

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-16>

УДК 621.694.2

С. О. Шарапов¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-8433-8580

А. Р. Вербицький¹, аспірант

ORCID: 0009-0002-7552-0142

С. О. Євтушенко¹, інженер

ORCID: 0000-0003-4536-4046

С. О. Хованський¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2435-7787

О. С. Ковязін², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3027-872X

¹ Сумський державний університет² Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: verbaanton1994@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧИХ АГРЕГАТІВ НА БАЗІ РІДИННО-ПАРОВИХ СТРУМИННИХ АПАРАТІВ

Анотація. У статті описано мету та завдання експериментальних досліджень теплоелектрогенеруючих агрегатів на базі рідинно-парових струминних апаратів. Для визначення завдань експериментальних досліджень було проведено критичний аналіз сучасного стану досліджень схемних рішень когенераційних систем для генерації теплової та електричної енергії, серед яких установки на базі міні-ТЕЦ та на базі теплових насосів. Отже, необхідно провести експериментальні дослідження запропонованого авторами теплоелектрогенеруючого агрегату на базі рідинно-парового струминного апарату, які б підтвердили проведені числові розрахунки та визначили режимні параметри, за яких його ефективність буде максимальною. У статті наведено схему та опис експериментальної установки для досліджень теплоелектрогенеруючих агрегатів на базі рідинно-парових струминних апаратів. Програма та методика містять діапазон зміни режимних та геометричних параметрів при проведенні експериментальних досліджень. Запропоновано схему підключення блоку конденсаторів до електрогенератора та наведено опис запропонованих контрольно-вимірювальних приладів в характерних точках циклах.

Ключові слова: рідинно-паровий струминний апарат, виробництво тепла та електроенергії, експериментальні дослідження, геометричні параметри, ефективність, доступна та чиста енергія, сталий розвиток міст та громад.

Постановка проблеми. Створення високоефективних теплоелектрогенеруючих агрегатів (ТЕГА) є пріоритетним напрямом розвитку української енергетики в даний час [1]. Існуючі схемні рішення мають ряд суттєвих недоліків, що стримують їх впровадження в системи тепло- та електрозабезпечення як промислових, так і комунальних споживачів [2].

Одним зі шляхів вирішення проблеми створення високоефективних когенераційних установок є створення теплоелектрогенеруючих агрегатів на базі рідинно-парових струминних апаратів (РПСА). Особливістю його робочого процесу є те, що генерація робочої пари відбувається в середині сопла активного потоку, що дає змогу регулювати режимні параметри всього циклу агрегату на його базі та досягати необхідних термодинамічних та витратних параметрів мережевої води, яка циркулює по системі опалення та гарячого водопостачання. Підтримання ступеня перевиробництва пари в змішаному потоці на виході з РПСА дає змогу впливати на кількість електроенергії, що буде вироблятися в ТЕГА [3].

Саме ці параметри впливають на ефективність робочого процесу РПСА та потребують детального числового розрахунку з подальшим експериментальним дослідженням, що визначає доцільність застосування ТЕГА в системах тепло- та електрогенерації.



Аналіз останніх досліджень. Перші спроби створення перших децентралізованих систем, які б забезпечували споживачів тепловою та електричною енергією відомі ще з 50-х років ХХ ст. Однак вони в своєму складі мали низькоефективність турбінні агрегати, що гальмувало їх розвиток та впровадження [4, 5].

Істотним кроком на шляху підвищення ефективності когенераційних установок у вигляді міні-ТЕЦ стало впровадження пароструминних агрегатів. Автори робіт [6–8] досліджують схемні рішення міні-ТЕЦ на базі таких агрегатів та наводять результати числових та експериментальних досліджень їх ефективності. Поруч з такими їх перевагами як відсутність рухомих вузлів, ущільнюючих елементів та клапанних систем, які є основними недоліками газо- та паротурбінних установок, вони все ж не є високоефективними. Це пов'язано з особливостями їх робочого процесу [9, 10].

Поява теплонасосних систем дала змогу по-новому поглянути на питання теплозабезпечення окремих споживачів теплом та гарячим водопостачанням [11]. В роботах [12–14] описані схеми теплонасосних систем в залежності від потреб споживачів. Так, досить актуальним є питання регулювання температури мережевої води в подаючому та зворотному трубопроводах, що є запорукою створення комфортних умов в приміщенні, в якому знаходиться споживач.

В роботах [15, 16] наведено результати числових розрахунків теплонасосних систем провідних світових фірм та діапазони їх робочих параметрів, за яких ефективність таких систем буде найвища.

Однак, в результаті проведеного вище аналізу можна зробити висновки, що в цих роботах не врахована ефективність основного устаткування, що входить до складу як міні-ТЕЦ, так і теплонасосних установок. Наприклад, автори цих робіт лише оцінювали температурні та режимні параметри в опалюваних приміщеннях.

Автори даної статті пропонують замінити неефективні пароструминні насоси, що входять до складу міні-ТЕЦ та компресори теплонасосних систем на РПСА [17, 18]. Це дасть змогу підвищити ефективність самого циклу перетворення енергії, яка буде використовуватися для підігрівання води для систем опалення та гарячого водопостачання, а також регулювати кількість пари, яка буде надходити в турбогенераторний блок для вироблення електроенергії. Для реалізації такого підходу розроблено схемне рішення комбінованого ТЕГА, що базується на міні-ТЕЦ, запропонованої в роботах [19, 20].

Для оцінювання доцільності впровадження ТЕГА на базі РПСА автори даної статті вважають за доцільне створити експериментальний стенд для проведення досліджень такого агрегату, що дозволить визначити діапазон робочих параметрів, в якому ефективність ТЕГА буде максимальною.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою даного дослідження є визначення оптимальних режимних параметрів контурів генерації тепла та електроенергії для забезпечення максимальної ефективності агрегату.

Об'єктом дослідження є термодинамічні та режимні параметри робочого струменя в циклі ТЕГА.

Предметом дослідження є показники ефективності системи тепло- та електропостачання на базі ТЕГА.

Для досягнення поставленої мети, були сформульовані та потребують вирішення наступні завдання:

1. Створення експериментального стенду ТЕГА на базі рідинно-парового струминного апарату.
2. Експериментальне дослідження термодинамічних та режимних параметрів в контурі теплопостачання ТЕГА на базі рідинно-парового струминного апарату.

3. Експериментальне дослідження термодинамічних та режимних параметрів в контурі електрогенерації ТЕГА.

4. Аналіз факторів, які впливають на показники ефективності роботи ТЕГА на базі рідинно-парового струминного апарату з подальшою кореляцією математичної моделі.

5. Перевірка достовірності отриманих результатів шляхом порівняння результатів розрахунків та експериментальних досліджень.

Основна частина. В Сумському державному університеті був створений експериментальний стенд для дослідження теплоелектрогенеруючого агрегату на базі рідинно-парового струминного апарату та парової турбіни з можливістю зміни геометрії проточної частини шляхом заміни сопел і камер змішування різної геометричної форми профілю. Даний стенд є удосконаленим варіантом установки, створеної авторами та описаної в роботі [21]. Стенд складається безпосередньо з самого РПСА 1, парової турбіни 2, теплообмінника 3, сепаратора 28, нагрівальної ємності 4, у якій нагрівається робоча рідина у вигляді проточної води, системи трубопроводів, запірної арматури та системи фіксації робочих параметрів у вигляді датчиків, терморегуляторів, манометрів та вакуумметрів (рис. 1). Фотографія експериментального стенду подана на рис. 2.

Спочатку робоча рідина нагрівається до необхідного тиску та температури за допомогою системи електричних водяних ТЕНів 15 у нагрівальній ємності 4. Параметри даного процесу контролюються та регулюються за допомогою терморегулятора з датчиками температури на базі термопари 12 та манометра для вимірювання тиску 10. На випадок виникнення позаштатної роботи терморегулятора та підвищення критичної температури та тиску був встановлений запобіжний клапан для аварійного скидання робочої рідини 5.

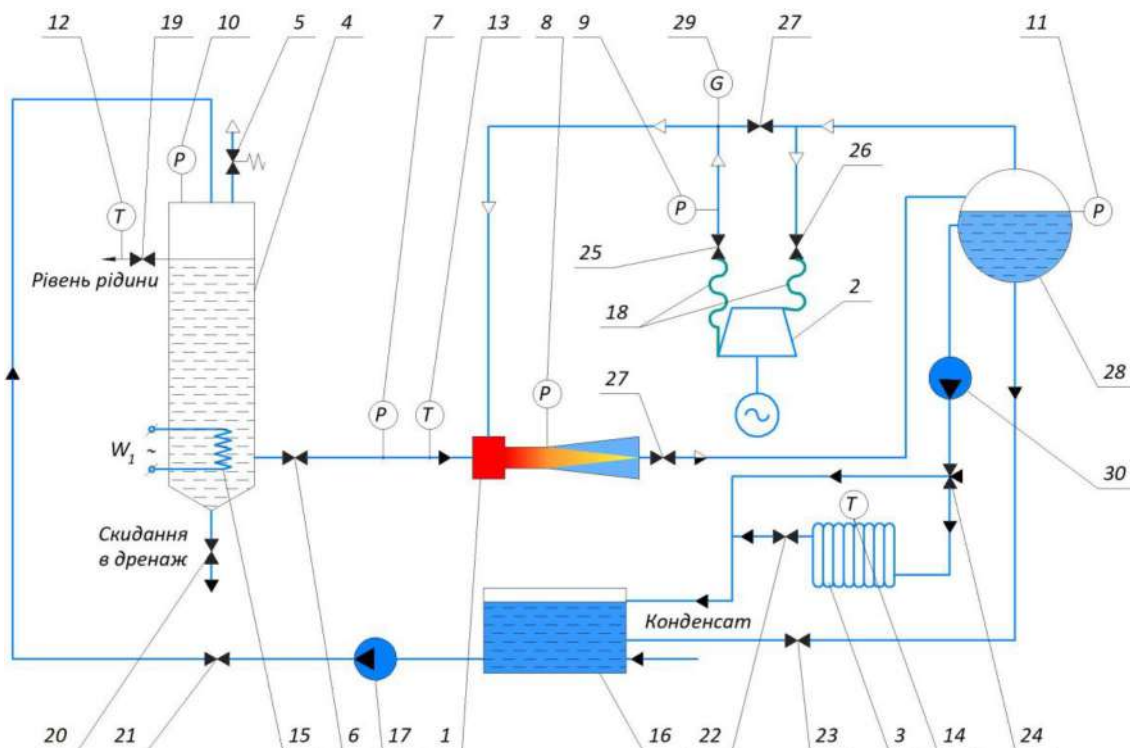


Рис. 1. Принципова схема експериментального стенду теплоелектрогенеруючого агрегату:

1 – РПСА; 2 – турбогенератор; 3 – радіаторний теплообмінник; 4 – нагрівальна ємність; 5 – запобіжний клапан; 6 – регулювальний вентиль; 7, 8, 9, 10, 11 – манометри та вакуумметри; 12, 13, 14 – датчики температури; 15 – блок ТЕНів; 16 – ємність для води; 17 – насос подачі мережевої води; 18 – гнучкі термостійкі рукава; 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 – регулюючі вентилі; 28 – сепаратор; 29 – лічильник витрати води та пари, 30 – циркуляційний насос



Рис. 2. Фотографія експериментального стенду теплоелектрогенеруючого агрегату на базі рідинно-парового струминного апарату

Потім робоча рідина через трубопровід під тиском подається з нагрівальної ємності 4 до входу в сопло активного потоку РПСА 1. В надзвуковій частині сопла активного потоку відбувається процес закипання недогрітої до насичення рідини, в результаті чого створюється сила, що ежектує пасивний потік. В камері змішування РПСА відбувається змішування активного і пасивного потоків в єдиний двофазний потік заданої парокрапельної структури з певним значенням ступеня перевиробництва пари. Він виходить з дифузору РПСА і потрапляє до сепаратора 28, де розділяється на парову та рідку фази.

Турбогенератор 2 монтується між виходом з парової лінії сепаратора 28 та входом пасивного потоку в РПСА, в результаті парова фаза розширюється в турбіні до параметрів, що відповідають її стану на вході в приймальну камеру РПСА. Підключення парової турбіни до лінії парової фази здійснюється за допомогою гнучких термостійких рукавів 18 через вентилі 25 і 26. В свою чергу, при роботі стенду в режимі генерації електроенергії необхідно перекрити вентиль 27, задля уникнення «байпасної лінії», яка проходить в обхід турбогенератора.

Значення витрати робочої пари через турбіну вимірюються за допомогою лічильника об'ємної витрати 29, а показники сили струму, напруги та потужності, яка створюється в турбогенераторі вимірюються за допомогою енергометра.

Надлишок парової фази може виводитися з сепаратора у навколишнє середовище. В свою чергу, рідка фаза з сепаратора спрямовується до побутового теплообмінника 3 та циркулює в ньому як теплоносій в системі теплопостачання, значення температури якого вимірюються за допомогою датчика температури 14.

Сопла активного потоку та камери змішування різної геометричної форми впливають на параметри пасивного потоку та змішаного потоків, що в свою чергу зумовлює зміну частоти обертів ротора турбогенератора, значення температури рідкої фази в побутовому теплообміннику та енергоефективність всього теплоелектрогенеруючого агрегату. Саме тому в даному стенді передбачено можливість додаткового регулювання робочих параметрів РПСА шляхом зміни геометричної форми проточної частини [22].

Турбогенератор для даного теплоелектрогенеруючого агрегату складається з парової турбіни, трифазного асинхронного електродвигуна, конденсаторного блоку, блоку електровимірювальних пристроїв та «споживача» (рис. 3). Схема підключення турбогенератора наведена на рис. 4.



Рис. 3. Фото турбогенератора з глушником

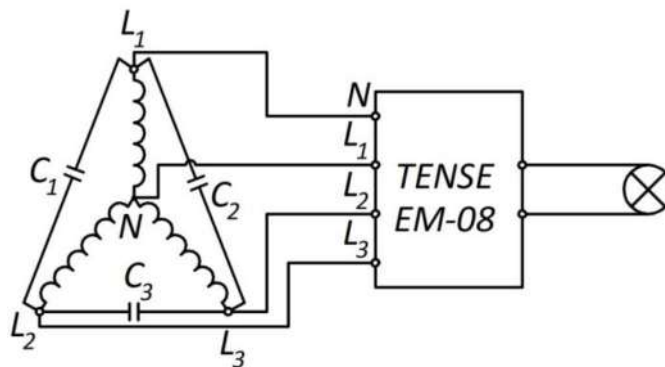


Рис. 4. Електрична схема підключення блоку конденсаторів до генератора, мультиенергометра та «споживача» (лампи)

Парова фаза з сепаратора 28, потрапляючи на лопатки колеса парової турбіни, яке, в свою чергу, з'єднане з валом ротору асинхронного електродвигуна, обертає його. В цьому вузлі відбувається перетворення механічної енергії в електрорушійну силу за рахунок збудження магнітного поля реактивною потужністю. Це забезпечується блоком з трьох конденсаторів, які з'єднані між собою у схему «зіркою» або «трикутником». Створення реактивної складової електричного струму за допомогою даного блоку забезпечує індуктивність обмоток двигуна, що надає змогу самостійного підтримування збудження магнітного поля. Дана схема дозволяє

забезпечувати симетрію фаз з мінімальним прекосом напруги. Водночас робота даної схеми конденсаторного блоку має обмеження у частоті обертання ротору, оскільки на генерацію електроенергії також впливає величина ємності конденсаторів та магнітна характеристика матеріалу ротору.

Для моніторингу значень температури з датчиків на базі термопари під час проведення експерименту використовується терморегулятор REX-C100 FK04 (рис. 5).



Рис. 5. Терморегулятор REX-C100FK04

Це надійний та сучасний прилад для керування температурою, укомплектований заводським фірмовим PID-монітором температури та твердотільним реле SSR-40 DA-H. Температурний діапазон даного приладу від 0 до 400 °С, а відносна похибка вимірювання складає всього 0,5 % [23].

Для вимірювання температури при проведенні експериментальних досліджень використовуються високоточні датчики на базі термопари. Термопара діє за принципом впливу температури на провідник, через що його опір і напруга змінюється. За допомогою іншого додаткового гнучкого проводу, який підключається до гарячого кінця термодатчика, вимірюється напруга.

Даний гнучкий провід надає власну напругу, що відрізняється від поточної. Ці два дроти виготовлені з двох різних матеріалів і завдяки цьому вони генерують різну напругу. Виготовлений даний датчик з хром-алюмінію, має температурний діапазон від 0 до 400 °С, з внутрішньою ізоляцією скловолокном, зовнішнім екрануванням, вилкою 3.5 мм, та монтажним гвинтом з різьбою М6 (рис. 6).



Рис. 6. Датчик температури на базі термопари

Для вимірювання витрати потоку робочого середовища в даному експериментальному використовується ультразвуковий лічильник води для закритих систем SHARKY 775 (рис. 7). Даний витратомір є ультразвуковим. Сам лічильник обладнаний архівом зберігання даних.



Рис. 7. Ультразвуковий лічильник води для закритих систем SHARKY 775

Технічні характеристики ультразвукового лічильника води для закритих систем SHARKY 775 наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики ультразвукового лічильника води для закритих систем SHARKY 775a [24]

Номінальна витрата	м ³ /год	1,5	2,5	6	10
Номінальний діаметр	мм	20	20	32	40
Монтажна довжина	мм	130	190	260	300
Поріг чутливості	л/год	2,5	4	7	20
Мінімальна витрата	л/год	6	10	24	40 ³ /100
Максимальна витрата	м ³ /год	3	5	12	20
Робочий тиск	бар	16	16	16	16
Витрата тиску	мбар	75	100	128	95
Діапазон температури	°C	5–105	5–105	5–105	5–105

Для вимірювання значень сили струму, напруги, частоти, потужності по кожній фазі генеруючого струму в турбогенераторі використовується цифровий мультиметр TENSE EM-08 (рис. 8).



Рис. 8. Електронний мультиенергометр TENSE EM-08



Даний енергометр має світлодіодний дисплей для показників всіх необхідних нам параметрів, та підтримує схеми трифазної мережі з або без нейтралі. Також надає нам можливість вимірювання реактивної потужності, індуктивної та ємнісної за фазами або в сумі, повної потужності по фазах та сумарно, коефіцієнт потужності та $\cos \varphi$ по кожній фазі та в сумі. Також має можливість вимірювання фазної та лінійної напруги між фазами або між фазою та нейтраллю, відображаючи при цьому мінімум, максимум та середні значення. Також струм по кожній фазі та в сумі, активну енергію споживання і експорт, реактивну енергію (як індуктивну, так і ємнісну) та частоту мережі з перекосом фаз.

Технічні характеристики мультиенергометра TENSE EM-08 [25]

- Робоча напруга: 85–260;
- Частота мережі: 50 / 60 Гц;
- Потужність: Менше 10 ВА;
- Робоча температура: від -20 °C до $+55$ °C;
- Діапазон вимірювання фазної напруги (L–N): 5 – 300В AC RMS;
- Діапазон вимірювання лінійної напруги (L–L): 10 – 520В AC RMS;
- Діапазон вимірювання струму: від 10 мА до 5.5 А;
- Діапазон вимірювання частоти: 45–65 Гц;
- Похибка вимірювання напруги та струму: ± 0.5 %;
- Похибка вимірювання активної потужності: ± 1 %;
- Похибка вимірювання реактивної потужності: ± 2 %;
- Похибка вимірювання частоти: ± 0.2 %;
- Похибка вимірювання активної енергії: ± 1 %;
- Підтримувані типи підключення: 3P3W, 3P4;
- Коефіцієнт трансформації струму: від 1 до 1200.

Для вимірювання тиску при проведенні експериментальних досліджень використовуються високоточні зразкові манометри та вакуумметри ДСТУ 7224:2011.

Значення температури робочої рідини активного потоку на вході в РПСА вимірюються за допомогою термодатчика, який знаходиться безпосередньо у рухомому потоці. Показники абсолютного тиску робочої рідини у витратному перерізі сопла активного потоку вимірюються датчиком тиску. Температура робочої рідини пасивного потоку визначається аналогічно температурі робочої рідини активного потоку на вході в РПСА.

Оброблення результатів експерименту здійснювалося за наступними формулами.

Абсолютний тиск робочої рідини активного потоку на вході до РПСА, Па:

$$p_{01} = p_{атм} + 9,861 \cdot 10^4 \cdot p_{ман01}, \quad (1)$$

де $p_{атм}$ – барометричний тиск, Па,

$p_{ман01}$ – показання манометра, розміщеного на вході до апарату,

$$p_{атм} = 133,32 \cdot B, \quad (2)$$

де A – показання датчику атмосферного тиску, мм рт. ст.

Масова витрата робочої рідини, що проходить через сопло активного потоку, кг/с:

$$\dot{m}_a = \frac{w_f \cdot F_f}{v'_0}. \quad (3)$$

Середня швидкість робочої рідини активного потоку у витратному перерізі сопла, м/с:

$$w_f = \mu_0 \cdot v_f \cdot \sqrt{2 \cdot (P_0 - P_{s0}) \cdot v'_0 \cdot 10^5}, \quad (4)$$



де μ_0 – коефіцієнт витрати вихідної ділянки сопла активного потоку,
 ν_f – показник метастабільності витрати,
 P_{s0} – тиск робочої рідини на вході в сопло активного потоку в стані насиченої рідини, Па,
 ν'_0 – питомий об'єм робочої рідини на вході в сопло активного потоку в стані насиченої рідини, м³/кг.

Площа сопла активного потоку у витратному перерізі, м²:

$$F_f = 0,7854 \cdot d_f^2 \cdot 10^{-6}, \quad (5)$$

де d_f – діаметр сопла у витратному перерізі, мм.

Абсолютний тиск робочої рідини пасивного потоку в приймальній камері, Па:

$$p_{02} = p_{атм} - p_{вак02}, \quad (6)$$

де $p_{вак02}$ – показники датчика, розташованого на вході до приймальної камери РПСА, Па.

Масова витрата робочої рідини пасивного потоку, кг/с:

$$\dot{m}_{02} = \frac{\dot{V}_{02}}{\rho_{02}}, \quad (7)$$

де \dot{V}_{02} – об'ємна витрата робочої рідини пасивного потоку,

ρ_{02} – густина робочої рідини пасивного потоку,

Густина робочої рідини пасивного потоку,

$$\rho_{02} = \frac{p_{02}}{R \cdot T_{02}}, \quad (8)$$

де R – газова стала речовини пасивного потоку,

T_{02} – температура пасивного потоку на вході до приймальної камери.

Тиск змішаного потоку на виході з камери змішування, Па:

$$p_{03} = p_{атм} - p_{вак03}, \quad (9)$$

де $p_{вак03}$ – показники датчика розміщеного у перерізі на виході з камери змішування РПСА.

Тиск змішаного потоку на виході з РПСА, Па:

$$p_4 = p_{атм} + 9,861 \cdot 10^4 \cdot p_{ман4}, \quad (10)$$

де $p_{ман4}$ – показники датчика, розміщеного на виході з РПСА.

Ступінь підвищення тиску пасивного потоку

$$\pi_n = \frac{p_4}{p_{02}}. \quad (11)$$

Коефіцієнт інжекції

$$u = \frac{\dot{m}_{02}}{\dot{m}_a}, \quad (12)$$

де \dot{m}_a – масова витрата активного потоку.

Потужність турбіни, кВт:

$$N_T = \dot{m}_{02} \cdot (h'_4 - h_{02}), \quad (13)$$

де h'_4 – ентальпія парової фази на виході з сепаратора, Дж/кг,

h_{02} – ентальпія пари на виході з турбіни, Дж/кг.

Ексергетична ефективність РПСА

$$\varepsilon_{ex\text{ РПСА}} = u \cdot \frac{\Psi_4 \cdot [(h_4'' - h_{02}) - T_{o.c.} \cdot (s_4'' - s_{02})]}{\tilde{c}_{pid} \cdot \left[(T_{01} - T_4') - T_{o.c.} \cdot \ln \frac{T_{01}}{T_4'} \right] + \frac{p_{01} - p_4'}{\rho_{pid}}}, \quad (14)$$

де Ψ_4 – ступінь перевиробництва пари,

$T_{o.c.}$ – температура оточуючого середовища, К,

s_4'' – ентропія парової фази на виході з сепаратора, Дж/(кг · К),

s_{02} – ентропія пари на виході з турбіни, Дж/(кг · К),

c_{pid} – питома теплоємність за середньої температури рідкої фази, Дж/(кг · К)

T_{01} – температура робочої рідини активного потоку на вході до РПСА, К,

T_4' – температура рідкої фази на виході з сепаратора, К,

p_{01} – тиск робочої рідини активного потоку на вході до РПСА, Па,

p_4' – тиск рідкої фази на виході з сепаратора, Па,

ρ_{pid} – густина рідкої фази за середнього тиску p_{01} і p_4' .

Ексергетична ефективність теплоелектрогенеруючого агрегату на базі РПСА:

$$\varepsilon_{ex\text{ ТЕГА}} = \frac{\dot{m}_n \cdot [(h_4'' - h_{02}) - T_{o.c.} \cdot (s_4'' - s_{02})] + N_T}{G_T \cdot \left[c_T \cdot \left\{ (T_{1T} - T_{2T}) - T_{o.c.} \cdot \ln \frac{T_{1T}}{T_{2T}} \right\} + \frac{p_{1T} - p_{2T}}{\rho_T} \right] + N_H}, \quad (15)$$

де c_T – питома теплоємність за середньої температури теплоносія, Дж/(кг · К)

T_{1T} – температура теплоносія на вході до теплообмінника, К,

T_{2T} – температура теплоносія на виході з теплообмінника, К.

Для оцінювання достовірності даних, отриманих в результаті прямих вимірювань, необхідно враховувати значення похибок величин вимірювання температури та тиску робочої рідини активного та пасивного потоків на вході і на виході з РПСА та об'ємної витрати робочої рідини, яка подається до приймальної камери РПСА. Величини, що є результатом непрямих вимірювань визначаються з функціональних залежностей, які враховують результати прямих вимірювань включно з їх похибками, а для виключення випадкових похибок буде виконуватись не одне, а серія вимірювань.

Висновки. В результаті експериментальних досліджень теплоелектрогенеруючого агрегату на базі рідинно-парового струминного апарату можна отримати результати, які дозволяють визначити оптимальні режими роботи цього агрегату, за яких його ефективність буде максимальною. В результаті експериментальних досліджень буде одержано термодинамічні параметри в контурах тепло- та електрогенерації, що дасть можливість вибирати оптимальні параметри турбогенератора та елементів системи тепло- та гарячого водопостачання. Також експериментальні дослідження дозволять порівняти результати теоретичних розрахунків та, за необхідності, провести кореляцію математичної моделі. Похибка прямих та непрямих вимірювань не перевищує 5 % при довірчій ймовірності 0,95, що є допустимим для технічних експериментів.

Список використаних джерел

1. Aghaei A. T., Saray R. K. Optimization of a combined cooling, heating, and power (CCHP) system with a gas turbine prime mover: A case study in the dairy industry. *Energy*. 2021. Vol. 229. P. 120788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120788>

2. Костенко, Г., Згуровець, О. (2023). Сучасний стан та перспективи розвитку відновлюваної розподіленої генерації в Україні. Системні дослідження в енергетиці, 2(73), 4–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.004>



3. Systems, Decision and Control in Energy I / ed. by V. Babak, V. Isaienko, A. Zaporozhets. Cham : Springer International Publishing, 2020. URL: DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2>
4. Bobrov, Y. (2021). The trends of Ukraine energy strategy development in the context of energy security. *Economics, Finance and Management Review*, 3(7), 21–32. DOI: <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2021-3-21>
5. Бобров Є. Економічні виклики розвитку розподіленої генерації в Україні в умовах енергетичної трансформації у 2025 році / Є. Бобров. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2025. № 2(78). С. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2025-78-23-34>
6. Сохацька О. М. Розподілена генерація як шлях до створення конкурентного біржового ринку електроенергії: завдання для повоєнної відбудови України. *Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference. Varna, Bulgaria*. 2022. Pp. URL: <https://isg-konf.com/implementation-of-modern-technologies-in-science/>
7. Теліженко О., Шашков С. Напрямки діяльності з агрегації в електроенергетиці на основі розвитку розподіленої генерації. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 4(87), 2023. 299–304. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.36>
8. Kostenko G., Zgurovets O. Current State and Prospects for Development of Renewable Distributed Generation in Ukraine. *System Research in Energy*, (2 (73)), 2023. 4–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.004>
9. Yang X, Li Y, Luo Z, Chan PW (2017) The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. *Int J Climatol* 37(2), 890–904. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4747>
10. Steam system optimization of an industrial heat and power plant / R. Filkoski et al. *Thermal Science*. 2020. Vol. 24, no. 6 Part A. P. 3649–3662. DOI: <https://doi.org/10.2298/tsci200403284f>
11. Horskyi V., Maliarenko O. Use of Improved Methodology to Determine the Total Power Efficiency of Energy Products in Their Co-production at Combined Heat and Power Plant. *Systems, Decision and Control in Energy IV*. Cham, 2023. P. 291–307. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_17
12. Aidoun Z., Ameer K., Falsafioon M., Badache M. Current Advances in Ejector Modeling, Experimentation and Applications for Refrigeration and Heat Pumps. Part 1: Single-Phase Ejectors. *Inventions*, Vol. 4 (1), 2019. 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions4010015>
13. Nikbakht Naserabad S., Mehrpanahi A., Ahmadi G. Multi-objective optimization of feed-water heater arrangement options in a steam power plant repowering. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 220. P. 253–270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.125>
14. Wang Y., Morosuk T., Yang S., Cao W. A high-efficiency multi-function system based on thermal desalination and absorption cycle for water, water-cooling or water-heating production. *Energy Conversion and Management*, Vol. 284, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116962>
15. Tashtoush B. M.; Al-Nimr M. A.; Khasawneh M. A. A comprehensive review of ejector design, performance, and applications. *Applied Energy*, Vol. 240, 2019. pp. 138–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.185>
16. Tashtoush B., Nayfeh Y. Energy and economic analysis of a variable-geometry ejector in solar cooling systems for residential buildings. *Journal of Energy Storage*, Vol. 27, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101061>
17. Марченко В. Н. Струйная термокомпрессорная установка (СТК): назначение, принцип действия, термодинамическая модель и результаты расчетных исследований параметров рабочего процесса / В. Н. Марченко, Н. А. Жиленко. *Вісник Сумського державного університету*. Серія «Технічні науки». 2004. № 13 (72). С. 50–60.
18. Марченко В. Н. Энергетическая эффективность парового струйного термокомпрессора / В. Н. Марченко, М. Г. Прокопов. *Холодильна техніка і технологія*. 2007. № 5 (109). С. 45–51.
19. Principle of stream thermocompression: conception of energetic efficiency and prospect of realization is in small heat energetic / V. N. Marchenko, V. A. Osipov, M. G. Prokopov, S. O. Sharapov. «MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa». Simferopol – Lublin, 2009. Vol. 11 A. P. 70–76.
20. Прокопов М. Г., Шарапов С. О., Мерзляков Ю. С., Гусев Д. М. Концепція енергоефективності й перспективи реалізації принципу струминної термокомпресії в малій теплоенергетиці. *Енергетика і автоматика*. 2021. 2. С. 39–51. DOI: <https://doi.org/10.31548/energiya2021.02.039>
21. Шарапов С. О., Євтушенко С. О., Хованський С. О. Експериментальний стенд для дослідження процесів змішування в рідинно-парових струминних апаратах. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 24(2), 2024. 37–50. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-4>



22. Sharapov, S., Husiev, D., Verbytskiy, A., Vaskin, R., Kozii, I., Plyatsuk, L., Vaskina, I., Hoptalo, D., & Denysenko, Y. (2025). Influence of Motive Nozzle Supersonic Part Profiling on the Effectiveness of the Vaporization Process: Experimental Results. *Thermo*, 5(4), 44. DOI: <https://doi.org/10.3390/thermo5040044>
23. Реле температури REX-C100FK04-M*AN URL: <https://www.mpja.com/download/rex-c100.pdf>
24. Теплолічильник SHARKY 775. Паспорт. Керівництво з експлуатації URL: https://lichilnik.com.ua/index.php?route=product/product/download&product_id=590&download_id=19
25. Багатофункціональний вимірювач мережі TENSE EM-08 URL: https://eshop.venio.sk/user/related_files/manual_en_em-08.pdf

Дата першого надходження статті до видання: 25.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



S. Sharapov¹, A. Verbytskiy¹, S. Yevtushenko¹, S. Khovanskyi¹, O. Koviazin²

¹ Sumy State University

² Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

EXPERIMENTAL STAND FOR RESEARCHING HEAT-&-ELECTRICITY GENERATING AGGREGATES BASED ON LIQUID-VAPOR JET DEVICES

Summary

This article describes the objectives and tasks of experimental studies of combined heat and power generation units based on liquid-vapor jet devices. To define the objectives of the experimental studies, a critical analysis was conducted of the current state of research on design solutions for cogeneration systems for the generation of thermal and electrical energy, including installations based on mini-CHP plants and heat pumps. Based on a review of the literature, it can be concluded that the modern energy sector has not developed highly efficient thermal and electrical power generation units with a capacity of up to 0.5 MW that could meet the needs of individual consumers. The literature review also revealed that there is currently no design solution capable of meeting the thermal and electrical energy needs of individual consumers. The authors propose a design solution for a combined heat and power unit based on a liquid-vapor jet device, which combines all the advantages of a mini-CHP plant and a heat pump system. The theoretical studies conducted by the authors allow us to conclude that the use of such units in distributed generation systems is feasible. Therefore, it is necessary to conduct experimental studies of the heat and power generation unit proposed by the authors, based on a liquid-vapor jet device, which would confirm the numerical calculations and determine the operating parameters under which its efficiency will be maximized. The article presents a diagram and description of an experimental setup for studying thermoelectric power generation units based on liquid-vapor jet devices. The program and methodology include a range of operating and geometric parameters for conducting experimental research. A connection diagram for the capacitor bank to the electric generator is proposed, and a description of the proposed control and measuring instruments at characteristic points in the cycles is provided. The methodology for processing the results of experimental studies of a heat and power generation unit based on a liquid-vapor jet device is also described, including the determination of the main errors in direct and indirect measurements.

Keywords: liquid-vapor jet device, heat-&-electricity generating, experimental research, geometric parameters, efficiency, affordable and clean energy, sustainable cities and communities.