

В. Г. Павлова<sup>1</sup>, к. техн. н., ст. викладач, О. В. Кошельнік<sup>1,2</sup>, к. техн. н., доцент,  
Т. М. Пугачова<sup>1</sup>, к. техн. н., професор, О. В. Круглякова<sup>1</sup>, к. техн. н., доцент

## РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ ПАРО- І КРИСТАЛОУТВОРЕННЯ ПРИ ТЕПЛООБМІНІ В ПЛІВКОВИХ ВИПАРНИХ АПАРАТАХ

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
м. Харків

<sup>2</sup>Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, м. Харків

**Ключові слова:** випарні апарати, упарювання кристалічних розчинів, плівкова течія багатофазної речовини, підвищення ефективності.

**Вступ.** В різних галузях промисловості використовують для технічних цілей розчини і суспензії, які можуть містити компоненти, що кристалізується. Такі компоненти під час термічного оброблення спричиняють інкрустацію поверхонь нагріву, погіршуючи тим самим умови теплопередачі та забруднення поверхонь теплообміну. Одним із поширених методів термічної обробки є випарювання. Його використовують як елемент у технологічному процесі при виробництві багатьох продуктів, а також, як кінцевий процес для збереження і транспортування готового продукту.

Сьогодні існують різні типи випарних установок: з природною циркуляцією; співвісно розташованою та винесеною гріючою камерою; з кипінням розчину в трубках; винесеною зоною кипіння; плівкові випарні установки, а також випарні апарати з пластинчастою поверхнею нагріву. Кожен з них має свої переваги та недоліки, що визначає можливість та особливості їх застосування. З такого різноманіття випарного обладнання особливий інтерес викликають дослідження щодо розробки апаратів інтенсивної дії, в яких процес випарювання відбувається за рахунок багаторазового використання теплоносія, що дасть змогу збільшити їх енергоефективність. Більшість таких конструкцій працює саме в плівковому режимі випарювання [1–2, 6–9].

Серед переваг процесу випарювання в падаючій плівці можна виділити швидке відокремлення легко-киплячих компонентів, що забезпечує швидку обробку продукту; невелику товщину плівок, що сприяє інтенсивному теплообміну за умови оптимального змочування труби, і малу депресію, що дає змогу збільшити кількість ступенів установки та використовувати відносно невеликі перепади температур. Однак плівкові апарати також мають і ряд недоліків – потребують хімічного та механічного очищення поверхонь нагріву, що накладає обмеження щодо чистоти розчину, оголення поверхні нагріву веде до переходу від плівкового руху розчину до струменевого зі зменшенням поверхні теплообміну. Перераховані переваги плівкових випарних апаратів викликають значний практичний інтерес для пошуку методів реалізації процесу випарювання солевмісних розчинів, що дало б можливість розширити сферу їх застосування.

### Виділення невирішеної частини загальної проблеми

Одним із способів зниження швидкості інкрустації поверхонь нагріву є додавання до початкового неупареного розчину різноманітних домішок, зокрема й готової твердої фази. Проведені дослідження в цій галузі показали, що введення домішок на початку

процесу випарювання призводить до значного зменшення обсягів відкладень на поверхнях нагрівання, що дає можливість збільшити час безпримивної роботи апарату. Як готову фазу, що вводиться, залежно від речовини, що випаровується, провідними фірмами-виробниками пропонувалися різні варіанти таких речовин-домішок, причому результати їх промислового тестування показали непогані результати зі зниження інкрустації та збільшення часу роботи апаратів.

Можна зазначити, що стосовно плівкових випарних апаратів у літературі практично відсутні дослідження процесів плівкової течії розчинів, що кристалізуються, які б урахували особливості спільного протікання теплообміну, пароутворення і кристалізації для трифазних рідин [1–5].

Під час дослідження тепло- і масообмінних процесів, що протікають у випарному апараті з плівкою, що стікає, доцільним буде використання методів математичного моделювання. Застосування таких методів дає змогу з набагато меншими витратами і в стислі терміни провести комплекс дослідницьких робіт, що дозволить розробити нові удосконалені конструкції випарних апаратів. Значною мірою ускладнює математичний опис процесів тепломасообміну в випарному апараті зміна фізичних властивостей розчину під час його випарювання. Незважаючи на широке коло досліджень у сфері кипіння, застосування різних типів апаратів, знання в цій області в даний час ще недостатні для створення розрахункових методик, що мають універсальне застосування.

#### **Викладення основної частини дослідження**

Для розв'язання поставленого завдання розглядався процес теплообміну в плівці трифазної рідинної суспензії зі змінним вмістом фаз. Математична модель теплообміну в суцільному середовищі плівкової течії рідинної суспензії містить у собі рівняння руху, нерозривності, енергії, рівняння зміни концентрацій фаз і теплообміну [10–12].

Під час складання математичної моделі розглядалися процеси перенесення тепла і енергії під час плівкового руху суспензії, а також теплообміну на межі «поверхня нагрівання-рідина». При цьому враховувалося, що течія плівки, яка стікає, є турбулентною завдяки хвилеутворенню, так і природній та штучній турбулізації. Тому можна припустити, що температуру  $t$  та концентрацію в конкретному поперечному перерізі плівки можна вважати постійною, але вони будуть змінюватимуться за шляхом її руху. Ще одним припущенням є сталість у поперечному перерізі теплофізичних властивостей суспензії.

Рівняння нерозривності плівки рідинної багатофазної суспензії, що стікає, матимуть такий вигляд:

– при пароутворенні на поверхні нагріву

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho' \left[ 1 + \beta_{\tau} \left( 1 - \frac{\rho'}{\rho_{\tau}} \right) + \beta'' \left( 1 - \frac{\rho'}{\rho''} \right) \right] + \left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right) \left[ \rho' \left( 1 - \beta_{\tau} \frac{\rho'}{\rho_{\tau}} - \beta'' \frac{\rho'}{\rho''} \right) \bar{\omega}' + \beta_{\tau} \bar{\omega}_{\tau} + \beta'' \bar{\omega}'' \right] = 0;$$

– при пароутворенні на поверхні плівки

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho' \left[ 1 + \beta_{\tau} \left( 1 - \frac{\rho'}{\rho_{\tau}} \right) \right] + \left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right) \left[ \rho' \left( 1 - \beta_{\tau} \frac{\rho'}{\rho_{\tau}} \right) \bar{\omega}' + \beta_{\tau} \bar{\omega}_{\tau} \right] = 0.$$

Рівняння енергії, що описує процеси перенесення тепла і енергії в плівці суспензії:

$$\beta_p \rho_p c_p \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} + \bar{\omega}_p \frac{\partial t}{\partial x} + \bar{\omega}_p \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \beta_n \rho_n c_n \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} + \bar{\omega}_n \frac{\partial t}{\partial x} + \bar{\omega}_n \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \beta_t \rho_t c_t \times \\ \times \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} + \bar{\omega}_t \frac{\partial t}{\partial x} + \bar{\omega}_t \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{(r_{кр} \rho_n + r_p \rho_t) dt}{\tau^2} = (\beta_p \lambda_p + \beta_n \lambda_n + \beta_t \lambda_t) \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right),$$

де  $\lambda_p, \lambda_n, \lambda_t$  – коефіцієнти теплопровідності рідкої, парової та твердої фаз відповідно,  $\rho_p, \rho_n, \rho_t$  – густина рідкої, парової та твердої фаз відповідно;  $\beta_p, \beta_n, \beta_t$  – масові частки парової, твердої і рідкої фази, що виділяється в плівці суспензії,  $c_p, c_n, c_t$  – теплоємність рідкої, парової та твердої фази, відповідно.

В процесі стікання плівки по поверхні теплообміну випарного апарату важливими факторами є гідростатична стійкість режиму плівкової течії і повне змочування поверхні теплообміну. При нестійкому режиму течії можливі розриви плівки, при цьому характер режиму течії стає струменевим із утворенням сухих ділянок. При цьому спостерігається різке зниження інтенсивності теплопередачі, оскільки поверхня теплообміну буде зменшуватись. Цей процес регулюється зміною щільності зрошення. Зміни густини зрошення і концентрації рідкої фази описуються системою диференціальних рівнянь.

Зміна щільності зрошення  $m$  у часі в процесі стікання плівки описується рівнянням

$$\frac{dm}{d\tau} = m_0 \left( \frac{\partial \beta_t}{\partial \tau} + \bar{\omega}_x \frac{\partial \beta_t}{\partial x} + \bar{\omega}_y \frac{\partial \beta_t}{\partial y} \right),$$

де  $m_0$  – початкова щільність зрошення.

Зміна концентрації рідкої фази:

$$\frac{dR_p}{d\tau} = \frac{\partial R_p}{\partial \tau} + \bar{\omega}_x \frac{\partial R_p}{\partial x} + \bar{\omega}_y \frac{\partial R_p}{\partial y}.$$

Рівняння збереження маси рідкої фази:

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial \tau} + \text{div}(\rho_p \bar{\omega}_p) = - \int_{l_{кр3}}^{l_{кр}} \rho_m f \bar{\omega}_{кр} dl_{кр} - \rho_m l_{кр3} \bar{\omega}_3.$$

де  $l_{кр}, l_{кр3}$  – розміри кристалічної фази та зародків кристалів.

Під час випарювання розчину суспензії процеси кристалізації солей можна описати системою рівнянь, що описують збереження мас твердої фази та балансом кількості твердих частинок у суспензії.

Передумови, що лежать в основі цієї моделі кристалізації, такі:

– ріст кристалів у плівці протікає в присутності готових кристалів, об'єм новоутвореної твердої кристалічної фази значно менший ніж об'єм загальної маси кристалів, що перебувають у суспензії. Також припускається сталість джерел руйнування кристалів під час їхнього перебування в плівці рідини;

– залежність часу зняття пересичення від середньозваженого розміру кристалів і від ступеня пересичення, властивостей розчинних солей і розчину, кількості твердої фази в суспензії, інтенсивності процесу кипіння;

– температура рідкої і твердої фаз та теплофізичні параметри твердих частинок однакові, постійними є швидкість течії плівки. Відносною швидкістю руху твердих частинок в плівці, що стікає, можна знехтувати внаслідок їх хаотичного переміщення;

– із зовнішніх сил діють сили тяжіння і поверхневого натягу, сила тертя на межі «пар-суспензія». Тиск у поперечному перерізі плівки можна вважати постійним.

Таким чином зміна вмісту твердої фази суспензії має такий вигляд:

$$\frac{d\beta_{\tau}}{d\tau} = \frac{\partial(b \cdot R_m)}{\partial\tau} + \bar{\omega}_x \frac{\partial(b \cdot R_m)}{\partial x} + \bar{\omega}_y \frac{\partial(b \cdot R_m)}{\partial y}.$$

Зміна концентрації насичення твердої фази:

$$\frac{dR_m}{d\tau} = \frac{\partial R_m}{\partial\tau} + \bar{\omega}_x \frac{\partial R_m}{\partial x} + \bar{\omega}_y \frac{\partial R_m}{\partial y},$$

де  $R_p$ ,  $R_{\tau}$  – параметри розчинності рідкої та твердої фаз, що визначаються як

$$R_p = \frac{b_m}{b_p}, \quad R_m = \frac{b_m}{b_{\text{роз}}},$$

де  $b_p$ ,  $b_{\tau}$ ,  $b_{\text{роз}}$  – концентрація рідкої, твердої фаз та розчину.

Рівняння теплообміну в прикордонному шару рідини має такий вигляд

$$\alpha = \frac{1}{\Delta t} [q - \lambda \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right)_{y \rightarrow 0}],$$

де  $\lambda$  – умовна теплопровідність прикордонного шару (визначається за методом адитивності).

Таким чином, представлено математичну модель плівкової течії багатофазної рідини зі зміною вмісту фаз і процесами випаровування та кристалізації. Дана модель відображає реальні процеси, що протікають у плівці, яка стікає, і дає можливість для подальшого аналізу метою отримання критеріального рівняння, що описує ці складні тепломасообмінні процеси.

**Висновок.** Однією з найбільш енергоефективних конструкцій випарних апаратів є плівкові випарні апарати. Однак їх застосування, як правило, обмежується чистотою розчину, тому їх не використовують для теплової обробки розчинів з компонентами, які кристалізуються, через підвищену інкрустацію поверхонь нагріву. Як показали проведені дослідження, при додаванні в початковий розчин невеликої кількості готової твердої фази, швидкість інкрустації поверхонь нагріву істотно зменшується, основна кристалізація відбувається на внесеній приманці твердої фази, що дає можливість розширити сферу застосування плівкових випарних апаратів для розчинів в яких відбувається процес кристалізації.

Тому актуальним залишається питання дослідження процесів теплообміну в плівці багатофазної рідини при спільному перебігу процесів течії, теплообміну, пароутво-

рення та кристалізації. Для розв'язання цієї проблеми розглядається теплообмінний процес турбулентного плівкового руху по внутрішній поверхні трубки рідинної суспензії зі змінним вмістом фаз. Представлена математична модель плівкової течії рідинної суспензії з урахуванням змінності вмісту різних фаз розчину. Ця модель описує фізичну сутність процесу випаровування в плівці багатофазної суспензії, що стікає, і містить рівняння руху, нерозривності, енергії, рівняння зміни концентрацій фаз і теплообміну, що дозволить в подальшому проводити дослідження процесів плівкової течії багатокомпонентної суміші зі зміною вмісту фаз з метою отримання практичного рішення, а саме критеріального рівняння для розрахунку процесів теплообміну у плівці, що стікає.

### Література

1. Гавриличенко И.Г. Экспериментальные исследования теплогидродинамических процессов выпаривания при плёночном течении жидкости / И.Г. Гавриличенко, Ю.Б. Данилов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 16 (1059). – С. 12–21.
2. Данилов Ю.Б. Теоретические и экспериментальные исследования теплопередачи и кипения в выпарных аппаратах со стекающей плёнкой / Ю.Б. Данилов, Л.М. Ульев // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2012. – № 3. – С. 84–96.
3. Lienhard, John H. A heat transfer textbook / John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V – 5th ed. — Cambridge, MA :Phlogiston Press, 2019 – 784 с.
4. W. K. Lewis. The evaporation of a liquid into a gas. / W. K. Lewis. //Mech. Engr., 44(7):445–446, 1922.
5. Гимбутис Г. Теплообмен в гравитационном течении плёнки жидкости / Г. Гимбутис. – Вильнюс : Моксла, 1988. – 232 с.
6. Павлова В.Г. Особливості процесів кипіння розчинів у стікаючій плівці в камерах випарних апаратів / В.Г. Павлова, О.В. Кошельник, О.В. Долобовська // Збірник наукових праць за матеріалами Всеукр. науково-технічної онлайн-конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» (29-30 вересня 2020 р., м. Одеса). – Одеса: ОНАХТ, 2020. – С. 31–32.
7. Фокин В.С. К расчету коэффициента теплоотдачи в ширококанальных пластинчатых греющих камерах/ В.С. Фокин, В.Г. Павлова, И.В. Иванова // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2011. – № 1. – С. 14–17.
8. Фокин В.С. Основы переноса тепла при пленочном движении жидкостной суспензии / В.С. Фокин, В.Г. Павлова // Вестник национального технического университета «ХПИ». Темат. вып. «Новые решения в современных технологиях» – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002 – № 6, Т.1. – С. 94–97.
9. Analysis of heat transfer intensity in evaporators with a plate heat exchanger / Pavlova V.G., Krugliakova O.V. // Тези доп. Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". – Харків: НТУ «ХПІ», 2019– Ч.1.– 227.
10. The mathematical model for studying the processes of heat and mass transfer of crystallizing solutions / Pavlova V.G., Koshelnik O.V., Pugacheva T.M, Krugliakova O.V. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023, 17–20 травня 2023 р. – Харків : НТУ «ХПІ». – С. 7.

11. Фокин В.С. Тепломассообмен при пленочном течении многокомпонентной жидкости суспензии / В.С. Фокин, В.Г. Павлова // Вестник национального технического университета «ХПИ». Тем. выпуск «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – Вып. 12. – С. 123–126.

12. Вплив процесів паро- та кристалоутворення на теплообмін в плівкових випарних апаратах / Павлова В.Г., Кошельник О.В., Пугачова Т.М., Круглякова О.В., Долобовська О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2021. – № 1. – С. 32–40.

Bibliography (transliterated)

1. Gavrilichenko I.G. Eksperimental'nye issledovaniya teplogidrodinamicheskikh processov vyparivaniya pri plyonochnom techenii zhidkosti / I.G. Gavrilichenko, Yu.B. Danilov // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universyteta «KhPI». Ser. Innovacijni doslidzhennya u naukovih robotah studentiv. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – № 16 (1059). – P. 12–21.

2/ Danilov Yu.B Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya teploperedachi i kipeniya v vyparnykh apparatah so stekayushchej plyonkoj/ YU.B Danilov, L.M. Ul'ev // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – 2012. – № 3. – P. 84–96.

3. Lienhard, John H. A heat transfer textbook / John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V – 5th ed. — Cambridge, MA :Phlogiston Press, 2019 – 784 p.

4. W. K. Lewis. The evaporation of a liquid into a gas. / W. K. Lewis. //Mech. Engr., 44(7):445–446, 1922.

5. Gimbutis G. Teploobmen v gravitacionnom techenii plyonki zhidkosti / G. Gimbutis. – Vil'nus : Moksla, 1988. – 232 p.

6. Pavlova V.G. Osoblyvosti protsesiv kypinnia rozchyniv u stikaiuchii plivtsi v kamerakh vyparnykh aparativ / V.G. Pavlova, O.V. Koshelnik, O.V. Dolobovska // Zbirnyk naukovykh prats za materialamy Vseukr. nauково-tekhnichnoi onlain-konferentsii «Aktualni problemy enerhetyky ta ekolohii» (29-30 veresnia 2020 r., m. Odesa). – Odesa: ONAKhT, 2020. – P. 31–32.

7. Fokin V.S. K raschetu koeffitsienta teplootdachi v shirokokanalnyih plastinchatyih greyuschih kamerah/ V. S. Fokin, V. G. Pavlova, I. V. Ivanova// Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – 2011. – № 1. – P. 14–17.

8. Fokin V.S. Osnovy perenosa tepla pri plenochnom dvizhenii zhidkostnoj suspenzii/ V.S. Fokin, V.G. Pavlova // Vestnyk natsyonalnoho tekhnicheskoho unyversyteta «KhPI». – Kharkov: NTU «KhPI», 2002. – № 6, T. 1, – P. 94–97.

9. Analysis of heat transfer intensity in evaporators with a plate heat exchanger / Pavlova V.G., Krugliakova O.V. // Tezi dop. Mizhnarodnoyi nauково–praktichnoyi konferentsiyi "Informatsiyi tehnologiyi : nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya". – Harkiv: NTU «HPI», 2019– Ch.1.– 227.

10. The mathematical model for studying the processes of heat and mass transfer of crystallizing solutions / Pavlova V.G., Koshelnik O.V., Pugacheva T.M, Krugliakova O.V. // Informatsiyi tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: tezi dopovidey HXHI mizhnarodnoyi nauково-praktichnoyi konferentsiyi MicroCAD-2023, 17–20 travnya 2023 r. – Harkiv : NTU «HPI». – С. 7.

11. Fokin V.S. Tepломассообмен при пленочном течении многокомпонентной жидкости суспензии / V.S. Fokin, V.G. Pavlova // Vestnik natsionalnogo tehničeskogo universiteta «HPI». Тем. vyipusk «Energeticheskie i teplotehnicheskie protsessyi i oborudovanie». – Harkov: NTU «HPI», 2004. – Vyip. 12. – P. 123–126.

12. Vpliv protsesiv paro- ta kristaloutvorennya na teploobmin v plivkovih viparnih aparatah / Pavlova V.G., Koshelnik O.V., Pugachova T.M., Kruglyakova O.V., Dolobovska O.V. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. – 2021. – # 1. – P. 32–40.

УДК 66.048.5

В. Г. Павлова, к. техн. н., ст. викладач, О. В. Кошельнік, к. техн. н., доцент,  
Т. М. Пугачова, к. техн. н., професор, О. В. Круглякова, к. техн. н., доцент

### **РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ ПАРО- І КРИСТАЛОУТВОРЕННЯ ПРИ ТЕПЛООБМІНІ В ПЛІВКОВИХ ВИПАРНИХ АПАРАТАХ**

У різних галузях промисловості знаходять широке застосування процеси кипіння розчинів з виділенням розчинних у них солей. Нині існують різні типи випарних установок, застосування яких залежить від технологічних особливостей процесу випарювання і вимог до оброблюваного продукту. Найефективнішими як з економічної точки зору, так і з точки зору отримання якісного готового продукту, є плівкові випарні апарати, теплообмінні процеси в яких протікають у турбулентній плівці, що стікає. Застосування плівкових випарних апаратів зазвичай обмежують чистотою оброблюваного розчину. Однак за наявності в початковому розчині невеликої кількості готових частинок цих солей (рідинна суспензія) можливе розширення сфери застосування даного типу апарату. У зв'язку зі сказаним дослідження процесів тепломасообміну в турбулентній плівці багатофазної рідинної суспензії, що стікає та розробка їх математичного опису представляє теоретичний і практичний інтерес.

У роботі представлена математична модель плівкової течії 3-х фазної суспензії. При цьому виходили з наступного: рідина суспензія складається з рідкої та твердої фаз. Рідинна суспензія складається з рідкої та твердої фаз. Рідка фаза являє собою багатокомпонентну систему, що містить розчинник, компоненти, які кристалізуються і не кристалізуються. Течія плівки рідинної суспензії, що стікає, відбувається під дією гравітаційних сил і сил поверхневого натягу на межі суспензія-пара (рух пари збігається з рухом плівки). Відносно швидкістю руху твердих частинок у плівці суцільного середовища, що стікає, можна знехтувати внаслідок їхнього хаотичного переміщення, швидкість течії плівки можна вважати постійною. Турбулентність плівки, що стікає, має місце по всій довжині і спричинена хаотичним переміщенням дисперсної фази, що призводить до однакової температури рідкої та твердої фази та теплофізичних параметрів у поперечному перерізі плівки. Під час стікання рідинної суспензії вздовж поверхні, що обігрівається, завдяки видаленню розчинника під час кипіння на поверхні плівки відбувається зміна концентрацій рідкої фази і кількості твердої фази. Кількість новоутвореної твердої фази значно менша від об'єму загальної маси кристалів, що перебувають у суспензії. Представлена в роботі модель відображає фізичну сутність процесу випарювання в плівці багатофазної суспензії, що стікає, і містить рівняння руху, нерозривності, енергії, рівняння зміни концентрацій фаз і теплообміну.

**Ключові слова:** випарні апарати, упарювання кристалічних розчинів, плівкова течія багатофазної речовини, підвищення ефективності.

В. Г. Павлова, А. В. Кошельник, Т. М. Пугачева, О. В. Круглякова

### **РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ПАРО- И КРИСТАЛЛООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТЕПЛООБМЕНЕ В ПЛЕНОЧНЫХ ВЫПАРНЫХ АППАРАТАХ**

В различных отраслях промышленности находят широкое применение процессы кипения растворов с выделением растворимых в них солей. В настоящее время существуют различные типы выпарных установок, применение которых зависит от технологических особенностей процесса выпаривания и требований к обрабатываемому продукту. Наиболее эффективными как с экономической точки зрения, так и с точки зрения получения качественного готового продукта являются пленочные выпарные аппараты, теплообменные процессы в которых протекают в турбулентной стекающей пленке. Применение пленочных выпарных аппаратов обычно ограничивают чистотой обрабатываемого раствора. Однако при наличии в исходном растворе небольшого количества готовых частиц этих солей (жидкостная суспензия) возможно расширение сферы применения данного типа аппарата. В связи со сказанным исследование процессов теплообмена в турбулентной пленке многофазной стекающей жидкостной суспензии и разработка их математического описания представляет теоретический и практический интерес.

В работе представлена математическая модель пленочного течения 3-х фазной суспензии. При этом исходили из следующего: жидкая суспензия состоит из жидкой и твердой фаз. Жидкостная суспензия состоит из жидкой и твердой фаз. Жидкая фаза представляет собой многокомпонентную систему, содержащую растворитель, компоненты, которые кристаллизуются и не кристаллизуются. Течение пленки стекающей жидкостной суспензии происходит под действием гравитационных сил и сил поверхностного натяжения на границе суспензия-пар (движение пара совпадает с движением пленки). Относительной скоростью движения твердых частиц в пленке сплошной стекающей среды можно пренебречь вследствие их хаотического перемещения, скорость течения пленки можно считать постоянной. Турбулентность стекающей пленки имеет место по всей длине и вызвана хаотическим перемещением дисперсной фазы, что приводит к одинаковой температуре жидкой и твердой фазы и теплофизических параметров в поперечном сечении пленки. При стекании жидкостной суспензии вдоль обогреваемой поверхности, благодаря удалению растворителя во время кипения на поверхности пленки происходит изменение концентраций жидкой фазы и количества твердой фазы. Количество новообразованной твердой фазы значительно меньше объема общей массы кристаллов, находящихся в суспензии. Представленная в работе модель отражает физическую сущность процесса испарения в стекающей пленке многофазной суспензии и содержит уравнения движения, неразрывности, энергии, уравнения изменения концентраций фаз и теплообмена.

**Ключевые слова:** испарительные аппараты, упаривание кристаллических растворов, пленочное течение многофазного вещества, повышение эффективности.

V. G. Pavlova, O. V. Koshelnik, T. M. Pugacheva, O. V. Kruglyakova

**CALCULATION OF STEAM AND CRYSTAL FORMATION PROCESSES  
FOR HEAT EXCHANGE IN FILM EVAPORATORS**

The processes of boiling solutions with soluble salts release are widely used in various industries. The technological features of the evaporation process and the requirements for the product being processed determine the choice of a specific type of evaporation unit. Film evaporators, in which heat exchange processes take place in a turbulent flowing film, are the most effective both from an economic reason and finished product quality. The use of film evaporators is usually limited by the purity of the solution being processed. However, expanding the scope of application of this type of apparatus is possible if the initial solution contains a small number of particles of salts (liquid suspension). Thus, the study of heat and mass transfer processes in a turbulent film of a multiphase flowing liquid suspension and the development of their mathematical description is of theoretical and practical interest.

A mathematical model of film flow of a three-phase suspension is presented in this work. The initial assumptions were as follows. A liquid suspension consists of liquid and solid phases. The liquid phase is a multicomponent system that contains a solvent and components that crystallize and do not crystallize. The flow of a film of a flowing liquid suspension occurs under the influence of gravitational forces and surface tension forces at the suspension-vapor boundary (the movement of the vapor coincides with the movement of the film). The relative speed of movement of solid particles in a film of a continuous flowing medium can be neglected due to their chaotic movement, while the flow rate of the film can be considered constant. The flowing film is turbulent along its entire length, which is caused by the chaotic movement of the dispersed phase. Thus, the temperatures of the liquid and solid phases, as well as the thermophysical parameters in the cross section of the film, are the same. When a liquid suspension flows along a heated surface, a change in the concentrations of the liquid phase and the amount of the solid phase occurs on the surface of the film due to the removal of the solvent during boiling. The amount of the newly formed solid phase is significantly less than the total mass of crystals in suspension. The model presented in the work reflects the physical essence of the evaporation process in a flowing film of a multiphase suspension and contains equations of motion, continuity, energy, equations for changes in phase concentrations and heat transfer.

**Keywords:** evaporators, evaporation of crystalline solutions, film flow of a multiphase substance, increasing efficiency.