

АНОТАЦІЯ

Костюченко Є.В. Концентрування водних розчинів малолетких рідин в плівковому апараті з протоком нейтрального газу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія. – Сумський державний університет, Суми, 2021.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню закономірностей процесу концентрування водних розчинів малолетких рідин у стікаючій плівці випаровуванням в перехресний потік нейтрального газу і використанню результатів цих досліджень для створення нової конструкції концентратора та методики його розрахунку. Такий концентратор дозволяє проводити безвакуумне концентрування розчинів при температурі нижче температури їх кипіння, що, зважаючи на високі температури кипіння малолетких рідин, дає можливість знизити енерговитрати й відмовитися від дефіцитних видів палива, що використовується для нагрівання розчину.

Відповідно до мети та поставлених задач, дослідження мали характер комплексних, оскільки були використані як теоретичні так експериментальні методи, які знайшли своє застосування у концентруванні водних розчинів. Теоретичні дослідження проводили використовуючи метод математичного моделювання, який полягав у формулюванні спрощених фізичних уявлень про процеси, що вивчаються, і опис їх системою диференціальних та інтегральних рівнянь. Розрахунки, пов'язані з моделюванням і обробкою експериментальних даних проводили за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel, Mathcad.

У дисертації наведені результати моделювання гідродинаміки і тепломасоперенесення стікаючої плівки індивідуальної (однокомпонентної) рідини, що випаровується в перехресний потік нейтрального газу з використанням розробленої математичної моделі. Ці результати показали закономірності зміни товщини, швидкості стікання і температури плівки за її довжиною, а також

температури газу над плівкою. Встановлено, що інтенсивність випаровування рідини з плівки при її перехресному напрямку руху щодо газового потоку більше, ніж при прямоточному напрямку і може перевищувати інтенсивність випаровування при протиточному напрямку. Температура плівки рідини, що випаровується в перехресний потік нейтрального газу, при віддаленні від її початкового перерізу досягає усталеного значення, а при подальшому збільшенні відстані від цього перерізу рідина повністю випаровується. Розроблено алгоритм розрахунку відстаней, на яких відбуваються ці явища. Температура газу над плівкою за довжиною плівки змінюється несуттєво, але за своїм характером ця зміна відповідає зміні температурі плівки, і також досягає усталеного значення.

В ході експериментальних досліджень використовували методи фізичного моделювання із застосуванням теорії подібності, статистичної обробки експериментальних даних. Вхідні та вихідні параметри досліджуваних процесів на експериментальній установці визначали манометричним, термометричним і об'ємним методами вимірювання. А концентрацію водних розчинів гліцерину, який використовувався в якості модельної рідини, вимірювали ареометричним і рефрактометричним методами.

На підставі експериментального дослідження тепломасоперенесення в стікаючій плівці води, що випаровується в перехресний потік повітря, встановлені значення коефіцієнта тепловіддачі від поверхні до стікаючої з неї плівки, а також коефіцієнтів тепло – і масовіддачі від плівки до повітряного потоку. Показано, що залежності коефіцієнтів тепло – і масовіддачі від початкового потоку рідини проходять через мінімум, відповідний $Re_{ж} \approx 500$, що свідчить про перехід від ламінарного режиму течії плівки до турбулентного в умовах, що розглядаються. Встановлено залежність цих коефіцієнтів від параметрів процесу тепломасоперенесення для обох режимів. На підставі математичної обробки експериментальних даних були отримані емпіричні рівняння для їх розрахунку.

Отримані результати математичного моделювання та експериментального дослідження випаровування індивідуальної рідини зі стікаючої її плівки стали основою для розробки математичної моделі і дослідження процесу концентрування

водних розчинів малолетких рідин в стікаючій плівці випаровуванням в перехресний потік нейтрального газу. За допомогою цієї моделі встановлено закономірності зміни складу розчину за довжиною плівки та інтенсивності процесу концентрування. Показано, що концентрація розчину на початку плівки змінюється лінійно, потім відбувається її різкий підйом, що триває до повного випаровування води. Такий характер зміни концентрації розчину за довжиною плівки пов'язаний з розподілом температури плівки. Різкий підйом концентрації відповідає усталеному значенню температури. Встановлено, що інтенсивність процесів концентрування зростає зі зменшенням початкового потоку розчину і його початкової концентрації, а також зі збільшенням початкової температури розчину, температури поверхні стінки, на якій стікає плівка й початкової температури повітря, що надходить в простір над плівкою. Зі збільшенням швидкості повітря інтенсивність концентрування падає.

Проведено експериментальне дослідження процесу концентрування водних розчинів гліцерину в їх стікаючій плівці в умовах випаровування в потік повітря, в результаті якого визначені коефіцієнти тепло – і масовіддачі, що являються параметрами розробленої математичної моделі. Встановлено, що в дослідженому діапазоні зміни параметрів процесу для низько концентрованих розчинів гліцерину, як і для води, характерний перехід від ламінарного режиму стікання плівки до турбулентного, для розчинів з підвищеною концентрацією гліцерину такий перехід відсутній і плівка стікає тільки в ламінарному режимі.

У дисертації на основі експериментальних досліджень показано прояв капілярних ефектів за умов стіканні плівки рідини, що випаровується в перехресний газовий потік, який виражається зменшенням ширини плівки. Також встановлені закономірності цього зменшення для плівок води й водних розчинів гліцерину залежно від параметрів процесу стікання. Для води і водних розчинів гліцерину така зміна ширини плівки може досягати 50-80%. Найбільший вплив на зменшення ширини плівки за таких умов дають початковий потік рідини та температура поверхні стікання. Для коригування поверхні випаровування плівки, визначеної на основі технологічного розрахунку, була введена величина ширини середньої поверхні випаровування плівки. Результатами експериментального дослідження впливу

параметрів процесу стікання плівки води й водних розчинів гліцерину на ширину середньої поверхні випаровування стали узагальнені емпіричні закономірності, що пов'язують коригувальний коефіцієнт з основними параметрами процесу стікання.

На основі проведених в дисертаційній роботі теоретичних і експериментальних досліджень закономірностей стікання і тепломасоперенесення в плівці рідини, а також моделювання процесу концентрування водних розчинів малолетких рідин в стікаючій плівці розроблена нова конструкція і методика розрахунку плівкового концентратора таких розчинів. Конструкція заснована на використанні плоско-паралельної (пластинчастої) насадки, що дозволяє забезпечити перехресну взаємодію стікаючої плівки рідини з газовим потоком. Елементи насадки (пластини) мають внутрішні порожнини, де проходить теплоносій, що нагріває плівку розчину, яка стікає з її зовнішньої поверхні. Методика розрахунку випробувана на конкретному прикладі розрахунку концентратора водного розчину гліцерину. Її апробація показала, що для підвищення концентрації цього розчину від 6 до 30% (мас.) з продуктивністю в 2,0 т/год необхідна робоча висота плоско – паралельної насадки рівна 1,62 м. Розроблену методику розрахунку такого апарату та ескізний проект на концентратор прийнятий Державним науково – дослідним інститутом хімічних продуктів у розробку директивного технологічного процесу та проектування фази регенерації відпрацьованої кислотної суміші виробництва нітратів целюлози.

Результати дисертаційних досліджень впроваджені в учбовий процес при викладанні дисциплін «Процеси і апарати хімічних виробництв» та «Технологія виробництва спеціальних високомолекулярних сполук» на кафедрі хімічної технології високомолекулярних сполук Шосткинського інституту СумДУ.

Ключові слова: концентрування, випаровування, тепломасоперенесення, стікаюча плівка, перехресний потік, малолетка рідини, нейтральний газ, розчин, математична модель, ustalена температура, плоско-паралельна насадка.

ABSTRACT

Kostiuchenko Y.V. Concentrating aqueous solutions of some low-volatile liquids in a film apparatus with a flow of neutral gas. – Qualification academic work under manuscript copyright.

The thesis for obtaining the Doctor of Philosophy by specialty 161 «Chemical technology and engineering». – Sumy State University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. Sumy, 2021.

The thesis is devoted to the study of the regularities of the process of concentration of aqueous solutions of some low-volatile liquids in a flowing diaper by evaporation into a cross flow of neutral gas and the use of the results to create a new kind of the concentrator. Such kind of a concentrator makes possible vacuum-free concentration of solutions at temperatures below their boiling point, which, due to the high boiling points of volatile liquids, helps to reduce energy consumption and to avoid the scarce types of fuel used while heating the solution.

The thesis presents the results of modeling the hydrodynamics and heat and mass transferring of a flowing film of an individual (of one component) liquid evaporating into a cross flow of a neutral gas using the created mathematical model. The results demonstrate the regularities of changes in the thickness, flow rate and temperature of the film along its length, as well as the temperature of the gas above the film. It was found that the intensity of evaporation of liquid from the film during its cross-interaction with the gas flow is higher than during direct-flow interaction and can exceed the rate of evaporation during counter current interaction. The temperature of a liquid film evaporating into a cross flow of a neutral gas, with distance from its initial cross section, reaches an equilibrium value, and with a further increasing the distance from this section, the liquid evaporates completely. There has been developed an algorithm for calculating the distances at which these phenomena appear. The temperature of the gas above the film along the length of the film changes insignificantly, but by its natural characteristics this change is associated with the temperature of the film and reaches an equilibrium value, in addition.

On the basis of an experimental study of heat and mass transfer in a flowing film of water evaporating into a cross flow of air, the values of the heat transfer coefficient from the surface to the film flowing along it, as well as the coefficients of heat and mass transfer from the film to the air flow, have been established. The dependence of these coefficients on the parameters of the heat and mass transfer process showed the presence of a transition from the laminar mode of film flow to the turbulent one at the value of the number $Re_{\text{ж}} \approx 500$. Mathematical processing of the experimental data made it possible to obtain empirical equations for calculating the heat and mass transfer coefficients.

The obtained results of mathematical modeling and experimental study of the evaporation of an individual liquid from its flowing down film became the basis for the development of a mathematical model and study of the process of concentration of aqueous solutions of some low-volatile liquids in a flowing film by evaporation into a cross flow of neutral gas. Using this model, the regularities of changes in the composition of the solution along the length of the film and the intensity of the concentration process were established. It is shown that the concentration of the solution at the beginning of the film changes linearly, then there is a abrupt rise, continuing until the complete evaporation of water. This kind of a change in the concentration of the solution along the length of the film is associated with the temperature distribution of the film. The abrupt rise of concentration corresponds to the state temperature value.

An experimental study of the process of concentration of aqueous solutions of glycerin in their flowing film in the conditions of evaporation into an air stream was carried out, as a result of which the heat and mass transfer coefficients were determined, which are the parameters of the developed mathematical model. It was found that, in the investigated range of variation of the process parameters, for low-concentration solutions of glycerol, as well as for water, it is common to observe the transition from a laminar mode of film flow to a turbulent one, for solutions with an increased concentration of glycerol, such a transition is absent and the film flows down only in a laminar mode.

The thesis presents experimental data on a decrease in the width of a liquid film flowing down a heated flat surface, associated with capillary effects. For water and aqueous solutions of glycerin, such a change in the width of the film can reach 50-80%. The natural

characteristic of the change in the width of the film along its length and the obtained empirical dependences for its assessment are established.

On the basis of the results obtained in the thesis, the study of the process of concentrating aqueous solutions of some low-volatile liquids, a new design and method for calculating a film concentrator have been developed. The design is based on the use of a plane-parallel (lamellar) packing, which makes possible a cross-flow interaction. The elements (plates) of the packing have internal cavities through which the coolant passes, heating the solution film flowing down their outer surface. The calculation technique was tested on specific parameters of the concentration process.

Keywords: concentration, evaporation, heat and mass transfer, flowing film, cross flow, low volatile liquid, neutral gas, solution, mathematical model, equilibrium temperature, plane-parallel packing.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Лукашов В.К., Романько С.М., Середа В.И., Костюченко Е.В. Теплоперенос при концентрировании раствора серной кислоты испарением в поток нейтрального газа. *Вопросы химии и химической технологии* (Scopus). 2018. № 4. С. 110-119. (Особистий внесок: проаналізовано експериментальні дані та отримав коефіцієнти для розрахунку теплових характеристик процесу концентрування).

2. 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. *Journal of Engineering Sciences* (Google Scholar). 2019. Vol. 6, № 1 P. 19-24. DOI: 10.21272/jes.2019.6(1).f4 (Особистий внесок: проведено розрахунки, на основі яких було встановлено закономірності зміни товщини і швидкості руху плівки за висотою поверхні при різному характері взаємодії плівки з потоком нейтрального газу).

3. Лукашов В.К., Костюченко Е.В., Шевцова Т.М. Моделирование теплопереноса в стикающей плівці рідини, що випаровується в перехресний потік

нейтрального газу. *Питання хімії та хімічної технології* (Scopus). 2020. №. 3, С. 108-115. (Особистий внесок: приймав участь у розробці математичної моделі, розробці алгоритму розрахунку та провів розрахунки, які дозволили встановити закономірності теплоперенесення стікаючої з нагрітої поверхні плівки рідини).

4. Lukashov V.K., Kostiuchenko Y.V., Timofeev S.V., Ochowiak M. An experimental study of heat and mass transfer in a falling liquid film evaporation into a crossflow of neutral gas. *Journal of Engineering Sciences* (Google Scholar). 2020. Vol. 7, № 1. P. 30-38, DOI: 10.21272/jes.2020.7(1).f3. (Особистий внесок: проведено експериментальні дослідження на основі яких отримав емпіричні рівняння для розрахунку коефіцієнтів тепло і – масовіддачі).

5. Лукашов В.К., Костюченко Є.В., Серета В.І. Концентрування водних розчинів малолетких рідин в стікаючій плівці випаровуванням у перехресний газовий потік. *Питання хімії та хімічної технології* (Scopus). 2021. № 3. С. 113-120. (Особистий внесок: приймав участь в розробці математичної моделі процесу концентрування, провів експериментальні дослідження і розрахунки на основі яких встановлені закономірності зміну складу розчину стікаючої плівки).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

6. Костюченко Є.В., Лукашов В.К. Математична модель стікання плівки рідини в умовах випаровування в перехресний потік нейтрального газу. *Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво*: матеріали IV Міжнародної науково–практичної конференції, м. Шостка, 14–16 листопада 2018 р. / Шосткинський інститут СумДУ, СумДУ. Суми, 2018. С. 149–150. (Особистий внесок: проведено розрахунки та підготував текст тез доповідей).

7. Костюченко Є.В., Романько С.М., Лукашов В.К. Взаємодія фаз при стіканні плівки рідини в умовах випаровування в потік нейтрального газу. *Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки* : Збірник доповідей VIII Всеукраїнської науково–практичної конференції, м. Київ, 13–14 грудня 2018 р. / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2018. С. 12–15. (Особистий внесок: проведено розрахунки,

на основі яких було встановлено закономірності зміни товщини і швидкості руху плівки за висотою поверхні при різному характері взаємодії плівки з потоком нейтрального газу).

8. Костюченко Е.В., Лукашов В.К. Експериментальне дослідження тепломасопереносу в апаратах зі стікаючою плівкою рідини, що випаровується в перехресний газовий потік. *Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки* : Збірник доповідей XI Всеукраїнської науково–практичної конференції, м Київ, 4–5 червня 2020 р. / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2020. С. 40–42. (Особистий внесок: проведено експериментальні дослідження на основі яких отримані залежності коефіцієнтів тепло і – масовіддачі).

9. Костюченко Е.В., Лукашов В.К. Математична модель теплопереносу при випаровуванні стікаючій плівці рідини в перехресний газовий потік. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : Матеріали та програма VII Всеукраїнської науково–технічної конференції, м. Суми, 21–24 квітня 2020 р. / СумДУ, Суми, 2020. С. 280–281. (Особистий внесок: приймав участь у розробці математичної моделі, та підготовки тез доповідей).

10. Костюченко Е.В., Лукашов В.К. Експериментальне дослідження зміни ширини стікаючої плівки рідини. *Сучасні технології у промисловому виробництві*. Матеріали та програма VIII Всеукраїнської науково–технічної конференції, м. Суми, 20–23 квітня 2021 р. / СумДУ, Суми, 2021. С. 196–197. (Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень та розрахунків).

11. Lukashov V.K. Kostiuchenko Y.V., Timofeev S.V. Modeling heat and mass transfer during evaporation in the film apparatus with cross movement phases. *Chemical Technology and Engineering*. 3rd International Scientific Conference, с. Lviv, June 21-24th, 2021 y. / Lviv Polytechnic National University, Lviv. 2021, 48-50 p. (Особистий внесок: приймав участь в розробці математичної моделі процесу концентрування, провів експериментальні дослідження і розрахунки).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.

12. Апарат для концентрування розчину сірчаної кислоти : пат. №134162
Україна : С01В 17/88. № и 2018 10018 ; заявл. 08.10.18 ; опуб. 10.05.19, Бюл. №9. 4 с.
(Особистий внесок: брав участь в розробці конструкції концентратора).