ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

VII Міжнародної науково-практичної конференції

«ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ»

9-13 вересня 2019 р.

НТБ ОНАХТ

ОДЕСА
2019

УДК 663 / 664

Публікуються доповіді, представлені на XVIII Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (9 – 13 вересня 2019 р.) і присвячені актуальним проблемам підвищення енергоефективності в сфері АПК, харчових та хімічних виробництвах, розробки та впровадження ресурсо-та енергоефективних технологій та обладнання, альтернативних джерел енергії.

НТБ ОНАХТ

Редакційна колегія:

Доктор техн. наук, професор О.Г. Бурдо
Кандидат техн. наук Ю.О. Левтринська
Я.О. Масельська

Одеська національна академія харчових технологій, 2019 р. ©

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ОРГКОМІТЕТ

Єгоров *Богдан Вікторович*	–	голова, Одеська національна академія харчових технологій, ректор, д.т.н., професор
Бурдо *Олег Григорович*	–	вчений секретар, Одеська національна академія харчових технологій, д.т.н., професор
Атаманюк *Володимир Михайлович*	–	Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., професор
Васильєв *Леонард Леонідович*	–	Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова, Республіка Білорусь, д.т.н, професор
Гавва *Олександр Миколайович*	–	Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Гумницький *Ярослав Михайлович*	–	Національний університет „Львівська політехніка”, д.т.н., професор
Долинський *Анатолій Андрійович*	–	Інститут технічної теплофізики, почесний директор, д.т.н., академік НАН України
Зав’ялов *Владимир Леонідович*	–	Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Сукманов *Валерій Олександрович*	–	Полтавський університет економіки і торгівлі, д.т.н., професор
Колтун *Павло Семенович*	–	Technident Pty. Ltd., Australia, Dr
Корнієнко *Ярослав Микитович*	–	Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
Малежик *Іван Федорович*	–	Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
Михайлов *Валерій Михайлович*	–	Харківський державний університет харчування та торгівлі, д.т.н, професор
Паламарчук *Ігор Павлович*	–	Національний університет біоресурсів та природокористування України, д.т.н., професор
Снежкін *Юрій Федорович*	–	Інститут технічної теплофізики, директор, д.т.н., академик. НАН України
Сорока *Петро Гнатович*	–	Український державний хіміко-технологічний університет, д.т.н., почесний професор
Сухий *Констянтин Михайлович*	–	ДВНЗ "Український державний хіміко-технологічний університет", д.хім.н., професор
Тасімов *Юрій Миколайович*	–	Віце-президент союзу наукових та інженерних організацій України
Товажнянський *Леонід Леонідович*	–	Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор, член-кореспондент НАН України
Ткаченко *Станіслав Йосифович*	–	Вінницький національний технічний університет, д.т.н., професор
Черевко *Олександр Іванович*	–	Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, д.т.н, професор
Шит *Михаїл Львович*	–	Інститут енергетики Академії Наук Молдови, к.т.н., в.н.с

НТБ ОНАХТ

СЕКЦІЯ 2.

ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ХІМІЧНИХ І ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

НТБ ОНАХТ

11. Мирошниченко С.Т., Коваль В.А, Епифанов С.А. Оценка кавитационного процесса в насосном оборудовании методом виброакустической диагностики Вісник НТУУ «КПІ», Серія Машинобудування №59. 2010. С 173-175.
12. Patrick Braeutigam, Zhi-Lin Wu, Annegret Stark, Bernd Ondruschka Roles of Pumps and Bypass in Chemistry Induced by Hydrodynamic Cavitation. Chem. Eng. Technol. 2010, Vol. 33, №2 P. 341-346.
13. Lesya Yu. Avdieieva, Eduard K. Zhukotskyi, Andrii A. Makarenko The Effects of hydrodynamic cavitation for the change of water temperature indicators. XVII International scientific conference "Improvement of processes and equipment in food and chemical industries" Abstracts. Ukraine, Odessa, September 3-8th, 2018. P 12.
14. Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А. Вплив ефектів гідродинамічної кавітації на електрохімічні властивості води. Наукові праці – Одеса, Одеська національна академії харчових технологій: 2017. Том 81, Вип. 1. С. 105-110.

References.

1. Promtov M.A. (2008) Perspektivy primeneniya kavitatsionnykh tekhnolohiy dlya intensifikatsii khimiko-tekhnolohicheskikh protsessov. Vestnik THTU. 14(4) 861-869.
2. Braeutigam P., Franke M., Zhi-Lin Wu, Ondruschka B. (2010) Role of Different Parameters in the Optimization of Hydrodynamic Cavitation. Chem. Eng. Technol., 33(6), 932–940
3. Ostrikov A. N., Krasovitskij Ju. V., Shevtsov A. A. i dr. (2006) Protsessy i apparaty pischevyh proiz-vodstv. SPb .: GIORD, 1, 632.
4. Karelin V.Ya., Minaev A.V. (1986) Nasosyi i nasosnyie stantsii: Ucheb. dlya vuzov. M.: Stroyizdat,. 320.
5. Lyamaev B.F. (1988) Gidrostruynyie nasosyi i ustanovki. L.: Mashinostroenie, 256 .
6. Fedorets' V.O., Pedchenko M.N., Strutins'kij V.B. ta in. (1995) Gidroprivodi ta gidropnevmoavtomatika: pidruchnik. K:Vischa shkola, 463.
7. Loginov A. V., Slyusarev M. I., Smirnyih A. A. (2001) Nasosyi i nasosnyie ustanovki pischevyih predpriyatiy [Tekst]: Uchebnoe posobie. Voronezh. gos. tehnol. akad., Voronezh. 220
8. Kulinchenko V. R. Gidravlika, gidravlichni mashini i gidroprivid: Pidruchnik. (2006) Kiïv: «Inkos», Tsentr navchal'noï literaturi, 616.
9. Chumakov G.A., Lunjaka K.V., Krivenko S.V. (2009) Kurs lektsij z distsiplini "Gidravlika i gidro-, pnev-moprivod": Navchal'nij posibnik Herson, HNTU, 121.
10. .Jahno O. M., Kostjuk D.V., Strichek Ja., Antonjak P. (2012) Vlijanie kavitatsii na velichinu pul'satsij podachi shesterennogo nasosa. Visnik NTUU «KPI», Serija Mashinobuduvannja, 64, 132-135.
11. Miroshnichenko S.T., Koval' V.A, Epifanov S.A. (2010) Otsenka kavitatsionnogo protsessa v nasosnom oborudovanii metodom vibroakusticheskoj diagnostiki. Visnik NTUU «KPI», Serija Mashinobuduvannja, 59, 173-175.
12. Patrick Braeutigam, Zhi-Lin Wu, Annegret Stark, Bernd Ondruschka (2010) Roles of Pumps and Bypass in Chemistry Induced by Hydrodynamic Cavitation. Chem. Eng. Technol., 33(2), 341-346.
13. Lesya Yu. Avdeeva, Eduard K. Zhukotskyi, Andrii A. Makarenko (2018) The Effects of hydrodynamic cavitation for the change of water temperature indicators. XVII International scientific conference "Improvement of processes and equipment in food and chemical industries" Abstracts. Ukraine, Odessa, September 3-8th,. P 12.
14. Avdeeva L.Ju., Makarenko A.A. (2017) Vpliv efektiv gidrodinamichnoï kavitatsiï na elektrohimichni vlastivosti vodi. Naukovi pratsi Odesa, 81(1), 105-110.

УДК 536.423.1

ГІДРОДИНАМІКА ГАЗОРІДИННИХ ПОТОКІВ НА КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ СТРУКТУРАХ

д.т.н. Туз[1] В.О., к.т.н. Лебедь[1] Н.Л., Трокоз[1] Я.Є.
[1]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Україна, Київ

HYDRODYNAMICS OF GAS-LIQUID FLOWS AT THE CAPILLARY-POROUS STRUCTURES

doctor of science V.O.Tuz[1], candidate of technical sciences N.L.Lebed[1], Ya.E.Trokoz
[1] National Technical University of Ukraine"Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute"Ukraine, Kyiv

Анотація. Перспективним напрямком підвищення енергоефективності і зменшення малогабаритних характеристик тепломасообмінного обладнання, яке використовується в хімічній, харчовій та ін. галузях є застосування методів, які забезпечують оптимізацію параметрів процесів в обладнанні.

НТБОНАХТ

Одним з основних принципів, покладених в основу проектування і експлуатації контактних тепломасообмінних апаратів, є забезпечення стабільності взаємодії плівки рідини і потоку газу або пари. Характер взаємодії визначається кризовими явищами, пов'язаними з порушенням режиму течії плівки при високих швидкостях газового потоку, що супроводжується інтенсивним уносом крапель і початком процесу захлинання.

Представлені результати дослідження показують, що використання капілярно-пористого покриття поверхні каналів контактних апаратів впливає на хвильові процеси в плівці і сприяє зниженню нижньої границі початку процесу захлинання при певних умовах. Досліджено вплив геометричних характеристик покриття на інтенсивність процесів тепломасообміну в контактному апараті. Використання результатів експериментального дослідження гідродинаміки двофазного потоку в каналах з капілярно-пористим покриттям дозволило уточнити аналітичний розв'язок задачі по визначенню границь кризових явищ. Аналіз результатів дослідження показав, що початок процесу захлинання наступає при значно більший товщині плівки, що є істотним позитивним моментом при експлуатації контактних тепломасообмінних апаратів.

Abstract. A promising direction of increasing energy efficiency and reducing the mass and dimensions of heat and mass transfer equipment used in chemical, food and other industries are the application of methods that provide optimization of process parameters in the equipment.

One of the main principles laid down in the design and operation of contact heat exchangers is to ensure the stability of the interaction of the liquid film and the flow of gas or steam.

The nature of the interaction is determined by the crisis phenomena associated with the violation of the flow regime of the film at high velocities of the gas stream, which is accompanied by intense drift of droplets and the beginning of the break process.

The presented research results show that the use of capillary-porous coating of the surface of the channels of contact devices affects the wave processes in the film and contributes to lowering the lower boundary of the beginning of the break process under certain conditions.

The influence of the geometrical characteristics of the coating on the intensity of the processes of heat and mass transfer in the contact apparatus is investigated. Using the results of an experimental study of the hydrodynamics of a two-phase flow in channels with a capillary-porous coating allowed to clarify the analytical solution of the problem of determining the boundaries of crisis phenomena.

Geometrical characteristics of the coating of the heat-exchange surface, significantly affect the interaction of the contact surface and the film of the working fluid and the intensity of the processes of heat and mass transfer in the contact apparatus.

Analysis of the presented results shows that in the temperature range in which conducted the studies, the intensity of the evaporation of the fluid increases with an enlarged cell size from 10-4 m to 5·10-4 m. With an increase in the size of the cell from 10-4 m to 6,3·10-4 m, the intensity of the evaporation of the liquid is somewhat reduced due to the fact that the work of adhesion forces are not enough to hold thin films for a long time in large cells until their full evaporation.

Analysis of the results of the study showed that the beginning of the break process occurs at a much greater thickness of the film, which is a significant positive moment in the operation of contact heat and mass transfer devices.

Ключові слова: гідродинаміка, газорідинні потоки, плівка рідини, капілярно-пориста структура, процес захлинання.

Keywords: hydrodynamics, gas-liquid flows, liquid film, capillary-porous structure, chocking boundary.

Умовні позначення

g	–	прискорення вільного падіння, м/с;
I	–	інтенсивність випаровування, кг/м^2·с;
p	–	тиск, Па;
R	–	радіус, м;
t	–	температура, °С;
u, w	–	швидкість рідини, газу відповідно, м/с;
x, y	–	координати, м;
ξ	–	коефіцієнт опору;
δ	–	товщина плівки, м;
λ	–	довжина хвилі, м;
ν	–	кінематичний коефіцієнт в'язкості, м^2/с;
ρ	–	густина , кг/м^3;
σ	–	коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;
τ	–	дотичне напруження, Па.

Числа подібності

$\mathrm{Bo} = \dfrac{d}{\left(\sigma/(g(\rho_р - \rho_г))\right)^{0,5}}$ – число Бонда;

$K_w = \dfrac{w''_{кр} \cdot \rho_г^{0,5}}{\left(\sigma \cdot g(\rho - \rho_г)\right)^{0,25}}$ – критерій стійкості.

Індекси

г	–	газ;
р	–	рідина;
кр	–	критичне значення;
"	–	вихідне (кінцеве) значення;
з	–	капілярно-пориста структура
о	–	середнє значення.

Вступ. Перспективним напрямком підвищення енергоефективності і зменшення малогабаритних

НТБОНАХТ

характеристик тепломасообмінного обладнання, яке використовується в хімічній, харчовій та ін. галузях є застосування методів, які забезпечують оптимізацію параметрів процесів в обладнанні. Перспективним методом пасивної інтенсифікації процесів тепломасообміну у газорідинних системах є використання поверхонь контакту з капілярно-пористим покриттям стінок каналу. Такий метод дозволяє штучно турбулізувати плівку рідини і, тим самим, інтенсифікувати процес тепломасообміну. З іншої сторони, капілярно-пориста структура сприяє більш ранньому розвитку хвильового руху плівки, що може обмежувати величину верхньої границі швидкості газу, при якій виникає процес захлинання у випадку затоплення структури поверхні. Особливістю капілярно-пористих структур є створення умов руху рідини в межах структури. Дія капілярних сил стабілізує рух рідини при певних густинах зрошування. Цей ефект доцільно використовувати для розширення робочого діапазону параметрів тепломасообмінних апаратів.

Формулювання задачі і аналіз літературних джерел. Процес взаємодії плівки рідини з газовим потоком досліджувався у роботі [1]. Дія потоку газу на вільну поверхню плівки враховувалася на підставі допущення про пропорційність дотичної напруги на цій поверхні величині відхилення поперечної координати хвильової поверхні щодо середнього значення товщини плівки рідини.

Необхідною умовою ефективності роботи апарату контактного типу, що має певну гідравлічну схему, є забезпечення взаємодії потоків в діапазоні зміни їх робочих параметрів, в межах яких реалізується сталий рух плівки рідини. Дослідженню процесів, при яких відбувається порушення сталості руху двофазної системи «плівка рідини - потік газу» у вертикальних каналах, присвячена велика кількість аналітичних і експериментальних робіт [2-4]. При висхідному русі газу можливе існування наступних режимів течії плівки: низхідного (під дією сил гравітації), висхідного (під дією потоку газу) і режим захлинання. Режим захлинання спостерігається в певному діапазоні співвідношень витрат рідкої і газової фаз. Він супроводжується порушенням гідродинамічної стійкості поверхні розділу фаз, інтенсивним краплинним винесенням, зникненням кільцевого режиму течії з переходом у барботажний. Критичне значення швидкості газового потоку, яке відповідає початку режиму захлинання, залежить від витрати рідини в плівці (фактично від її товщини), режиму течії, частоти і амплітуди хвиль, дотичної напруги на зовнішній поверхні плівки, а також від теплофізичних властивостей рідини і газу.

Залежність, що дозволяє визначити критичну швидкість газу, має вид

$$w''_{0кр} = 2,52 \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho'' \cdot R} \right)^{0,5}. \qquad (1)$$

Отримана залежність, як наголошувалося у [3], мала істотні розбіжності з експериментальними результатами.

Гідродинамічна криза захлинання двофазної системи досліджувалася в роботі [3] на основі нелінійної теорії руху хвильової плівки спільно з газовим потоком. Математичний опис процесу взаємодії контактуючих фаз був істотно спрощений, в результаті область застосування даної моделі значно скоротилася. Отримане в результаті досліджень значення критерію стійкості $K_w = 3,3$ задовільно узгоджується з верхньою границею процесу захлинання, визначеною у роботах [3, 4].

Аналітичне дослідження стійкості системи «плівка рідини – газовий потік» на основі класичної роботи [1] стосовно двофазних термосифонів розглянуто в [3].

Проведений аналіз гравітаційного руху плівки рідини середньої товщини δ_0 у вертикальному каналі круглого перетину радіусом R, по якому рухається вгору потік газу. Радіус каналу R значно більше середньої товщини плівки δ_0. В цьому випадку впливом кривизни каналу на гідродинаміку гравітаційно стікаючої плівки можна знехтувати. В результаті, для опису гідродинаміки даного процесу застосовується система, яка складається з диференціальних рівнянь руху і нерозривності для рідкої і газової фаз.

Складність розв'язку сформульованої математичної моделі у виді системи диференціальних рівнянь з відповідними граничними умовами полягає у тому, що функціональна залежність для границі розділу фаз невідома. Для рівняння поверхні розділу у виді хвильової функції, яка задовольняє умовам взаємодії рідини і газового потоку на границі фаз, необхідно визначити частоту хвиль. Припускається також, що дотична і нормальна складові напруження на поверхні плівки рідини зі сторони газу можуть бути виражені залежністю через відхилення поверхні розділу фаз від площини $\delta = \delta_0$, що відповідає поверхні плівки рідини, яка незбурена хвилями. При таких допущеннях розв'язок зводиться до розгляду руху плівки рідини при заданих граничних умовах на стінці каналу і на вільній поверхні. Аналізуючи експериментальні дослідження [1-3] з визначення характеристик хвильового руху гравітаційно стікаючих плівок рідини і враховуючи незначну товщину плівки, можна нехтувати інерційними членами диференціального рівняння руху. За прийнятих допущень, для опису руху плівки рідини маємо наступну систему рівнянь і відповідних граничних умов:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_p}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu_p \nabla^2 u_x - g, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_p}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu_p \nabla^2 u_y, \qquad (3)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}=0, \tag{4}$$

$$u_x\big|_{y=0}=u_y\big|_{y=0}=0; \tag{5}$$

$$\tau_p\big|_{y=y_i}=\tau_r\big|_{y=y_i}, \tag{6}$$

$$p^{п}_{p}\big|_{y=y_i}-p^{п}_{r}\big|_{y=y_i}=\sigma\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right). \tag{7}$$

Аналітичне розв'язання системи диференціальних рівнянь (2)-(5) при граничних умовах (6)-(7) можливо для одновимірного руху плівки і періодичних відхилень швидкостей і тиску внаслідок її хвильового руху.

На підставі аналізу результатів розв'язання системи (2)-(5) з урахуванням експериментальних значень параметрів хвиль, представлених в [1], зроблено припущення, що на практиці реалізуються граничні хвильові режими. Отримана з цієї умови залежність довжини хвилі від швидкості газу експериментально підтверджена в [4]. В результаті отримано, що у момент втрати стійкості хвильового руху плівки критична швидкість газу відповідає значенню критичної довжини хвилі:

$$w_{г\,кр}=\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\left(\frac{\sigma\cdot R}{2\cdot\rho_г}\right)^{0,5}, \tag{8}$$

або у безрозмірному виді

$$K=\pi\cdot Bo^{0,5}\frac{\delta}{\lambda_{кр}}. \tag{9}$$

Швидкість рідини u_0 на поверхні плівки може бути визначена на підставі рішення, отриманого в роботі [2] при $\delta = \delta_0$:

$$u_0=\frac{\tau_0}{\mu_p}\cdot\delta_0-\frac{\rho_p\cdot g-\psi}{2\cdot\mu_p}\delta_0^2. \tag{10}$$

Градієнт тиску вздовж газового потоку визначається через дотичну напругу τ_0 на поверхні плівки

$$\psi=\frac{4\cdot\tau_0}{d}, \tag{11}$$

де $d = 2\cdot(R - \delta_0)$ – переріз для проходу газу.

Аналіз результатів [1] показав, що стійкий хвильовий рух спостерігається лише в області малих значень безрозмірної товщини плівки коли кожному значенню безрозмірної товщини плівки відповідає два значення критичної довжини хвилі $\lambda_{кр}/\delta_0$: більше - відповідає початку появи хвиль на гладкій поверхні, а менше – малим довжинам хвиль і характеризує втрату стійкості хвильового руху при збільшенні швидкості газового потоку. В останньому випадку зростає амплітуда хвиль, що приводить до порушення стійкості течії і відриву крапель рідини з гребенів хвиль. Цей режим відповідає нижній границі процесу захлинання. Початок цього режиму характеризується різким збільшенням опору, що підтверджується роботами [5, 6]. Функціонально границі режиму захлинання можна представити у вигляді залежності критичної довжини хвилі від безрозмірної товщини плівки і безрозмірної дотичної напруги на границі «рідина – газ»

$$\frac{\lambda_{кр}}{\delta_0}=f\left(\frac{\tau_0}{\rho_p\cdot g\cdot\delta_0};\frac{\delta_0}{d}\right). \tag{12}$$

Як встановлено в результаті аналізу [3], порушення хвильової течії, досягнувши граничної товщини плівки рідини, характеризується постійним значенням відносної довжини хвилі. Таким чином, критерій стійкості хвильового руху визначається виразом (9) і може бути розрахований за допомогою співвідношення

$$K_w=\frac{\pi\cdot Bo^{0,5}}{\left[986\cdot\gamma^2\cdot\left(\frac{\delta_0}{\delta_л}\right)^2+0,962\cdot Bo\right]^{0,5}}. \tag{13}$$

Подальший розвиток кризових явищ, внаслідок збільшення швидкості газу і товщини плівки, супроводжується утворенням хвиль великої амплітуди, зривом крапель рідини з гребенів і зменшенням швидкості руху плівки рідини. Цей режим характеризується підвисанням плівки рідини. Внаслідок складного характеру течії, що супроводжується зникненням чіткої границі між рідкою і газоподібною фазами, на даний час аналітичне дослідження кількісної характеристики даного процесу не може бути виконане.

Використання методів пасивної інтенсифікації у вигляді поверхонь з капілярно-пористим покриттям в контактних апаратах істотно ускладнюють гідродинамічну картину взаємодії системи «поверхня – плівка рідини – газовий потік». Інтенсифікуючи процеси тепло- і масообміну, штучна шорсткість зменшує робочий діапазон контактних апаратів, шляхом зниження границі захлинання [7].

НТБОНАХТ

Дослідження гідродинаміки газорідинних потоків в каналах проведене в роботах [8, 9], зводилося до визначення нижньої границі захлинання, величина якої в основному залежала від конструктивних особливостей поверхонь теплообміну контактного апарату. Використання залежностей для визначення товщини плівки рідини на вертикальній гладкій поверхні, стосовно поверхонь з регулярною шорсткістю, або з капілярно-пористим покриттям не коректно і вимагає відповідного дослідження.

Таким чином, гідродинамічній кризі, яка пов'язана з досягненням граничної товщини плівки рідини, що обмежена початком крапельного виносу і характеризується мінімальним коефіцієнтом опору $\xi_{оп}$, відповідає вираз (13). Невідомий в цьому рівнянні коефіцієнт γ, на підставі експериментальних даних по дослідженню гідродинаміки двофазних кільцевих потоків в каналах з гладкими стінками [5] визначається як:

$$\gamma = \frac{\left(\pi^2 \cdot Bo - 0,962 \cdot Bo \cdot K_w^2\right)^{0,5}}{31,4 \cdot \left(\frac{\delta_o}{\delta}\right) \cdot K_w}. \qquad (14)$$

Результати експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження по визначенню товщини плівки на вертикальній стінці з капілярно-пористим покриттям залежно від густини зрошування дозволило виділити декілька характерних областей, границі яких визначалися не тільки взаємодією плівки і газу з урахуванням сил інерції і в'язкості, але і капілярними силами. Для ламінарного режиму течії плівки було виявлено чотири області (рис.1). Область I відповідала руху плівки при затопленому капілярно-пористому покритті. Слід зазначити, що характер зміни товщини плівки в I області ідентичний зміні при її течії по гладкій поверхні з урахуванням геометричних характеристик капілярно-пористого покриття. Область II характеризується практично автомодельністю товщини плівки від густини зрошування. Подальше зменшення густини зрошування приводить до стрибкоподібної зміни товщини плівки, що дозволяє виділити цей ефект в область III. В області IV спостерігається квазістабільний режим течії. Нижня границя області IV визначається початком процесу розриву плівки.

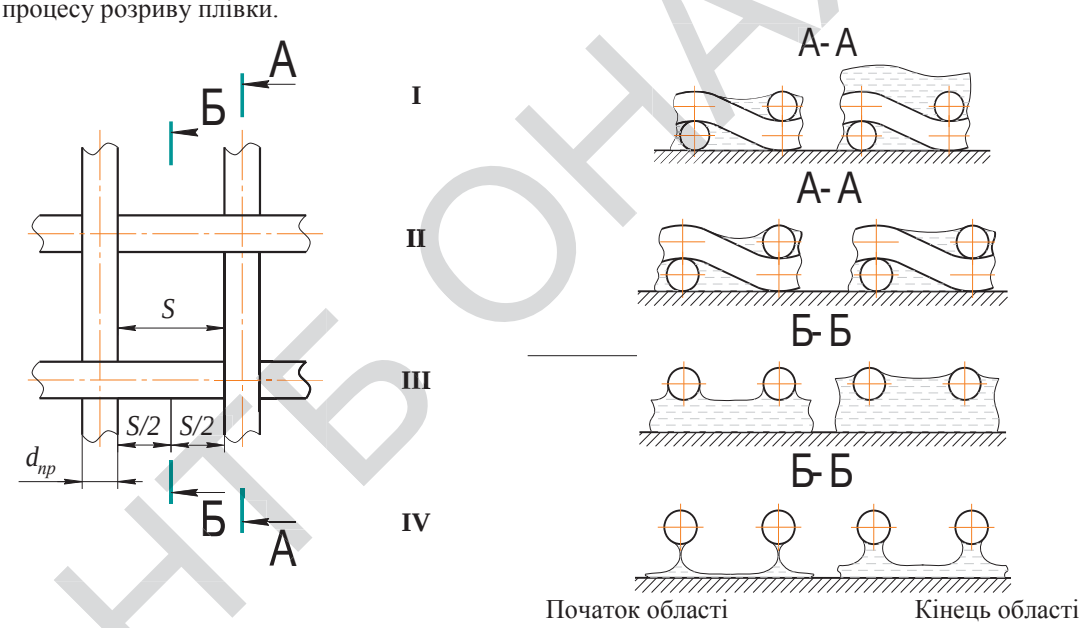


Рисунок 1. Характерні стадії гравітаційної течії рідини у вертикальних каналах із капілярно-пористим покриттям

Виконані дослідження показали, що при використанні капілярно-пористих матеріалів при певних густинах зрошення, коли товщина плівки не перевищує товщини капілярно-пористого покриття, граничне значення швидкості газового потоку збільшується у 2-3 рази [10]. З іншої сторони, враховуючи особливості експлуатації тепломасообмінних апаратів контактного типу достатньо складно досягти значень товщини плівки менше 10^{-4}м. На процес формування плівки впливають тип зрошувального пристрою і виникнення капілярних сил в структурі покриття. Вплив наведених факторів значно ускладнює гідродинаміку плівкової течії. Для капілярних сил в значній мірі залежить від теплофізичних властивостей рідини, крайового кута змочування, поверхневого натягу і геометрії капілярно-пористої структури. Були проведені дослідження по визначенню впливу геометричних характеристик покриття на інтенсивність процесів тепломасообміну двофазних газорідинних систем в каналах з капілярно-пористою структурою.

Геометричні характеристики покриття теплообмінної поверхні, суттєво впливають на адгезійну взаємодію поверхні контакту і плівки робочої рідини, а отже і на інтенсивність процесів тепломасообміну в контактному апараті. Результати дослідження впливу на інтенсивність випаровування плівки робочої рідини геометричних характеристик капілярно-пористого покриття, а саме розміру чарунки, при швидкості газового потоку 10 м/с

НТБ ОНАХТ

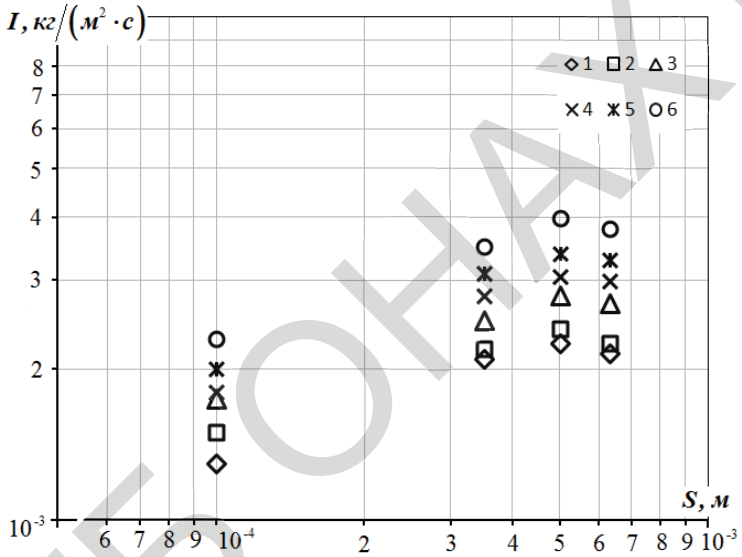
представлено на рис.2. Аналіз представлених результатів показує, що у діапазоні температур, в якому проводились дослідження, інтенсивність випаровування рідини *I* зростає при збільшені розміру чарунки S від 10^{-4}м до $5\cdot10^{-4}$м. При збільшенні розміру чарунки від $5\cdot10^{-4}$м до $6{,}3\cdot10^{-4}$м інтенсивність випаровування рідини дещо знижується, в наслідок того, що роботи сил адгезії не вистачає на утримання тонких плівок довгий час у великих чарунках до їх повного випаровування. Зростання інтенсивності випаровування здійснюється також за рахунок турбулізації плівки рідини.

Враховуючи експериментальні дані по дослідженню гідродинаміки плівки рідини на вертикальній поверхні з капілярно-пористим покриттям [10], при визначенні коефіцієнта γ, згідно (14), необхідно замість δ_o для області I використовувати

$$\delta' = \delta_o - \delta_3 . \qquad (15)$$

Отриманий результат добре узгоджується з результатами, наведеними у [3].

Таким чином, аналітичне рішення задачі з визначення границь кризових явищ, отримане в [3], з урахуванням результатів експериментального дослідження гідродинаміки двофазного потоку в каналах з капілярно-пористим покриттям, при відповідних граничних умовах, дозволяє визначати верхній діапазон навантажень до початку захлинання по рідкій і газовій фазах в контактних тепломасообмінних апаратах. При цьому, початок процесу захлинання наступає при значно більшій товщині плівки, що є істотною позитивною характеристикою.



Температура газового потоку на вході у робочу камеру: **1** – 42°С; **2** – 55 °С; **3** – 77 °С; **4** – 96 °С; **5** – 115 °С; **6** – 152 °С

Рисунок 2. Інтенсивність випаровування рідини з капілярно-пористого покриття в залежності від геометричних параметрів

Висновки.

1. Наявність капілярно-пористого покриття на поверхні каналів, яке за певних умов, приводить до інтенсифікації хвильових процесів в плівці і, тим самим, зниженню нижньої границі початку процесу захлинання.
2. Аналіз результатів дослідження процесів формування плівки на капілярно-пористій поверхні дозволив визначити геометричні характеристики покриття, які забезпечують високу інтенсивність процесів тепломасообміну в контактному апараті.
3. Аналітичний розв'язок задачі по визначенню границь кризових явищ, отримане в [3], було уточнено з використанням результатів експериментального дослідження гідродинаміки двофазного потоку в каналах з капілярно-пористим покриттям. Дослідження показали, що початок процесу захлинання наступає при значно більший товщині плівки, що є істотним позитивним моментом при експлуатації контактних тепломасообмінних апаратів.

Література.

1. Семёнов П.А. Течение жидкости в тонких слоях (II). Журнал теоретической физики. 1950. Т. 20., вып. 8. С. 980-990.
2. Капица П.Л. Волновое течения тонких слоёв вязкой жидкости. Журнал экспериментальной теплофизики. 1948. Т. 18, вып.1. С. 3-28.
3. Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Київ: Факт, 2003. 480 с.

НТБОНАХТ

4. Сорокин Ю.Л., Кирдяшкин А.Г., Покусаев Б.Г. Исследование устойчивости плёночного режима течения жидкости в вертикальной трубе при восходящем движении газа. Журнал химическое и нефтяное машиностроение. 1965. № 5. С. 35-38.
5. Безродный М.К., Алабовский А.Н., Волков С.С. Исследование гидродинамических характеристик двухфазного потока в условиях замкнутого термосифона. Известия вузов СССР. Серия Энергетика. 1980. № 7. С. 116-121.
6. Безродный М.К. О режиме захлёбывания в противоточном течении плёнки жидкости и потока газа в вертикальных трубах. Журнал химическое и нефтяное машиностроение. 1980. № 5. С. 30-32.
7. Кириллов В.Х. Гідродинаміка та тепломасообмін в двофазних потоках плівкових апаратів для холодильної техніки: автореф. дис. … докт. техн. наук: 05.04.03. Одеса, 2002, 48
8. Николаев Н.А., Харин В.Ф. Гидродинамические закономерности плёночного течения жидкости на шероховатой поверхности. Известия вузов СССР. Серия Теоретические основы химических технологий. 1974. Т. 8, № 5. С. 712.
9. Холпанов Л.П. Гидродинамика и массообмен в активных гидродинамических режимах. Журнал химическое и нефтяное машиностроение. 1997. № 2. С. 1-7.
10. В.О. Туз, Н.Л. Лебедь. Гідродинаміка і тепломасообмін газорідинних потоків на капілярно-пористих структурах: монографія. Харьков: ФОП Бровін О.В. 2018. 220с.

УДК 542.61

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСТРАКЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ПРОДУКТОВ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИМЕТИЛСУЛЬФОКСИДА

Челтонов[a] М.М. аспирант, Опарин[b] С.А. к.т.н., Матросов[b] А.С. к.т.н., Кириченко[a] А.Л. к.т.н.
[a]Государственное предприятие «Научно-производственное объединение «Павлоградский химический завод», г. Павлоград, Украина; [b]ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр, Украина

TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE EXTRACTION OF HIGH-ENERGY COMPONENTS FROM THE PRODUCTS OF SOLID PROPELLANT UTILIZATION USING DIMETHYL SULFOXIDE

M.M. Cheltonov[a] postgraduate student, S.A. Oparin[b] Candidate of Engineering Sciences, A.S. Matrosov[b] Candidate of Engineering Sciences, A.L. Kirichenko[a] Candidate of Engineering Sciences [a]State Enterprise Research-Industrial Complex "Pavlograd Chemical Plant", Pavlograd, Ukraine; [b]Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepr, Ukraine

Аннотация. В процессе утилизации твёрдого ракетного топлива (ТРТ) из снаряжённых корпусов двигателей (СКД) МБР РС-22 образуется полимерная крошка с размерами фрагментов от 7х4х2 мм до 15х4х2 мм, которая нашла применение в качестве энергетической добавки в составе эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ). В состав полимерной крошки входит: связующее, окислитель (перхлорат аммония), энергетические добавки (нитрамин, в частности - циклотетраметилентетранитрамин, алюминий) и технологические добавки. Одним из более рациональных способов использования полимерной крошки является извлечение ценных высокоэнергетических компонентов – перхлората аммония, нитрамина. Для извлечение нитрамина из полимерной крошки ТРТ, из которой предварительно удалён перхлорат аммония, возможно применять селективный органический растворитель — диметилсульфоксида (ДМСО). Из полученной полимерной крошки ТРТ нитрамин экстрагировался ДМСО с последующим отделением экстракта от рафинированной полимерной крошки и высаждением нитрамина путём введения в раствор экстракта разбавителя, нерастворяющего нитрамин - воды. Целью работы является установление закономерностей процесса экстракции и определение параметров извлечения нитрамина из продуктов утилизации твердого ракетного топлива — полимерной крошки с помощью ДМСО. В результате проведённых исследований установлены зависимости влияния температуры, частоты вращения механической мешалки, времени процесса на степень извлечения нитрамина из полимерной крошки ТРТ диметилсульфоксидом. Получены кинетические константы и кинетическое уравнение, описывающее процесс извлечения нитрамина из полимерной крошки ТРТ с применением ДМСО. В отработанном водном растворе ДМСО присутствует побочный продукт сильный окислитель - перхлорат аммония, что нежелательно в процессе нагревания и регенерации ДМСО. Из отработанного водного раствора ДМСО перхлорат аммония удалён переводом его в труднорастворимую соль $KClO_4$, которую возможно применять качестве окислителя и промышленных взрывчатых веществах.

ЗМІСТ

ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

ВИРІШЕННЯ ЕНЕРГО-ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ КРУП'ЯНОГО ВИРОБНИЦТВА
Хоренжий Н.В., Лапінська А.П...... 5
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГАЗАЦИИ ЖИДКОСТИ В КАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЯХ. ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
Иваницкий Г.К., Целень Б.Я., Недбайло А.Е., Коник А.В...... 11
ІНОВАЦІЙНІ СПОСОБИ ЕНЕРГОПІДВОДУ У ПРОЦЕСАХ СУШІННЯ ТЕРМОЛАБІЛЬНОЇ СИРОВИНИ
Яровий І.І., Кашкано М.А., Маренченко О. І., Пилипенко Є.О...... 17
МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ШВИДКОСТЕЙ ТЕПЛОНОСІЇВ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ КАНАЛІ КОНТАКТНОГО АПАРАТУ
Кузьменко І.М...... 24
МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ ПРИ КОНВЕКТИВНОМУ СУШІННІ М'ЯСНИХ ВИРОБІВ
Ощипок І. М...... 29
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ШВИДКІСНОГО ТРАМВАЮ М. КРИВИЙ РІГ
Кухта О.О...... 33
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ В ПРОЦЕСІ ЖАРІННЯ ОЛІЙНОЇ СИРОВИНИ
Сорокова Н.М., Дідур В.В...... 37
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМЕННЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕД
Холявченко Л.Т., Опарин С.А., Давыдов С.Л...... 42
ПРОБЛЕМИ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ УКРАЇНИ
Бундюк А.М., Подпалова Ю.В., Коваленко А.К...... 46
ENERGY POLICY OPPORTUNITIES. HOW TO FACE CHALLENGES
Bezhan V., Zhytarenko V., Ostapenko O., Yakovleva O. 48

ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ХІМІЧНИХ І ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СУППОЗИТОРИЕВ
Шматок А.И., Степанова О.Е., Сильнягина Н.Б...... 54
ТЕРМІЧНЕ РОЗКЛАДАННЯ ГРАНУЛЬОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ В УМОВАХ ЗМІННОЇ ГАЗОВОЇ АТМОСФЕРИ
Корінчевська Т.В., Михайлик В.А., Корінчук Д.М...... 59
АКТИВАТОРИ ПРОЦЕСУ ПОГЛИНАННЯ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ХЛОРОФІЛСИНТЕЗУЮЧИМИ МІКРОВОДОРОСТЯМИ
Дячок В.В., Мандрик С.Т., Гуглич С.І...... 64
РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНОГО ТЕПЛОМАСООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Грабова Т. Л., Шматок О.І., Сильнягіна Н.Б...... 70
ДОСЛІДЖЕННЯ КАВІТАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ В НАСОСАХ РІЗНИХ ТИПІВ
Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А., Жукотський Е.К...... 77
ВИНИКНЕННЯ КАВІТАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ ПІД ЧАС РОБОТИ НАСОСІВ РІЗНОГО ТИПУ
Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А., Жукотський Е.К...... 80
ГІДРОДИНАМІКА ГАЗОРІДИННИХ ПОТОКІВ НА КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ СТРУКТУРАХ
Туз В.О., Лебедь Н.Л., Трокоз Я.Є...... 85
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСТРАКЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ПРОДУКТОВ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИМЕТИЛСУЛЬФОКСИДА
Челтонов М.М., Опарин С.А., Матросов А.С., Кириченко А.Л...... 91
МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЛЛЕТ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ
Бунецкий В.А., Бурдо О.Г., Зыков А.В., Войтенко А.К., Безбах И.В., Кашкарев А.А...... 94
ARTIFICIAL MICRO RNA (AMIRNA): A POTENT TOOL FOR GENE SILENCING IN PLANT

НТБ ОНАХТ