

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF STRUCTURAL ELEMENTS OF THE RECEIVING CHAMBER ON THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF THE LIQUID-GAS EJECTOR

A. Sliusenko, V. Ponomarenko, S. Lementar, N. Pushanko

National University of Food Technologies

Key words:

Ejector

Ejection coefficient

Receiving chamber

Mixing chamber

Passive medium supply

Article history:

Received 18.11.2020

Received in revised form
02.12.2020

Accepted 16.12.2020

Corresponding author:

A. Sliusenko

E-mail:

andriy_slyusenko@
ukr.net

ABSTRACT

Jet devices (ejectors) are used in various industries for carrying out both basic and auxiliary technological processes. It's explained by their reliability of operation and the relatively low cost of manufacturing and maintenance. However, the main disadvantage of such equipment is its low coefficient of efficiency (COE). With all the simplicity of the design, no way has yet been found to significantly increase it. Since the design of the apparatus is quite simple, the role of each element, their relative position and size play an important role in improving the technical and operational characteristics.

One of the main characteristics of ejectors is the ejection coefficient K_{ej} , which characterizes the amount of captured passive phase per unit of active phase. This indicator becomes decisive when carrying out high-intensity mass transfer processes in jet devices.

The analysis of the ejectors' designs shows that the receiving chamber plays an important role in the operation of the apparatus. It should provide uniform supply of the passive medium to the outer surface on of the active liquid jet with minimal hydraulic resistance.

Typically, the design of the receiving chamber of ejectors is cylindrical and has one branch pipe for supplying the passive medium. The operation of such an ejector is characterized by insufficient interaction between the phases, which does not allow achieving a high K_{ej} .

According to the above, the purpose of this work was to study the influence of the structural features of the elements of the receiving chamber (chamber design, the number of inlet pipes of the passive medium) on the ejector efficiency.

To achieve this goal experimental device was created on which a classic water-air jet apparatus with a cylindrical mixing chamber and a new energy-efficient ejector with a combined finite-cylindrical mixing chamber and various designs of the receiving chamber were studied.

As a result of the studies, the influence of the structural elements of the receiving chamber on the ejection coefficient of jet devices was established and recommendations for improving their design were formulated.

DOI: 10.24263/2225-2924-2020-26-6-14

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИЙМАЛЬНОЇ КАМЕРИ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РІДИННО-ГАЗОВОГО ЕЖЕКТОРА

А. М. Слюсенко, В. В. Пономаренко, С. Ю. Лементар, М. М. Пушанко
Національний університет харчових технологій

Струминні апарати (ежектори) застосовуються в різних галузях промисловості для проведення як основних, так і допоміжних технологічних процесів, що пояснюється надійністю їх роботи та відносно низькою вартістю виготовлення й технічного обслуговування. Основним недоліком такого обладнання є низький коефіцієнт корисної дії (ККД). При всій простоті конструкції досі так і не знайдено шляхів його істотного підвищення. Оскільки конструкція апарата достатньо проста, то роль кожного елемента, їх взаємне розташування та розміри мають важливе значення в підвищенні техніко-експлуатаційних характеристик. Однією з таких є коефіцієнт ежекції $K_{еж}$, який характеризує кількість захопленої пасивної фази на одиницю активної. Цей показник стає визначальним при проведенні в струминних апаратах масообмінних процесів високої інтенсивності.

Аналіз конструкцій ежекторів показує, що приймальна камера відіграє важливу роль у роботі апарата та повинна забезпечувати при мінімальному гідравлічному опорі рівномірне підведення пасивного середовища до зовнішньої поверхні факела активного струменя рідини.

Зазвичай, конструкція приймальної камери ежекторів циліндричної форми має один патрубок для підводу пасивного середовища. Робота такого ежектора характеризується недостатньою взаємодією між фазами, що не дає змоги досягти високого $K_{еж}$. Відповідно до цього у статті досліджено вплив елементів приймальної камери (конструкції камери, кількості підвідних патрубків пасивного середовища) на ефективність роботи ежектора. Для цього створено експериментальну установку, на якій досліджувалися класичний водо-повітряний струминний апарат з циліндричною камерою змішування і новий енергоефективний ежектор з комбінованою (конічно-циліндричною) камерою змішування та різними конструкціями приймальної камери.

У результаті проведених досліджень встановлено вплив елементів приймальної камери на коефіцієнт ежекції струминних апаратів і сформовано рекомендації щодо її конструкційного виконання.

Ключові слова: ежектор, коефіцієнт ежекції, приймальна камера, камера змішування, підвід пасивного середовища.

Постановка проблеми. Струминні апарати (ежектори) завдяки своїй простій конструкції знайшли широке використання в різних галузях промисловості: хар-

човий, хімічний, нафтовий, авіабудуванні тощо. Як відомо, вискоєфективна робота ежекторів залежить від багатьох факторів, в тому числі від правильного вибору конструкційних параметрів.

Одним із важливих елементів струминного апарата є приймальна камера, призначена для підводу пасивного середовища до камери змішування. Слід зазначити, що приймальну камеру можна розглядати як початок камери змішування, оскільки в ній починається взаємодія між фазами, передача енергії активного середовища пасивному та починає формуватися двофазний потік.

При проектуванні струминних апаратів для проведення технологічних процесів харчової промисловості згідно з технологічним регламентом і з високою інтенсивністю необхідно мати достатню кількість газової фази, яка потрапляє через приймальну камеру до камери змішування, де й відбуваються масообмінні процеси та досягається необхідна якість оброблення. Для цього струминним апаратом повинна бути забезпечена робота з високим коефіцієнтом ежекції ($K_{\text{еж}}$), який являє собою відношення витрати пасивного середовища ($Q_{\text{пас}}$) до активного ($Q_{\text{акт}}$).

У запропонованому дослідженні проведено аналіз впливу елементів конструкції приймальної камери на роботу ежектора і на основі проведених досліджень розроблено рекомендації щодо її конструювання.

Досліджено роботу ежектора з циліндричною камерою змішування (класичного типу) і різними конструкціями приймальної камери, а також нового енергоєфективного ежектора з конічно-циліндричною (комбінованою) камерою змішування й аналогічними приймальними камерами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі дослідження [1—5], у яких рекомендується виконувати перехідну частину від приймальної до змішувальної камери різної форми: криволінійною, конфузornoю, по лемніскаці. На розташування та кількість підвідних патрубків газу увага не зверталась.

У [6] представлені результати дослідження роботи ежектора при тангенційному підведенні пасивного середовища в приймальну камеру та з різною формою підвідних патрубків. Встановлено, що при однакових витратах робочого середовища швидкість пасивного потоку в підвідних патрубках є різною. Для характеристики конструкції ежектора авторами введено параметр кутової швидкості w_i — відношення швидкості пасивного середовища в тангенційному каналі до радіуса приймальної камери. Виявлено, що при збільшенні w_i витрата пасивного середовища зменшується.

Для зменшення гідравлічних втрат у струминному апараті у [7] пропонується підвід пасивного середовища в приймальну камеру виконати через патрубок, який розташований під кутом 45° в напрямку руху активного потоку. Порівняння коефіцієнтів опору руху пасивного потоку з таким підведенням та при підводі газу в приймальну камеру під прямим кутом показує, що в першому випадку втрати напору в 2,4 раза нижчі, ніж при другому.

У [8] представлена конструкція струминного апарата, приймальна камера якого виконана з воронки у формі усіченого конуса, сегмента кульової та напівсферичної обичайок, а також профільованої кільцевої вставки. Таке складне конструктивне виконання приймальної камери, на думку авторів, приводить до підвищення ефективності роботи ежектора за рахунок рівномірного входу пасивного

середовища в камеру змішування. Крім того, в результаті розвороту газу на 180° в напівсферичній обичайці приймальної камери досягається швидке вирівнювання поля швидкостей потоків у камері змішування. Кільцева вставка приводить до зменшення зворотно-циркуляційних потоків між робочим соплом і напівсферичною обичайкою. Однак підтвердженень ефективності роботи струминного апарата такої конструкції немає.

Слід відмітити ту особливість конструктивного виконання ежекторів, що в більшості випадків підвід пасивного середовища до камери змішування здійснюється через приймальну камеру з одним підвідним патрубком, який розташований під прямим кутом відносно осі струминного апарата.

Необхідно констатувати той факт, що зазначені вище рекомендації дають змогу покращити роботу ежекторів (наприклад, збільшити коефіцієнт ежекції) лише на декілька відсотків. З цього можна зробити висновок, що, незважаючи на важливість робіт зі встановлення оптимальних розмірів і співвідношень при проектуванні ежекторів, раціонального конструкційного виконання підводу пасивного середовища в камеру змішування ще не запропоновано.

Мета статті: дослідити вплив елементів приймальної камери (конструкції камери, кількості підвідних патрубків пасивного середовища) на ефективність роботи ежектора, оцінену за коефіцієнтом ежекції.

Матеріали і методи. Для досягнення поставленої мети була виготовлена експериментальна установка [9], на якій досліджувався водо-повітряний струминний апарат з різними конструкціями підводу пасивного середовища та циліндричною і конічно-циліндричною камерами змішування. В усіх випадках робоче сопло мало діаметр 4 мм. Діаметр камер змішування складав 27 мм, довжина — 216 мм. Відстань від вихідного перерізу сопла до початку камери змішування становила 4 мм.

Як робоче сопло була використана універсальна форсунка з нахиленими підвідними каналами та рухомим плунжером усередині її корпусу. Це дало змогу регулювати витрату рідини через сопло та змінювати характер течії. Особливістю такої форсунки є отримання на виході із сопла високотурбулізованого потоку рідини, що дає змогу досягати високого значення $K_{\text{еж}}$ за рахунок швидкого розпаду струменя рідини й утворення нестійких крапель, які схильні до повторного розпаду. Дослідження ежекторів проводились за умови, коли робота форсунки відповідає відцентрово-струминній течії рідини із сопла та має кут розпилення $28...30^\circ$.

Викладення основних результатів дослідження. Для визначення раціональної конструкції приймальної камери, кількості підвідних патрубків і місця підводу пасивного середовища до камери змішування, при яких досягається найвищий $K_{\text{еж}}$, було розроблено та досліджено струминні апарати, конструкції яких зображені на рис. 1 та 2.

Конструкція струминного апарата з циліндричною камерою змішування (рис. 1) є типовою. Такий ежектор використовується в різних сферах виробництва завдяки простому виготовленню. Для нього розглянуто два варіанти підведення пасивного середовища:

- класичний, через один підвідний патрубок до приймальної камери (рис. 1а);

- через два підвідні патрубки до приймальної камери та встановлений усередині газорозподільник, що являв собою диск з рівномірно розміщеними по периметру отворами (рис. 1б).

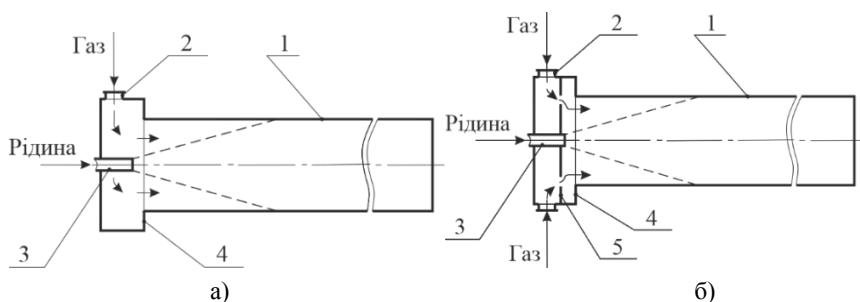


Рис. 1. Конструкція струминного апарата з циліндричною камерою змішування:

а) — підведення пасивного середовища виконано через один патрубок у приймальній камері (класичний); б) — підведення газу здійснюється через два патрубки та газорозподільник у приймальній камері;

1 — камера змішування; 2 — патрубок для підводу пасивного середовища; 3 — робоче сопло; 4 — приймальна камера; 5 — газорозподільник

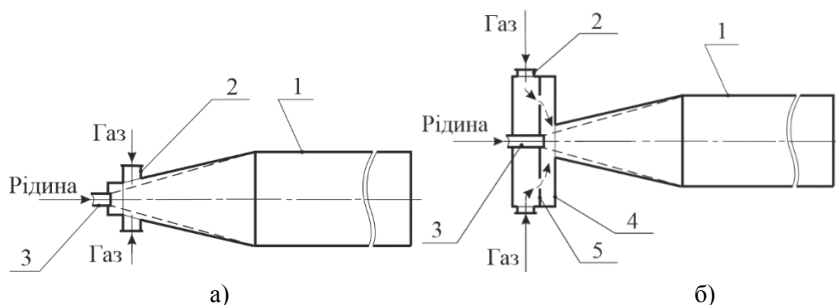


Рис. 2. Конструкція струминного апарата з комбінованою камерою змішування:

а) — підведення пасивного середовища здійснюється через два патрубки, що виконані в конічній частині камери змішування; б) — підведення газу виконано через два патрубки та газорозподільник у приймальній камері;

1 — камера змішування; 2 — патрубок для підводу пасивного середовища; 3 — робоче сопло; 4 — приймальна камера; 5 — газорозподільник

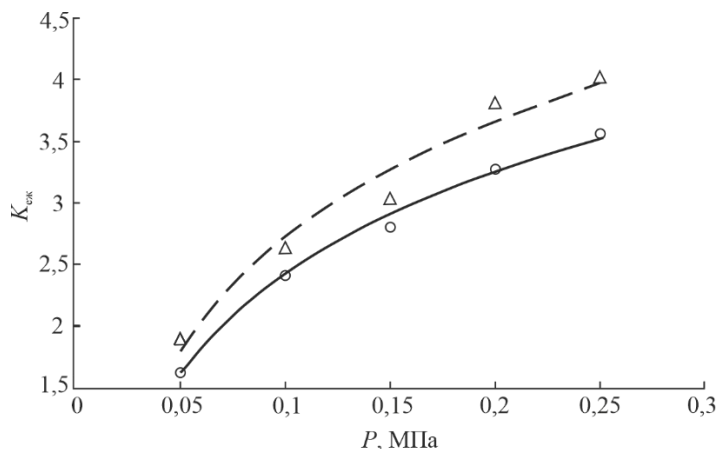
На рис. 2 зображено інноваційний струминний апарат з комбінованою (конічно-циліндричною) камерою змішування. В ньому перехід від приймальної камери до циліндричної камери змішування виконаний через зрізаний конус з кутом при вершині 25° . При такому виконанні камери змішування забезпечується зазор між зовнішньою поверхнею факела розпиленої рідини і внутрішньою поверхнею конічної частини для можливості ежекції газу на достатній довжині потоку.

Підведення пасивного середовища в ежектор (рис. 2а) було виконане двома патрубками на початку конічної частини камери змішування, що забезпечує вхід газу з мінімальним опором.

Підведення пасивного середовища в струминний апарат (рис. 2б) здійснюється через два патрубки в приймальну камеру, в якій також був встановлений

газорозподільник. Така конструкція підведення газу гарантувала рівномірне розподілення повітря по кільцевому зазору між факелом розпиленої води та конічною стінкою перехідної ділянки.

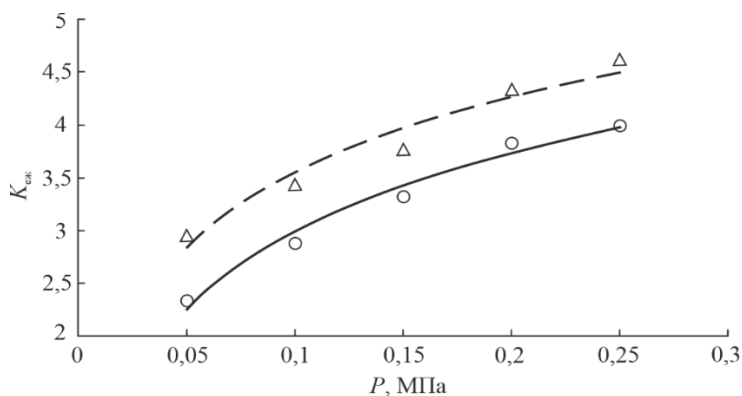
Дослідження роботи ежекторів з різними конструкціями приймальних і змішувальних камер, обробка результатів за загальноприйнятими методиками дали змогу отримати залежності коефіцієнта ежекції $K_{\text{еж}}$ від тиску P подачі активного середовища, що представлені на рис. 3 та 4.



○ Підведення газу через один патрубок у приймальній камері

△ Підведення газу через два патрубки та газорозподільник у приймальній камері

Рис. 3. Залежність $K_{\text{еж}}$ від P для ежектора з циліндричною камерою змішування та різними варіантами підведення пасивного середовища



○ Підведення газу через два патрубки в конічній частині

△ Підведення газу через два патрубки та газорозподільник у приймальній камері

Рис. 4. Залежність $K_{\text{еж}}$ від P для ежектора з конічно-циліндричною камерою змішування та різними варіантами підведення пасивного середовища

Аналіз результатів досліджень струминного апарата з циліндричною камерою змішування. Зазвичай, конструкція приймальної камери в ежекторів з циліндричною камерою змішування виконана так, як показано на рис. 1а. Вважається, що одного підвідного патрубку пасивного середовища достатньо для розподілу газу по всій поверхні факела розпиленої рідини.

Однак результати наших досліджень (рис. 3) спростовують це твердження. Якщо приймальну камеру виконати з двома патрубками підводу пасивного середовища та встановити в ній газорозподільник (рис. 1б), то коефіцієнт ежекції такого струминного апарата на 13...17% стає вищим, ніж в ежектора, в якому підвід газу до приймальної камери здійснюється через один підвідний патрубок (рис. 1а).

Пояснити такі результати можна таким чином: при розпиленні рідини із сопла найбільше розрідження та максимальна швидкість активного потоку досягаються у вхідному перерізі камери змішування. На незначній відстані від сопла форсунки відбувається розпад струменя під дією поперечних пульсацій та формування крапель рідини, що приводить до захоплення газової фази й утворення зони змішування. У разі, коли підвід пасивної фази в приймальну камеру відбувається через один патрубок, повітря ежекується переважно тією частиною рідини, яка рухається зі сторони вхідного патрубка. Тобто не вся поверхня рідини рівноцінно бере участь у захопленні газу і подальшому його переміщенню в камеру змішування.

У разі підводу газу в приймальну камеру через два патрубки та розміщений всередині газорозподільник у вигляді диска з отворами досягається більш рівномірне розподілення повітря по поверхні факела розпиленої води. Взаємодія рідкої та газової фази відбувається на більшій площі, тому коефіцієнт ежекції збільшується.

Аналіз результатів досліджень струминного апарата з конічно-циліндричною камерою змішування. На рис. 4 представлена залежність $K_{\text{еж}}$ від P для ежектора з конічно-циліндричною камерою змішування та різними способами підведення пасивного середовища. Якщо підвід повітря до камери змішування здійснюється через приймальну камеру з двома підвідними патрубками та газорозподільником в ній, то $K_{\text{еж}}$ такого струминного апарата, залежно від тиску активного середовища, вищий на 16...27% порівняно з ежектором, в якому підвід газу здійснюється через два підвідні патрубки в конічній частині.

Отримані результати можна пояснити так: якщо підвід газу в ежектор (рис. 2а) виконаний підвідними патрубками в конічну частину камери змішування (безпосередньо в зону низького тиску), то повітря ежекується тією частиною струменя рідини, яка знаходиться в зоні підвідних патрубків.

При підводі пасивного середовища в камеру змішування через приймальну камеру з двома патрубками та газорозподільником (рис. 2б) досягається рівномірне розподілення газу по всій поверхні розпиленої рідини. Своєю чергою, збільшення поверхні контакту фаз приводить до підвищення $K_{\text{еж}}$.

Порівняння ефективності роботи струминних апаратів (рис. 5) з різними камерами змішування, але однаковим виконанням підводу пасивного середовища до

неї (через приймальну камеру з двома підвідними патрубками та газорозподільником всередині), показує беззаперечну перевагу запатентованої конструкції ежектора з конічно-циліндричною камерою змішування [10].

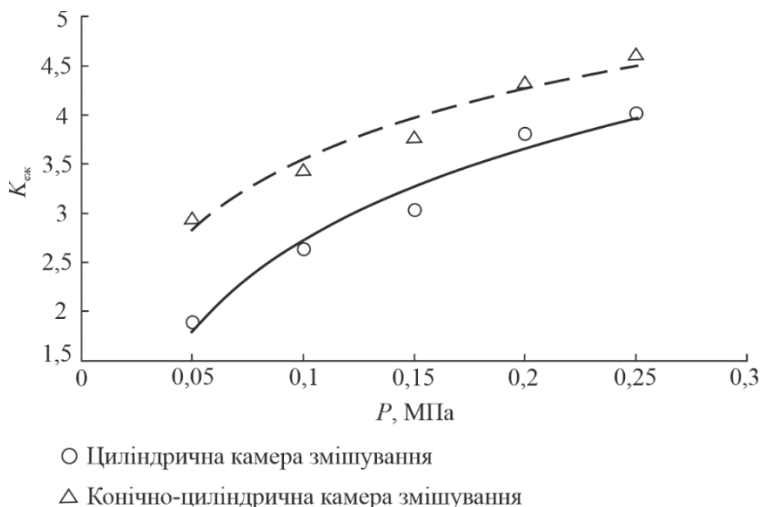


Рис. 5. Залежність $K_{ек}$ від P для ежекторів з різними камерами змішування

При використанні ежектора нової конструкції можна досягти на 15...30% вищий $K_{ек}$, ніж у класичного ежектора з циліндричною камерою змішування. Отримані результати підтверджують ефективність цієї запатентованої конструкції струминного апарата, у якого перехід від приймальної камери до камери змішування здійснюється через конічну частину.

Висновки

1. Конструкція приймальної камери, кількість підвідних каналів та їх розташування істотно впливають на експлуатаційні характеристики струминних апаратів.

2. Приймальна камера повинна забезпечити низький опір входу пасивного середовища та його рівномірне розподілення по всій поверхні струменя розпиленої рідини.

3. Для досягнення максимального $K_{ек}$ підвід газу необхідно виконувати через, щонайменше, як два підвідні патрубки та газорозподільник. Це приводить до підвищення коефіцієнта ежекції на 13...17% для класичного ежектора та на 16...27% для ежектора з комбінованою камерою змішування.

4. Порівняння ефективності роботи струминних апаратів з однаковим конструктивним виконанням приймальної камери (два підвідні патрубки та газорозподільник усередині), але різними камерами змішування показало, що $K_{ек}$ ежектора з конічно-циліндричною камерою змішування на 15...30% вищий, ніж для ежектора з циліндричною.

Наступний етап дослідження передбачає проведення гідродинаміки потоку в струминних апаратах за допомогою методу CFD (Computational Fluid Dynamics) та встановлення оптимальних режимів їх роботи.

Література

1. Цегельский В. Г. Струйные аппараты. Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. 567 с.
2. Александров В. Ю., Климовский К.К. Оптимальные эжекторы. Москва: Машиностроение, 2012. 136 с.
3. Design optimization of supersonic jet pumps using high fidelity flow analysis / J. Eves et al. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2011. № 45(5). P. 739—745.
4. Computational fluid dynamic analysis and design optimization of jet pumps / J. Fan et al. *Computers & Fluids*. 2011. № 46. P. 212—217.
5. Milazzo A., Rocchetti A., Eames, I. Theoretical and experimental activity on ejector refrigeration. *Energy Procedia*. 2014. № 45. P. 1245—1254.
6. Экспериментальное исследование расходно-напорной характеристики эжектора с тангенциальным подводом пассивной среды для системы аварийного охлаждения активной зоны АЭС с ВВЭР / В.Н. Блинков и др. *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10(5). С. 949—952.
7. Абдураимова Д. А., Ярашев Б. Г. Особенности движения потока в водоподъемных установках. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2015. № 5(2). С. 201—204.
8. Газоструйный эжектор: пат. 189929 Россия: МПК F04F 5/16. № 2019105520; заявл. 27.02.19; опубл. 11.06.19, Бюл. №17. 7 с.
9. Гідравлічний стенд для дослідження ежектора з диспергованим струменем рідини / Ю. Губаненко та ін. *Наукові здобутки молоді — вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*: матеріали 84 Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 23—24 квітня 2018 р. Київ: НУХТ, 2018. Ч. 2. С. 81.
10. Рідинно-газовий ежектор: пат. 122296 Україна: МПК F04F 5/04. № 201900687; заявл. 23.01.19; опубл. 12.10.20, Бюл. № 19. 5 с.