

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.; О. В. Шевченко, О. В. Бакум

## ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОНАСОСНИХ СТАНЦІЙ З РІЗНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛОТИ ЗА УМОВИ ЗМІННИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

*Визначено режими ефективної роботи теплонасосних станцій (ТНС) з різними видами приводу компресора та джерелами низькотемпературної теплоти за умови змінних режимів роботи систем теплопостачання. Запропоновані рекомендації дозволяють здійснити вибір режимів роботи ТНС та джерел низькотемпературної теплоти з метою досягнення заданих значень показників ефективності річної роботи ТНС. Представлені рекомендації можуть бути використані для прогнозування раціональних режимів роботи ТНС різної потужності в системах теплопостачання.*

**Ключові слова:** енергетична ефективність, теплонасосна станція, теплонасосна установка, режими роботи систем теплопостачання.

### Вступ

Дефіцит паливно-енергетичних ресурсів в Україні та екологічні переваги теплових насосів стимулюють упровадження теплонасосних станцій (ТНС) у промисловість і муніципальну енергетику. Спорудження теплонасосних станцій на основі водогрійних котелень дозволить скоротити споживання природного газу та зменшити вартість теплової енергії. Це зумовлює актуальність досліджень енергетичної ефективності теплонасосних станцій.

За останні роки проведено ряд досліджень ефективності ТНС у теплових схемах джерел енергопостачання. У роботі [1] авторами виконано дослідження з підвищення енергоефективності джерел теплопостачання шляхом використання теплонасосних установок (ТНУ) з урахуванням впливу схемних розв'язків та режимів роботи. У дослідженні [2] розглянуто «функцію цілі» ТНС, яка представлена економією палива в системі енергопостачання під час оцінки енергетичної ефективності та приросту інтегрального ефекту. У [3] розглянуто комбіновані схеми теплопостачання з ТНУ в разі використання низькотемпературної теплоти від різних джерел на промислових електростанціях. У дослідженні [4] проаналізовано ефективність ТНС з електроприводом та з приводом від газотурбінної установки і котлом-утилізатором.

Авторами [5] проведено порівняльні дослідження трьох систем енергопостачання (на основі газового котла, теплового насоса та когенераційної установки з тепловим насосом). У роботі [6] проведено оцінку ефективності чотирьох джерел теплопостачання потужністю 3 МВт на основі електродкотла, паливного котла (газ, рідке паливо) та теплонасосної установки. У роботі [7] проведено оцінку енергоефективності теплонасосної установки малої потужності порівняно з традиційними джерелами теплопостачання на основі електричного та газового котлів.

У дослідженнях [1 – 7] оцінку ефективності ТНС здійснено за такими критеріями: коефіцієнт перетворення, економія робочого та умовного палива порівняно з наявною схемою за економічними показниками.

У проаналізованих роботах [1 – 7] авторами не здійснено оцінку енергетичної ефективності ТНС із різними видами приводу зі змінними режимами роботи систем теплопостачання в широкому діапазоні зміни потужності ТНУ. Відсутній аналіз енергетичної ефективності ТНС із різними джерелами низькотемпературної теплоти.

**Метою дослідження** є оцінка енергетичної ефективності ТНС із різними видами приводу компресора на різних джерелах низькотемпературної теплоти з урахуванням змінних режимів роботи систем теплопостачання в широкому діапазоні зміни потужності ТНУ; проведен-

ня оптимізаційних досліджень з метою визначення раціональних режимів роботи ТНС різної потужності в системах теплопостачання.

### Основна частина

Дослідження проводили методом математичного моделювання роботи ТНС із використанням програми в середовищі Excel. Програму використовують для моделювання роботи теплонасосних станцій з різними видами приводу компресора для теплопостачання. Програма має блочну структуру та складається з таких розрахункових модулів: розрахунок теплової схеми заміщеної водогрійної котельні, розрахунок теплонасосної установки, розрахунок двигуна внутрішнього згорання та системи утилізації теплоти, розрахунок енергетичної ефективності теплонасосної станції. Передбачено модуль вибору джерела низькотемпературної теплоти для ТНС та його температурного рівня залежно від режиму роботи ТНС.

Досліджували енергетичну ефективність ТНС з електроприводом та приводом компресора від двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) максимальною потужністю 10 МВт в опалювальний сезон, максимальна потужність ТНС в режимі роботи для гарячого водопостачання становила 2 МВт. За порівняльний варіант приймали варіант роботи водогрійної котельні такої ж потужності. Дослідження проводили для різних джерел низькотемпературної теплоти з урахуванням змінних режимів роботи ТНС для систем теплопостачання в широкому діапазоні зміни потужності теплового насоса. Потужність конденсатора теплового насоса змінювалась від 500 до 2000 кВт відповідно до марок теплонасосного обладнання, що випускає промисловість [8]. Джерелами низькотемпературної теплоти для ТНС були: поверхневі води, вода системи оборотного водопостачання, ґрунтові води, геотермальні води, повітря, вторинні енергоресурси (ВЕР), каналізаційні стічні води та теплота ґрунту.

Ефективність роботи ТНС значною мірою визначають оптимальним розподілом навантаження між теплонасосною установкою та водогрійним котлом у складі ТНС. Розподіл навантаження між елементами ТНС характеризується часткою навантаження ТНУ у складі ТНС  $\beta$ , яка визначається як відношення потужності конденсатора ТНУ до потужності ТНС

$$\beta = \frac{Q_{ТНУ}}{Q_{ТНС}} \quad (1)$$

Потужність та температурні режими роботи теплонасосної станції в системі теплопостачання визначають за температурним графіком залежно від температури зовнішнього повітря та необхідної потужності споживачів.

На основі аналізу результатів проведених досліджень визначено оптимальні значення показника  $\beta$  для ТНС на різних джерелах теплоти з різними видами приводу компресора ТНУ за умови змінних режимів роботи теплової мережі. Кожному із цих режимів відповідає певне значення теплових потужностей ТНС, ТНУ та частки навантаження ТНУ  $\beta$ .

Для випадків змінних режимів роботи та змінного теплового навантаження ТНС протягом року середньорічне значення частки навантаження ТНУ у складі ТНС може бути визначене так:

$$\beta_{сер.річне} = \frac{\sum_i \beta_i \cdot \tau_i}{\tau_{річне}}, \quad (2)$$

де  $\beta_i$  – частка навантаження ТНУ для  $i$ -го режиму роботи ТНС;  $\tau_i$  – тривалість  $i$ -го режиму

роботи ТНС;  $\tau_{\text{річне}}$  – річна тривалість роботи ТНС.

Економію умовного палива від упровадження ТНС значною мірою визначають оптимально підібраними режимами роботи ТНС, раціональним розподілом навантаження між водогрійним котлом та ТНУ, отже, оптимальним значенням частки навантаження ТНУ у складі ТНС  $\beta$ . На основі визначених значень частки навантаження ТНУ  $\beta$  визначають економію умовного палива ТНС для певного режиму роботи системи теплопостачання.

Для випадків змінних режимів роботи та змінного теплового навантаження ТНС протягом року середньорічне значення економії умовного палива ТНС може бути визначене так:

$$\Delta B_{\text{сер.річне}} = \frac{\sum_i \Delta B_i \cdot \tau_i}{\tau_{\text{річне}}}, \quad (3)$$

де  $\Delta B_i$  – економія умовного палива від упровадження ТНС для  $i$ -го режиму роботи ТНС, %;  $\tau_i$  – тривалість  $i$ -го режиму роботи ТНС;  $\tau_{\text{річне}}$  – річна тривалість роботи ТНС.

Запропоновані критерії дозволяють оцінити енергетичну ефективність роботи ТНС протягом року за різних режимів роботи.

Результати досліджень ефективності роботи ТНС на різних джерелах теплоти з різними видами приводу за умови змінних режимів роботи ТНС зведено в таблицях, які представлені нижче. Тут зазначено потужності ТНУ, вказано значення частки навантаження ТНУ. Значення економії умовного палива ТНС з електроприводом та приводом від ДВЗ вказано для опалювального та міжопалювального режимів, а також середньорічні значення цих показників залежно від частки навантаження ТНУ.

У таблиці 1 наведено значення показників енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті поверхневих вод та оборотної води з електроприводом або приводом компресора від ДВЗ за умови змінних режимів роботи ТНС. Як видно із таблиці 1, найбільші значення економії умовного палива ТНС відповідають максимальним значенням частки навантаження ТНУ. Для ТНС з електроприводом на теплоті поверхневих вод економія умовного палива забезпечується не для всіх режимів роботи ТНС, суттєва економія умовного палива забезпечується для режимів роботи ТНС із середньорічним значенням частки навантаження ТНУ  $\beta > 0,502$ . Максимальне значення річної економії умовного палива ТНС з електроприводом на теплоті поверхневих вод становить 10,12% та відповідає середньорічному значенню частки навантаження ТНУ  $\beta = 0,629$ . Для ТНС з приводом від ДВЗ на теплоті поверхневих вод максимальне значення річної економії умовного палива становить 37,87% та відповідає середньорічному значенню частки навантаження ТНУ  $\beta = 0,629$ .

У таблиці 1 також наведено значення показників енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті оборотної води з електроприводом та приводом компресора від ДВЗ за умови змінних режимів роботи ТНС. Для таких ТНС з електроприводом економія умовного палива забезпечується для режимів роботи ТНС з середньорічним значенням частки навантаження ТНУ  $\beta > 0,187$ . Як і в попередньому випадку, найбільші значення економії умовного палива ТНС відповідають максимальним значенням частки навантаження ТНУ. Максимальні значення річної економії умовного палива ТНС на теплоті оборотної води становлять: для електроприводу – 26%, для приводу від ДВЗ – 45,52% – і відповідають середньорічному значенню частки навантаження ТНУ  $\beta = 0,629$ .

Таблиця 1

## Показники енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті поверхневих вод та оборотної води

Потужність ТНУ, кВт		Економія умовного палива ТНС з електроприводом, %		Економія умовного палива ТНС із приводом від ДВЗ, %		Середньорічна економія умовного палива ТНС з електроприводом, %	Середньорічна економія умовного палива ТНС із приводом від ДВЗ, %	Частка теплової потужності, що покриває ТНУ $\beta$		
Опалювальний період	Міжопалювальний період	Опалювальний період	Міжопалювальний період	Опалювальний період	Міжопалювальний період			Опалювальний період	Міжопалювальний період	Середнє значення за рік
Показники енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті поверхневих вод										
500	500	-22,92	4,73	1,84	11,32	-8,69	6,66	0,0609	0,25	0,158
1000	500	-14,98	4,73	5,94	11,32	-4,84	8,64	0,121	0,25	0,187
1500	500	-7,04	4,73	10,57	11,32	-0,99	10,88	0,182	0,25	0,2165
2000	500	0,901	4,73	15,81	11,32	2,86	13,41	0,243	0,25	0,246
1000	1000	-14,98	9,46	5,94	24,35	-2,42	15,3	0,121	0,5	0,315
1500	1000	-7,04	9,46	10,57	24,35	1,43	17,53	0,182	0,5	0,344
2000	1000	0,901	9,46	15,81	24,35	5,27	20,06	0,243	0,5	0,374
1500	1500	-7,04	14,19	10,57	39,88	3,95	25,45	0,182	0,75	0,472
2000	1500	0,901	14,19	15,81	39,88	7,7	27,98	0,243	0,75	0,502
2000	2000	0,901	18,92	15,81	59,26	10,12	37,87	0,243	1	0,629
Показники енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті оборотної води										
500	500	-14,61	10,51	3,06	15,15	-1,7	9,21	0,0609	0,25	0,158
1000	500	-6,67	10,51	8,25	15,15	2,15	11,72	0,121	0,25	0,187
1500	500	1,27	10,51	13,06	15,15	6,00	14,40	0,182	0,25	0,2165
2000	500	9,21	10,51	19,79	15,15	9,85	17,29	0,243	0,25	0,246
1000	1000	-6,67	21,03	8,25	31,52	7,53	20,07	0,121	0,5	0,315
1500	1000	1,27	21,03	13,06	31,52	11,38	22,85	0,182	0,5	0,344
2000	1000	9,21	21,03	19,79	31,52	15,23	25,64	0,243	0,5	0,374
1500	1500	1,27	31,54	13,06	49,65	16,76	31,99	0,182	0,75	0,472
2000	1500	9,21	31,54	19,79	49,65	20,61	34,88	0,243	0,75	0,502
2000	2000	9,21	42,05	19,79	70,48	26,00	45,52	0,243	1	0,629

Значення показників енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті ґрунтових та геотермальних вод з різними видами привода, за умови змінних режимів роботи ТНС, показано в таблиці 2.

Як видно з табл. 2, найбільші значення економії умовного палива ТНС відповідають максимальним значенням частки навантаження ТНУ. Для ТНС з електроприводом економія умовного палива забезпечується для режимів роботи ТНС із середньорічним значенням частки навантаження ТНУ  $\beta > 0,502$ . Максимальні значення річної економії умовного палива ТНС на теплоті ґрунтових вод становлять: для електроприводу – 5,64% , для приводу від Наукові праці ВНТУ, 2013, № 4

ДВЗ – 35,07% – і відповідають середньорічному значенню частки навантаження ТНУ  $\beta=0,629$ .

Таблиця 2

## Показники енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті ґрунтових та геотермальних вод

Потужність ТНУ, кВт		Економія умовного палива ТНС з електроприводом, %		Економія умовного палива ТНС із приводом від ДВЗ, %		Середньорічна економія умовного палива ТНС з електроприводом, %	Середньорічна економія умовного палива ТНС з приводом від ДВЗ, %	Частка теплової потужності, що покриває ТНУ $\beta$		
Опалювальний період	Міжопалювальний період	Опалювальний період	Міжопалювальний період	Опалювальний період	Міжопалювальний період			Опалювальний період	Міжопалювальний період	Середнє значення за рік
Показники енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті ґрунтових вод										
500	500	-22,92	2,54	1,84	9,86	-9,8	5,92	0,0609	0,25	0,158
1000	500	-14,98	2,54	5,94	9,86	-5,95	7,91	0,121	0,25	0,187
1500	500	-7,04	2,54	10,57	9,86	-2,11	10,14	0,182	0,25	0,2165
2000	500	0,901	2,54	15,81	9,86	1,74	12,67	0,243	0,25	0,246
1000	1000	-14,98	5,09	5,94	21,64	-4,67	13,91	0,121	0,5	0,315
1500	1000	-7,04	5,09	10,57	21,64	-0,8	16,14	0,182	0,5	0,344
2000	1000	0,901	5,09	15,81	21,64	3,04	18,67	0,243	0,5	0,374
1500	1500	-7,04	7,63	10,57	36,18	0,49	23,57	0,182	0,75	0,472
2000	1500	0,901	7,63	15,81	36,18	4,34	26,09	0,243	0,75	0,502
2000	2000	0,901	10,17	15,81	55,02	5,64	35,07	0,243	1	0,629
Показники енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті геотермальних вод										
500	500	0,44	16,13	5,28	29,13	6,98	17,205	0,0609	0,25	0,158
1000	500	8,38	16,13	12,46	29,13	12,31	20,795	0,121	0,25	0,187
1500	500	16,32	16,13	19,73	29,13	16,17	24,43	0,182	0,25	0,2165
2000	500	24,26	16,13	27,13	29,13	20,02	28,13	0,243	0,25	0,246
1000	1000	8,38	32,26	12,46	38,49	20,57	25,475	0,121	0,5	0,315
1500	1000	16,32	32,26	19,73	38,49	24,42	29,11	0,182	0,5	0,344
2000	1000	24,26	32,26	27,13	38,49	28,27	32,81	0,243	0,5	0,374
1500	1500	16,32	48,39	19,73	59,12	32,68	39,425	0,182	0,75	0,472
2000	1500	24,26	48,39	27,13	59,12	36,53	43,125	0,243	0,75	0,502
2000	2000	24,26	64,52	27,13	81,38	44,49	54,255	0,243	1	0,629

У таблиці 2 також показано значення показників ефективності роботи ТНС на теплоті геотермальних вод із різними видами приводу, за умови змінних режимів роботи ТНС, залежно від частки навантаження ТНУ. Економія умовного палива забезпечується для всіх режимів роботи ТНС. Максимальні значення економії умовного палива таких ТНС відповідають

максимальним значенням частки навантаження ТНУ. Максимальні значення річної економії умовного палива ТНС на теплоті геотермальних вод становлять: для електроприводу – 44,49%, для приводу від ДВЗ – 54,255% – і відповідають середньорічному значенню частки навантаження ТНУ  $\beta=0,629$ .

Таблиця 3

## Показники енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті повітря та ВЕР

Потужність ТНУ, кВт		Економія умовного палива ТНС з електроприводом, %		Економія умовного палива ТНС із приводом від ДВЗ, %		Середньорічна економія умовного палива ТНС із електроприводом, %	Середньорічна економія умовного палива ТНС з приводом від ДВЗ, %	Частка теплової потужності, що покриває ТНУ $\beta$		
Опалювальний період	Міжопалювальний період	Опалювальний період	Міжопалювальний період	Опалювальний період	Міжопалювальний період			Опалювальний період	Міжопалювальний період	Середнє значення за рік
Показники енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті повітря										
500	500	-26,47	2,54	1,32	9,87	-11,53	5,67	0,0609	0,25	0,158
1000	500	-18,53	2,54	4,97	9,87	-7,68	7,43	0,121	0,25	0,187
1500	500	-10,59	2,54	9,2	9,87	-3,83	9,47	0,182	0,25	0,2165
2000	500	-2,65	2,54	14,12	9,87	0,016	11,86	0,243	0,25	0,246
1000	1000	-18,53	5,08	4,97	21,64	-6,38	13,43	0,121	0,5	0,315
1500	1000	-10,59	5,08	9,2	21,64	-2,53	15,48	0,182	0,5	0,344
2000	1000	-2,65	5,08	14,12	21,64	1,31	17,86	0,243	0,5	0,374
1500	1500	-10,59	7,63	9,2	38,8	-1,23	22,9	0,182	0,75	0,472
2000	1500	-2,65	7,63	14,12	38,8	2,62	25,28	0,243	0,75	0,502
2000	2000	-2,65	10,17	14,12	55,02	3,92	34,89	0,243	1	0,629
Показники енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті ВЕР										
500	500	2,57	22,07	5,53	22,83	12,39	14,32	0,0609	0,25	0,158
1000	500	10,2	22,07	12,97	22,83	16,52	17,91	0,121	0,25	0,187
1500	500	18,14	22,07	20,46	22,83	20,09	21,53	0,182	0,25	0,2165
2000	500	26,08	22,07	28,03	22,83	23,93	25,18	0,243	0,25	0,246
1000	1000	10,2	44,14	12,97	45,85	27,54	29,66	0,121	0,5	0,315
1500	1000	18,14	44,14	20,46	45,85	31,4	33,27	0,182	0,5	0,344
2000	1000	26,08	44,14	28,03	45,85	35,24	36,93	0,243	0,5	0,374
1500	1500	18,14	66,22	20,46	69,16	42,69	45,16	0,182	0,75	0,472
2000	1500	26,08	66,22	28,03	69,16	46,54	48,82	0,243	0,75	0,502
2000	2000	26,08	88,29	28,03	92,91	57,84	60,93	0,243	1	0,629

Значення показників ефективності роботи ТНС на теплоті повітря з різними видами привода, за умови змінних режимів роботи ТНС, показано в таблиці 3. Для ТНС з електроприводом

водом спостерігають перевитрату умовного палива для режимів роботи ТНС із середньорічним значенням частки навантаження ТНУ  $\beta < 0,502$ . Це свідчить про те, що робота ТНС із таким джерелом теплоти та видом приводу є ефективною не для всіх режимів роботи. Для ТНС з приводом від ДВЗ спостерігають економію умовного палива для всіх режимів роботи, а найбільше значення річної економії палива ТНС становить 31,16% та відповідає середньорічному значенню частки навантаження ТНУ  $\beta = 0,629$ .

У таблиці 3 також наведені значення показників ефективності роботи ТНС на теплоті вторинних енергоресурсів з різними видами приводу залежно від частки навантаження ТНУ. Для ТНС з електроприводом суттєва економія умовного палива забезпечується для режимів роботи ТНС із середньорічним значенням частки навантаження ТНУ  $\beta > 0,374$ . Найбільші значення економії умовного палива таких ТНС відповідають максимальним значенням частки навантаження ТНУ. Максимальні значення річної економії палива ТНС на теплоті вторинних енергоресурсів становлять: для електроприводу – 57,84%, для приводу від ДВЗ – 60,93% – і відповідають середньорічному значенню частки навантаження ТНУ  $\beta = 0,629$ .

Значення показників ефективності роботи ТНС на теплоті стічних вод з різними видами приводу, за умови змінних режимів роботи ТНС, показано в таблиці 4. Для таких ТНС з електроприводом істотна економія умовного палива забезпечується для режимів роботи ТНС із середньорічним значенням частки навантаження ТНУ  $\beta > 0,374$ . Як і в попередніх випадках, найбільші значення економії умовного палива ТНС відповідають максимальним значенням частки навантаження ТНУ. Максимальні значення річної економії умовного палива ТНС на теплоті стічних вод становлять: для електроприводу – 10,41%, для приводу від ДВЗ – 38% – і відповідають середньорічному значенню частки навантаження ТНУ  $\beta = 0,629$ .

У таблиці 4 також наведено значення показників ефективності роботи ТНС на теплоті ґрунту з різними видами приводу залежно від частки навантаження ТНУ. Для таких ТНС з електроприводом спостерігається перевитрата умовного палива для більшості режимів роботи ТНС. Робота ТНС із таким джерелом теплоти та видом приводу є неефективною. Для ТНС на теплоті ґрунту з приводом від ДВЗ спостерігається економія умовного палива для всіх режимів роботи, а найбільше значення річної економії умовного палива ТНС становить 31,16% та відповідає середньорічному значенню частки навантаження ТНУ  $\beta = 0,629$ .

Визначено та обґрунтовано раціональні режими роботи ТНС різної потужності в системах теплопостачання в широкому діапазоні зміни потужності ТНУ з урахуванням комплексного впливу джерел низькотемпературної теплоти та виду приводу компресора ТНУ.

Таблиця 4

## Показники енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті стічних вод і ґрунту

Потужність ТНУ, кВт		Економія умовного палива ТНС з електроприводом, %		Економія умовного палива ТНС із приводом від ДВЗ, %		Середньорічна економія умовного палива ТНС з електроприводом, %	Середньорічна економія умовного палива ТНС із приводом від ДВЗ, %	Частка теплової потужності, що покриває ТНУ $\beta$		
Опалювальний період	Міжопалювальний період	Опалювальний період	Міжопалювальний період	Опалювальний період	Міжопалювальний період			Опалювальний період	Міжопалювальний період	Середнє значення за рік
Показники енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті стічних вод										
500	500	-22,32	4,73	1,93	11,32	-8,39	6,71	0,0609	0,25	0,158

Продовження табл. 4

1000	500	-14,37	4,73	6,11	11,32	-4,55	8,73	0,121	0,25	0,187
1500	500	-6,43	4,73	10,80	11,32	-0,69	10,99	0,182	0,25	0,2165
2000	500	1,51	4,73	16,10	11,32	3,15	13,55	0,243	0,25	0,246
1000	1000	-14,37	9,46	6,11	24,35	-2,12	15,38	0,121	0,5	0,315
1500	1000	-6,43	9,46	10,80	24,35	1,72	17,64	0,182	0,5	0,344
2000	1000	1,51	9,46	16,10	24,35	5,57	20,2	0,243	0,5	0,374
1500	1500	-6,43	14,19	10,80	39,88	4,19	25,56	0,182	0,75	0,472
2000	1500	1,51	14,19	16,10	39,88	8,00	28,12	0,243	0,75	0,502
2000	2000	1,51	18,91	16,10	59,26	10,41	38,00	0,243	1	0,629
Показники енергетичної ефективності роботи ТНС на теплоті ґрунту										
500	500	-31,36	0,39	0,61	8,44	-14,99	4,06	0,0609	0,25	0,158
1000	500	-23,42	0,39	3,62	8,44	-11,15	6,06	0,121	0,25	0,187
1500	500	-15,48	0,39	7,32	8,44	-7,29	7,84	0,182	0,25	0,2165
2000	500	-7,53	0,39	11,82	8,44	-3,44	10,02	0,243	0,25	0,246
1000	1000	-23,42	0,79	3,62	18,97	-10,94	11,43	0,121	0,5	0,315
1500	1000	-15,48	0,79	7,32	18,97	-7,09	13,22	0,182	0,5	0,344
2000	1000	-7,53	0,79	11,82	18,97	-3,24	15,39	0,243	0,5	0,374
1500	1500	-15,48	1,19	7,32	32,56	-6,89	20,14	0,182	0,75	0,472
2000	1500	-7,53	1,19	11,82	32,56	-3,06	22,32	0,243	0,75	0,502
2000	2000	-7,53	1,59	11,82	50,85	-2,84	31,16	0,243	1	0,629

Представлені результати досліджень дозволяють оцінити енергетичну ефективність ТНС з різними видами приводу компресора та джерелами низькотемпературної теплоти за умови змінних режимів роботи систем теплопостачання. Запропоновані рекомендації дозволяють здійснити вибір режимів роботи ТНС та джерел низькотемпературної теплоти з метою досягнення заданих значень показників ефективності роботи ТНС.

Представлені рекомендації можуть бути використані для прогнозування раціональних режимів роботи ТНС різної потужності в системах теплопостачання.

### Висновки

1. Суттєва економія умовного палива від застосування ТНС з електроприводом забезпечується для режимів роботи зі значеннями частки навантаження теплового насоса у складі ТНС  $\beta > 0,502$ . Максимальні значення річної економії умовного палива ТНС з електроприводом спостерігаються для таких джерел низькотемпературної теплоти, як: вторинні енергоресурси – 57,84%, геотермальні води – 44,49%, оборотна вода – 26,00%, стічні води – 10,41%. Режими роботи ТНС з електроприводом із середньорічним значенням частки навантаження ТНУ  $\beta < 0,502$  на теплоті повітря є неефективними через перевитрату умовного палива. Робота ТНС з електроприводом на теплоті ґрунту є неефективною, оскільки для більшості режимів роботи зафіксовано перевитрату умовного палива.

2. У випадку застосування ТНС із приводом від ДВЗ економія умовного палива спостерігається для всіх досліджуваних джерел низькотемпературної теплоти та режимів роботи. Найбільші значення річної економії палива таких ТНС відповідають середньорічному значенню частки навантаження теплового насоса  $\beta = 0,629$ . Максимальні значення річної економії умовного палива ТНС з приводом від ДВЗ спостерігаються для таких джерел низькотем-



пературної теплоти, як: вторинні енергоресурси – 60,93%, геотермальні води – 54,26%, оборотна вода – 45,25%, стічні води – 38%. Мінімальне значення річної економії умовного палива ТНС з приводом від ДВЗ забезпечується за використання теплоти ґрунтових вод – 5,64%.

3. Визначено та обґрунтовано режими ефективної роботи ТНС з різними видами приводу компресора та джерелами низькотемпературної теплоти за умови змінних режимів роботи систем теплопостачання. Запропоновані рекомендації дозволяють здійснити вибір режимів роботи ТНС та джерел низькотемпературної теплоти з метою досягнення заданих значень показників ефективності річної роботи ТНС. Представлені рекомендації можуть бути використані для прогнозування раціональних режимів роботи ТНС різної потужності в системах теплопостачання.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 176 с.
2. Новиков Д. В. Выбор рациональных схем и параметров систем теплоснабжения с теплонасосными установками: дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.01 / Новиков Дмитрий Викторович. – Саратов, 2007. – 128 с.
3. Осипов А. Л. Исследование и разработка схем теплоснабжения для использования низкопотенциального тепла на основе применения теплонасосных установок: дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Осипов Айрат Линарович. – Казань, 2005. – 117 с.
4. Маринченко А. Ю. Оптимизация исследований комбинированных теплопроизводящих установок с тепловыми насосами: дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.01 / Маринченко Андрей Юрьевич. – Иркутск, 2004. – 120 с.
5. Беляева Т. Г. Оценка экономической целесообразности использования тепловых насосов в коммунальной теплоэнергетике Украины / Т. Г. Беляева, А. А. Рутенко, М. В. Ткаченко, О. Б. Басок // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 5. – С. 81 – 87.
6. Долинский А. А. Тепловые насосы в системе теплоснабжения зданий / А. А. Долинский, Б. Х. Драганов // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 6. – С. 71 – 83.
7. Басок Б. И. Анализ экономической эффективности при реализации теплонасосных систем для теплоснабжения / Б. И. Басок, Т. Г. Беляева, А. А. Рутенко, А. А. Лунина // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 4. – С. 56 – 63.
8. Долинский А. А. Тепловые насосы в теплоснабжении / А. А. Долинский, Е. Т. Базеев, А. И. Чайка // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 99 – 105.

**Остапенко Ольга Павлівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики. Вінницький національний технічний університет.

**Шевченко Ольга Валентинівна** – менеджер з адміністративної діяльності. ТОВ "НВО Теплоенергоресурс".

**Бакум Олена Вікторівна** – студентка інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання. Вінницький національний технічний університет.