DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-32-40
УДК 621.694.2:621.517.2:532.5

Сергій Михайлович Ванєєв[1], Олег Юрійович Чех[2], Юрій Сергійович Мерзляков[3], Андрій Сергійович Карпцов[4], Олександр Станіславович Мелейчук[5]

[1]кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної теплофізики
Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: s.vaneev@kttf.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8205-0209. **SCOPUS Author ID:** 56168752900

[2]аспірант кафедри технічної теплофізики
Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: o.cheh@kttf.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-2500-481X. **SCOPUS Author ID:** 57209244933

[3]кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної теплофізики
Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: y.merzlyakoff@kttf.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4516-5573
SCOPUS Author ID: 56436708300

[4]аспірант кафедри технічної теплофізики
Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: andrij.karptsov@student.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0005-5481-2738
ResearcherID: LSL-9719-2024

[5]аспірант кафедри технічної теплофізики
Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: ol.meleychuk@kttf.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-2637-0106. **ResearcherID:** NLO-4704-2025

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ МАКСИМАЛЬНО ДОСЯЖНОГО ТИСКУ РІДИННО-ПАРОВОГО СТРУМИННОГО ЕЖЕКТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ДІАГРАМ

Запропоновано нову методику розрахунку рідинно-парових струминних ежекторів (РПСЕ). Вона дає змогу точно визначати термодинамічні параметри та основні геометричні розміри РПСЕ у різних робочих режимах, використовуючи h,s-діаграми. Універсальність методу дозволяє застосовувати його до різних робочих речовин та широкого діапазону початкових параметрів. Практичне застосування методики полягає в покращенні проєктування РПСЕ для енергетичних установок, підвищуючи їхню ефективність та надійність. Наступним етапом можуть бути експериментальні дослідження для підтвердження теоретичних моделей.

Ключові слова: *рідинно-паровий струминний апарат; двофазний ежектор; струменевий компресор; термодинамічний розрахунок; ентальпійно-ентропійна h,s-діаграма; енергетичні установки; проєктування; робоча речовина; енергетичне машинобудування; процеси фазових переходів.*

Рис.: 1. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. У сучасній техніці широко використовуються процеси, що потребують вакууму, зокрема в таких галузях, як холодильна техніка, хімічна інженерія, енергетика та харчова промисловість. Одним з основних пристроїв для таких процесів є струминні апарати, зокрема ежектори, що застосовуються для різноманітних технологічних завдань. Зокрема, двофазні та однофазні ежектори є важливими елементами у холодильних та теплонасосних установках, у хімічній інженерії, а також у харчовій промисловості.

Перспективним напрямом є використання рідинно-парових струминних ежекторів (РПСЕ), що працюють на основі струминної термокомпресії. Відмінною рисою цих апаратів є процес релаксаційного пароутворення в робочому соплі активного потоку, що може суттєво вплинути на ефективність технологічних процесів.

Дослідження в цій галузі є досить актуальними в контексті сучасних вимог до енергоефективності та екологічної безпеки. Пошук інноваційних рішень, які можуть підвищити ефективність і надійність технологічних процесів, є ключовим для забезпечення конкурентоспроможності підприємств у різних галузях промисловості, зокрема у сфері енергетичного машинобудування. Крім того, розробка рідинно-парових струминних апаратів відповідає глобальним екологічним викликам, затвердженим міжнародними угодами, такими як Кіотський протокол та Паризька угода, що сприяють зниженню викидів

© С. М. Ванєєв, О. Ю. Чех, Ю. С. Мерзляков, А. С. Карпцов, О. С. Мелейчук, 2025

парникових газів та підтримці сталого розвитку. Враховуючи сучасні тенденції в енергетиці та екології, розвиток цієї технології має потенціал для оптимізації використання ресурсів та, відповідно, зменшення екологічного навантаження на навколишнє середовище.

Постановка проблеми. Однією з основних задач при проєктуванні вакуумних установок, що працюють на базі рідинно-парових струминних ежекторів (РПСЕ), є розробка методики їхнього розрахунку, яка здатна точно відобразити складність процесів, що відбуваються у проточній частині апарату. Існують різні підходи до розрахунку двофазних струминних апаратів, однак усі вони базуються на спрощених методах, які використовують одновимірну модель процесу, що є наближенням, оскільки важливою характеристикою таких процесів є їхня неодномірність, зокрема при витіканні з каналів із непрофільованим входом, що проявляється у специфіці навколозвукових потоків. Попри велику кількість теоретичних та експериментальних досліджень, ці процеси потребують подальшого вивчення через складність змішування різнофазних струменів, обміну кількості руху, тепло- та масообмінні процеси, конденсацію, а також надзвукові режими течії та стрибки ущільнення. Через складну природу процесу передачі імпульсу у двофазних ежекторах процедура їх проєктування, заснована на точному теоретичному прогнозуванні продуктивності ежектора, все ще залишається відкритим питанням.

Проблема полягає в тому, що існуючі підходи до розрахунку струминних апаратів не завжди враховують усі фактори, які впливають на їхню ефективність, зокрема процеси релаксаційного пароутворення та взаємодію рідинно-парових фаз у робочому соплі. Відомі на сьогодні методики можуть застосовуватися, зазвичай, лише для обраного режиму роботи апарата у вузькому діапазоні його параметрів. Вичерпний огляд цих методик зробив у своїй монографії "Вакуумні агрегати на базі рідинно-парових ежекторів" (2024) доцент кафедри технічної теплофізики СумДУ Шарапов Сергій Олегович [1].

Для забезпечення коректності розрахунку процесів, що відбуваються в рідинно-парових струминних ежекторах (РПСЕ), необхідно розробити точну та універсальну методику, яка відповідатиме сучасним вимогам до їх проєктування. Оскільки ефективність РПСЕ значною мірою залежить від коректного моделювання термодинамічних та гідродинамічних процесів, важливо створити методику розрахунку, що дозволить більш точно прогнозувати робочі параметри цих апаратів.

Отже, детальне теоретичне та експериментальне дослідження робочого процесу РПСЕ, а також розробка теплофізичних методик для їх розрахунку, на сьогодні є актуальними та мають важливе практичне значення.

Мета статті полягає в розробці методики розрахунку рідинно-парових струминних ежекторів (РПСЕ) за допомогою комп'ютерних (електронних) термодинамічних h,s-діаграм, яка дозволяє точно визначати термодинамічні параметри в характерних точках циклу апарата, з використанням яких можна розрахувати основні геометричні розміри та експлуатаційні характеристики, а також проводити оцінку максимально досяжного тиску в апараті.

Кінцевий результат роботи полягає у створенні універсальної методики розрахунку, що забезпечить високу точність прогнозування параметрів роботи РПСЕ, що допоможе у проєктуванні таких апаратів. Користь від досягнення мети полягає у підвищенні ефективності та надійності технологічних процесів, у яких використовуються РПСЕ, завдяки більш точним розрахункам та оптимізації режимних характеристик.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ряді досліджень розглядаються різноманітні аспекти проєктування, моделювання та оптимізації струминних апаратів, зокрема двофазних ежекторів, для різних промислових застосувань, включаючи системи охолодження, теплові насоси та вакуумні агрегати. Цей аналіз базується на численних роботах, що значно сприяли розвитку концепцій щодо підвищення ефективності струминних апаратів через вдосконалення їх конструкції, геометрії та чисельного моделювання.

Одним з основних напрямків є моделювання та оптимізація двофазних ежекторів для систем, що працюють з CO_2. У роботі [2] представлена процедура моделювання двофазних ежекторів для різноманітних промислових застосувань, зокрема в охолодженні та теплових насосах. Моделі, розроблені в рамках цього дослідження, показали хорошу узгодженість з експериментальними даними, що підтверджує їх ефективність. Ці моделі дозволяють точно прогнозувати продуктивність та ефективність ежектора в реальних умовах, що є важливим для подальшої розробки таких систем.

У подальших дослідженнях [3] було здійснено детальний огляд поточного рівня техніки в моделюванні потоку в двофазних ежекторах для системи CO_2 (R744). Автори наголошують на важливості точного проєктування двофазних ежекторів для досягнення високої енергоефективності в охолоджувальних системах, таких як HVAC&R ("Heating, Ventilation, Air Conditioning, and Refrigeration" (опалення, вентиляція, кондиціонування повітря та холодильна техніка)). Вони підкреслюють необхідність застосування новітніх моделей для проєктування, зокрема для визначення оптимальної геометрії та характеристик роботи ежекторів, що дозволяє суттєво знизити енергетичні витрати в промислових застосуваннях.

Дослідження [4] моделює цикл транскритичного теплового насоса на CO_2 з двофазним ежектором для холодного клімату. Моделювання показує, що використання двофазного ежектора забезпечує значне покращення продуктивності теплового насоса завдяки оптимізації геометрії ежектора. Це дозволяє досягти вищої ефективності в умовах низьких температур, що робить таку систему ефективною для використання в регіонах з холодним кліматом.

Автори [5] зосереджують увагу на оптимізації конструкції двофазного ежектора за допомогою тривимірного чисельного моделювання. Автори досліджують вплив геометричних параметрів, таких як поперечний переріз і кут входу вторинного потоку, на ефективність роботи ежектора. Результати показали, що оптимізація допоміжних захоплювачів і їхнього розташування сприяє покращенню продуктивності ежектора, що підтверджує важливість точного проєктування в цьому напрямку.

Авторами роботи [6] запропоновано розрахункову схему робочих процесів в рідинно-паровому струминному апараті вихрового типу. За розрахункову модель течії в струминному апараті прийнято модель течії з тангенціальною швидкістю. Також було отримано основні розрахункові рівняння процесу роботи в апараті вихрового типу з використанням моделі потоку з тангенціальною швидкістю. Отримані науково-практичні результати дозволяють визначити геометричні параметри та фізичні характеристики вихрового рідинно-парового струминного апарату.

Дослідження [7] пропонує простий підхід до конструкції двофазного ежектора для CO_2, що працює в транскритичних умовах. Розроблена термодинамічна модель показала хорошу узгодженість з експериментальними даними та дозволила оптимізувати характеристики ежектора. Це дозволяє не тільки покращити ефективність роботи ежектора, але й досягти високої продуктивності за рахунок оптимального розміру й форми ежектора.

У дослідженні [8] представлено математичну модель комбінованої системи охолодження, що поєднує парокомпресійний цикл з ежекторним циклом охолодження. Модель дозволяє прогнозувати вплив геометрії ежектора та умов експлуатації на продуктивність системи охолодження. Результати дослідження показали, що геометрія ежектора суттєво впливає на ефективність роботи системи, зокрема на коефіцієнт корисної дії та продуктивність.

Щодо оптимізації конструкцій ежекторів, праця [9] пропонує нову концепцію регульованого сопла для ежектора. Застосування цієї технології дозволяє ефективно регулювати потік і покращити характеристики струминного апарату. Визначена емпірична формула для еквівалентної площі горловини дозволяє значно підвищити ККД струминного насоса, що є важливим аспектом для його ефективної роботи.

У роботі [10] проведено огляд останніх досягнень у розробці парокомпресійних теплових насосів з ежекторами. Автори висвітлюють нові концепції одноступінчастих і двоступінчастих систем стиснення, що використовують один або кілька ежекторів. Огляд показує значний потенціал для покращення енергоефективності таких систем, проте автори зазначають обмежену кількість експериментальних даних для підтвердження теоретичних результатів, що потребує подальших досліджень.

Експериментальні дослідження струминних апаратів також займають важливе місце в наукових роботах. У роботі [11] описано експериментальний стенд для дослідження процесів змішування в рідинно-парових струминних апаратах. Дослідження показали, що форма камери змішування впливає на ефективність роботи апарата, а оптимальні геометрії можуть значно покращити результати роботи таких систем. У свою чергу, автори [12] провели числові розрахунки для проєктування нафтових струминних насосів, використовуючи моделі турбулентності та агрегатні стани середовища. Результати показали, що врахування кавітації за допомогою моделі Релея-Плессета дозволяє підвищити ККД насоса втричі.

Нарешті, у статті [13] обговорюють останні досягнення в чисельному моделюванні струминних насосів для отримання вакууму, зокрема складні потоки, які включають ударні хвилі та фазові переходи. У ній наголошують на необхідності вдосконалення багатофазних моделей і методів моделювання турбулентності для точного прогнозування ефективності таких систем.

Загалом, проведений аналіз літератури показує, що застосування двофазних струминних апаратів, зокрема ежекторів, та їх оптимізація є важливими напрямками для підвищення ефективності різноманітних енергетичних систем. Прогрес у моделюванні, вдосконаленні конструкцій і проведенні експериментальних досліджень є важливими кроками до створення більш ефективних та енергоощадних технологій у сфері охолодження, опалення та вакуумних систем.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на значні успіхи у вивченні РПСЕ, досі відсутня уніфікована методика розрахунку максимально досяжного тиску, яка б повною мірою враховувала складність взаємодії фаз та нестаціонарні режими роботи. Існуючі моделі часто базуються на спрощених припущеннях щодо термодинамічних процесів, що призводить до розбіжностей між теоретичними прогнозами та експериментальними даними, особливо для широкого діапазону робочих параметрів. Недостатньо дослідженими залишаються вплив варіативності геометрії камери змішування та конфузора на ефективність перетворення енергії та формування максимального тиску, що обмежує можливості оптимізації конструкції. Таким чином, розробка точної та універсальної методики розрахунку, що базується на детальному аналізі термодинамічних діаграм та враховує багатофакторний вплив експлуатаційних та конструктивних параметрів, залишається ключовою невирішеною задачею.

Виклад основного матеріалу. Нова методика розрахунку рідинно-парового струминного ежектора має наступні етапи:

1. Введемо перелік умовних позначень.

Початкові параметри для розрахунку наступні: C – швидкість потоку; *f* – площа перерізу, $м^2$; *d* – діаметр, м; *h* – ентальпія, $\frac{кДж}{кг}$; *m* – масова витрата, $\frac{кг}{с}$; *P* – тиск, бар; *s* – ентропія, $\frac{кДж}{кг \cdot К}$; *t* – температура, °С; *v* – питомий об'єм, $\frac{м^3}{кг}$; φ – коефіцієнт швидкості.

Індекси: 01 – вхідний переріз, *b* – переріз на виході з дифузора РПСЕ, *a* – переріз на виході із сопла активного потоку, *f* – переріз у горлі сопла активного потоку, *s* – ізоентропійний процес, д – процес у дифузорі, с – процес у соплі.

2. Вибір вихідних даних для розрахунку.

Задаємося вихідними даними для розрахунку: P_{01}, бар та t_{01}, °С – тиск та температура потоку на вході в сопло активного потоку; P_a, бар– тиск потоку на виході з сопла. Приймаємо d_f, м – діаметр горла сопла, φ_c – коефіцієнт швидкості сопла.

Процес у соплі активного потоку.

3. Визначення ізоентропійних параметрів у соплі активного потоку (Ізоентропійний процес).

При P_{01}, бар та t_{01}, °С, визначаємо, за діаграмою, ізоентропні параметри потоку на вході в активне сопло: $h_{01}, \frac{кДж}{кг}$ – ентальпія; $s_{01}, \frac{кДж}{кг \cdot К}$ – ентропія; $v_{01}, \frac{м^3}{кг}$ – питомий об'єм. За величиною тиску насиченої пари визначаємо тиск у горлі сопла $P_{s0} = P_f$, бар.

При $s = s_{fs} = const$ проводимо ізоентропу до перетину з ізобарою $P_{s0} = P_f$, та визначаємо, за діаграмою, ізоентропні параметри потоку у горлі сопла: t_{fs}, °С – температура; $h_{fs}, \frac{кДж}{кг}$ – ентальпія; $v_{fs}, \frac{м^3}{кг}$ – питомий об'єм.

Ізоентропійна швидкість у горлі сопла активного потоку визначається за формулою:

$$C_{fs} = \sqrt{2 \cdot (h_{01} - h_{fs})}, \frac{м}{с}.$$

При $s = s_{01} = const$ проводимо ізоентропу до перетину з ізобарою P_a, бар, і визначаємо ізоентропні параметри потоку на виході з сопла: t_{as}, °С; $h_{as}, \frac{кДж}{кг}$; $v_{as}, \frac{м^3}{кг}$.

Ізоентропійна швидкість на виході з сопла активного потоку:

$$C_{as} = \sqrt{2 \cdot (h_{01} - h_{as})}, \frac{м}{с}.$$

Далі визначаємо масову витрату та основні геометричні розміри (при d_f, м) за такими формулами.

Ізоентропійна масова витрата в соплі:

$$m_s = \frac{C_{fs} \cdot \pi \cdot {d_f}^2}{4 \cdot v_{fs}}, \frac{кг}{с}.$$

Ізоентропійна площа горла сопла:

$$f_{fs} = \frac{m_s \cdot v_{fs}}{C_{fs}}, м^2.$$

Ізоентропійна площа вихідного перерізу сопла:

$$f_{as} = \frac{m_s \cdot v_{as}}{C_{as}}, м^2.$$

Ізоентропійний діаметр вихідного перерізу сопла:

$$d_{as} = \sqrt{\frac{4 \cdot f_{as}}{\pi}}, м.$$

4. Визначення дійсних параметрів у соплі активного потоку (Дійсний процес).

Визначаємо ККД сопла:

$$\eta_c = \varphi_c^2.$$

Дійсна ентальпія у горлі сопла визначається за формулою:

$$h_f = h_{01} - \varphi_c^2 \cdot (h_{01} - h_{fs}), \frac{кДж}{кг}.$$

При P_f, бар та $h_f, \frac{кДж}{кг}$, визначаємо, за діаграмою, дійсні параметри потоку в горлі сопла: t_f, °С; $v_f, \frac{м^3}{кг}$; $s_f, \frac{кДж}{кг \cdot К}$.

Дійсна швидкість у горлі сопла активного потоку:

$$C_f = \sqrt{2 \cdot (h_{01} - h_f)}, \frac{м}{с}.$$

Дійсна масова витрата в соплі:

$$m = \frac{C_f \cdot \pi \cdot {d_f}^2}{4 \cdot v_f}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Дійсна ентальпія на виході з сопла:

$$h_a = h_{01} - \varphi_c^2 \cdot (h_{01} - h_{as}), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

При P_a, бар та $h_a, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ визначаємо за діаграмою дійсні параметри потоку на виході із сопла: t_a, °С; $v_a, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $s_a, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$.

Дійсна швидкість на виході із сопла активного потоку:

$$\text{C}_a = \sqrt{2 \cdot (h_{01} - h_a)}, \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Перевіряємо коефіцієнт швидкості сопла:

$$\varphi_\text{c} = \frac{\text{C}_\text{a}}{\text{C}_{as}}.$$

Тоді дійсна площа вихідного перерізу сопла:

$$f_a = \frac{m \cdot v_a}{C_a}, \text{м}^2.$$

Дійсний діаметр вихідного перерізу сопла:

$$d_a = \sqrt{\frac{4 \cdot f_a}{\pi}}, \text{м}.$$

Процес у камері змішування.

5. Визначення ізоентропійних параметрів у камері змішування (Ізоентропійний процес).

Розглянемо процес підвищення тиску в камері змішування без інжекції пасивного потоку (при нульовому коефіцієнті інжекції), тобто як процес перетворення кінетичної енергії на виході із сопла активного потоку в потенційну енергію тиску в дифузорі (процес підвищення тиску в дифузорі, як обернений процесу зниження тиску в активному соплі). У цьому випадку можна оцінити максимально досяжний тиск на виході з ежектора.

З точки «а», при $s = const$ проводимо ізоентропу до перетину з ізоентальпією $h_{4s} = h_{01}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, та визначаємо за діаграмою ізоентропні параметри потоку на виході з ежектора: P_{4s}, бар; t_{4s}, °С; $v_{4s}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $s_{4s}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$.

Тиск P_{4s} є максимально досяжним тиском рідинно-парового струминного ежектора при ізоентропійному процесі підвищення тиску в дифузорі до початкової ентальпії h_{01}.

6. Визначення дійсних параметрів у камері змішування (Дійсний процес).

Задаємося ККД $\eta_\text{д}$ або коефіцієнтом швидкості для дифузора: $\varphi_\text{д}$.

Ентальпія на виході з дифузора для дійсного процесу дорівнює початковій ентальпії h_{01}. Тоді для відповідного ізоентропійного процесу ентальпія на виході з дифузора дорівнює:

$$h_{bs} = h_a + \eta_\text{д} \cdot (h_{01} - h_a) = h_a + \varphi_\text{д}^2 \cdot (h_{01} - h_a), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

При $s = const$ проводимо ізоентропу до перетину з ізоентальпією $h_{0s} = h_{bs}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, та визначаємо, за діаграмою, ізоентропні параметри потоку на виході з дифузора ежектора: P_{bs}, бар t_{bs}, °С; $v_{bs}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $s_{bs}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$.

Точка b (рис. 1) знаходиться на перетині ізобари $P_{bs} = P_b$ з ізоентальпією $h_{01} = h_b$. Визначаємо за діаграмою параметри потоку на виході з дифузора ежектора в дійсному процесі «ab»: t_b, °C; $v_b, \frac{м^3}{кг}$; $s_b, \frac{кДж}{кг \cdot K}$.

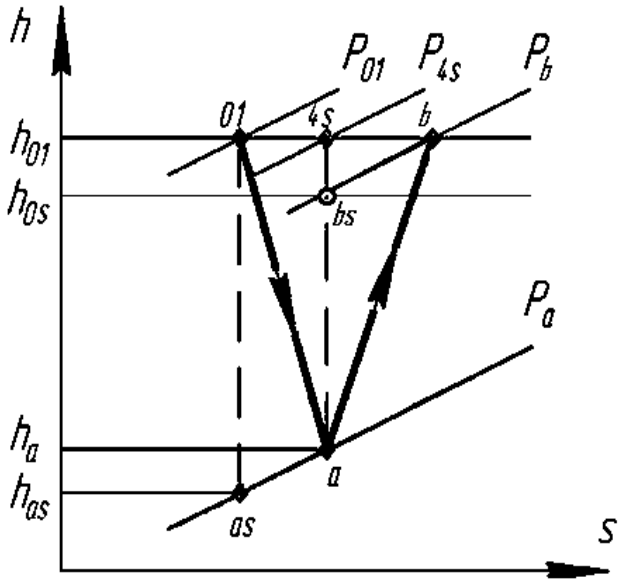

Рис. 1. Схема робочого процесу РПСЕ зображена у h,s-діаграмі
Джерело: розроблено авторами.

У цьому випадку тиск $P_{b,}$ є максимально досяжним тиском рідинно-парового струминного ежектора при дійсному процесі підвищення тиску в дифузорі для заданого ККД дифузора.

Висновки. У роботі запропоновано нову методику визначення максимально досяжного тиску рідинно-парового струминного ежектора (РПСЕ) з використанням комп'ютерних (електронних) термодинамічних h,s-діаграм, що дозволяє оцінити доцільність подальших розрахунків і проєктування апарату на задані параметри, а також визначати термодинамічні параметри в характерних точках циклу. Запропонована методика забезпечує достовірні результати розрахунків параметрів роботи РПСЕ та отримання їх основних геометричних розмірів при різних режимах роботи. Важливою перевагою запропонованого методу є його універсальність, що дозволяє застосовувати його до різних робочих речовин і адаптувати до широкого діапазону початкових параметрів.

Практичне застосування отриманих результатів полягає у можливості більш точного проєктування РПСЕ для енергетичних установок, щоб підвищити ефективність та надійність технологічних процесів у цих апаратах. Застосування розробленої методики дозволить значно покращити точність розрахунків і забезпечити оптимальне проєктування РПСЕ, що є перспективним напрямком розвитку в галузі енергетичного машинобудування. Наступним етапом дослідження є проведення експериментальних випробувань для кореляції теоретичних моделей із реальними результатами.

Список використаних джерел

1. Шарапов, С. О. (2024) *Вакуумні агрегати на базі рідинно-парових ежекторів*. Сумський державний університет.

2. Ameur, K., Aidoun, Z., & Ouzzane, M. (2016). Modeling and numerical approach for the design and operation of two-phase ejectors. *Applied Thermal Engineering, (109)*, 809-818.

3. Ringstad, K., Allouche, Y., Gullo, P., Ervik, Å., Banasiak, K., & Hafner, A. (2020). A detailed review on CO_2 two-phase ejector flow modeling. *Thermal Science and Engineering*, *(20)*, 100647.

4. Ameur, K., Aidoun, Z. (2021). Two-phase ejector enhanced carbon dioxide transcritical heat pump for cold climate. *Energy Conversion and Management*, *(243),* 114421.

5. Yan, J., Jiang, J., & Wang, Z. (2022). Optimization on Secondary Flow and Auxiliary Entrainment Inlets of an Ejector by Using Three-Dimensional Numerical Study. *Entropy*, *(24).*

6. Merzliakov, I., Pavlenko, I., Ochowiak, M., Ivanov, V., & Agarwal, P. (2022). Flow Modeling in a Vortex Chamber of a Liquid–Steam Jet Apparatus. *Processes*, *10(5)*, 984.

7. Ameur, K., Aidoun, Z. (2023). A Simple Design Approach of Two-Phase Ejectors for CO_2 Transcritical Heat Pumps. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, *16(10),* 1833.

8. Ouelhazi, I., Ezzaalouni, Y., & Kairouani, L. (2020). Parametric analysis of a combined ejector-vapor compression refrigeration cycle. *International Journal of Low-carbon Technologies*, *15*, 398-408.

9. Guo, Y., Zhang, J., Ma, S., & Zhang, J. (2024). Coupling optimization design of adjustable nozzle for a steam ejector. *Applied Thermal Engineering*, *252*, 123550.

10. Gruber, S., Rola, K., Urbancl, D., & Goričanec, D. (2024). Recent Advances in Ejector-Enhanced Vapor Compression Heat Pump and Refrigeration Systems-A Review. *Energies*.

11. Шарапов, С. О., Євтушенко, С. О., & Хованський, С. О. (2024). Експериментальний стенд для дослідження процесів змішування в рідинно-парових струминних апаратах. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*, 24.2, 37-50.

12. Роговий, А. С., Костюк, М. О., & Азаров, А. С. (2022). Удосконалювання енергетичних параметрів нафтових струминних насосів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія "Гідравлічні машини та гідроагрегати"*, 1, 25-32.

13. Sadeghiseraji, J., Garcia-Vilchez, M., Castilla, R., & Raush, G. (2024). Recent Advances in Numerical Simulation of Ejector Pumps for Vacuum Generation-A Review. *Energies*.

References

1. Sharapov, S. O. (2024) Vakuumni ahrehaty na bazi ridynno-parovykh ezhektoriv [Vacuum units based on liquid-vapor ejectors]. *Sumskyi derzhavnyi universytet – Sumy State University.*

2. Ameur, K., Aidoun, Z., & Ouzzane, M. (2016). Modeling and numerical approach for the design and operation of two-phase ejectors. *Applied Thermal Engineering*, 109, 809-818.

3. Ringstad, K., Allouche, Y., Gullo, P., Ervik, Å., Banasiak, K., & Hafner, A. (2020). A detailed review on CO_2 two-phase ejector flow modeling. *Thermal Science and Engineering*, 20, 100647.

4. Ameur, K., Aidoun, Z. (2021). Two-phase ejector enhanced carbon dioxide transcritical heat pump for cold climate. *Energy Conversion and Management*, 243, 114421.

5. Yan, J., Jiang, J., & Wang, Z. (2022). Optimization on Secondary Flow and Auxiliary Entrainment Inlets of an Ejector by Using Three-Dimensional Numerical Study. *Entropy*, 24.

6. Merzliakov, I., Pavlenko, I., Ochowiak, M., Ivanov, V., & Agarwal, P. (2022). Flow Modeling in a Vortex Chamber of a Liquid–Steam Jet Apparatus. *Processes*, 10(5), 984.

7. Ameur, K., Aidoun, Z. (2023). A Simple Design Approach of Two-Phase Ejectors for CO_2 Transcritical Heat Pumps. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 16(10), 1833.

8. Ouelhazi, I., Ezzaalouni, Y., & Kairouani, L. (2020). Parametric analysis of a combined ejector-vapor compression refrigeration cycle. *International Journal of Low-carbon Technologies*, 15, 398-408.

9. Guo, Y., Zhang, J., Ma, S., & Zhang, J. (2024). Coupling optimization design of adjustable nozzle for a steam ejector. *Applied Thermal Engineering*, 252, 123550.

10. Gruber, S., Rola, K., Urbancl, D., & Goričanec, D. (2024). Recent Advances in Ejector-Enhanced Vapor Compression Heat Pump and Refrigeration Systems—A Review. *Energies*.

11. Sharapov, S. O., Yevtushenko, S. O., & Khovanskyi, S. O. (2024). Eksperymentalnyi stend dlia doslidzhennia protsesiv zmishuvannia v ridynno-parovykh strumynnykh aparatakh [Experimental stand for studying mixing processes in liquid-vapor jet devices]. Zaporizhzhia: *Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu imeni Dmytra Motornoho - Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University named after Dmitry Motorny*, 24.2, 37-50.

12. Rohovyi, A. S., Kostiuk, M. O., & Azarov, A. S. (2022). Udoskonaliuvannia enerhetychnykh parametriv naftovykh strumynnykh nasosiv [Improving the energy parameters of oil jet pumps]. Kharkiv: *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriia "Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty" – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series "Hydraulic Machines and Hydraulic Units"*, 1, 25-32.

13. Sadeghiseraji, J., Garcia-Vilchez, M., Castilla, R., & Raush, G. (2024). Recent Advances in Numerical Simulation of Ejector Pumps for Vacuum Generation—A Review. *Energies*.

Отримано 10.06.2025

UDC 621.694.2:621.517.2:532.5

Serhii Vanieiev[1], Oleh Chekh[2], Iurii Merzliakov[3], Andrii Karptsov[4], Oleksandr Meleichuk[5]

[1]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Thermophysics
Sumy State University (Sumy, Ukraine)
E-mail: s.vaneev@kttf.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8205-0209. **SCOPUS Author ID:** 56168752900

[2]PhD Student of the Department of Technical Thermophysics
Sumy State University (Sumy, Ukraine)
E-mail: o.cheh@kttf.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-2500-481X. **SCOPUS Author ID:** 57209244933

[3]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Thermophysics
Sumy State University (Sumy, Ukraine)
E-mail: y.merzlyakoff@kttf.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4516-5573
SCOPUS Author ID: 56436708300

[4]postgraduate student of the Department of Technical Thermophysics
Sumy State University (Sumy, Ukraine)
E-mail: andrij.karptsov@student.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0005-5481-2738
ResearcherID: LSL-9719-2024

[5]PhD Student of the Department of Technical Thermophysics
Sumy State University (Sumy, Ukraine)
E-mail: ol.meleychuk@kttf.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-2637-0106. **ResearcherID:** NLO-4704-2025

METHOD OF CALCULATING THE MAXIMUM ACHIEVABLE PRESSURE OF A LIQUID-VAPOR JET EJECTOR USING THERMODYNAMIC DIAGRAMS

The current landscape of energy production and industrial processes increasingly demands highly efficient and reliable equipment. Liquid-vapor jet ejectors (LVJEs), due to their simplicity, absence of moving parts, and ability to handle various working fluids, offer a compelling solution for a range of applications, including vacuum generation, refrigeration, and thermal compression. However, accurate design and optimization of these devices remain challenging due to complex thermodynamic interactions involved. Existing calculation methods often rely on simplified assumptions or empirical correlations, which may limit their applicability and accuracy across different operating conditions and working fluids.

This work introduces a novel methodology for calculating LVJEs, enabling precise determination of thermodynamic parameters at key points of their operating cycle through the application of enthalpy-entropy (h,s) diagrams. The proposed methodology yields reliable results for calculating LVJE operational parameters and deriving their fundamental geometric dimensions across various operating conditions. A significant advantage of this method is its inherent universality, allowing for its application with diverse working fluids and adaptability to a broad spectrum of input parameters.

The practical utility of these findings lies in the potential for more accurate design of LVJEs for energy installations, thereby enhancing the efficiency and reliability of technological processes within these devices. Implementation of the developed methodology is expected to significantly improve calculation accuracy and facilitate optimal LVJE design, representing a promising avenue for advancement in the field of power engineering. The subsequent phase of this research involves conducting experimental validations to correlate theoretical models with real-world outcomes. This will provide empirical support for the proposed methodology and refine its predictive capabilities.

Keywords: *liquid-vapor jet apparatus; two-phase ejector; jet compressor; thermodynamic calculation; enthalpy-entropy h,s-diagram; energy installations; projecting; working substance; power machinery; phase transition processes.*

Fig.: 1. References: 13.

Ванєєв С. М., Чех О. Ю., Мерзляков Ю. С., Карпцов А. С., Мелейчук О. С. Методика розрахунку максимально досяжного тиску рідинно-парового струминного ежектора з використанням термодинамічних діаграм. *Технічні науки та технології,* 2025. № 2(40). С. 32-40. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-32-40.