

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.; В. М. Портнов, П. Д. Форсюк

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗМІННИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З КОГЕНЕРАЦІЙНО-ТЕПЛОНАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОТИ ПРОМИСЛОВИХ ТА ПРИРОДНИХ ДЖЕРЕЛ

Приведено результати досліджень енергоекономічної ефективності змінних режимів роботи систем енергозабезпечення (СЕ) з піковими джерелами теплоти (ПДТ) та когенераційно-теплонасосними установками (КТНУ) з використанням теплоти промислових та природних джерел, що забезпечують обґрунтоване визначення енергоефективних та економічно ефективних режимів роботи СЕ з КТНУ та ПДТ з комбінованим сезонним використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел. Результати досліджень приведені на прикладі СЕ з КТНУ та ПДТ для теплової схеми котельні санаторію. Запропоновано застосувати енергоефективний та економічно доцільний варіант системи енергозабезпечення з КТНУ на основі парокompресійних теплових насосів та газопоршневих двигунів-генераторів (ГПД) з метою покращення показників роботи теплової схеми котельні санаторію. В нашому дослідженні передбачено комбіноване сезонне використання в КТНУ теплоти відхідних газів котельні санаторію з використанням утилізаційного обладнання, а також природної теплоти поверхневих вод. Визначено, що за умови змінних режимів роботи СЕ з КТНУ та комбінованого сезонного використання в КТНУ теплоти промислових та природних джерел, найефективнішим за енергетичними, економічними та технічними показниками є варіант застосування СЕ з КТНУ в тепловій схемі котельні санаторію з утилізацією 50% теплової потужності відхідних газів котлів в утилізаційному обладнанні та КТНУ. У разі застосування цього варіанту СЕ з КТНУ та ПДТ будуть забезпечені енергоефективні та економічно обґрунтовані режими роботи вказаних СЕ з комбінованим сезонним використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел. Запропонований в цій статті підхід, щодо дослідження енергоекономічної ефективності змінних режимів роботи СЕ з ПДТ та КТНУ з використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел, дозволив забезпечити обґрунтоване визначення енергоефективних та економічно ефективних режимів роботи СЕ з КТНУ та ПДТ з комбінованим сезонним використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел.

**Ключові слова:** енергоефективність, економічна ефективність, система енергозабезпечення, когенераційно-теплонасосна установка, пікове джерело теплоти, змінні режими роботи, промислові та природні джерела низькотемпературної теплоти.

### Вступ

Системи енергозабезпечення (СЕ) з когенераційно-теплонасосними установками (КТНУ) та піковими джерелами теплоти (ПДТ) забезпечують високі показники ефективності енергоперетворень в елементах СЕ, що дозволяє їм бути до двох разів ефективнішими за традиційні джерела енергозабезпечення. Питанням дослідження енергоефективних СЕ з КТНУ присвячено низку публікацій [1 – 9], в яких підтверджені висока енергетична і економічна ефективність вказаних СЕ.

**Метою роботи** є дослідження енергоекономічної ефективності змінних режимів роботи

систем енергозабезпечення з піковими джерелами теплоти та когенераційно-теплонасосними установками з використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел, що дозволить забезпечити обґрунтоване визначення енергоефективних та економічно ефективних режимів роботи СЕ з КТНУ та ПДТ з комбінованим сезонним використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел.

### Основна частина

Енергетична та економічна ефективність теплонасосних станцій з використанням природних та промислових джерел низькотемпературної теплоти, за умов змінних режимів роботи, проаналізована в дослідженнях [10 – 12]. Наше дослідження спрямоване на визначення енергоефективних та економічно обґрунтованих режимів роботи СЕ з КТНУ та ПДТ з комбінованим сезонним використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел.

Приведемо результати досліджень на прикладі СЕ з КТНУ та ПДТ для теплової схеми котельні санаторію. Метою нашого дослідження [13] було проведення техніко-економічного обґрунтування застосування енергоефективної СЕ з КТНУ в тепловій схемі котельні санаторію на основі результатів дослідження [14]. Джерелом теплозабезпечення санаторію є водогрійна котельня на природному газі, яка забезпечує потреби технологічних споживачів, а також споживачів опалення та гарячого водопостачання санаторію. В дослідженнях [13 – 14] запропоновано застосувати енергоефективний та економічно доцільний варіант системи енергозабезпечення з КТНУ на основі парокompресійних теплових насосів та газопоршневих двигунів-генераторів (ГПД) з метою покращення показників роботи теплової схеми котельні санаторію. Як пікове джерело теплоти в СЕ з КТНУ планується використовувати діючу водогрійну котельню санаторію. В дослідженнях [13 – 14] передбачено комбіноване сезонне використання в КТНУ теплоти відхідних газів котельні санаторію з використанням утилізаційного обладнання, а також природної теплоти поверхневих вод. Техніко-економічне обґрунтування застосування енергоефективної СЕ з КТНУ в тепловій схемі котельні санаторію в роботі [13] виконано на основі результатів досліджень [1 – 12] та методичних основ з оцінювання енергетичної та економічної ефективності СЕ з КТНУ з досліджень [1 – 2, 15 – 22].

В нашій статті, на основі результатів з дослідження [13], виконано дослідження енерго-економічної ефективності змінних режимів роботи СЕ з КТНУ з комбінованим сезонним використанням в КТНУ теплоти відхідних газів котельні та природної теплоти поверхневих вод для теплової схеми котельні санаторію. Досліджувались чотири варіанти застосування СЕ з КТНУ в тепловій схемі з наступними показниками утилізації теплової потужності відхідних газів котельні санаторію в утилізаційному обладнанні та КТНУ для першого та другого сезонів роботи котельні: 1 – 100%; 2 – 75%; 3 – 50%; 4 – 25%. В третьому сезоні передбачено використання природної теплоти поверхневих вод в СЕ з КТНУ без роботи ПДТ.

Результати проведених досліджень енергоекономічної ефективності змінних режимів роботи СЕ з КТНУ з комбінованим сезонним використанням в КТНУ теплоти відхідних газів котельні та природної теплоти поверхневих вод узагальнені в таблиці 1, де позначені варіанти утилізації теплової потужності відхідних газів котельні в утилізаційному обладнанні та КТНУ: 1 – 100%; 2 – 75%; 3 – 50%; 4 – 25%.

З табл. 1 можна визначити, що економія робочого палива котельнею у випадку застосування СЕ з КТНУ спостерігається для всіх досліджуваних варіантів застосування та режимів роботи СЕ з КТНУ з комбінованим сезонним використанням в КТНУ теплоти промислових та природних джерел. Найбільші значення сезонної та річної економії робочого палива, у разі застосування СЕ з КТНУ в тепловій схемі котельні санаторію, будуть забезпечені у випадку утилізації 100% теплової потужності відхідних газів котельні в утилізаційному обладнанні та КТНУ. З табл. 1 видно, що значення сезонної та річної економії робочого палива, у разі застосування СЕ з КТНУ в тепловій схемі котельні санаторію, будуть зменшуватись зі змен-

шенням частки утилізації теплової потужності відхідних газів котельні в утилізаційному обладнанні та КТНУ. Подібним чином буде зменшуватись і річна економія коштів котельнею з СЕ з КТНУ у разі зменшення частки утилізації теплової потужності відхідних газів котельні в утилізаційному обладнанні та КТНУ. Крім того, як видно з табл. 1, збільшення частки утилізації теплової потужності відхідних газів котельні в утилізаційному обладнанні та КТНУ зумовлює зниження температури відхідних газів котельні.

На основі аналізу результатів проведеного дослідження визначено, що за умови змінних режимів роботи СЕ з КТНУ та комбінованого сезонного використання в КТНУ теплоти промислових та природних джерел, найефективнішим за енергетичними, економічними та технічними показниками є варіант застосування СЕ з КТНУ в тепловій схемі котельні санаторію з утилізацією 50% теплової потужності відхідних газів котлів в утилізаційному обладнанні та КТНУ. У разі застосування цього варіанту СЕ з КТНУ та ПДТ будуть забезпечені енергоефективні та економічно обґрунтовані режими роботи вказаних СЕ з комбінованим сезонним використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел: температура відхідних газів котельні становитиме 112,8 °С, сезонна економія робочого палива котельнею з СЕ з КТНУ буде змінюватись в межах 10,59...15,43%, річна економія робочого палива котельнею з СЕ з КТНУ становитиме 13,64%. Для цього варіанту застосування СЕ з КТНУ в тепловій схемі котельні санаторію економія природного газу становитиме 593,18 тис. м<sup>3</sup>/рік та буде забезпечено економію коштів котельнею в обсязі 5,74 млн. грн./рік.

Таблиця 1

**Показники енергоекономічної ефективності змінних режимів роботи СЕ з КТНУ з комбінованим сезонним використанням в КТНУ теплоти відхідних газів котельні та природної теплоти поверхневих вод**

Показник	Варіант застосування											
	1			2			3			4		
	Сезон 1	Сезон 2	Сезон 3	Сезон 1	Сезон 2	Сезон 3	Сезон 1	Сезон 2	Сезон 3	Сезон 1	Сезон 2	Сезон 3
Теплова потужність контактного утилізатора теплоти відхідних газів котельні, кВт	1698	1444	---	1346	1146	---	865	737	---	507	427	---
Теплова потужність конденсатора КТНУ, кВт	2252	1916	978	1786	1520	978	1147	977	978	673	566	978
Потужність компресора КТНУ, кВт	554	472	380	440	374	380	282	240	380	166	139	380
Теплова потужність теплоутилізаційного устаткування ГПД, кВт	765	650	523	606	515	523	389	331	523	228	192	523
Загальна теплова потужність КТНУ, кВт	3017	2566	1501	2392	2035	1501	1536	1308	1501	901	758	1501

Температура відхідних газів котельні у випадку застосування СЕ з КТНУ, °С	55	55	---	81,3	81,3	---	112,8	112,8	---	133,8	133,8	---
Економія робочого палива котельнею у випадку застосування СЕ з КТНУ, %	21,20	22,19	15,43	16,73	17,79	15,43	10,59	11,76	15,43	6,05	7,18	15,43
Річна економія робочого палива котельнею у випадку застосування СЕ з КТНУ, %	18,73			16,58			13,64			11,4		
Економія робочого палива котельнею у випадку застосування СЕ з КТНУ, тис. м <sup>3</sup> /рік	898,70			769,75			593,18			459,20		
Економія коштів котельнею у випадку застосування СЕ з КТНУ, млн. грн./рік	8,69			7,44			5,74			4,44		

Запропонований в цій статті підхід, розроблений на основі результатів з робіт [1 – 22], щодо дослідження енергоекономічної ефективності змінних режимів роботи СЕ з ПДТ та КТНУ з використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел, дозволив забезпечити обґрунтоване визначення енергоефективних та економічно ефективних режимів роботи СЕ з КТНУ та ПДТ з комбінованим сезонним використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел.

### Висновки

В статті проведено дослідження енергоекономічної ефективності змінних режимів роботи систем енергозабезпечення з піковими джерелами теплоти та когенераційно-теплонасосними установками з використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел, що спрямоване на визначення енергоефективних та економічно ефективних режимів роботи СЕ з КТНУ та ПДТ з комбінованим сезонним використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел.

Приведено результати досліджень на прикладі СЕ з КТНУ та ПДТ для теплової схеми котельні санаторію. Визначено, що за умови змінних режимів роботи СЕ з КТНУ та комбінованого сезонного використання в КТНУ теплоти промислових та природних джерел, найефективнішим за енергетичними, економічними та технічними показниками є варіант застосування СЕ з КТНУ в тепловій схемі котельні санаторію з утилізацією 50% теплової потужності відхідних газів котлів в утилізаційному обладнанні та КТНУ. У разі застосування цього варіанту СЕ з КТНУ та ПДТ будуть забезпечені енергоефективні та економічно обґрунтовані режими роботи вказаних СЕ з комбінованим сезонним використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел: температура відхідних газів котельні становитиме 112,8 °С, сезонна економія робочого палива котельнею з СЕ з КТНУ буде змінюватись в межах 10,59...15,43%, річна економія робочого палива котельнею з СЕ з КТНУ становитиме 13,64%. Для цього варіанту застосування СЕ з КТНУ в тепловій схемі котельні санаторію економія природного газу становитиме 593,18 тис. м<sup>3</sup>/рік та буде забезпечено економію коштів котельнею в обсязі 5,74 млн. грн./рік.

Запропонований в цій статті підхід, розроблений на основі результатів з робіт [1 – 22], щодо дослідження енергоекономічної ефективності змінних режимів роботи СЕ з ПДТ та КТНУ з використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел, дозволив забезпечити обґрунтоване визначення енергоефективних та економічно ефективних режимів роботи СЕ з КТНУ та ПДТ з комбінованим сезонним використанням низькотемпературної теплоти промислових та природних джерел.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Енергетична ефективність систем енергозабезпечення на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок і пікових джерел теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // Наукові праці ВНТУ. – 2016. – № 1. – Режим доступу до журн. : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/462/460>.
2. Енергетична ефективність систем енергозабезпечення на основі комбінованих когенераційно-теплонасосних установок [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // Наукові праці ВНТУ. – 2015. – № 4. – Режим доступу до журн. : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/454/452>.
3. Области энергосберегающей работы систем энергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками та піковими джерелами теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // Наукові праці ВНТУ. – 2016. – № 3. – Режим доступу до журн. : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/479/478>.
4. Области високої енергоефективності систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками малої потужності та паливними котлами в системах теплопостачання [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // Наукові праці ВНТУ. – 2017. – № 1. – Режим доступу до журн. : <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/499/496>.
5. Ostapenko O. P. Spheres of high energy efficiency of energy supply systems with cogeneration heat pump installations of large power and peak fuel-fired boilers / O. P. Ostapenko // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. – IV (12). – Issue 110. – 2016. – P. 64 – 67.
6. Ostapenko O. P. Areas of high energy efficiency of energy supply systems with cogeneration heat pump installations of small power and peak electric boilers in heat supply systems / O. P. Ostapenko // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. – V (13). – Issue 121. – 2017. – P. 77 – 80.
7. Ostapenko O. P. Areas of high energy efficiency of energy supply systems with cogeneration heat pump installations of large power and peak fuel-fired boilers for heat supply systems / O. P. Ostapenko // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. – V (14). – Issue 132. – 2017. – P. 70 – 74.
8. Ostapenko O. P. Areas of high energy efficiency of energy supply systems with cogeneration heat pump installations of small power and peak fuel-fired boilers / O. P. Ostapenko // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. – V (15). – Issue 140. – 2017. – P. 64 – 68.
9. Ostapenko O. P. Areas of high energy efficiency of energy supply systems with cogeneration heat pump installations of small power and peak electric boilers / O. P. Ostapenko // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. – V (16). – Issue 148. – 2017. – P. 85 – 89.
10. Енергетична ефективність теплонасосних станцій з різними джерелами теплоти за умови змінних режимів роботи [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, О. В. Шевченко, О. В. Бакум // Наукові праці ВНТУ. – 2013. – № 4. – Режим доступу до журн. : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/381/379>.
11. Енергоекологічна ефективність теплонасосних станцій на природних та промислових джерелах теплоти за умови змінних режимів роботи [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, І. О. Валігура, А. Д. Коваленко // Наукові праці ВНТУ. – 2013. – № 2. – Режим доступу до журн. : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/363/361>.
12. Енергетичний, екологічний та економічний аспекти ефективності теплонасосних станцій на природних та промислових джерелах теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, О. В. Бакум, А. В. Ющишина // Наукові праці ВНТУ. – 2013. – № 3. – Режим доступу до журн. : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/371/369>.
13. Остапенко О. П. Техніко-економічне обґрунтування застосування енергоефективної системи енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосною установкою в тепловій схемі котельні санаторію / О. П. Остапенко, В. М. Портнов // Збірник наукових матеріалів ХХ Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Інновації ХХІ століття» (25 травня 2018 р., м. Вінниця). – Вінниця, 2018. – Частина 7. – Технічні науки. – С. 59 – 65.
14. Остапенко О. П. Варіантний аналіз енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками в тепловій схемі котельні санаторію / О. П. Остапенко, В. М. Портнов // Актуальні проблеми сучасної енергетики: Матеріали Третьої Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (23 – 25 травня 2018 р., Херсон). – Херсон: Херсонський

національний технічний університет, 2018. – С. 48 – 50.

15. Методичні основи з комплексного оцінювання енерго-еколого-економічної ефективності систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками та піковими джерелами теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // Наукові праці ВНТУ. – 2017. – № 3. – Режим доступу до журн. : <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/515/507>.

16. Остапенко О. П. Методичні основи з оцінювання енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками та піковими джерелами теплоти / О. П. Остапенко // Наукові праці ОНАХТ.– 2017. – Т. 81. – Вип. 1. – С. 136 – 141.

17. Енергоефективність систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками та піковими джерелами теплоти в системах теплопостачання [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // Наукові праці ВНТУ. – 2016. – № 2. – Режим доступу до журн. : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/472/470>.

18. Ostapenko O. P. Scientific basis of evaluation energy efficiency of heat pump plants: monograph / O. P. Ostapenko. – Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 64 p.

19. Показники енергоекономічної ефективності систем енергозабезпечення на основі когенераційно-теплонасосних установок та пікових джерел теплоти [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. М. Портнов, А. Д. Волошин // Електронне наукове видання матеріалів XLVI науково-технічної конференції Вінницького національного технічного університету (22–24 березня 2017 р., Вінниця). – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2017/paper/view/2875/2248>.

20. Комплексна оцінка енергетичної ефективності пароконденсійних теплонасосних станцій з когенераційним приводом [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко // Наукові праці ВНТУ. – 2015. – № 3. – Режим доступу до журн. : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/2/2>.

21. Остапенко О. П. Наукові основи з оцінювання систем енергозабезпечення на основі когенераційно-теплонасосних установок / О. П. Остапенко // Актуальні проблеми енергетики та екології: матеріали XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції (5–7 жовтня 2016 р., м. Одеса). – Херсон : ФОП Грін Д. С., 2016. – С. 15 – 17.

22. Остапенко О. П. Оцінка ефективності систем енергозабезпечення з когенераційно-теплонасосними установками на теплоті вторинних енергоресурсів за умов змінних режимів роботи / О. П. Остапенко, Є. О. Павлович, М. І. Максимов, М. С. Дзюбанчук, В. М. Портнов // Збірник наукових матеріалів XVIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Перспективні напрями розвитку науки і техніки» (23 березня 2018 р., м. Вінниця). – Вінниця, 2018. – Частина 2. – Технічні науки. – С. 16 – 22.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2018 р.

Стаття пройшла рецензування 18.04.2018 р.

**Остапенко Ольга Павлівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: [ostapenko1208@gmail.com](mailto:ostapenko1208@gmail.com).

**Портнов Віктор Миколайович** – здобувач освітнього ступеня «бакалавр», студент групи ТЕ-146, факультет будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

**Форсюк Павло Дмитрович** – здобувач освітнього ступеня «бакалавр», студент групи ТЕ-146, факультет будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Вінницький національний технічний університет.