

INFLUENCE OF PHYSICAL PROPERTIES OF LIQUID ON OPERATION OF LIQUID-GAS EJECTORS

V. Ponomarenko, N. Pushanko, A. Slyusenko, O. Yeschenko

National University of Food Technologies

Key words:

Ejector
Liquid
Physical properties
Coefficient of ejection
Dilution

Article history:

Received 06.03.2019
Received in revised form
20.03.2019
Accepted 04.05.2019

Corresponding author:

V. Ponomarenko

E-mail:

vponomarenkov@ukr.net

ABSTRACT

In classical jet devices, the jet nozzle with a compact liquid jet is mainly used as an active nozzle, and the interaction of the phases in the receiving chamber occurs only on the outside of the spray cone, followed by leveling the characteristics in the mixing chamber.

While jet devices are used to carry out heat exchange processes, which is typical for the food industry, it is more advisable to use an active nozzle in the form of a centrifugal-jet nozzle with a dispersed stream of liquid. Due to the appearance of longitudinal and transverse waves, the jet of liquid disintegrates into drops at an insignificant distance from the nozzle. The contact surface of the phases increases significantly and mass transfer processes are accelerated in many times. Taking into consideration the fact that during this period there are cavitation phenomena, the final effects, the formation of the surface of the drops and its reformatting during a collision, then the work of the ejectors is extremely effective while carrying out technological processes in them.

Based on the assessment of the knowledge level about processes and physical phenomena occurring in jet devices, in order to create equipment with high performance characteristics, the study examines the influence of only two factors on the operation of ejectors: the type of active nozzle and the physical properties of the dispersed liquid.

To establish the features of the hydrodynamics of the emulsion in the mixing chamber of jet devices, a hydraulic stand was created, on which an ejector with transparent mixing chambers with diameters of 8, 15, 19, 27, 45 mm and a jet and centrifugal jet nozzle as a working nozzle with nozzle diameters of 4, 6, 8 mm, was investigated. The dependence of the ejection coefficient on the type of nebulizer and pressure was established. The operation of a liquid-gas ejector with a dispersed stream of liquid was studied on model sugar and starch solutions with a concentration of 12%, 16.6%, and the influence of the physical properties of the liquid on the operation of the ejector was established.

While low pressures of fluid supply to the nozzle (up to 0.25 MPa), the ejection coefficient depends on the properties of the liquid: an increase in the solutions concentration leads to a decrease in ejection ability. While increasing pressure, under which the liquid is sprayed, the influence of its physical properties on the work of the ejector disappears.

DOI: 10.24263/2225-2924-2019-25-2-14

ВПЛИВ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РІДИН НА РОБОТУ РІДИННО-ГАЗОВИХ ЕЖЕКТОРІВ

В.В. Пономаренко, М.М. Пушанко, А.М. Слюсенко, О.А. Єщенко
Національний університет харчових технологій

У класичних струминних апаратах як активне сопло в основному використовується струминна форсунка з компактним струменем рідини, а взаємодія фаз у приймальній камері відбувається лише із зовнішньою поверхнею факела розпилення з подальшим вирівнюванням характеристик у камері змішування.

При використанні струминних апаратів для здійснення тепломасообмінних процесів, що характерно для харчової промисловості, більш доцільно використовувати активне сопло у вигляді відцентрово-струминної форсунки з диспергованим струменем рідини. Внаслідок появи поздовжніх і поперечних хвиль струмів рідини розпадається на краплі на незначній відстані від сопла. Поверхня контакту фаз значно збільшується і процеси масопередачі прискорюються багатократно. З урахуванням того, що в цей період мають місце кавітаційні явища, кінцеві ефекти, формування поверхні крапель та її переформатування при співдарах, то робота ежекторів вкрай ефективна при проведенні в них технологічних процесів.

Виходячи з оцінки рівня знань процесів і фізичних явищ, що відбуваються в струминних апаратах, з метою створення обладнання з високими експлуатаційними характеристиками в дослідженні розглядається вплив лише двох факторів на роботу ежекторів: тип активного сопла і фізичні властивості рідини, що диспергується.

Для встановлення особливостей гідродинаміки емульсії в камері змішування струминних апаратів був створений гідравлічний стенд, на якому досліджувався ежектор з прозорими камерами змішування діаметрами 8, 15, 19, 27, 45 мм та струминною і відцентрово-струминною форсункою як робочого сопла з діаметрами сопел 4, 6, 8 мм. Встановлено залежність коефіцієнта ежекції від типу розпилювача й тиску. Досліджено роботу рідинно-газового ежектора з диспергованим струменем рідини на модельних цукрових і крохмальних розчинах концентрацією 12%, 16,6% та встановлено вплив фізичних властивостей рідини на роботу ежектора.

При малих тисках подачі рідини на сопло форсунки (до 0,25 МПа) коефіцієнт ежекції залежить від властивостей рідини: збільшення концентрації розчинів приводить до зниження ежектуючої здатності. При збільшенні тиску, під яким відбувається розпилення рідини, вплив її фізичних властивостей на роботу ежектора зникає.

Ключові слова: ежектор, рідина, фізичні властивості, коефіцієнт ежекції, розрідження.

Постановка проблеми. В харчовій промисловості ежектори використовуються для здійснення різноманітних технологічних процесів: для насичення напоїв діоксидом вуглецю, пастеризації та стерилізації харчових про-

дуктів, у випарних і холодильних установках, для перемішування середовищ, аерації при бродінні, для сульфитації та сатурації в цукровій промисловості, для очищення запиленого повітря тощо [1—4]. В усіх працях відмічається висока швидкість та ефективність перебігу процесів.

Ефективна робота ежекторів відбувається у вузькому діапазоні співвідношення розмірів елементів струминного апарата (основною характеристикою ежектора є головна геометрична характеристика: відношення площі камери змішування до площі сопла) [5; 6]. Визначення цієї характеристики є одним з основних завдань їх проектування. Неодноразово порушувалось питання вибору типу сопла для ежектора [6—9], при якому його робота найбільш енергоефективна, та єдиної методики його вибору немає через неоднозначність отриманих результатів.

При розрахунку та проектуванні струминних апаратів використовуються як теоретичні, так і експериментальні дані. В лабораторних умовах, зазвичай, досліджується робота ежекторів на модельних середовищах вода-повітря. Однак, фізичні властивості рідин і газів у цих процесах значно відрізняються від фізичних властивостей середовищ, при яких були проведені дослідження. Чи можливо переносити результати таких досліджень при проектуванні ежекторів для їх роботи у виробничих умовах?

Відомий вплив фізичних властивостей рідин при їх розпиленні форсунками різних конструкцій на середній діаметр крапель рідини. Однак питання впливу на роботу ежектора потребує додаткових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними елементами струминних апаратів є приймальна камера з вхідним колектором, робоче сопло, горловина (камера змішування), дифузор. Оскільки струминний апарат надзвичайно простий за конструкцією, то значення кожного його елемента, взаємне положення, співвідношення розмірів відіграють важливу роль при роботі. В класичних струминних апаратах (КСА) як активне сопло в основному використовується струминна форсунка з компактным струменем рідини. У випадку суміщення в струминному апараті функцій транспортування газової фази з проведенням масообмінних процесів, що характерно для обладнання харчової промисловості, більш доцільно використовувати активне сопло у вигляді відцентрово-струминної форсунки з диспергованим струменем рідини. Це пояснюється тим, що в цьому випадку на незначній відстані від сопла внаслідок появи поздовжніх і поперечних хвиль струмів рідини розпадається на краплі. Поверхня контакту фаз значно збільшується і процеси масопередачі прискорюються багатократно. З урахуванням того, що в цей період мають місце кавітаційні явища, кінцеві ефекти, формування поверхні крапель та її переформатування при співударах, зрозуміло, що робота ежекторів вкрай ефективна при проведенні в них тепломасообмінних процесів харчових технологій. Ці дані підтверджені експериментальними дослідженнями [3; 5; 10].

У сучасних гідравлічних форсунках значна частина енергії йде на прискорення руху крапель і втрачається при їх в'язкій деформації. Подрібнення рідини на краплі обумовлено втратою стійкості течії струменя і плівок внаслідок утворення на їх поверхні нестійких хвиль [11; 12]. При розпиленні

рідин малої в'язкості утворюється плівка з турбулентними поздовжніми та поперечними хвилями, відбувається швидкий розпад струменів. При збільшенні в'язкості рідини, що розпиляється, поперечні хвилі зменшуються та зникають, турбулентність затухає і плівка рідини розпадається на більший відстані від сопла форсунки. Різні фізичні властивості рідини (в'язкість, поверхневий натяг) по різному впливають на розмір крапель.

Крім фізичних властивостей рідини на розмір крапель і кут розпилення, впливає тиск, під яким відбувається її розпилення [13; 14].

В аналітичній формі функціональна залежність між критеріями, що характеризують середній діаметр краплі, записується у вигляді [11]:

$$\frac{d}{d_0} = f\left(\frac{\mu_p^2}{\rho_p \sigma d_0}, \frac{\rho_r v^2 d_0}{\sigma}\right), \quad (1)$$

де d — середній діаметр крапель, м; d_0 — діаметр струменя, м; μ — динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с; ρ — густина, кг/м³; σ — поверхневий натяг, Н/м; v — швидкість, м/с; (індекси: р — рідина, г — газ).

Критерій $\mu_p^2 / \rho_p \sigma d_0$ характеризує співвідношення сил в'язкості, інерційних сил і поверхневого натягу. Критерій $\rho_r v^2 d_0 / \sigma$ показує відношення інерційних сил повітряного потоку до сил поверхневого натягу, тобто враховує взаємодію струменів із зовнішнім середовищем: розмір крапель, що отримують при розпиленні рідини зменшується в міру збільшення цього критерію.

Фізичні властивості рідини впливають на дисперсність розпилення таким чином:

- в'язкість здебільшого погіршує дисперсність розпилення (ступінь впливу в'язкості на середній діаметр краплі в межах $d \sim \mu_p^{0,2 \dots 0,5}$);

- поверхневий натяг мало впливає на ступінь дисперсності ($d \sim \sigma^{0,1 \dots 0,2}$).

Якщо вплив фізичних властивостей на дисперсність розпилення рідини з форсунок досліджувався, то чи впливає це на роботу ежекторів, даних досить мало [15; 16].

Мета дослідження: встановити залежність коефіцієнта ежекції від типу активного сопла та фізичних властивостей робочої рідини, що диспергується.

Матеріали і методи. Для встановлення залежності коефіцієнта ежекції струминного апарата від типу активного сопла та фізичних властивостей рідини, що диспергується, на кафедрі технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування НУХТ був створений гідравлічний стенд (рис. 1). Досліджено роботу ежектора із струминною (рис. 2) та відцентрово-струминною форсунками (рис. 3).

Витрата рідини вимірювалась ротаційним витратоміром типу КВ-1,5, клас точності 1,5. Тиск рідини на форсунці контролювався манометром ОБМ1-160, кл. точності 1,5. Витрата газу вимірювалась лічильником PREMA G 1,6 об'ємного типу. Розрідження в камері змішування фіксувалось диференційним манометром у мм. вод. ст. Фотозйомку течії рідини в камері змішування здійснювали цифровою фотокамерою Canon SX130.

Досліджувався ежектор з прозорими камерами змішування діаметрами 8, 15, 19, 27, 45 мм та струминною і відцентрово-струминною форсункою як робочого сопла з діаметрами сопел 4, 6, 8 мм.

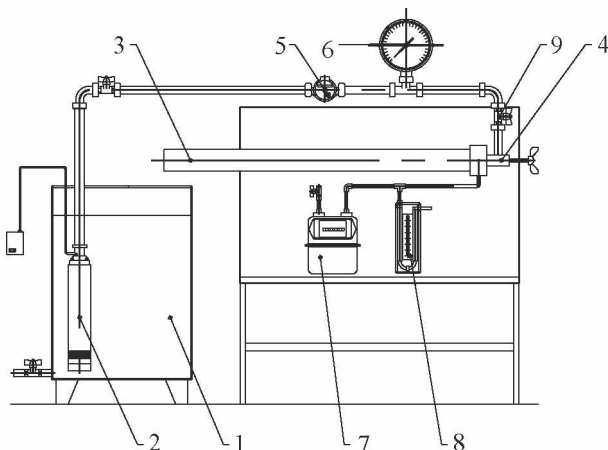


Рис. 1. Експериментальна установка: 1 — мірна ємність; 2 — насос; 3 — камера змішування ежектора; 4 — форсунка; 5 — витратомір рідини; 6 — манометр; 7 — витратомір газу; 8 — дифманометр; 9 — регулювальні крани

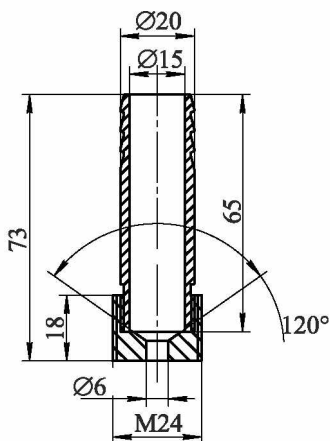


Рис. 2. Струминна форсунка

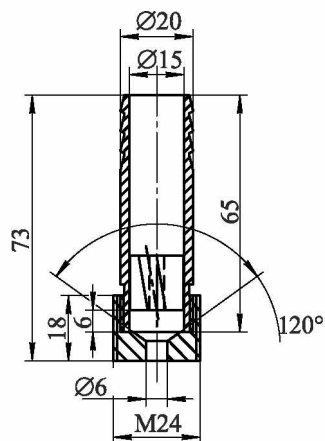


Рис. 3. Відцентрово-струминна форсунка

Викладення основних результатів дослідження. Проведені дослідження ежекторів виявили значну відмінність їх роботи залежно від типу форсунок, що використовуються як робоче сопло. На рис. 4 показана залежність об'ємного коефіцієнта ежекції від тиску подачі рідини на сопло форсунки для системи вода-повітря при різних типах розпилювачів для ежектора з $d_c = 4$ мм та $D_{кз} = 19$ мм. Для цього дослідження приймемо визначення геометричної характеристики ежектора m' як відношення діаметрів камери змішування до діаметра сопла форсунки ($m' = D_{кз} / d_c = 4,75$).

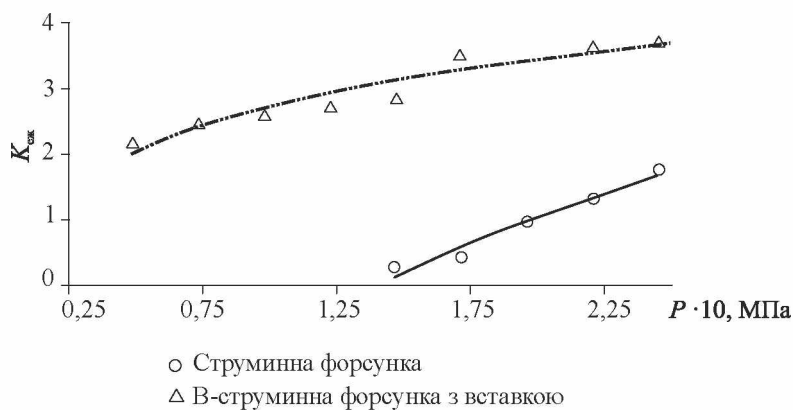


Рис. 4. Залежність об'ємного коефіцієнта ежекції від типу форсунок і тиску рідини для ежектора з $d_c = 4$ мм та $D_{кз} = 19$ мм ($m' = 4,75$)

Як випливає з приведеного графіка, для ежектора з геометричною характеристикою 4,75, при використанні як активного сопла струминної форсунки, коефіцієнт ежекції в усьому діапазоні досліджених тисків нижчий за аналогічний показник для ежектора з відцентрово-струминною форсункою. Наприклад, при тиску рідини $P = 0,25$ МПа коефіцієнт ежекції для апарата з струминною форсункою досягає числового значення 1,6, що в 2,3 раза менше, ніж для ежектора з відцентрово-струминною форсункою (3,7).

Проведені дослідження показують, що ежекційна здатність струминних апаратів з активним соплом як відцентрово-струминною форсункою, тобто з диспергованим струменем рідини, перевищує показники роботи ежекторів з струминною форсункою. В першому випадку струмінь рідини розпадається на краплі рідини на невеликій відстані від сопла форсунки, дисперсність їх діаметрів у межах 12% [17; 18], краплі рідини своєю поверхнею беруть участь в ежекції газової фази. У випадку використання як активного сопла струминної форсунки ежекція повітря досягається за рахунок тертя факела рідини лише зовнішньою стороною. Дані свідчать про залежність коефіцієнта ежекції від поверхні контакту фаз, що утворюється при розпиленні рідини форсунками, тобто від кількості і діаметра крапель, та доводять ефективність роботи ежекторів з диспергованим струменем рідини.

Для встановлення особливостей та закономірностей роботи ежекторів з диспергованим струменем від фізичних властивостей рідини були проведені додаткові дослідження роботи ежектора на системах вода–повітря та модельних цукрових розчинах з концентрацією цукру 12%, 16,6% і крохмальних розчинах такої ж концентрації. Такі розчини зустрічаються при використанні ежекторів як першого ступеня сатураторів, приготуванні крохмальних розчинів, промивки крохмальних зерен тощо. Проаналізуємо вплив зміни фізичних властивостей рідини на роботу ежектора в цілому.

Дослідження роботи ежектора в діапазоні тисків 0,05...0,25 МПа на воді, цукрових і крохмальних розчинах проводились при кімнатній температурі 18...23°C, ежектуюче повітря було при тій же температурі та вологості 70...85%.

Встановлено, що зі збільшенням тиску подачі рідини на робоче сопло ежектора відбувається збільшення коефіцієнта ежекції (рис. 5) для води та цукрових розчинів. Збільшення концентрації цукрози зменшує коефіцієнт ежекції, а при тиску подачі рідини на сопло форсунки ежектора більше 0,25 МПа коефіцієнт ежекції не залежить від концентрації цукрози в рідині.

Пояснити таку роботу ежектора можна тим, що при малих тисках подачі рідини на сопло форсунки, тобто при малих швидкостях витоку рідини з сопла форсунки, вона розпилюється на краплі різного діаметра. Краплі рідини з більшою концентрацією цукрози розпилюються на краплини правильної форми, чому сприяє більш висока в'язкість і поверхневий натяг. Зі збільшенням тиску подачі рідини на сопло форсунки більш ніж 0,25 МПа, збільшується швидкість витікання рідини із сопла форсунки (збільшується критерій We), досягається критичний режим розпилення, при якому діаметри крапель приймають правильну кулясту форму рівновеликого діаметра.

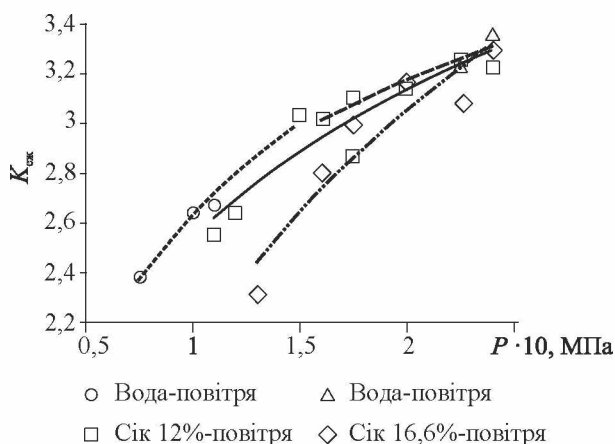


Рис. 5. Залежність коефіцієнта ежекції від тиску рідини для цукрових розчинів

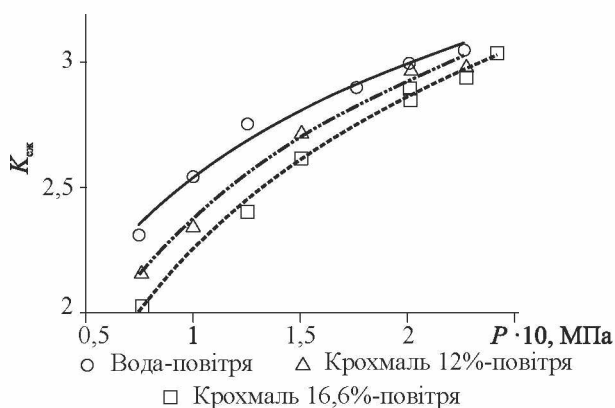


Рис. 6. Залежність коефіцієнта ежекції від тиску рідини для крохмальних розчинів

Результати роботи ежектора на модельних крохмальних розчинах концентрацією 12%, 16,6% представлені на рис. 6. Збільшення концентрації крохма-

лю в розчині сприяє розпиленню рідини на краплі правильної кулястої форми завдяки більшій в'язкості та поверхневому натягу розчину. Така форма крапель зменшує коефіцієнт ежекції. Проведені дослідження на цукрових і крохмальних розчинах ще раз підтверджують, що форма крапель, їх розмір впливають на роботу ежектора.

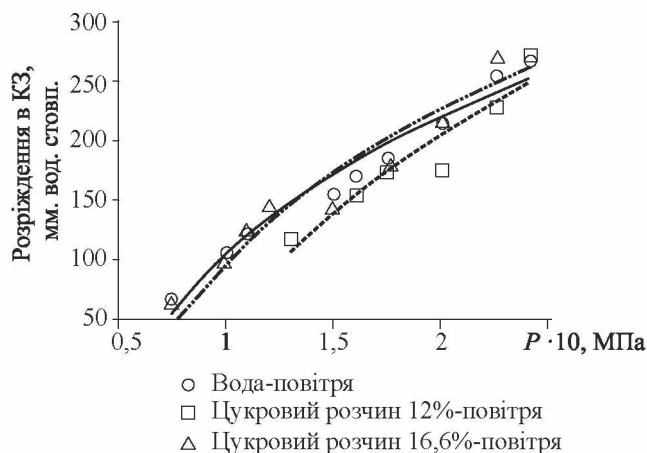


Рис. 7. Залежність розрідження від тиску цукрового розчину на соплі відцентрово-струминної форсунки

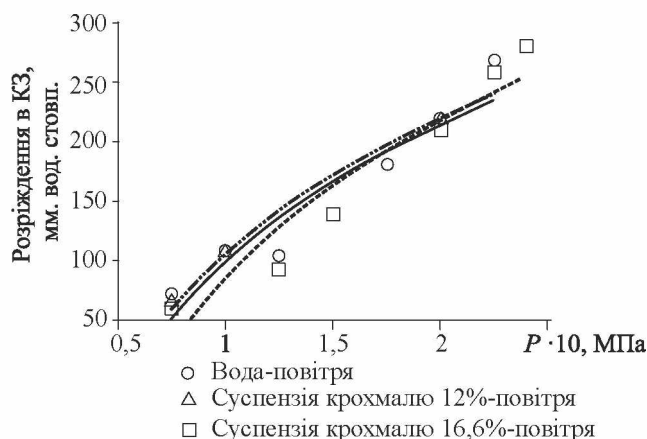


Рис. 8. Залежність розрідження від тиску крохмальної суспензії на соплі відцентрово-струминної форсунки

При роботі ежектора не менш важливим показником є розрідження, яке створюється в приймальній камері. Від його величини залежить ежектуюча здатність струминного апарата та опір, який може подолати газова фаза. Залежність розрідження в приймальній камері ежектора від тиску рідини на робочому соплі форсунки при роботі на воді та цукрових розчинах різної концентрації представлена на рис. 7. На рис. 8 показана аналогічна залежність при роботі ежектора на крохмальній суспензії. В обох випадках при збіль-

шенні тиску рідини на соплі форсунки до 0,25 МПа відбувається збільшення коефіцієнта ежекції. В подальшому розрідження монотонно збільшується та не залежить від концентрації цукрози та крохмалю. Приведена експериментальна залежність також може бути пояснена формуванням крапель одного розміру при збільшенні швидкості витікання рідини з сопла форсунки та досягненням критичного режиму розпилення, при якому отримують краплі рівновеликого розміру.

Висновки

Порівняльні дослідження роботи струминних апаратів з компактным та диспергованим струменем рідини показали, що ежекційна здатність апаратів залежить від типу форсунки, що використовується як активне сопло. Коефіцієнт ежекції струминного апарата з диспергованим струменем рідини (відцентрово-струминною форсункою) значно перевищує аналогічний показник (в 2,3 раза при тиску рідини 0,25 МПа) для ежектора з струминною форсункою і збільшується при збільшенні тиску.

Робота ежекторів залежить від фізичних властивостей рідини, що використовується як активний потік. При низьких тисках подачі рідини на робоче сопло ежектора коефіцієнт ежекції залежить від концентрації цукрози та крохмалю, причому зі збільшенням концентрацій $K_{еж}$ зменшується. При перевищенні тиску розпилення рідини 0,25 МПа, досягається критичний режим розпилення, що характеризується рівновеликим діаметром крапель в усіх випадках, коефіцієнт ежекції не залежить від концентрації компонентів, а залежить лише від тиску рідини (швидкості витікання з сопла форсунки).

Подальші дослідження будуть направлені на виявлення особливостей течії водо-газової емульсії в камері змішування ежекторів при різних просторових положеннях.

Література

1. Соколенко А.І. Інтенсифікація тепло-масообмінних процесів в харчових технологіях: Монографія / під ред. д-ра техн. наук Соколенко А.І. Київ. 2011. 536 с.
2. Subrata K.M. Hydrodynamics and Transport Processes of Inverse Bubbly Flow. Departament of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology Guwahati, Assam, India. 2016. 446 p.
3. Billerbeck G.M., Condoret J.S., Fonade C. Study of mass transfer in a novel gas-liquid contactor: the aero-ejector. *Original Research Article Chemical Engineering Journal*. 1999. Vol. 72. P. 185—193.
4. Ponomarenko V., Pushanko N. Ejection devices in mass transfer processes of sugar industry. *LAP LAMBERT Academic Publishing ist ein Imprint der / is a trademark of OmnisScriptum GmbH & Co. KG Saarbrücken*. 2014. P. 48. ISBN: 978-3-659-47763-8.
5. Cramers A.A.C.M., Beenackers P.H.M.R. Influence of the ejector configuration, scale and the gas density on the mass transfer characteristics of gas—liquid ejectors. *Chemical Engineering Journal*. 2001. Vol. 82. P. 131—141.
6. Kandakure M.T., Gaikar V.G., Patwardhan A.W. Hydrodynamic aspects of ejectors. *Chemical Engineering Science*. 2005. Vol. 60. P. 6391—6402.
7. Rudolf von Rohr P., Trepp C. Experimental investigation of an ejector. *Original Research Article Cryogenics*. 1985. Vol. 25, Issue 12. P. 684—686.

8. Yang X., Long X., Yao X. Numerical investigation on the mixing process in a steam ejector with different nozzle structures. *Original Research Article International Journal of Thermal Sciences*. 2012. Vol. 56. P. 95—106.
9. Спиридонов Е.К. Испытание водовоздушного струйного насоса ЮУрГУ в системах вакуумирования паровых турбин. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2005. вып. 6(1). С. 120—125.
10. Balamurugan S., Mayank D. Lad, Vilas G. Gaikar, Ashwin W. Patwardhan. Hydrodynamics and mass transfer characteristics of gas—liquid ejectors. *Original Research Article Chemical Engineering Journal*. 2007. Vol. 131, Issues 1—3. P. 83—103.
11. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. Москва: Химия, 1984. 250с.
12. Dos Santos F., Le Moyne L. Spray Atomization Models in Engine Applications, from Correlations to Direct Numerical Simulations. *Article in Oil & Gas Science and Technology*. 2011. Vol. 66, Issue 5. P. 801—822.
13. Manish Jaina, Benny Johnb, Iyera K.N., Prabhu S.V. Characterization of the full cone pressure swirl spray nozzles for the nuclear reactor containment spray system. *Nuclear Engineering and Design*. 2014. Vol. 273. P. 131—142.
14. Ponomarenko V., Pushanko N. Sprays fluid: an effective way to intensify the processes in the food industry. *LAP LAMBERT Academic Publishing ist ein Imprint der / is a trademark of OmnisScriptum GmbH & Co. KG Saarbrücken*. 2015. P. 121. ISBN: 978-3-659-70944-9.
15. Аркадов Ю.К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. Москва: Издательство физико-математической литературы, 2001. 336 с.
16. Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 408 с.
17. Симаков Н.Н. Кризис сопротивления капель при переходных числах Рейнольдса в турбулентном двухфазном потоке факела распыла механической форсунки. *Журнал технической физики*. 2004. Т. 74, № 2. С. 46—51.
18. Симаков Н.Н. Расчет сопротивления и теплоотдачи пара обтекающему газу в цилиндрическом канале. *Журнал технической физики*. 2016. Т. 86, № 9. С. 32—38.