

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2\(44\)-56-68](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-56-68)

УДК 621.438.2

**Сергій Михайлович Ванєєв<sup>1</sup>, Олександр Станіславович Мелейчук<sup>2</sup>,  
Ольга Ігорівна Мірошніченко<sup>3</sup>, Володимир Сергійович Сітало<sup>4</sup>, Олег Юрійович Чех<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної теплофізики

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: [s.vaneev@kttf.sumdu.edu.ua](mailto:s.vaneev@kttf.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8205-0209>

SCOPUS Author ID: 56168752900

<sup>2</sup>аспірант кафедри технічної теплофізики

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: [ol.meleychuk@kttf.sumdu.edu.ua](mailto:ol.meleychuk@kttf.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2637-0106>. SCOPUS Author ID: 60015632600

<sup>3</sup>аспірант кафедри технічної теплофізики

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: [o.miroshnychenko@kttf.sumdu.edu.ua](mailto:o.miroshnychenko@kttf.sumdu.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7131-8575>

SCOPUS Author ID: 57745606800

<sup>4</sup>аспірант кафедри технічної теплофізики

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: [v.sitalo@kttf.sumdu.edu.ua](mailto:v.sitalo@kttf.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0610-3320>. ResearcherID: LRU-5977-2024

<sup>5</sup>аспірант кафедри технічної теплофізики

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: [o.cheh@kttf.sumdu.edu.ua](mailto:o.cheh@kttf.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2500-481X>. SCOPUS Author ID: 57209244933

## CFD-АНАЛІЗ ТУРБОГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТУ НА БАЗІ СТРУМИННО-РЕАКТИВНОЇ ТУРБИНИ КАНАЛЬНОГО ТИПУ ПРИ РОБОТІ НА ПРИРОДНОМУ ГАЗІ (CH<sub>4</sub>)

У статті досліджено актуальну проблему модернізації енергетичних систем України шляхом розвитку малої розподіленої генерації на базі турбогенераторного обладнання. Метою роботи є проведення чисельних досліджень методами обчислювальної гідродинаміки (CFD) та аналіз отриманих параметрів струминно-реактивної турбіни (СРТ) каналного типу з використанням природного газу як робочої речовини. Обчислювальне моделювання газодинамічних процесів реалізовано в програмно-обчислювальному комплексі ANSYS CFX для діапазону частот обертання від 0 до 25 000 об/хв. У процесі дослідження отримано залежності потужності, крутного моменту та ККД від частоти обертання ротора. Результати роботи науково обґрунтовують доцільність інтеграції утилізаційних СРТ у блоки редукування газорозподільних станцій, газорегулюючих пунктів на підприємствах, тощо.

**Ключові слова:** чисельне дослідження; ANSYS CFX; енергетичні системи; енергоефективність; децентралізація; джерела енергії; газорозподільні станції.

Рис.: 6. Бібл.: 18.

**Актуальність теми дослідження.** Світові енергосистеми десятиліттями будувалися за наступною ієрархією: велика електростанція > магістральні мережі > підстанції > споживач [1]. Такий тип енергетичної архітектури вразливий до кліматичних факторів, кіберзагроз, фізичних атак, перевантаження мережі та аварійним збоєм. Збільшення навантаження на мережу при сталій пропускній здатності, призводить до перевантаження мережі, що у свою чергу, спричиняє зростання експлуатаційних витрат та обмеження генерації з відновлюваних джерел енергії. Наприклад, у 2022 році витрати на управління перевантаженнями в Німеччині перевищили 4 мільярди євро, а в США - майже 21 мільярд доларів США. Переважна більшість збоїв (понад 90 %) відбувається в розподільчих мережах [2]. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) зазначає, що без масштабної модернізації мереж і інтеграції децентралізованих енергоресурсів забезпечити надійність мереж та декарбонізацію неможливо. Потрібні нові правила розбудови, планування та експлуатації енергомереж, а також ринкові стимули від держав для збільшення гнучкості та зберігання енергії [2].

Усі вищезазначені фактори загострюють інтерес у всесвітній спільноті та особливо України до трансформації/модернізації енергетичних систем з метою підвищення їхньої ефективності, надійності та екологічності. Ключову роль у цій трансформації відіграють децентралізація виробництва енергії [3] та інтеграція відновлюваних та/або інноваційних

джерел енергії в промислові й комунальні підприємства [4]. Ці підходи розглядаються як важливі кроки для зменшення викидів парникових газів, підвищення надійності та ефективності енергопостачання та зменшення вартості енергоресурсів для кінцевого споживача.

Потенційним рішенням у підвищенні ефективності вже наявного обладнання та децентралізації енергосистеми є впровадження турбінних установок потужністю до 500 кВт на газорозподільчих станціях (ГРС). Таке рішення дозволить слідувати прийнятій Україною енергетичної стратегії, у якій одним із пріоритетів є децентралізація генерації електроенергії по всій території країни для поліпшення стійкості та надійності енергозабезпечення [5]. Також таке впровадження відповідатиме схваленому Кабінетом Міністрів від 25 червня 2024 року Національну плану з енергетики та клімату [6] котрий в свою чергу відповідає Регламенту Європейського Союзу (ЄС) 2018/1999 [7] та є документом котрий узгоджує план відновлення енергетичної системи України в поєднанні з декарбонізацією.

Одним з інноваційних напрямків, у впровадженні турбогенераторів на ГРС, є використання турбінного обладнання на основі струминно-реактивних турбін (СРТ). Цей тип турбін знайшов застосування в енергетиці, зокрема, для створення турбогенераторів потужністю до 500 кВт, які використовують енергію стиснутих газів. Приклади таких турбогенераторів наведено в роботах [8; 9]. Ці установки демонструють надійність та простоту в експлуатації та здатні забезпечити електроенергією промислових або комунальних споживачів.

**Постановка проблеми.** У роботі [10] авторами досліджений турбогенератор на основі СРТ каналного типу, котрий був використаний для підвищення загальної ефективності технологічного устаткування хімічного підприємства шляхом генерації електроенергії для власних потреб. Така турбіна призначена для вироблення електроенергії шляхом перетворення потенційної енергії тиску пари під час її розширення в СРТ у механічну роботу на валу генератора. Проте цей тип установок є новим та потребує додаткового дослідження з використанням інших робочих речовин.

**Мета статті** полягає в проведенні чисельного експерименту та дослідженні отриманих параметрів струминно-реактивної турбіни каналного типу з робочою речовиною – природній газ.

Основними завданнями є:

- числове моделювання течії робочої речовини в СРТ за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX;
- аналіз отриманих даних під час проведення чисельного дослідження;
- визначення доцільності подальших досліджень та модернізації СРТ каналного типу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як свідчить міжнародний досвід [11], насичення економіки незалежними розподіленими енергоджерелами веде до зниження вартості енергії, підвищення конкурентоспроможності підприємств та енергетичної безпеки країни і відповідає цілям сталого розвитку України.

Звіт МЕА за 2025 р. «Empowering Ukraine through a Decentralised Electricity System» [12] відзначає, що для подолання дефіциту електроенергії й захисту від атак слід впроваджувати розподілені енергоресурси. Звіт наводить ключові рекомендації, а саме: сформувати бачення децентралізованої системи; удосконалити регуляторну базу; реформувати ринки електроенергії для доступу малих генерацій; посилити координацію між передачею і розподілом електроенергії; забезпечити контроль та «розумний» облік для децентралізованих енергетичних систем (ДЕС); створити законодавчі й фінансові інструменти для масштабування ДЕС.

Тож, враховуючи всі вищезазначені фактори, потенційним вирішенням проблеми є створення та розвиток малої розподіленої енергетики (МРЕ): системи, що складається з великої кількості джерел енергії малої та/або середньої потужності, які знаходяться в безпосередній близькості до кінцевого споживача. Дані системи вирішують проблему децентралізації, підвищення ефективності використання енергоресурсів та декарбонізації.

У межах сучасної енергетичної політики та стратегій національної безпеки основний акцент робиться на розосередженні генерації та підвищенні ефективності використання енергоресурсів. Редукування тиску технологічних газів через дросельні органи - поширений, але енергетично збитковий спосіб регулювання параметрів робочої речовини: корисна робота не відбирається, а потенційна енергія безповоротно втрачається. Відповідно, найбільші втрати спостерігаються у вузлах із великими перепадами тиску та витратами: на ГРС, у парових системах промислових підприємств та гідравлічних мережах комунальних господарств.

Більша частина ГРС України має потенціал для підвищення енергоефективності та потужності, яку можна отримати на процесі дроселювання тиску природного газу. На виході ГРС, залежно від категорії споживачів, має підтримуватися тиск 0,3; 0,6 або 1,2 МПа, тоді як тиск на вході коливається у діапазоні від 2,5 до 7,0 МПа [13]. Також вимоги галузевих технічних завдань щодо обов'язкового підігріву газу на АГРС дозволяють використовувати детандери без ризику переохолодження робочого тіла [14]. Наявність систем підігріву природного газу спрощує інтеграцію утилізаційних турбін, зберігаючи температуру в межах нормативних значень на виході станції. Потреба у локальних джерелах живлення на ГРС створює прямий запит на турбіни малої потужності.

Аналіз експлуатаційних характеристик, термодинамічних та конструктивних особливостей СРТ дозволяє окреслити області їх потенційного та найбільш раціонального застосування. Конструктивна особливість СРТ базується на принципі використання реактивної сили витікання струменя робочого тіла з рухомих сопел, що кардинально відрізняє їх від традиційних лопаткових турбін [15, 16].

Головним критерієм доцільності впровадження СРТ є наявність технологічних процесів або вузлів, де відбувається неминуче зниження тиску стисненої робочої речовини. СРТ можуть працювати у специфічних умовах: при роботі із забрудненим або вологим робочим тілом, за низьких температур, а також у випадках, коли критерії простоти конструкції, надійності, дешевизни виготовлення та обслуговування переважають над вимогою досягнення максимально можливого ККД. Відсутність тонкозорних лабіринтових ущільнень класичного типу робить СРТ менш чутливими до фізичних властивостей реальних газів та наявності краплинної вологи [17,18].

Інтеграція утилізаційних турбогенераторних агрегатів на базі СРТ дозволяє замінити традиційне дроселювання, з незворотною втратою ексергії потоку, на кероване розширення газу з отриманням корисної роботи. У цьому процесі потенційна енергія стисненого газу перетворюється на механічну роботу обертання вала СРТ, яка безпосередньо передається на вал електрогенератора та перетворюється в електроенергію. Отримана електроенергія може повністю покривати власні потреби станції (освітлення, системи телеметрії, зв'язок тощо), а при наявності надлишку - передаватися в загальну енергомережу.

При типових діапазонах витрат і перепадів тисків на вітчизняних ГРС корисна електрична потужність окремого турбогенератора може варіюватися від 10 до 500 кВт. Використання СРТ підвищує рівень енергетичної автономності інфраструктури, знижує навантаження на загальну електромережу та за наявності надлишку електроенергії сприяє децентралізації мереж.

**Виклад основного матеріалу.** Чисельне моделювання газодинамічних процесів природного газу в проточній частині СРТ реалізовано за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX. На рисунку 1а наведено тривимірну твердотільну модель робочого колеса досліджуваної турбіни. Розрахункова область, що відтворює внутрішній геометричний об’єм проточної частини СРТ, представлена на рисунку 1б.

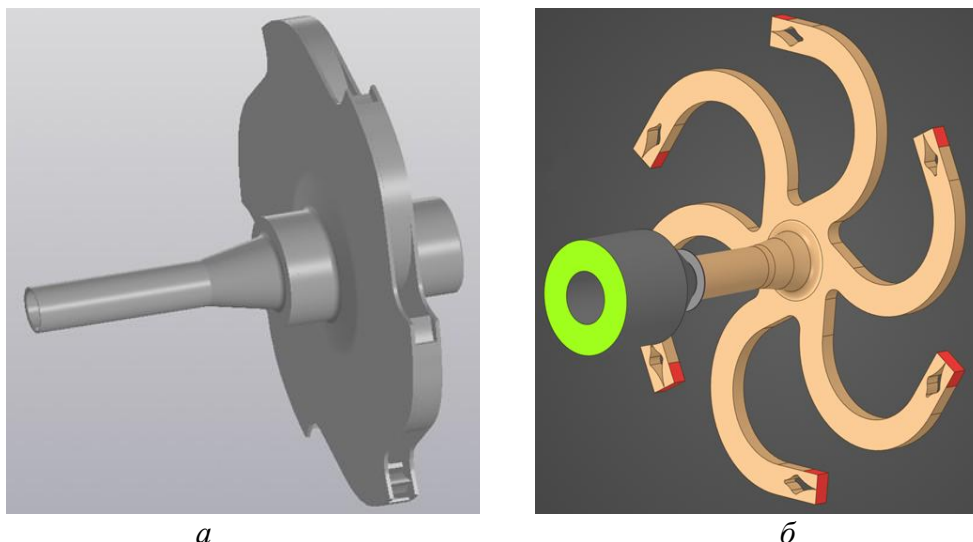


Рис. 1. 3D модель для чисельного моделювання:

а - твердотільна 3D-модель робочого колеса СРТ; б - геометрія розрахункової області.  
Джерело: [10].

Для коректного проведення обчислень розрахунковий домен розділено на статорну та роторну підобласті, між якими передбачено відповідний конструктивний зазор. Межі розрахунку визначені наступним чином: статорна область СРТ обмежена на вході підвідною втулкою (зелена зона на рисунку 1, б), а роторна область - площинами виходу із соплових каналів робочого колеса (червоні зони на рисунку 1б).

Фундаментом даного дослідження є результати чисельного моделювання СРТ, що були отримані та верифіковані для водяної пари як робочого тіла у праці [10]. У роботах викладено детальну інформацію щодо побудови твердотільної 3D-моделі, конфігурації тривимірної розрахункової області досліджуваного зразка, а також наведено параметри розрахункової сітки та наукове обґрунтування вибору моделі турбулентності.

Процес моделювання методами обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics - CFD) традиційно складається з трьох послідовних етапів: препроцесингу, процесингу та постпроцесингу. На стадії препроцесингу визначаються граничні умови та фізичні характеристики області, що відповідають параметрам вхідних даних для моделювання, як це систематизовано в таблиці 1. Етап обчислень у межах даного дослідження реалізовано за допомогою програмного забезпечення ANSYS CFX, а для постобробки та візуалізації результатів використано інструментарій CFD-Post.

Таблиця 1 - Вхідні параметри

Тип параметра	Значення параметра
Тип машини	СРТ каналного типу
Робоча речовина	Природний газ
Опорний тиск	300000 Па (CH <sub>4</sub> )
Модель передачі тепла	Total Energy
Модель турбулентності	SST
Інтерфейс поділу зони контакту	Frozen Rotor
Параметри розв'язувача > Схема адвекції	High Resolution
Параметри розв'язувача > Контроль конвергенції	Auto timescale

Джерело: розроблено авторами.

Відповідно до реальних параметрів робочої речовини на ГРС, у таблиці 2 представлено налаштування граничних умов, що застосовувалися під час проведення чисельних досліджень.

Таблиця 2 - Налаштування граничних умов

Гранична умова	Тип границі	Параметри
Вхід	Inlet	Повний тиск – 2,30133 МПа
		Повна температура - 15 °С
Вихід	Opening	Статичний тиск – 0 Па
Зазор	Opening	Статичний тиск – 0 Па
Стінки статорної та роторної розрахункової області	Wall	No Slip wall

Джерело: розроблено авторами.

Результати чисельного дослідження СРТ каналного типу з робочою речовиною природний газ отримані в діапазоні частоти обертання ротора СРТ від 0 об/хв до 25 000 об/хв включно.

Основні отримані характеристики представлені в таблиці 3.

Таблиця 3 - Основні розраховані характеристики.

Назва характеристики	Частота обертання, об/хв					
	0	5000	10000	15000	20000	25000
Масові витрати на вході, кг/с	1,74147	1,74470	1,76066	1,77424	1,77589	1,77861
Масові витрати на виході, кг/с	1,63585	1,64541	1,66682	1,69808	1,7182	1,75084
Масові витрати через зазор, кг/с	0,09593	0,09443	0,08466	0,06668	0,04863	0,01846
Загальні масові витрати через виходи, кг/с	1,73178	1,73984	1,75148	1,76476	1,76683	1,7693
Відносна похибка, %	0,55	0,28	0,52	0,53	0,51	0,52
Крутний момент, Н·м	133,61	119,35	108,23	98,23	87,49	77,98
Потужність, кВт	0	62,46	113,28	154,22	183,14	204,06
ККД	0	0,152	0,271	0,368	0,437	0,486

Джерело: розроблено авторами.

ККД СРТ розраховувався за такою формулою:

$$\eta_T = \frac{N_T}{N_S} \tag{1}$$

де  $N_T$  – потужність на валу СРТ;

$N_S$  - наявна потужність.

Потужність на валу СРТ:

$$N_T = M_T \cdot \omega_T \tag{2}$$

де  $M_T$  – момент на валу СРТ;

$\omega_T$  – кутова швидкість обертання вала ротора СРТ.

$$\omega_T = \frac{2U}{D} = \frac{\pi \cdot n_T}{30} \tag{3}$$

де  $n$  – частота обертання робочого колеса, об/хв.

Наявна потужність:

$$N_S = G_{\Pi} \cdot h_S \tag{4}$$

де  $G_{\Pi}$  – витрати робочої речовини через сопло СРТ;

$h_S$  - ізоентропна робота розширення 1 кг робочого тіла від параметрів гальмування на вході СРТ до тиску навколишнього середовища.

$$h_S = i_1 - i_{S2} \tag{5}$$

де,  $i_1$  – статична ентальпія на вході, Дж/кг;

$i_{S2}$  – статична ентальпія на виході для ізоентропного процесу розширення, Дж/кг.

На рисунку 2 представлена крива залежності потужності та крутного моменту на валу СРТ від частоти обертання ротора СРТ. Найбільше значення потужності 204,06 кВт досягається при частоті обертання 25000 об/хв. Найбільше значення крутного моменту, так званий пусковий момент, – 133,61 спостерігається при 0 об/хв. Зі збільшенням частоти обертання значення крутного моменту поступово зменшується до значення 77,98 Н·м.

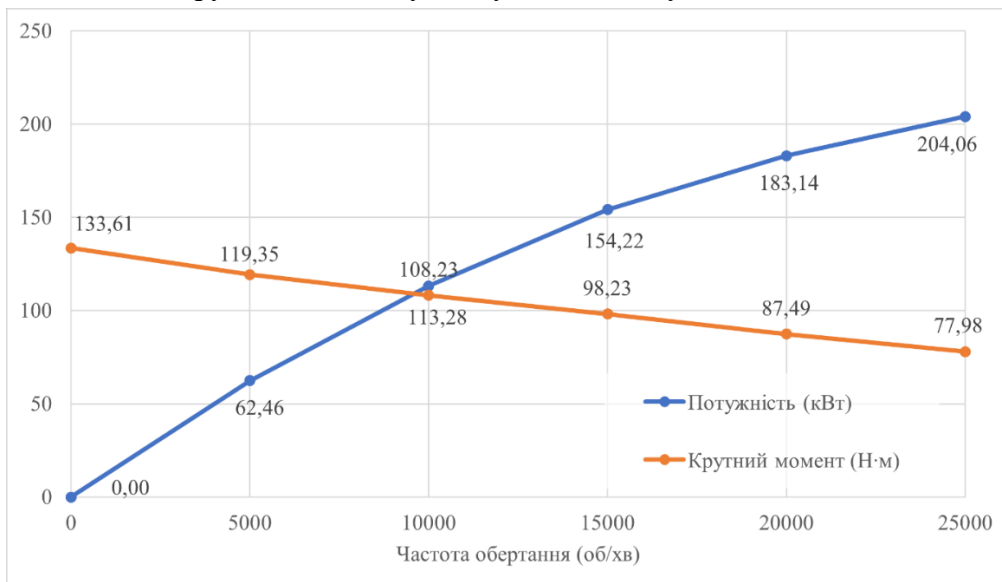


Рис. 2. Графік залежності потужності та крутного моменту на валу СРТ від частоти обертання ротора СРТ.

Джерело: розроблено авторами.

Графіки залежності масових витрат на вході та на виході від частоти обертання ротора СРТ зображені на рисунку 3. Крім того, на рис. 3 показаний графік сумарних масових витрат на виходах: через зазор та на виході з робочого колеса. Максимальна розбіжність між значеннями масової витрати на вході в СРТ і сумарними масовими витратами на виходах при чисельних розрахунках складає 0,52 %, що є відносною похибкою чисельних розрахунків.

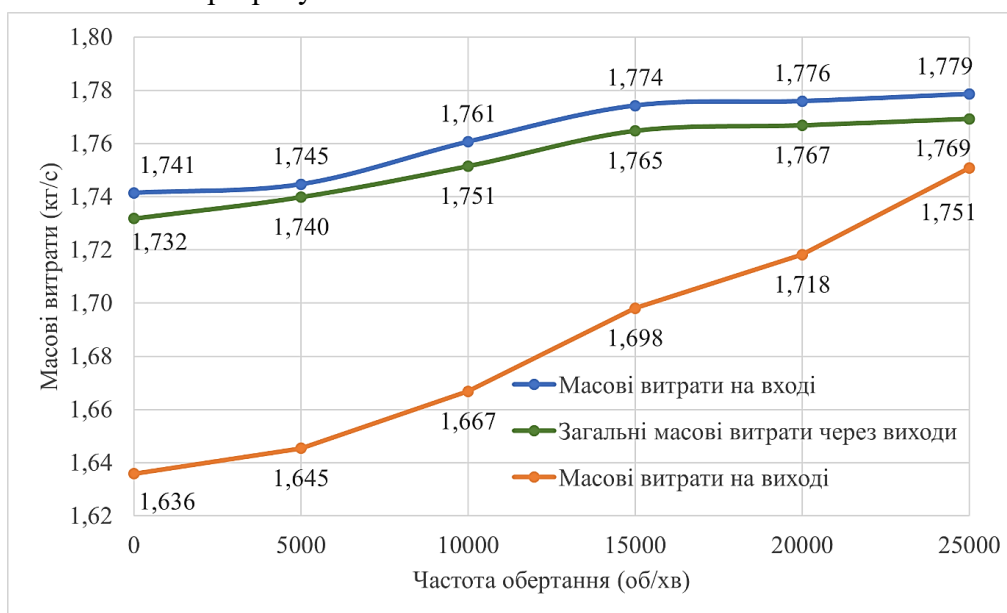


Рис. 3. Графік залежності масових витрат від частоти обертання ротора СРТ.

Джерело: розроблено авторами.

Графік залежності ККД від частоти обертання ротора СРТ зображений на рисунку 4. Максимальне значення ККД досягається при номінальній частоті обертання ротора (2500 об/хв) та складає 0,486. Максимальна частота обертання ротора СРТ обмежена характеристиками міцності робочого колеса.

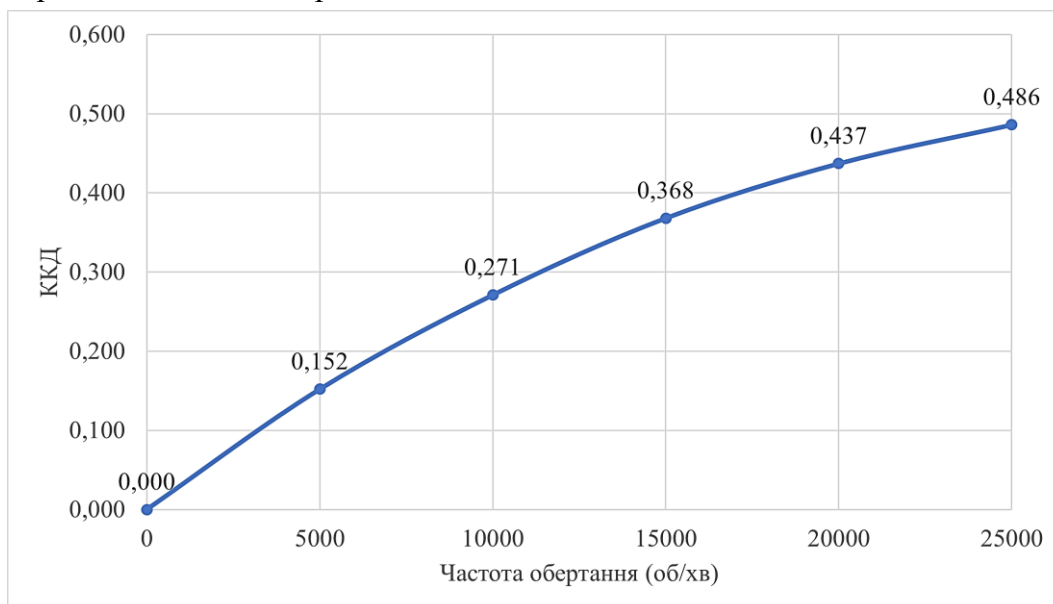


Рис. 4. Графік залежності ККД від частоти обертання ротора СРТ.

Джерело: розроблено авторами.

Детальний аналіз структури потоку в області підвідного сопла (рис. 5, *a-d*, 6, *a-d*), проведений у всьому діапазоні частоти обертання ротора, виявив виражену закономірність: тиск на виході із соплового апарату зменшується, а швидкість витікання робочого тіла зростає при збільшенні частоти обертання ротора.

Під час переміщення робочого тіла каналами від центральної осі до периферії виникає так званий компресорний ефект, зумовлений градієнтом колових швидкостей на різних радіусах. Рівень інтенсивності цього явища безпосередньо визначається кутовою швидкістю обертання робочого колеса турбіни: при збільшенні частоти обертання від 0 до 25 000 об/хв спостерігається формування чіткої зони зниженого тиску на виході з соплового апарату (рис. 5, *a-d*).

Встановлено, що для режимів від 0 до 10000 об/хв (рис. 6, *a-в*) спостерігається стабільне підвищення швидкості потоку, яка, проте, залишається в межах дозвукових значень (число Маха  $M < 1$ ). При частоті обертання ротора 15000 об/хв (рис. 6, *г*) починає формуватися надзвуковий струмінь ( $M > 1$ ), на периферії каналу спостерігаються чітко видалені зони з надзвуковим потоком. При досягненні частоти обертання 20000 та 25 000 об/хв (рис. 6, *г-d*) зафіксовано перехід через критичну межу ( $M > 1$ ), що свідчить про виникнення стабільних надзвукових зон у безпосередній близькості до зрізу підвідного сопла та на вході в осьовий канал роторної частини турбіни. Таке явище призводить до суттєвого зменшення витoku природного газу через конструктивний зазор та зростання витрат через підвідне сопло.

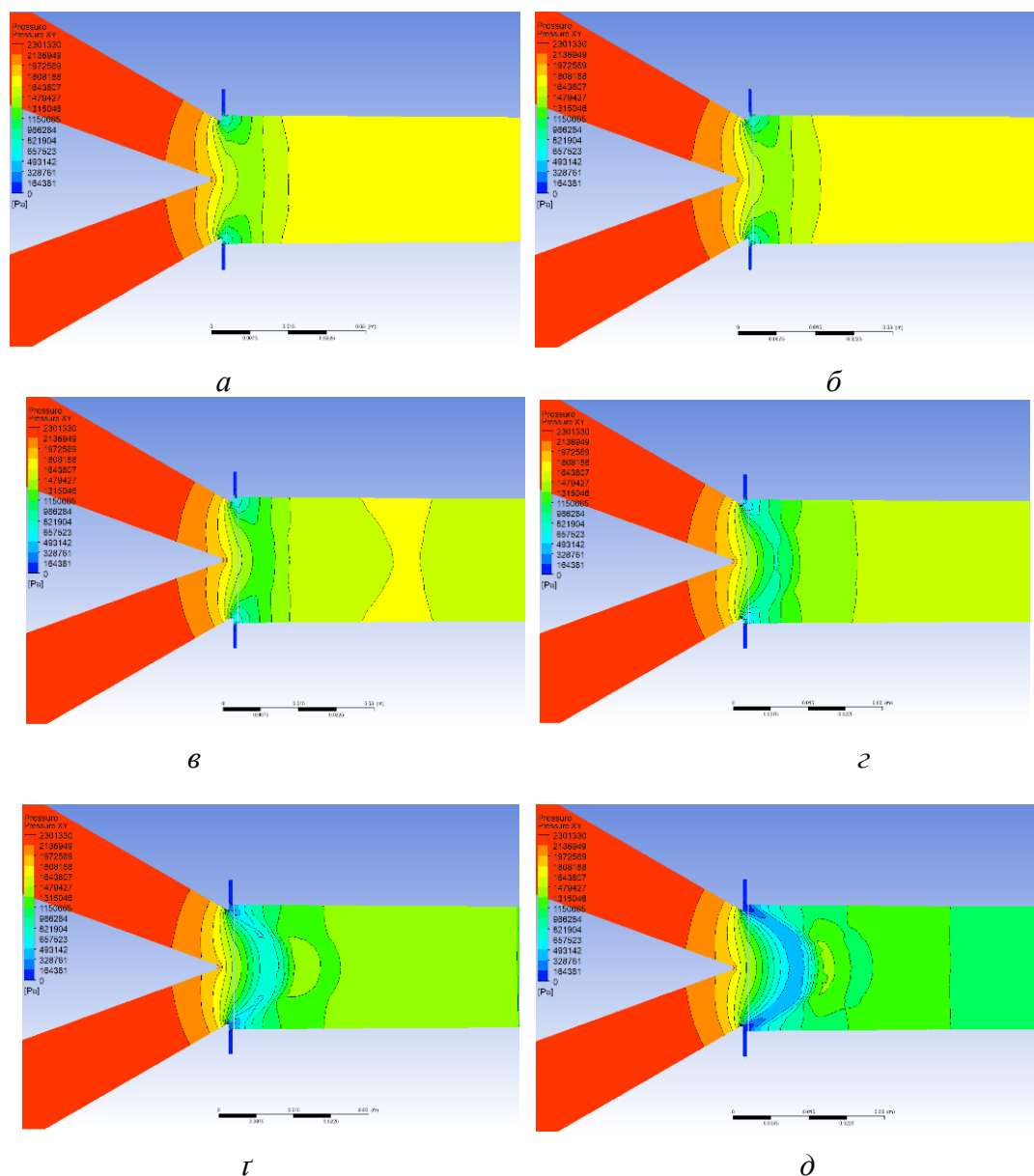


Рис. 5. Залівки зі значенням статичного тиску від частоти обертання ротора СРТ:  
 а –  $n = 0$  об/хв; б –  $n = 5000$  об/хв; в –  $n = 10000$  об/хв; г –  $n = 15000$  об/хв;  
 д –  $n = 20000$  об/хв; е –  $n = 25000$  об/хв

Джерело: розроблено авторами.

Збільшення витрати через тягове сопло пояснюється тим, що на пусковому режимі швидкість звуку не досягається по всьому вихідному перерізу сопла (рис. 6, а). Зі зростанням частоти обертання швидкість потоку в осьовій частині та на зрізі підвідного сопла поступово наближається до швидкості звуку (рис. 6, д), що збільшує масові витрати як через підвідне, так і через тягове сопло.

Крім того, чисельні дані підтверджують, що при збільшенні частоти обертання ротора від 0 до 25 000 об/хв, обсяг втрат через зазор скорочується більш ніж у п'ять разів, що також призводить до збільшення масової витрати газу через тягове сопло. Тому в цьому діапазоні частоти обертання ротора масова витрата через підвідне сопло демонструє приріст на рівні 2,1 %, а через тягове сопло на рівні 6,6 % (рис. 3).

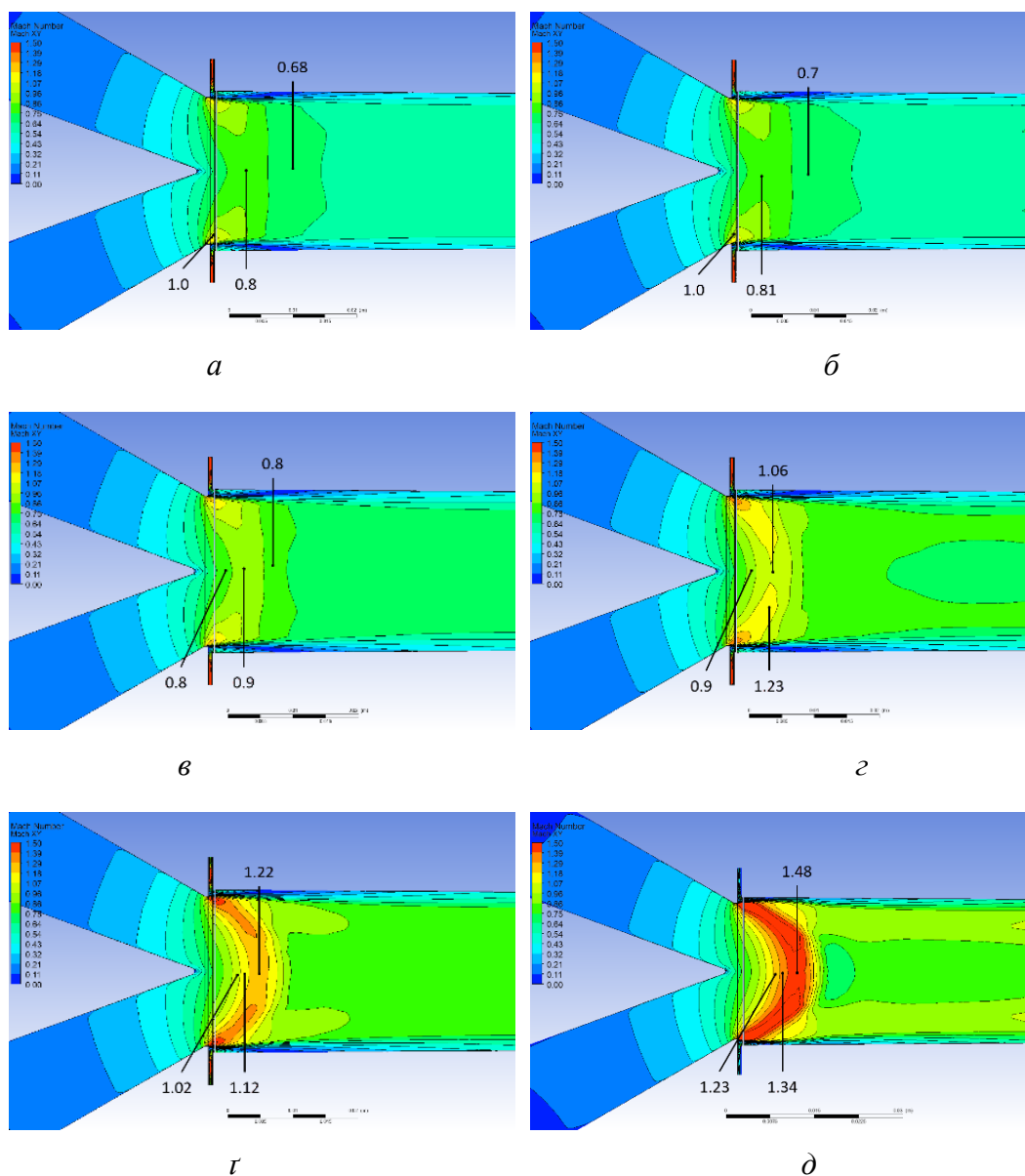


Рис. 6. Заливки зі значенням числа Маха від частоти обертання ротора СРТ:  
 а –  $n=0$  об/хв; б –  $n=5000$  об/хв; в –  $n=10000$  об/хв; г –  $n=15000$  об/хв;  
 д –  $n=20000$  об/хв; е –  $n=25000$  об/хв

Джерело: розроблено авторами.

**Висновки.** У рамках даного дослідження було проведено чисельне дослідження параметрів струминно-реактивної турбіни каналного типу з робочою речовиною природним газом.

У результаті чисельного моделювання отримано залежності потужності та крутного моменту на валу СРТ, а також залежності масових витрат та ККД від частоти обертання ротора СРТ.

Використаний підхід із застосуванням програмного комплексу ANSYS CFX дозволив оцінити основні характеристики та параметри СРТ у діапазоні частот обертання ротора від 0 до 25 000 об/хв. Це підтверджує ефективність чисельних методів моделювання для скорочення витрат на етапі проектування та оптимізації конструкцій турбогенераторів.

Під час проведення чисельних досліджень встановлено, що максимальна потужність агрегату становить 204,06 кВт та максимальний ККД сягає 0,486 при частоті обертання 25 000 об/хв.

Під час чисельного експерименту ідентифіковано компресорний ефект, спричинений градієнтом колових швидкостей. Це явище призводить до зменшення тиску на виході з підвідного сопла та збільшення швидкості витікання до критичних значень і «запирання» вихідного перерізу сопла. При цьому витoki газу через зазор зменшуються більш ніж у 5 разів при зростанні частоти обертання ротора від 0 до 25 000 об/хв. Одночасно зафіксовано приріст масової витрати через підвідне сопло на рівні 2,1 %, а через тягове сопло на рівні 6,6 %.

Результати чисельних досліджень продемонстрували можливість впровадження турбогенераторних установок на базі СРТ каналного типу, як резервні джерела живлення на ГРС або джерела генерації електроенергії для децентралізації енергопостачання та підвищення енергетичної незалежності України.

Стаття виконана в рамках науково-дослідної роботи № 0126U000876, що виконується на замовлення МОН України.

### Список використаних джерел

1. Gellings, C. W. (2009). *The smart grid: Enabling energy efficiency and demand response*. Fairmont Press.
2. International Energy Agency. (2023). *Electricity grids and secure energy transitions*. IEA. <https://www.iea.org/reports/electricity-grids-and-secure-energy-transitions>.
3. Hiremath, R. B., Shikha, S., & Ravindranath, N. H. (2007). Decentralized energy planning; modeling and application – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5), 729–752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.07.005>.
4. Adil, A. M., & Ko, Y. (2016). Socio-technical evolution of decentralized energy systems: A critical review and implications for urban planning and policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1025–1037. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.079>.
5. Кабінет Міністрів України. (2023, 21 квітня). Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року (Розпорядження № 373-р). <https://zakon.rada.gov.ua/go/373-2023-%D1%80>.
6. Кабінет Міністрів України. (2024, 25 червня). Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року (Розпорядження № 587-р). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/587-2024-%D1%80>.
7. European Parliament, & Council of the European Union. (2018). Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the governance of the Energy Union and climate action. *Official Journal of the European Union*, L 328, 1–77. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/1999/oj>.
8. Vanyeyev, S. M., & Getalo, V. V. (2014). Jet-reactive turbine: Experimental researches and calculations by means of softwares. *Applied Mechanics and Materials*, 630, 66–71. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.66>.
9. Vaneev, S. M., Miroshnichenko, D. V., Zhurba, V. O., Znamenshchikov, Y. V., Baga, V. N., & Rodymchenko, T. S. (2019). Stand for investigation of low power expansion turbomachines and units on their basis. *Refrigeration Engineering and Technology*, 55, 15–21. <https://doi.org/10.15673/ret.v55i1.1348>.
10. Meleychuk, O., Vaneev, S., Koroliov, S., Miroshnichenko, O., Pavlenko, I., Ochowiak, M., Włodarczak, S., Krupińska, A., & Kruszelnicka, I. (2025). CFD analysis of steam jet-reactive turbines for sustainable energy: The critical role of boundary conditions. *Journal of Engineering Sciences*, 12(2), F22–F31. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).f3](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).f3).
11. Cleveland, T., & Mokhtab, S. (2014). Energy recovery at pressure regulating stations. *Pipeline & Gas Journal*, 241(6).
12. International Energy Agency. (2024). *Empowering Ukraine through a decentralised electricity system*. IEA. <https://www.iea.org/reports/empowering-ukraine-through-a-decentralised-electricity-system>.

13. Wang, E., & Peng, N. (2023). A review on the preliminary design of axial and radial turbines for small-scale organic Rankine cycle. *Energies*, 16(8), 3423. <https://doi.org/10.3390/en16083423>.
14. Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine. (2018). *Hazopostachannia* [Gas supply] (DBN V.2.5-20:2018). Minregionbud of Ukraine.
15. Гетало, В. В. (2014). Вдосконалення систем редукування тиску шляхом використання струминно-реактивних пневмоагрегатів (Автореф. дис. канд. техн. наук). Сумський державний університет, Суми. <https://essuir.sumdu.edu.ua/items/023601b0-519a-45fc-96b3-bfed1c10100a/full>.
16. Бережний, О. С. (2015). Удосконалення робочих характеристик струминно-реактивного пневмоагрегата на основі уточнення моделі робочого процесу (Автореф. дис. канд. техн. наук). Сумський державний університет, Суми. <https://essuir.sumdu.edu.ua/items/5de62541-7c75-4371-93cd-26ea17395c53/full>.
17. Bondarenko, G. A., Vaneyev, S. M., Baga, V. N., Bashlak, I. A., & Rodimchenko, T. S. (2018). Influence of gas physical properties on labyrinth seals throttling characteristics. *Problemele Energeticii Regionale*, 3(38), 1–12. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2222364>.
18. Sharapov, S., Chekh, O., Husiev, D., Klymenko, V., & Shaparenko, O. (2021). Increasing boiling fluid flowing efficiency from motive nozzles of two-phase ejectors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1180(1), 012059. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1180/1/012059>.

### References

1. Gellings, C. W. (2009). *The smart grid: Enabling energy efficiency and demand response*. Fairmont Press.
2. International Energy Agency. (2023). *Electricity grids and secure energy transitions*. IEA. <https://www.iea.org/reports/electricity-grids-and-secure-energy-transitions>.
3. Hiremath, R. B., Shikha, S., & Ravindranath, N. H. (2007). Decentralized energy planning; modeling and application—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5), 729–752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.07.005>.
4. Adil, A. M., & Ko, Y. (2016). Socio-technical evolution of decentralized energy systems: A critical review and implications for urban planning and policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1025–1037. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.079>.
5. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2023, April 21). *Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2050 roku* [On approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period until 2050] (Order No. 373-r). <https://zakon.rada.gov.ua/go/373-2023-%D1%80>.
6. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2024, June 25). *Pro skhvalennia Natsionalnoho planu z enerhetyky ta klimatu na period do 2030 roku* [On approval of the National Energy and Climate Plan for the period until 2030] (Order No. 587-r). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/587-2024-%D1%80>.
7. Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Governance of the Energy Union and Climate Action. (2018). *Official Journal of the European Union*, L 328, 1–77. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/1999/oj>.
8. Vanyeyev, S. M., & Getalo, V. V. (2014). Jet-reactive turbine: Experimental researches and calculations by means of softwares. *Applied Mechanics and Materials*, 630, 66–71. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.66>.
9. Vanev, S. M., Miroschnichenko, D. V., Zhurba, V. O., Znamenshchikov, Y. V., Baga, V. N., & Rodymchenko, T. S. (2019). Stand for investigation of low power expansion turbomachines and units on their basis. *Refrigeration Engineering and Technology*, 55, 15–21. <https://doi.org/10.15673/ret.v55i1.1348>.
10. Meleychuk, O., Vanev, S., Koroliy, S., Miroschnichenko, O., Pavlenko, I., Ochowiak, M., Włodarczak, S., Krupińska, A., & Kruszelnicka, I. (2025). CFD analysis of steam jet-reactive turbines for sustainable energy: The critical role of boundary conditions. *Journal of Engineering Sciences*, 12(2), F22–F31. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).f3](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).f3).
11. Cleveland, T., & Mokhtab, S. (2014). Energy recovery at pressure regulating stations. *Pipeline & Gas Journal*, 241(6).
12. International Energy Agency. (2024). *Empowering Ukraine through a decentralised electricity system*. IEA. <https://www.iea.org/reports/empowering-ukraine-through-a-decentralised-electricity-system>.
13. Wang, E., & Peng, N. (2023). A review on the preliminary design of axial and radial turbines for small-scale organic Rankine cycle. *Energies*, 16(8), 3423. <https://doi.org/10.3390/en16083423>.
14. Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine. (2018). *Hazopostachannia* [Gas supply] (DBN V.2.5-20:2018). Minregionbud of Ukraine.

15. Hetalo, V. V. (2014). Vdoskonalennia system redukovannia tysku shliakhom vykorystannia strumynno-reaktyvnykh pnevmoahrehativ [Improvement of pressure reduction systems by using jet-reactive pneumatic units] (Abstract of candidate's thesis). Sumy State University, Sumy, Ukraine. <https://essuir.sumdu.edu.ua/items/023601b0-519a-45fc-96b3-bfed1c10100a/full>.

16. Berezhnyi, O. S. (2015). *Udoskonalennia robochykh kharakterystyk strumynno-reaktyvnoho pnevmoahrehata na osnovi utochnennia modeli robochoho protsesu* [Improving the performance characteristics of a jet-reactive pneumatic unit based on refining the workflow model] (Abstract of candidate's thesis). Sumy State University, Sumy, Ukraine. <https://essuir.sumdu.edu.ua/items/5de62541-7c75-4371-93cd-26ea17395c53/full>.

17. Bondarenko, G. A., Vaneyev, S. M., Baga, V. N., Bashlak, I. A., & Rodimchenko, T. S. (2018). Influence of gas physical properties on labyrinth seals throttling characteristics. *Problemele Energeticii Regionale*, 3(38), 1–12. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2222364>.

18. Sharapov, S., Chekh, O., Husiev, D., Klymenko, V., & Shaparenko, O. (2021). Increasing boiling fluid flowing efficiency from motive nozzles of two-phase ejectors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1180(1), 012059. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1180/1/012059>.

Дата першого надходження статті до видання: 28.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

UDC 621.438.2

**Serhii Vaneev<sup>1</sup>, Oleksandr Meleichuk<sup>2</sup>, Olha Miroshnychenko<sup>3</sup>,  
Volodymyr Sitalo<sup>4</sup>, Oleh Chekh<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>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](mailto:s.vaneev@kttf.sumdu.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8205-0209> SCOPUS Author ID: [56168752900](https://orcid.org/0000-0002-8205-0209)

<sup>2</sup>Postgraduate student of the Department of Technical Thermophysics  
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: [ol.melechuk@kttf.sumdu.edu.ua](mailto:ol.melechuk@kttf.sumdu.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2637-0106> SCOPUS Author ID: [60015632600](https://orcid.org/0009-0003-2637-0106)

<sup>3</sup>Postgraduate student of the Department of Technical Thermophysics  
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: [o.miroshnychenko@kttf.sumdu.edu.ua](mailto:o.miroshnychenko@kttf.sumdu.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7131-8575>  
SCOPUS Author ID: [57745606800](https://orcid.org/0000-0001-7131-8575)

<sup>4</sup>Assistant of the Department of Technical Thermophysics  
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: [v.sitalo@kttf.sumdu.edu.ua](mailto:v.sitalo@kttf.sumdu.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0610-3320> ResearcherID: [LRU-5977-2024](https://orcid.org/0009-0005-0610-3320)

<sup>5</sup>Postgraduate student of the Department of Technical Thermophysics  
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: [o.chekh@kttf.sumdu.edu.ua](mailto:o.chekh@kttf.sumdu.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2500-481X> SCOPUS Author ID: [57209244933](https://orcid.org/0000-0003-2500-481X)

## CFD ANALYSIS OF TURBOGENERATOR BASED ON A CHANNEL-TYPE JET-REACTION TURBINE WORKING ON NATURAL GAS (CH<sub>4</sub>)

The global community, and Ukraine in particular, is showing significant interest in transforming and modernising energy systems to improve efficiency, reliability, and environmental sustainability. A key role in this transformation is played by the decentralisation of energy production and the integration of renewable and/or innovative energy sources into industrial and municipal enterprises. A potential solution lies in the implementation of turbine equipment based on jet-reaction turbines (JRT) at gas distribution stations. However, this type of installation is relatively new and requires further research using various working fluids.

The aim of the work is to conduct numerical studies using Computational Fluid Dynamics (CFD) methods and to analyse the parameters obtained for a channel-type JRT using natural gas as the working fluid. Computational modelling of gas-dynamic processes was implemented in the ANSYS CFX software and computing complex for a rotation speed range from 0 to 25,000 rpm. During the study, the dependencies of power, torque, and efficiency on rotor rotation speed were determined. It was established that the maximum power of the installation reaches 204.06 kW, and the highest efficiency is 0.486 at a rotor speed of 25,000 rpm. Analysis of the Mach number distribution confirmed the occurrence of stable supersonic zones in the inlet nozzle and at the inlet to the axial channel at rotor speeds of 20,000 and 25,000 rpm. The results of the work scientifically justify the feasibility of integrating utilisation JRTs into the reduction units of gas distribution stations, gas control points at enterprises, etc. This not only allows critical infrastructure facilities to meet their own energy needs, but also contributes to the overall decentralisation of energy networks and to the strengthening of the state's energy independence, which aligns with sustainable development goals.

**Keywords:** *energy efficiency; power generation; numerical calculations; ANSYS CFX; energy systems; resource efficiency; sustainable energy systems.*

*Fig.: 6. References: 18.*