному пристрої плівкового апарату під час перехресного руху фаз описують системою диференціальних рівнянь автори роботи [8]. Розв'язок цієї системи дозволив їм визначити поля температури та парціального тиску пари в контактному пристрої. Встановлені залежності середньої температури рідини та повітря на виході з апарату від висоти насадки. У дисертаційній роботі [9] наведені інженерні розробки технологічних процесів у нафтопереробному виробництві, що базуються на перехресному контактуванні рідкої та парової фаз у насадкових апаратах. Показано доцільність застосування перехреснопотокових контактних пристроїв для реалізації енергозберігаючих технологій фракціонування нафтопродуктів.

Очевидно, що цих відомостей недостатньо для моделювання та розрахунку такого процесу як концентрування водних розчинів малолетких рідин, що проводять в плівковому апараті з перехресним рухом нейтрального газу. Для вирішення таких задач необхідно знати закономірності зміни складу розчину в плівці, що стікає з нагрітої поверхні в умовах випаровування в перехресний потік нейтрального газу.

Математична модель процесу

Розглянемо процес концентрування розчину малолеткої необмежено розчинної у воді рідкої речовини (гліцерин, сірчана кислота, тощо).

Будемо вважати, що випаровується тільки вода. Такий підхід має підставу для розчинів малолетких речовин, що не утворюють з водою азеотропних сумішей, наприклад, гліцерин. Для речовин, що утворюють з водою азеотропні суміші, наприклад, сірчана кислота таке допущення справедливе за значень концентрації цих речовин в розчині віддалених від азеотропної точки. Коли концентрація розчиненої речовини наближається до азеотропної точки, ця речовина починає випаровуватися разом з водою й склад парів обох компонентів стає близьким складу розчину.

У даному випадку процес концентрування організований так (рис. 1), що розчин у вигляді плівки 1 рухається під дією сили тяжіння з поверхні вертикальної плоскої стінки 2, нагрітої до заданої температури, яка підтримується постійною.

Випаровування відбувається з поверхні плівки в простір, огороджений стінкою 3, що не нагрівається, зовнішня поверхня якої контактує з навколишнім середовищем. У цей простір перпендикулярно руху плівки надходить потік нейтрального газу, який захоплює пару випаровуваної речовини й виносить її за межі поверхні плівки.

Математична модель ґрунтується на фізичних уявленнях і припущеннях, запропонованих під час моделювання гідродинаміки й теплоперенесення в стікаючій плівці рідини, що випаровується в перехресний потік нейтрального газу [10,11]. Відповідно математичний опис процесу концентрування розчину в цих умовах включає

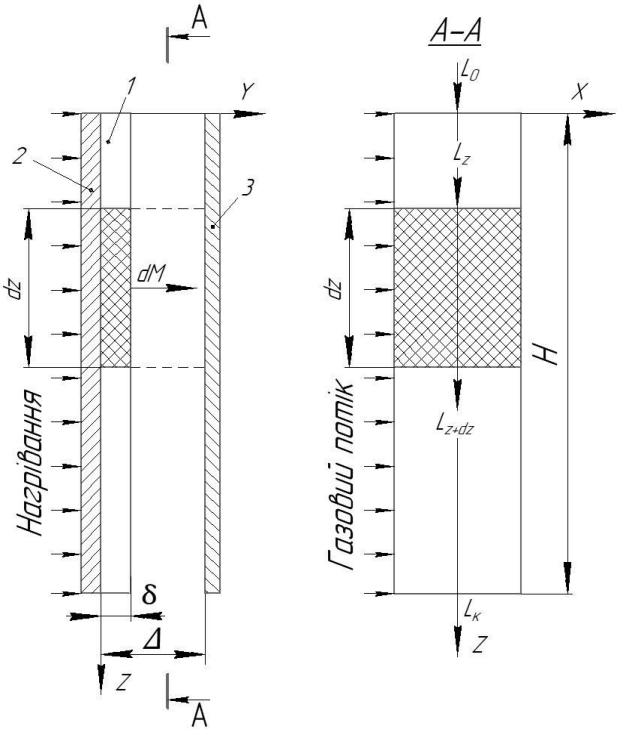

Рис. 1. Схема організації процесу концентрування розчину: 1 – плівка розчину; 2 – стінка з поверхнею стікання; 3 – огороджувальна стінка

такі рівняння: руху рідини в плівці; нерозривності плівки; масовіддачі від вільної поверхні плівки в газову фазу; матеріального балансу газової фази за речовиною, що випаровується; відносного вмісту речовини в газовій фазі (записане на основі рівняння Клапейрона); рівняння, що виражає закон Дальтона; теплоперенесення в рідкій плівці; теплоперенесення в газовому потоці, наведені в зазначених роботах. Відмінність у застосуванні цих рівнянь для процесу концентрування в тому, що в даному випадку враховуємо залежність характеристик розчину (густини, в'язкості, питомої теплоємності) від його температури й складу, що змінюються під час руху плівки.

Для визначення зміни складу розчину в стікаючій плівці цю систему рівнянь доповнимо рівнянням матеріального балансу за речовиною, що випаровується (водою), що записане для елемента плівки об'ємом bδdz (рис. 1):

$$-d(\psi L)=\gamma dM, \qquad (1)$$

де ψ – масова частка води в розчині; $L=\rho_p u_{пл}\delta b$ – масовий потік (витрата) розчину, кг/с; ρ_p – густина розчину, кг/м^3; $u_{пл}$ – швидкість руху плівки, м/с; δ – товщина плівки, м; b – ширина плівки, м; γ – масова частка водяної пари в газовій фазі (парогазовій суміші); M – масовий потік водяної пари від поверхні плівки, кг/с; z – поздовжня координата.

Переходячи до лінійної масової густини зрошення $\Gamma=\rho_p u_{пл}\delta$ і виражаючи масовий потік водяної пари з рівняння масовіддачі

$$\gamma dM = \beta(P_{вн} - P_в)bdz, \qquad (2)$$

рівняння (1) при b(z)=const запишемо в наступному вигляді:

$$-\frac{d(\psi\Gamma)}{dz} = \beta(P_{вн} - P_в), \qquad (3)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі води в газову фазу, кг/м^2·с·Па; $P_{вн}$ – тиск насиченої водяної пари за температури газової фази, Па; $P_в$ – парціальний тиск пари води в газовій фазі, Па.

Систему рівнянь, що описують процес концентрування розчину в стікаючій плівці в розглянутих умовах, вирішували чисельно, окремо для плівки розчину з сіткою в поздовжньому напрямку за довжиною плівки й для газового потоку з сіткою в поперечному напрямку з використанням методу явної схеми Ейлера відповідно до розрахункової схеми, наведеної в [11].

Рівняння (3) в цьому випадку вирішуємо наступним чином. Дискретизуючи розрахунковий інтервал, що відповідає заданій висоті поверхні стікання, на осі Z від $z_0=0$ до $z_n=H$ з прийнятою величиною кроку, замінимо похідну в лівій частині рівняння (3) різницевим аналогом для деякого і-го поперекового перерізу плівки z_i:

$$-\frac{d(\psi\Gamma)}{dz} \approx \frac{(\psi\Gamma)_{i+1} - (\psi\Gamma)_i}{z_{i+1} - z_i}.$$

Тоді рівняння (3) запишемо наступним чином:

$$\frac{(\psi\Gamma)_{i+1} - (\psi\Gamma)_i}{z_{i+1} - z_i} = \beta(P_{вн_i} - P_{в_i}),$$

звідки, використовуючи вираз для густини зрошення, після відповідних перетворень, отримаємо рекурентну формулу вигляді:

$$\psi_{i+1} = \frac{\rho_{pi} u_{плi} \delta_i}{\rho_{p(i+1)} u_{пл(i+1)} \delta_{(i+1)}} \psi_i + \frac{\beta(P_{вн_i} - P_{в_i})}{\rho_{p(i+1)} u_{пл(i+1)} \delta_{(i+1)}} (z_{(i+1)} - z_i). \qquad (4)$$

Формула (4) дозволяє розраховувати зміну масової частки води в розчині стікаючої плівки в умовах випаровування в перехресний потік нейтрального газу. Розрахунок проводимо, допускаючи, що гідродинамічні закономірності стікання плівки розчину аналогічні закономірностям стікання індивідуальної (однокомпонентної) рідини. Для цього на поздовжній осі Z задаємось кроком $z_{i+1}-z_i$ і на кожному кроці, за наведеними в [10] залежностями, розраховуємо товщину плівки, швидкість її руху $u_{пл\ i}$, вологовміст газу d_{ri} і парціальний тиск $P_{в\ i}$, вважаючи, що значення температур плівки $t_{пл\ i}$ і газу $t_{г\ i}$ відомі в результаті послідовного розрахунку, починаючи з вказаних початкових значень $t_{пл\ 0}$ і $t_{г\ 0}$. На відміну від плівки індивідуальної рідини, що стікає в ізотермічних умовах [10], в даному випадку враховуємо на кожному кроці $z_{i+1}-z_i$ зміну густини $\rho_{p\ i}$ і в'язкості $\mu_{ж\ i}$ розчину залежно від його температури та складу. Температури газу $t_{г(i+1)}$, і $t_{пл(i+1)}$ для кожного наступного кроку розраховуємо за рекурентними формулами, наведеними в [11], в яких, на ряду з урахуванням зміни зазначених характеристик розчину, вра-

ховуємо зміну його питомої теплоємності.

Методика експериментального дослідження

Експериментальне дослідження процесу концентрування водних розчинів малолетких рідин проводили на установці, детально описаній у роботі [11]. Основним елементом цієї установки є прямокутна ємність, зовнішня поверхня однієї з вертикальних стінок (робоча поверхня) з розмірами 0,8×0,01 м, яка служить для стікання плівки концентрованого розчину. Ємність заповнена високотемпературним теплоносієм (гліцерином), що контактує з внутрішньою поверхнею зазначеної стінки. Теплоносій циркулює через ємність за допомогою рідинного термостата, де нагрівається до заданої температури. Вгорі на ємності встановлено розподільний пристрій, призначений для рівномірного розподілу розчину за шириною робочої поверхні. На відстані 18 мм від цієї поверхні розміщена огороджувальна стінка. У простір між цією стінкою та робочою поверхнею рівномірно за висотою й перпендикулярно руху плівки, подається повітря.

Установка забезпечена системами регулювання й вимірювання витрати і температури розчину, що надходить зверху L_0 (кг/с), $t_{ж0}$ (^{0}C) й стікає знизу $L_к$ (кг/с), $t_ж$ (^{0}C) робочої поверхні, температури теплоносія $t_{тн}$ (^{0}C) в ємності, швидкості v (м/с) й температури повітря на вході $t_{г0}$ (^{0}C) та виході $t_г$ (^{0}C) з простору між робочою поверхнею й огороджувальною стінкою. Як модельний розчин малолеткої рідини використовували водний розчин гліцерину. Значення концентрації (масової частки) гліцерину у вихідному C_0 (%) й стікаючому знизу робочої поверхні $C_к$ (%) розчині визначали за його густиною. Для цього вимірювали густину відповідних проб розчину за допомогою набору ареометрів з подальшим перерахунком на концентрацію з використанням довідкових таблиць.

Для конкретних значень параметрів процесу, з урахуванням параметрів навколишнього середовища: температури $t_{ос}$ (^{0}C), відносної вологості φ (%) й атмосферного тиску B (Па), визначали коефіцієнти тепловіддачі від робочої поверхні до плівки та від плівки до повітряного потоку, що необхідні для розрахунків температур плівки і газу під час моделювання процесу концентрування. Коефіцієнт масовіддачі β, що входить до формули (4), обчислювали за допомогою виразу, отриманого з рівняння масовіддачі (2):

$$\beta = \frac{w}{P_{вн} - P_в}, \qquad (5)$$

де w – швидкість випаровування (питомий потік пари) води з розчину.

На відміну від індивідуальної рідини [10], в даному випадку швидкість випаровування води, як середнє за висотою робочої поверхні значення, визначали виходячи зі складу розчину:

$$w = \frac{L_0\psi_0 - L_к\psi_к}{b_{пл}H},$$

де ψ_0, $\psi_к$ – масова частка води відповідно у вихідному розчині та розчині, що стікає знизу робочої поверхні; $b_{пл}$ – середня за висотою робочої поверхні ширина плівки.

Результати дослідження процесу концентрування

Результати дослідження, здійсненого на основі запропонованої математичної моделі, надавали у вигляді графіків залежностей зміни відносної концентрації гліцерину в плівці його водних розчинів за висотою робочої поверхні $C/C_0=f(z)$ від параметрів процесу концентрування.

На рис. 2 наведені такі залежності для різних початкових витрат розчину (густини зрошення поверхні) у зіставленні з розподілом температури розчину в плівці.

Аналіз цих залежностей показує (рис. 2,а), що зміна концентрації розчину за довжиною плівки на початку плівки має характер близький до лінійного, потім відбувається її різкий підйом до повного випаровування води (крива 1). Зіставлення цих залежностей з розрахунковим розподілом температури розчину в плівці (рис. 2,б) дозволяє припустити, що їх лінійний характер на початку плівки пов'язаний з виходом температури плівки на встановлене значення. Після досягнення встановленої температури плівки спостерігається підйом концентрації за довжиною плівки.

Виражаючи інтенсивність процесу концентрування розчину через відстань стікання плівки, на якій досягається задана концентрація розчину, в даному випадку можна відзначити, що зі зменшенням початкової витрати розчину гліцерину інтенсивність концентрування зростає. Це пов'язано зі зменшенням товщини плівки й відповідно зі збільшенням масовіддачі під час випаровування води.

Встановлено, що інтенсивність концентрування водного розчину гліцерину зростає зі збільшенням початкової температури розчину, початкової температури повітря, температури

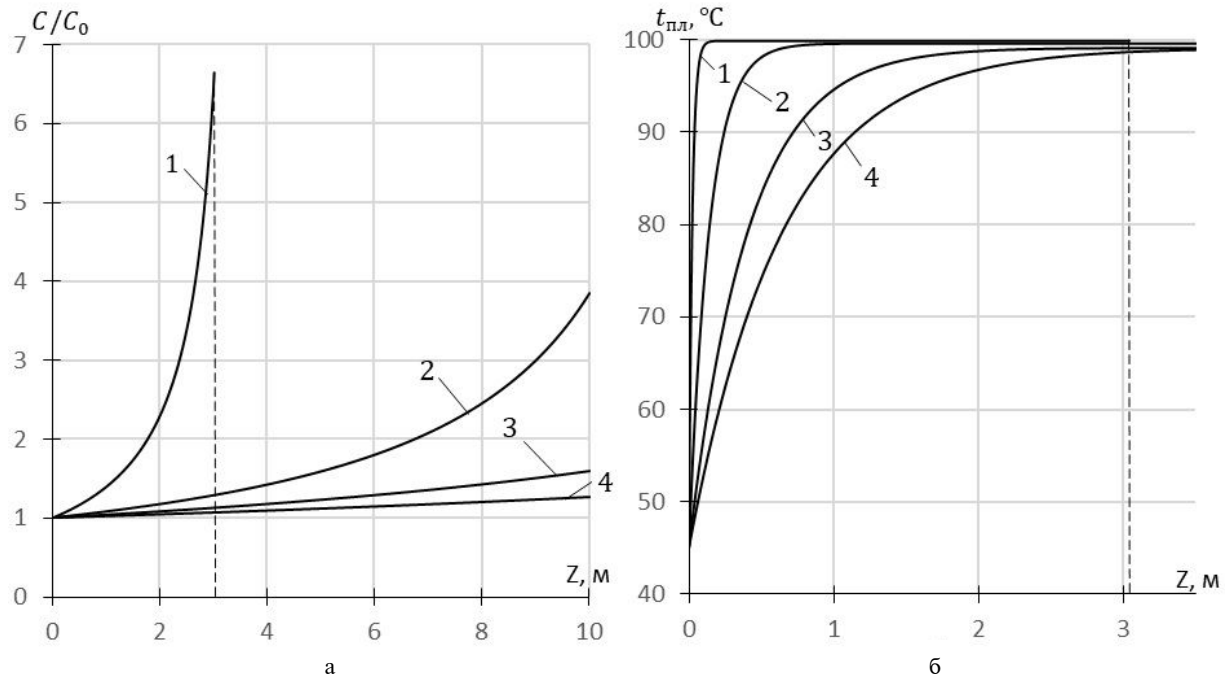

Рис. 2. Залежність зміни концентрації гліцерину в розчині за довжиною плівки за різних початкових витратах розчину (а) в зіставленні з розподілом температури розчину у плівці (б) ($t_{ж0}$=45⁰C; v=0,75 м/с; $t_{г0}$=125⁰C; $t_{ст}$=100⁰C; C_0=15%): 1 − L_0 =0,00186 кг/с; 2 − 0,00485 кг/с; 3 − 0,00632 кг/с; 4 − 0,0102 кг/с

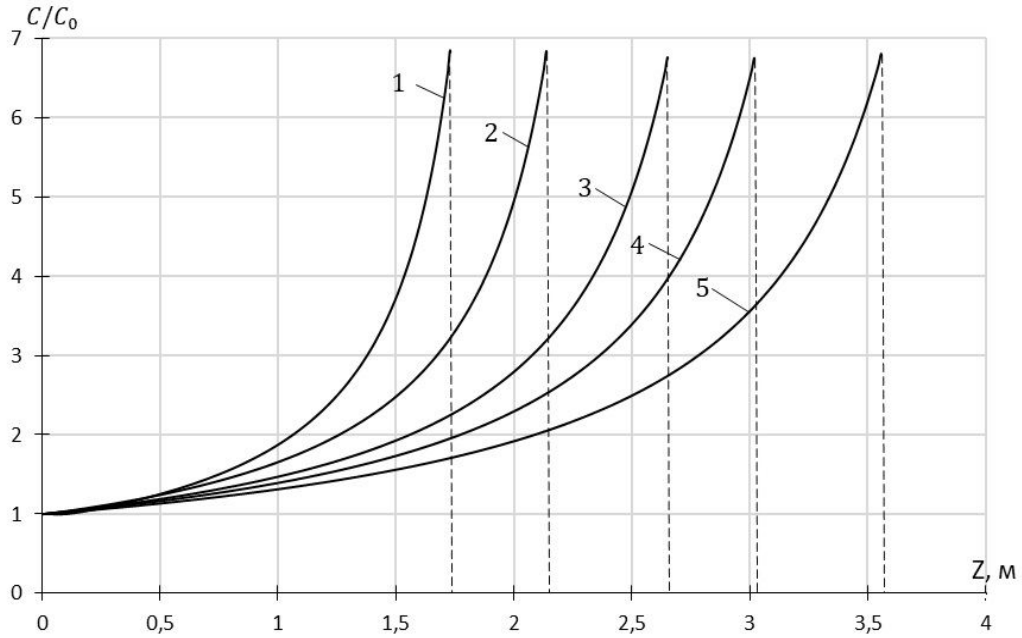

Рис. 3. Вплив швидкості повітря на зміну концентрації гліцерину в розчині за довжиною плівки (L_0=0,00204 кг/с; $t_{ж0}$=45⁰C; $t_{г0}$=125⁰C; $t_{ст}$=100⁰C; C_0=15%): 1 − v_1=0,258 м/с; 2 − 0,445 м/с; 3 − 0,741 м/с; 4 − 0,997 м/с; 5 − 1,435 м/с

робочої поверхні. Особливий характер має вплив швидкості повітря, що подається в простір над плівкою. Виявлено, що інтенсивність концентрування падає зі збільшенням швидкості повітря (рис. 3).

Це можна пояснити тим, що, незважаючи на зростання коефіцієнтів тепловіддачі зі збільшенням швидкості повітря, коефіцієнт масовіддачі води в газову фазу зменшується. Останнє пов'язане зі зменшенням парціального тиску пари води в парогазовій суміші над плівкою під час збільшення подачі нейтрально-

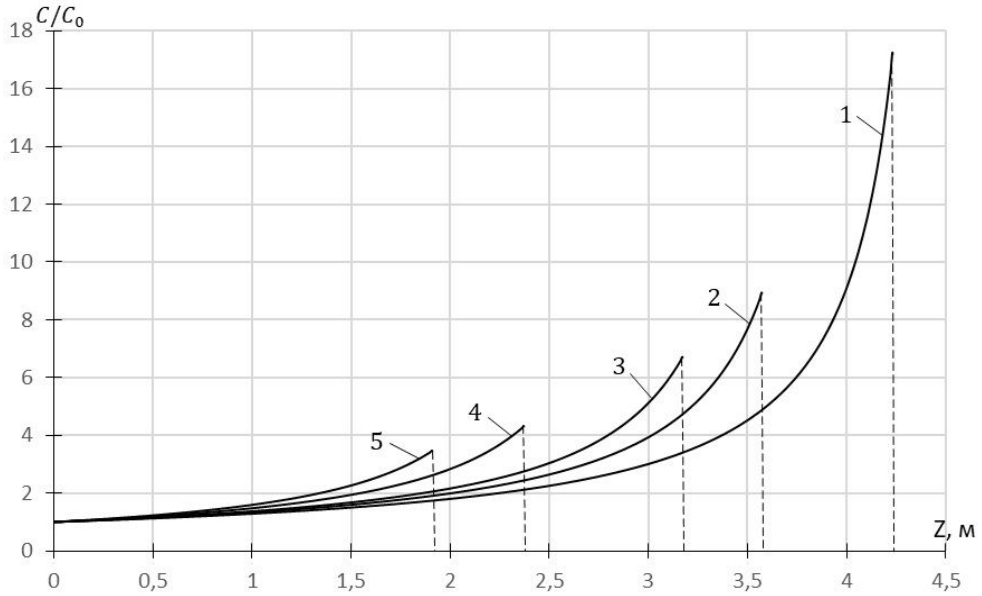

Рис. 4. Залежність зміни концентрації гліцерину в розчині за довжиною плівки за різних його концентраціях у вихідному розчині (L_0=0,00204 кг/с; $t_{к0}$=45^{0}C; v=0,75 м/с; $t_{г0}$=125^{0}C; $t_{ст}$=100^{0}C):
1 − C_0=5,9%; 2 − 11,4%; 3 − 15,0%; 4 − 23,3%; 5 − 28,9%

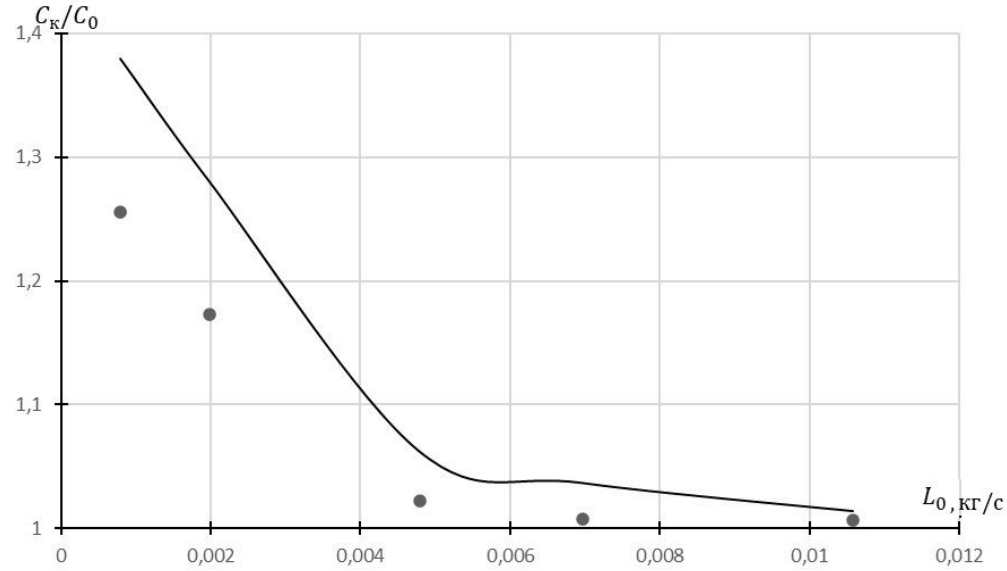

Рис. 5. Порівняння розрахункових і експериментальних значень концентрацій гліцерину в його водному розчині, що стікає знизу робочої поверхні

го газу, що у відповідності до формули (5), призводить до зменшення коефіцієнта масовіддачі.

Із залежностей зміни концентрації гліцерину в розчині за довжиною плівки за різних його початкових концентраціях у вихідному розчині (рис. 4) випливає, що менш концентрований розчин вимагає більшої відстані для повного випаровування води, незважаючи на те, що швидкість випаровування води зростає зі зменшенням концентрації розчиненої речовини в розчині.

Порівняння результатів розрахунків, виконаних з використанням запропонованої математичної моделі процесу концентрування в застосуванні до водного розчину гліцерину з виміряними на експериментальній установці значеннями концентрації гліцерину в розчині, що стікає знизу робочої поверхні (H=0,8 м), показало досить гарну їх відповідність (рис. 5).

Абсолютна розбіжність між розрахункови-

ми і експериментальними значеннями концентрації знаходиться в межах 10%.

Висновки

На підставі розробленої математичної моделі процесу концентрування водних розчинів малолетких рідин у плівці, яка стікає, випаровуванням у перехресний потік нейтрального газу і здійснених експериментальних досліджень встановлено закономірності зміни складу розчину за довжиною плівки та інтенсивності процесу концентрування. Встановлено, що на початку плівки зміна концентрації розчину має характер близький до лінійного, потім відбувається її різкий підйом до повного випаровування розчинника. Показано, що така закономірність пов'язана з розподілом температури розчину за довжиною плівки. Інтенсивність процесу концентрування зростає зі зменшенням початкової витрати розчину і його початкової концентрації, а також зі збільшенням початкової температури розчину, початкової температури газу й температури поверхні стінки, з якої стікає плівка. Зі збільшенням швидкості газу, що надходить у простір над плівкою, інтенсивність концентрування падає.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Таубман Е.И.* Выпаривание. – М.: Химия, 1982. – 323 с

2. *Термодинамические* особенности процесса концентрирования жидких сред вымораживанием / Антипов С.Т., Овсянников В.Ю., Кондратьева Я.И., Бостынец Н.И. // Совр. наукоемкие технол. – 2014. – № 5 (часть 1). – С.159-164.

3. *Гуляева Е.С., Беренгартер М.И.* Перенос ионов через ионообменные мембраны в процессе электродиализного концентрирования // Вода: химия и экология. – 2011. – № 10. – С.77-81.

4. *Долниковский В.И., Полянский К.К.* Обратный осмос. Перспективы использования в молочной промышленности // Известия вузов. Пищевая технол. – 1990. – № 1. – С.5-13.

5. *Лукашов В.К., Романько С.М., Костюченко Є.В.* Пат. 134162 Україна, МПК C01B 17/88. Апарат для концентрування розчину сірчаної кислоти. – заявл. 02.10.18; опубл. 10.05.19. – Бюл. № 9.

6. *Актершев С.П., Алексеенко С.В.* Устойчивость трехмерного течения пленки вязкой жидкости, обтекаемой турбулентным потоком газа // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т.19. – № 3. – С.317-330.

7. *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* Влияние трехмерных деформаций на локальный теплообмен к неоднородно нагреваемой стекающей пленке жидкости // Теплофизика высоких температур. – 2004. – Т.42. – № 2. – С.269-278.

8. *Георгалина Е.Р., Кириллов В.Х., Ситник В.А.* Исследование процессов контактной обработки жидкостей и газов в аппаратах пленочного типа при поперечном контактировании // Труды Одес. полит. ун-та. – 2001. – № 2. – С.81-86.

9. *Чуракова С.К.* Разработка энергосберегающих технологий в нефтегазопереработке на основе перекрёстноточных насадочных контактных устройств: Автореф. дисс. докт. техн. наук. – Уфа: Уфимский гос. нефтяной технич. ун-т, 2014. – 48 с.

10. *Lukashov V.K., Kostiuchenko Y.V., Timofeev S.V.* Hydrodynamics of a liquid film downflow on a flat surface in evaporation conditions into a flow of neutral gas // J. Eng. Sci. – 2019. – Vol.6. – No. 1. – P.F19-F24.

11. *Лукашов В.К., Костюченко Е.В., Шевцова Т.М.* Моделювання теплоперенесення в стікаючій плівці рідини, що випаровується в перехресний потік нейтрального газу // Питання хімії та хім. технол. – 2020. – № 3. – С.108-115.

Надійшла до редакції 11.02.2021

CONCENTRATION OF AQUEOUS SOLUTIONS OF LOW-VOLATILE LIQUIDS IN A FALLING FILM WITH EVAPORATION INTO A CROSS-GAS FLOW

V.K. Lukashov [a, *], Y.V. Kostiuchenko [a, b], V.I. Sereda [a]

[a] Shostka Institute of the Sumy State University, Shostka, Ukraine

[b] Sumy State University, Sumy, Ukraine

[*] e-mail: khtms@ishostka.sumdu.edu.ua

The article presents the results of the investigation of the process of concentrating solutions of low-volatile liquids in a flowing film under the conditions of evaporation in the cross-flow of neutral gas. The purpose of the study was to establish the features of solution composition change along the film length. The study was carried out using the developed mathematical model with experimental determination of model parameters: heat and mass transfer coefficients. It was found that at the beginning of the film, the change in the concentration of the solution has a character close to linear, and then the concentration sharply increases until the solvent evaporates completely. It was shown that this pattern of change in the composition of the solution is related to the distribution of the temperature of the solution along the length of the film. The intensity of the concentration process increases with decreasing initial flow rate of the solution and its initial concentration as well as with increasing initial temperature of the solution, initial temperature of the gas and temperature of the surface of the wall along which the film flows. The concentration intensity decreases with an increase in the velocity of the gas entering the space above the film. Comparison of the calculation results concerning aqueous glycerol solution with the experimental data showed their good agreement. The data obtained in the article allow calculating the height of the film concentrator nozzle at which a given concentration of the solution is provided.

Keywords: concentrating; low-volatile liquid; flowing film; evaporation; cross-flow; neutral gas.

REFERENCES

1. Taubman YI. *Vyparivanie* [Evaporation]. Moscow: Khimiya; 1982. 323 p. (*in Russian*).

2. Antipov ST, Ovsyannikov VY, Kondrat'eva YI, Bostynets NI. Termodinamicheskie osobennosti protsessa kontsentrirovaniya zhidkikh sred vymorazhivaniem [Thermodynamic features of the process of concentration of liquid media by freezing]. *Sovremennye Naukoemkie Tekhnologii*. 2014; (5): 159-164. (*in Russian*).

3. Gulyaeva ES, Berengarter MI. Perenos ionov cherez ionoobmennyie membranyi v protsesse elektrodializnogo kontsentrirovaniya [Ion transport across ion-exchange membranes during electrodialysis preconcentration]. *Voda Khimiya Ekologiya*. 2011; (10): 77-81. (*in Russian*).

4. Dolnikovskii VI, Polyanskii KK. Obratnyi osmos. Perspektivy ispolzovaniya v molochnoi promyshlennosti [Reverse osmosis. Prospects for use in the dairy industry]. *Izvestiya Vuzov. Pishhevaya Tekhnologiya*. 1990; (1): 5-13. (*in Russian*).

5. Lukashov VK, Romanko SM, Kostyuchenko YV, inventors; Shostka Institute of the Sumy State University, assignee. *Aparat dlya kontsentruvann'ya rozchynu sirchanoyi kysloty* [Apparatus for concentration of sulfuric acid solutions]. Ukraine patent UA 134162. 2019 May 10. (*in Ukrainian*).

6. Aktershev SP, Alekseenko SV. Ustoichivost trekhmernogo techeniya plenki vyazkoi zhidkosti, obtekaemoi turbulentnyim potokom gaza [Stability of a three-dimensional flow of a viscous liquid film in a turbulent gas flow]. *Teplofizika i Aeromekhanika*. 2012; 19(3): 317-330. (*in Russian*).

7. Chinnov EA, Kabov OA. Vliyanie trehmernykh deformatsii na lokalnyi teploobmen k neodnorodno nagrevaemoi stekayushhei plenke zhidkosti [Influence of three-dimensional deformations on local heat transfer to a non-uniformly heated falling liquid film]. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2004; 42(2): 269-278. (*in Russian*).

8. Georgalina ER, Kirillov VK, Sitnik VA. Issledovanie protsessov kontaktnoi obrabotki zhidkostei i gazov v apparatakh plenochnogo tipa pri poperechnom kontaktirovanii [Investigation of the processes of contact processing of liquids and gases in film-type devices with transverse contact]. *Trudy Odes Polit Un-ta*. 2001; (2): 81-86. (*in Russian*).

9. Churakova SK. *Razrabotka energosberegayushhikh tekhnologii v neftegazopererabotke na osnove perekryostnotochnykh nasadochnykh kontaktnykh ustroistv* [Development of energy-saving technologies in oil and gas processing based on cross-flow packed contact devices] [dissertation]. Ufa (Russian Federation): Ufimskii Gosudarstvennyi Neftyanoi Tekhnicheskii Universitet; 2014. (*in Russian*).

10. Lukashov VK, Kostiuchenko YV, Timofeev SV. Hydrodynamics of a liquid film downflow on a flat surface in evaporation conditions into a flow of neutral gas. *J Eng Sci*. 2019; 6(1): F19-F24. doi: 10.21272/jes.2019.6(1).f4.

11. Lukashov VK, Kostiuchenko YV, Shevtsova TM. Modelyuvannya teploperenesennya v stikayuchii plivtsi ridyny, shcho vyparovuyetsya v perekhresnyi potik neitralnogo gazu [Simulation of heat transfer in a flowing film of a evaporating liquid into a cross flow of a neutral gas]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2020; (3): 108-115.
doi: 10.32434/0321-4095-2020-130-3-108-115.