

## МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ ТЕПЛОНАСОСНИХ СТАНЦІЙ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ТА КОГЕНЕРАЦІЙНИМ ПРИВОДОМ

Остапенко О. П., канд. техн. наук, доцент  
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

*Запропоновано методичні основи комплексного оцінювання енергетичної ефективності парокompресійних теплонасосних станцій (ТНС) з електричним та когенераційним приводами з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії ТНС та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.*

*Methodical bases of complex evaluation of the energy efficiency of heat pump stations (HPS) with electric and cogeneration drives with taking into account the complex effect of variable operation modes of HPS, peak heat sources of HPS, sources of drive power of HPS and taking into consideration the energy losses of the process of generation, supply and transformation of electric energy.*

Ключові слова: енергетична ефективність, теплонасосна станція, безрозмірний критерій енергетичної ефективності, електричний привод, когенераційний привод.

### Вступ

Енерго- та ресурсозбереження і охорона довкілля є пріоритетними напрямками розвитку фундаментальних досліджень в області споживання паливно-енергетичних ресурсів [1]. У світлі енергетичної кризи актуальним стає питання ефективного споживання енергоносіїв та впровадження новітніх енергозберігаючих технологій [2]. Використання парокompресійних теплонасосних установок (ТНУ) з електричним та когенераційним приводом сприятиме економії паливно-енергетичних ресурсів та захисту навколишнього середовища за рахунок зниження теплового забруднення та кількості шкідливих викидів продуктів згорання. Більший енерго- та ресурсощадний ефект, ніж від ТНУ, слід очікувати від впровадження теплонасосних станцій, де тепловий насос поєднано з піковим джерелом теплоти. Це зумовлює актуальність досліджень енергетичної ефективності теплонасосних станцій.

Питанням енергетичної ефективності парокompресійних ТНС за останні роки присвячено низку публікацій [1–12]. В роботі [1] автором виконані дослідження з підвищення ефективності та вибору раціональних параметрів та режимів роботи теплонасосних станцій для систем опалення та теплопостачання за витратою умовного палива. В [2] проведено термодинамічний та ексергетичний аналіз ефективності парокompресійного циклу теплонасосної станції теплопостачання. Авторами в дослідженні [3] аналізується термодинамічна ефективність теплонасосних станцій теплопостачання. В дослідженні [4] запропоновано новий підхід до оцінки ефективності теплових насосів. Термодинамічний аналіз різних типів ТНУ проведений в дослідженні [5]. Проте, в дослідженнях [1–5] не враховані втрати енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до ТНУ від електростанцій різних типів. В роботі [6] визначені ефективні дійсні режими роботи ТНУ з електричним та когенераційним приводами з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних теплових насосів та втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до ТНУ. Енергетичні переваги застосування парокompресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами проаналізовано в дослідженні [7].

В публікаціях [8, 9] визначені енергетичні та економічні передумови ефективної інтеграції ТНС в системи теплопостачання промислових підприємств та підприємств муніципальної енергетики в Україні. В роботі [10] оцінено енергетичну, екологічну та економічну ефективність ТНС з різними видами приводу компресора на природних та промислових джерелах низькотемпературної теплоти з урахуванням змінних режимів роботи систем теплопостачання в широкому діапазоні зміни потужності ТНУ. Результати досліджень енергетичної ефективності ТНС з різними джерелами теплоти, за умови змінних режимів роботи, наведені в роботі [11]. В роботі [12] оцінено енергоекологічну ефективність ТНС з різними видами приводу компресора на природних та промислових джерелах низькотемпературної теплоти за умови змінних режимів роботи систем теплопостачання.

В роботах [1–12] авторами не запропоновані методичні основи для комплексної оцінки енергетичної ефективності парокompресійних ТНС з електричним та когенераційним приводами з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії

парокомпресійних ТНС та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.

**Метою дослідження** є розроблення методичних основ комплексної оцінки енергетичної ефективності парокомпресійних теплонасосних станцій з електричним та когенераційним приводами з урахуванням комплексного впливу змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії парокомпресійних ТНС та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії.

#### Основна частина

В дослідженні запропоновано методичні основи для комплексної оцінки енергетичної ефективності парокомпресійних ТНС з ТНУ малої (до 1 МВт) та великої потужностей з електричним та когенераційним приводом (від газопоршневого двигуна (ГПД)). Дослідження проводилось для випадків використання в електроприводних ТНУ електроенергії від електростанцій різних типів, а також для усереднених значень ККД електростанцій в Україні. Когенераційний привод теплових насосів має переваги порівняно з електричним, оскільки дозволяє уникнути додаткових втрат електроенергії при транспортуванні та передбачає утилізацію теплоти відхідних газів після газового двигуна, що забезпечує кращу енергетичну ефективність. Схеми зазначених ТНС наведені в роботі [8].

Енергетична ефективність ТНС в значній мірі визначається оптимальним розподілом навантаження між теплонасосною установкою та піковим джерелом теплоти (наприклад, водогрійним паливним котлом, електрокотлом, сонячними колекторами тощо) у складі ТНС. Цей розподіл характеризується часткою навантаження ТНУ у складі ТНС  $\beta$ , яка визначається як відношення теплової потужності ТНУ до потужності ТНС  $\beta = Q_{ТНУ}/Q_{ТНС}$ . Для ТНС з когенераційним приводом значення теплової потужності ТНУ визначається з урахуванням потужності утилізаційного обладнання когенераційного приводу  $Q_{ТНУ} = Q_{\kappa} + \Sigma Q_{ym}$ , де  $Q_{\kappa}$  – потужність конденсатора ТНУ,  $\Sigma Q_{ym}$  – потужність утилізаційного обладнання когенераційного приводу ТНУ.

На основі аналізу результатів проведених досліджень [10-12] визначені оптимальні значення показника  $\beta$  для ТНС на різних джерелах теплоти з різними видами приводу компресора ТНУ при змінних режимах роботи теплової мережі. Кожному із цих режимів відповідає певне значення теплових потужностей ТНС, ТНУ та частки навантаження ТНУ  $\beta$ . Результати досліджень енергетичної ефективності ТНС з електричним та когенераційним приводом, за умови змінних режимів роботи, для різних джерел низькотемпературної теплоти наведені в роботі [11].

В нашому дослідженні проаналізовано енергетичну ефективність системи «Джерело приводної енергії ТНС – ТНС – споживач теплоти від ТНС» на прикладі парокомпресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводом. Перевагою такого підходу є врахування втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до ТНУ та пікового джерела теплоти з метою визначення ефективних режимів роботи ТНС з електричним та когенераційним приводом.

Запропоновано здійснювати комплексну оцінку енергетичної ефективності парокомпресійних ТНС з електричним та когенераційним приводами за комплексним безрозмірним критерієм енергетичної ефективності ТНС:

$$K_{ТНС} = (1-\beta) \cdot K_{ПДТ} + \beta \cdot K_{ТНУ}, \quad (1)$$

де  $K_{ПДТ}$  – безрозмірний критерій енергетичної ефективності пікового джерела теплоти у складі ТНС (водогрійний паливний котел, електрокотел, сонячні колектори тощо),

$K_{ТНУ}$  – безрозмірний критерій енергетичної ефективності парокомпресійної ТНУ з електричним чи когенераційним приводом у складі ТНС.

Безрозмірний критерій енергетичної ефективності парокомпресійних ТНУ з електричним чи когенераційним приводом  $K_{ТНУ}$  запропонований в дослідженні [6]. Він одержаний на основі рівняння енергетичного балансу для системи «Джерело приводної енергії ТНУ – ТНУ – споживач теплоти від ТНУ» з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокомпресійних ТНУ та з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до ТНУ.

Для парокомпресійних ТНУ з електричним приводом безрозмірний критерій енергетичної ефективності матиме вид [6]:

$$K_{ТНУ} = Q_{ТНУ}/Q_m = \eta_{ЕЛ} \cdot \varphi \cdot \eta_{mn}, \quad (2)$$

де  $Q_m$  – потужність, витрачена на електростанції для вироблення електричної енергії для приводу ТНУ,

$\eta_{ЕЛ}$  – загальний ККД генерування, постачання і перетворення електричної енергії з [6],

$\varphi$  – коефіцієнт перетворення парокомпресійних ТНУ,

$\eta_{mn}$  – ККД теплового потоку, що враховує втрати енергії та робочого агента в трубопроводах та обладнанні ТНУ.

Значення загального ККД генерування, постачання і перетворення електричної енергії до ТНУ з електроприводом, згідно з [6], може бути визначене:

$$\eta_{EL} = \eta_{EC} \cdot \eta_{LEP} \cdot \eta_{EP}, \quad (3)$$

де  $\eta_{EC}$  – усереднене значення ККД електростанцій в Україні з дослідження [6],

$\eta_{LEP}$  – ККД розподільчих електричних мереж в Україні з [6],

$\eta_{EP}$  – ККД електричного двигуна з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном з [6].

Для ТНУ з когенераційним приводом загальний ККД генерування, постачання і перетворення електричної енергії визначається за формулою з [6]:  $\eta_{EL} = \eta_{ED} \cdot \eta_{EP}$ , де  $\eta_{ED}$  – ефективний ККД газопоршневого двигуна.

Для парокompресійних ТНУ з когенераційним приводом безрозмірний критерій енергетичної ефективності матиме вид [6]:

$$K_{THV} = Q_{THV} / Q_m = \eta_{EL} \cdot \varphi \cdot \eta_{mn} = \eta_{ED} \cdot \eta_{EP} \cdot \varphi \cdot \eta_{mn}. \quad (4)$$

За умови  $K_{THV} = 1$  теплонасосна установка передає до споживача таку ж теплову потужність, яка була витрачена для вироблення електроенергії для привода ТНУ. Чим більше значення цього показника, тим більш ефективним та конкурентоздатним буде тепловий насос.

В дослідженні [6] запропоновано метод визначення областей ефективного використання парокompресійних ТНУ з електричним та когенераційним приводом за безрозмірним показником енергетичної ефективності ТНУ  $K_{THV}$  з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних ТНУ та врахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до ТНУ.

Безрозмірний критерій енергетичної ефективності пікового джерела теплоти – електрокотла – у складі ТНС  $K_{ПДТ}$  може бути одержаний на основі рівняння енергетичного балансу для систем «Джерело електричної енергії – електричний котел – споживач теплоти від ТНС» з урахуванням впливу джерел енергії для пікового джерела теплоти (електрокотла) та з урахуванням втрат енергії при генеруванні та постачанні електричної енергії до електрокотла.

Для електрокотла як пікового джерела теплоти для ТНС безрозмірний критерій енергетичної ефективності матиме вид:

$$K_{ПДТ} = Q_{ЕК} / Q_m = \eta_{EL}^k \cdot \eta_{ЕК}, \quad (5)$$

де  $Q_{ЕК}$  – теплова потужність водогрійного електрокотла, яка визначається як:  $Q_{ЕК} = Q_{ТНС} - Q_{THV}$ ;

$Q_m$  – потужність, витрачена на електростанції для вироблення електричної енергії,

$\eta_{EL}^k$  – загальний ККД генерування та постачання електричної енергії до електрокотла, визначається за формулою:  $\eta_{EL}^k = \eta_{EC} \cdot \eta_{LEP}$ ,

$\eta_{ЕК}$  – ККД електричного котла.

Тоді безрозмірний критерій енергетичної ефективності електрокотла як пікового джерела теплоти для ТНС визначатиметься:

$$K_{ПДТ} = \eta_{EC} \cdot \eta_{LEP} \cdot \eta_{ЕК}. \quad (6)$$

Для випадків застосування парокompресійних ТНС з когенераційним приводом та піковим електрокотлом загальний ККД генерування та постачання електричної енергії до електрокотла може визначатись як  $\eta_{EL}^k = \eta_{ED}$  у випадку використання електроенергії від когенераційного приводу ТНУ, або за вказаною вище формулою для випадків споживання електричної енергії з енергосистеми.

Безрозмірний критерій енергетичної ефективності пікового джерела теплоти – водогрійного паливного котла – у складі ТНС  $K_{ПДТ}$  може бути одержаний на основі рівняння енергетичного балансу для систем «Джерело електричної енергії та палива – паливний котел – споживач теплоти від ТНС» з урахуванням впливу джерел енергії для пікового джерела теплоти (паливного котла) та з урахуванням втрат енергії при генеруванні та постачанні електричної енергії до котла.

Для паливного котла як пікового джерела теплоти для ТНС безрозмірний критерій енергетичної ефективності матиме вид:

$$K_{ПДТ} = Q_{ПК} / Q_n = \eta_{ПК}, \quad (7)$$

де  $Q_{ПК}$  – теплова потужність водогрійного паливного котла, яка визначається як:  $Q_{ПК} = Q_{ТНС} - Q_{ТНУ}$ ;  
 $Q_n$  – потужність, витрачена для вироблення теплової енергії від спалювання палива в котлі,  
 $\eta_{ПК}$  – ККД водогрійного паливного котла або паливної котельної (для ТНС великих потужностей).

Для випадків використання альтернативних пікових джерел теплоти в ТНС (наприклад, сонячних колекторів для ТНС невеликої потужності) значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності пікового джерела теплоти для ТНС  $K_{ПДТ}$  дорівнюватиме ККД альтернативного пікового джерела теплоти  $\eta_{АПДТ}$ , або ККД додаткової системи з альтернативним піковим джерелом теплоти  $\eta_{АПДТ}^c$ .

Слід зазначити, що комплексний безрозмірний критерій енергетичної ефективності ТНС  $K_{ТНС}$  може бути використаний також і для вибору найбільш ефективного пікового джерела теплоти для певного виду парокompресійних ТНС.

Запропоновані методичні основи з оцінювання енергетичної ефективності парокompресійних ТНС з електричним та когенераційним приводами мають такі переваги:

- дозволяють оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії парокompресійних ТНС з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії;
- враховують режими роботи парокompресійних ТНУ;
- враховують змінні режими роботи ТНС для тепlopостачання протягом року зі зміною розподілу навантаження між парокompресійними ТНУ та піковим джерелом теплоти ТНС;
- враховують вплив видів привода парокompресійних ТНУ та джерел приводної енергії парокompресійних ТНС з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до ТНС;
- враховують енергетичну ефективність парокompресійних ТНС різних рівнів потужностей з електричним та когенераційним приводами;
- враховують вплив пікових джерел теплоти парокompресійних ТНС та виду споживаної ними енергії з урахуванням втрат енергії при генеруванні та постачанні енергії до пікових джерел теплоти;
- можуть бути використані для вибору найбільш ефективного пікового джерела теплоти для певного виду парокompресійних ТНС;
- можуть бути використані для оцінювання енергетичної ефективності парокompресійних ТНС з різними холодоагентами та схемними рішеннями ТНУ;
- дозволяють комплексно оцінювати енергетичну ефективність значної кількості варіантів парокompресійних ТНС з електричним та когенераційним приводами.

Застосування запропонованих методичних основ комплексної оцінки енергетичної ефективності ТНС з електричним та когенераційним приводами продемонструємо на конкретних прикладах.

На рис. 1 та 2 показані результати комплексної оцінки енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом, за умови споживання електроенергії з енергосистеми України.

На рис. 1 показані значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ у складі ТНС зі значеннями частки навантаження ТНУ в діапазоні  $\beta = 0 \dots 1,0$ . На рис. 1 значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності парокompресійних ТНУ з електричним приводом  $K_{ТНУ}$ , згідно з дослідженням [6], визначені для значень дійсного коефіцієнта перетворення ТНУ в діапазоні  $\varphi_\delta = 0,68 \dots 0,75$ . Піковим джерелом теплоти ТНС в цьому випадку передбачена водогрійна паливна котельня з  $\eta_{ПК} = 0,85$ .

На основі аналізу результатів проведених досліджень [10-12] визначені оптимальні значення показника  $\beta$  для ТНС на різних джерелах теплоти з різними видами приводу компресора ТНУ при змінних режимах роботи теплової мережі. На рис. 2 показані результати комплексної оцінки енергетичної ефективності ТНС великої потужності з електричним приводом, за умови споживання електроенергії з енергосистеми України, для оптимальних значень частки навантаження ТНУ  $\beta$ . Дослідження проведено для випадків сезонного змінного навантаження ТНУ у складі ТНС для оптимальних значень частки навантаження ТНУ в діапазоні  $\beta = 0,16 \dots 0,63$  [10-12], що відповідає температурним режимам роботи системи тепlopостачання. Значення критерію енергетичної ефективності ТНУ з електроприводом  $K_{ТНУ}$  на рис. 2 відповідають значенням дійсного коефіцієнта перетворення ТНУ в межах  $\varphi_\delta = 0,68 \dots 0,75$ . Піковим джерелом теплоти ТНС є водогрійна паливна котельня з  $\eta_{ПК} = 0,85$ .

Для практичного застосування запропонованих методичних основ комплексної оцінки енергетичної ефективності ТНС з електричним та когенераційним приводами пропонуємо використовувати результати з досліджень [6-12].

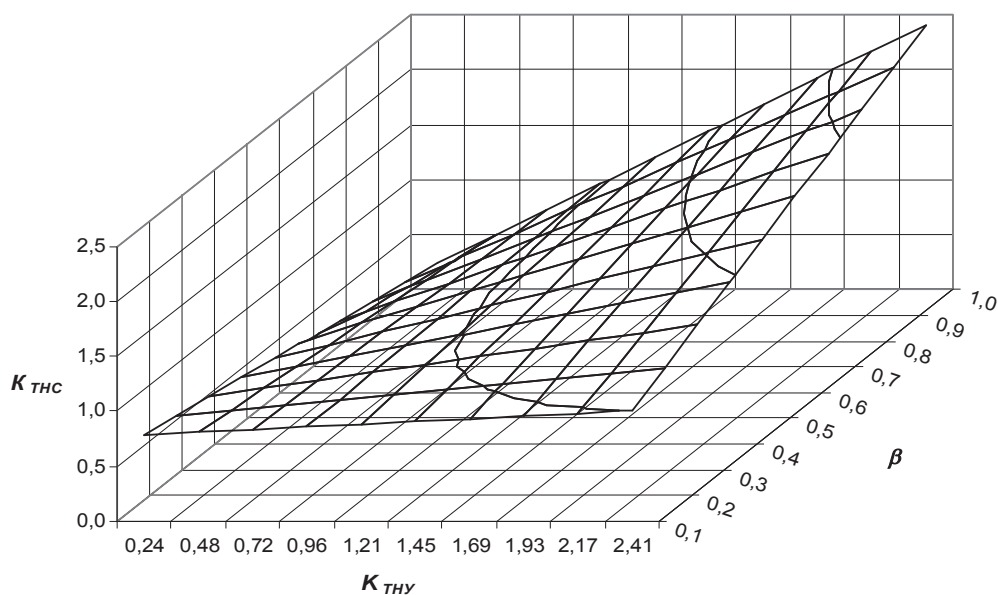


Рис. 1 – Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС з електричним приводом для випадків змінного навантаження ТНУ, за умови споживання електроенергії з енергосистеми України

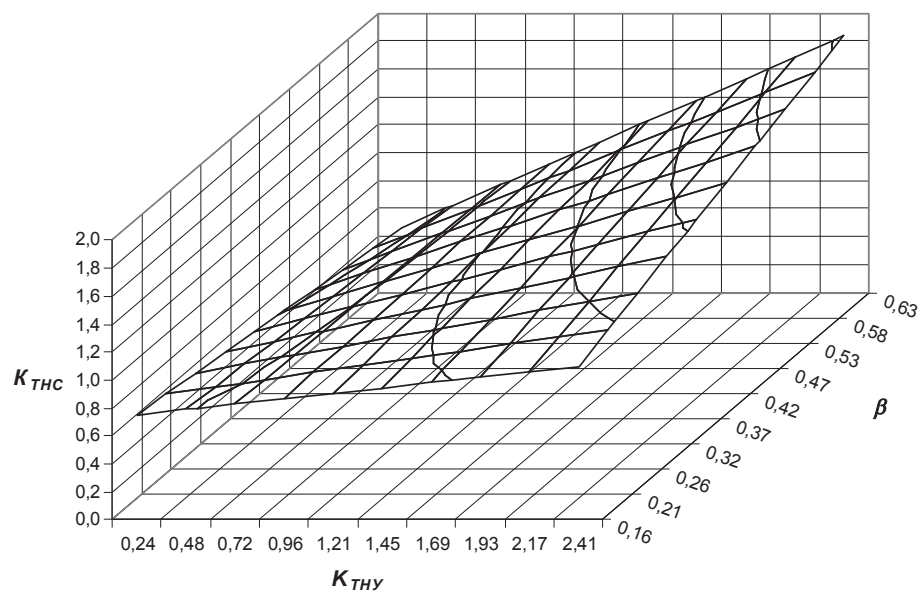


Рис. 2 – Значення безрозмірного критерію енергетичної ефективності ТНС з електричним приводом для оптимальних значень частки навантаження ТНУ, за умови споживання електроенергії з енергосистеми України

#### Висновки

Запропоновані методичні основи з оцінювання енергетичної ефективності парокompресійних ТНС з електричним та когенераційним приводами, які мають такі переваги:

- дозволяють оцінювати комплексний вплив змінних режимів роботи ТНС, пікових джерел теплоти ТНС, джерел приводної енергії парокompресійних ТНС з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії;
- враховують режими роботи парокompресійних ТНУ;



- враховують змінні режими роботи ТНС для теплопостачання протягом року зі зміною розподілу навантаження між парокompресійними ТНУ та піковим джерелом теплоти ТНС;
- враховують вплив видів привода парокompресійних ТНУ та джерел приводної енергії ТНС з урахуванням втрат енергії при генеруванні, постачанні і перетворенні електричної енергії до ТНС;
- враховують енергетичну ефективність парокompресійних ТНС різних рівнів потужностей з електричним та когенераційним приводами;
- враховують вплив пікових джерел теплоти парокompресійних ТНС та виду споживаної ними енергії з урахуванням втрат енергії при генеруванні та постачанні енергії до пікових джерел теплоти;
- можуть бути використані для вибору найбільш ефективного пікового джерела теплоти для певного виду парокompресійних ТНС;
- можуть бути використані для оцінювання енергетичної ефективності парокompресійних ТНС з різними холодоагентами та схемними рішеннями ТНУ;
- дозволяють комплексно оцінювати енергетичну ефективність значної кількості варіантів парокompресійних ТНС з електричним та когенераційним приводами.

### Література

1. Исанова А. В. Повышение эффективности и выбор рациональных параметров и режимов работы теплонасосных станций для систем отопления и горячего водоснабжения : автореферат дисс. ... канд. тех. наук : 05.23.03 / Исанова Анна Владимировна. – Воронеж, 2011. – 18 с.
2. Денисова А. Є. Аналіз парокompресійного циклу теплонасосних станцій теплопостачання / А. Є. Денисова., В. Ю. Бірюк // Тр. Одес. политехн. ун-та., 2012. – Вып.1 (38). – С. 125–128.
3. Безродний М. К. Термодинамічна ефективність теплонасосних схем теплопостачання / М. К. Безродний, Н. О. Питула // Вісник ВПІ. – 2013. – №3. – С. 39–45.
4. Ильин Р. А. Новый подход к оценке эффективности тепловых насосов / Р. А. Ильин, А. К. Ильин // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2010. – № 2. – С. 83–87.
5. Елистратов С. Л. Комплексное исследование эффективности тепловых насосов : дисс. ... докт. техн. наук : 01.04.14 / Елистратов Сергей Львович. – Новосибирск, 2010. – 383 с.
6. Енергетична ефективність парокompресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // Наукові праці ВНТУ. – 2014. – № 4. – 9 с. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3821/5562>.
7. Остапенко О. П. Енергетичні переваги застосування парокompресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, В. В. Лещенко, Р. О. Тіхоненко // Наукові праці ВНТУ. – 2015. – № 1. – 9 с. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3976/5776>
8. Ткаченко С. Й. Парокompресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2009. – 176 с.
9. Остапенко О. П. Перспективи застосування теплонасосних станцій в Україні / О. П. Остапенко, О. В. Шевченко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2011. – №2. – С. 132 – 139.
10. Остапенко О. П. 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. – 11 с. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/viewFile/3040/4626>.
11. Остапенко О. П. 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. – 9 с. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3448/5066>.
12. Остапенко О. П. 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. – 10 с. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3033/4605>.