

УДК 621.577

О. П. Остапенко, к. т. н., доц.; В. В. Лещенко; Р. О. Тіхоненко

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПЕРЕВАГИ ЗАСТОСУВАННЯ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ТА КОГЕНЕРАЦІЙНИМ ПРИВОДАМИ

Проаналізовано енергетичні переваги застосування парокompресійних теплових насосів (ТН) з електричним та когенераційним приводами. Представлені результати досліджень дозволяють оцінити економію умовного палива від застосування парокompресійних ТН з електричним та когенераційним приводами для різних режимів роботи ТН і здійснити вибір ефективних режимів роботи парокompресійних ТН з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних ТН і врахуванням втрат енергії під час генерування, постачання і перетворення електричної енергії.

Ключові слова: енергетичні переваги, парокompресійний тепловий насос, коефіцієнт перетворення, електричний привод, когенераційний привод, економія умовного палива.

Вступ

В Україні сучасний розвиток енергетики характеризується значним збільшенням вартості енергоресурсів і погіршенням стану довкілля. Розв'язання проблем енерго- та ресурсозбереження й охорони довкілля є пріоритетними напрямками досліджень в галузі споживання паливно-енергетичних ресурсів [1]. Частка споживання природного газу в промисловому комплексі України дотепер залишається значною. Значну частину енергетичних проблем країни розв'язують за рахунок спалювання природного газу. У світлі енергетичної кризи актуальним стає питання ефективного споживання енергоресурсів і впровадження новітніх енергозберігальних технологій [2]. Використання парокompресійних теплових насосів з електричним та когенераційним приводами сприятиме економії природного газу та покращенню стану довкілля за рахунок зниження теплового забруднення та кількості шкідливих викидів продуктів згорання.

Питанням оцінки енергетичної ефективності теплових насосів за останні роки присвячено чимало публікацій [1 – 6]. У роботі [1] автором виконані дослідження з підвищення ефективності та вибору раціональних параметрів і режимів роботи теплонасосних станцій для систем опалення та теплопостачання за витратою умовного палива. У [2] проведено термодинамічний та ексергетичний аналіз ефективності парокompресійного циклу теплонасосної станції теплопостачання. Авторами в дослідженні [3] проаналізовано термодинамічну ефективність теплонасосних станцій теплопостачання. У дослідженні [4] запропоновано новий підхід до оцінки ефективності теплових насосів. Проте в дослідженнях [1 – 4] не враховано втрати енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії від електростанцій різних типів. Автором [5] проведено термодинамічний аналіз різних типів ТН. У роботі [6] визначено ефективні дійсні режими роботи ТН з електричним і когенераційним приводами з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних теплових насосів і втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТН.

У роботах [1 – 6] авторами не здійснено оцінку обсягів економії енергоресурсів від упродовження парокompресійних теплових насосів з електричним і когенераційним приводами з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Метою дослідження є визначення енергетичних переваг застосування парокompресійних ТН та оцінка обсягів економії енергоресурсів від упровадження парокompресійних ТН з електричним і когенераційним приводами з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних ТН та врахування втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії; визначення ефективних режимів роботи парокompресійних ТН з електричним і когенераційним приводами.

Основна частина

У парокompресійних ТН підвищення температурного рівня низькотемпературної теплоти відбувається за механічного стискання холодоагенту в компресорі. Теплові насоси можуть мати електричний та когенераційний приводи (від газопоршневого двигуна). Когенераційний привод теплових насосів дозволяє уникнути додаткових втрат електроенергії під час транспортування. Крім того застосування ТН з когенераційним приводом компресора від газових двигунів можна розглядати як один з важливих напрямів енерго- і ресурсозбереження, оскільки він передбачає утилізацію теплоти відхідних газів після газового двигуна, що забезпечує кращу енергетичну ефективність.

Найчастіше енергетичну ефективність перетворення енергії в тепловому насосі оцінюють коефіцієнтом перетворення енергії ϕ , який дорівнює відношенню енергії, що надійшла споживачу, до енергії, яку використали для реалізації циклу.

Теоретичне значення коефіцієнта перетворення ТН визначають за формулою:

$$\phi_t = \frac{T_1}{T_1 - T_2}, \quad (1)$$

де T_1 та T_2 – відповідно температури високотемпературного теплоносія на виході та низькотемпературного теплоносія на вході в ТН, К.

Слід зазначити, що коефіцієнт перетворення не враховує всі втрати енергії, пов'язані з виробленням теплоти в ТН. У реальних умовах, крім дроселювання, відбуваються втрати енергії в трубопроводах та обладнанні ТН.

Дійсний коефіцієнт перетворення ТН становитиме

$$\phi_d = \phi_t \cdot \eta_{тн}, \quad (2)$$

де $\eta_{тн}$ – енергетичний ККД ТН, який враховує всі втрати енергії в тепловому насосі. Величина енергетичного ККД сучасних ТН в межах 0,65 – 0,7 [4].

У вітчизняній і закордонній літературі, а також на практиці ефективність використання ТН оцінюють переважно за дійсним коефіцієнтом перетворення. Для ефективної роботи ТН з електричним приводом вважають прийнятною величину $\phi_d \geq 2,5 \dots 3,0$; високу енергетичну ефективність ТН забезпечують за $\phi_d = 3,5 \dots 4,0$. Ці значення коефіцієнтів перетворення підтверджують статистичні дані щодо дійсних коефіцієнтів перетворення ТН, які випускають фірми LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, «Енергія», «Тритон-ЛТД» [4].

Високу енергетичну ефективність ТН з когенераційним приводом забезпечують за $\phi_d \geq 2,0$; що зумовлено врахуванням додаткової теплової потужності від утилізаційного обладнання когенераційного приводу ТН [7].

У нашому дослідженні проаналізовано енергетичну ефективність системи «Джерело приводної енергії ТН – ТН – споживач теплоти від ТН» на прикладі парокompресійних теплових насосів з електричним і когенераційним приводами. Перевагою такого підходу є врахування втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТН з метою визначення ефективних режимів роботи ТН з електричним і когенераційним приводами та оцінки обсягів економії енергоресурсів від упровадження парокompресійних ТН.

Електроенергію в Україні виробляють теплові (ТЕС), атомні електростанції (АЕС) та гідроелектростанції (ГЕС). Знаючи значення ККД ТЕС, АЕС та ГЕС та частки електричної енергії, що вони генерують, можна визначити середній ККД генерування електроенергії в Україні.

Усереднене значення ККД електростанцій становитиме:

$$\eta_{EC} = \frac{\alpha_{TEC} + \alpha_{AEC} + \alpha_{GEC}}{\frac{\alpha_{TEC}}{\eta_{TEC}} + \frac{\alpha_{AEC}}{\eta_{AEC}} + \frac{\alpha_{GEC}}{\eta_{GEC}}}, \quad (3)$$

де α_{TEC} , α_{AEC} , α_{GEC} – частки електричної енергії, які генерують відповідні електростанції.

Ураховуючи, що $\alpha_{TEC} = 0,463$; $\alpha_{AEC} = 0,47$ та $\alpha_{GEC} = 0,07$, із формули (3) можна одержати усереднене значення ККД електростанцій $\eta_{EC} = 0,383$ [6].

У разі залучення в енергетичний баланс України альтернативних видів електростанцій (на основі парогазових установок (ПГУ) та газотурбінних установок (ГТУ), сонячних електростанцій термодинамічного циклу (СЕС), вітроенергетичних електростанцій (ВЕС)) усереднене значення ККД електростанцій визначатимемо так:

$$\eta_{EC} = \frac{\sum \alpha_i}{\sum (\alpha_i / \eta_i)}, \quad (4)$$

де α_i – частки електричної енергії, які генерують відповідні електростанції; η_i – ККД відповідної електростанції.

Від електростанцій електрична енергія через розподільчі мережі надходить до споживача. ККД функціонування розподільчих електричних мереж визначається рівнем втрат енергії під час транспортування. За даними річного звіту НКРЕ за 2010 рік, величина загальних технологічних втрат електроенергії в Україні склала 12,5% від обсягу електроенергії, що надійшла в мережу. Отже, ККД розподільчих мереж в Україні становитиме $\eta_{ЛЕП} = 0,875$ [6].

У кінці енергетичного ланцюга споживач електричної енергії – електричний двигун ТН. ККД електричного двигуна потужністю 55 – 100 кВт, з урахуванням втрат енергії в блоці управління двигуном, становитиме $\eta_{ЕП} = 80 - 85\%$. ККД електричного двигуна великої потужності становитиме $\eta_{ЕП} = 90 - 95\%$ [6].

Отже, проаналізувавши ланцюг генерування, постачання й перетворення електричної енергії, отримаємо значення загального ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТН з електроприводом

$$\eta_{ЕЛ} = \eta_{EC} \cdot \eta_{ЛЕП} \cdot \eta_{ЕП}. \quad (5)$$

Для ТН з когенераційним приводом загальний ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії визначатимемо за формулою: $\eta_{ЕЛ} = \eta_{ЕД} \cdot \eta_{ЕП}$, де $\eta_{ЕД}$ – ефективний ККД газопоршневого двигуна.

Для ТН з когенераційним приводом теоретичне значення коефіцієнта перетворення визначаємо з урахуванням потужності утилізаційного обладнання когенераційного приводу $\varphi_T = \frac{Q_{ТН} + \sum Q_{УТ}}{N_{КМ}}$, де $N_{КМ}$ – теоретична потужність компресора ТН, $\sum Q_{УТ}$ – потужність утилізаційного обладнання когенераційного приводу ТН.

Ефективна інтеграція парокompресійних ТН з електричним і когенераційним приводами в промисловість та енергетику обґрунтована забезпеченням економії умовного палива від упродовження.

Економія умовного палива (у відсотках) від застосування парокompресійних ТН з елект-

ричним і когенераційним приводами визначають так:

$$\Delta B_y = \left(1 - \frac{\eta_{д.т.}^н}{\varphi \cdot \eta_{ЕЛ}} \right) \cdot 100, \quad (6)$$

де $\eta_{д.т.}^н$ – ККД-нетто заміщеного джерела теплоти, $\eta_{ЕЛ}$ – загальний ККД генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Ефективне впровадження парокompресійних ТН з електричним і когенераційним приводами в промисловість та енергетику буде досягнуто за умови:

$$\varphi_d > \frac{\eta_{д.т.}^н}{\eta_{ЕЛ}}, \quad (7)$$

де φ_d – дійсний коефіцієнт перетворення парокompресійних ТН з формули (2).

Дослідження енергетичної ефективності ТН проводили методом математичного моделювання роботи ТН із використанням програми в Excel. Досліджували енергетичну ефективність ТН з електроприводом і когенераційним приводом компресора від газопоршневого двигуна (ГПД). Схеми зазначених ТН наведені в роботі [8].

У дослідженні здійснена оцінка економії умовного палива від упровадження парокompресійних ТН малої (до 1 МВт) та великої потужностей з електричним і когенераційним приводами (від ГПД). Дослідження проводили для випадків використання в електроприводних ТН електроенергії від електростанцій різних типів, а також для усереднених значень ККД електростанцій в Україні. У дослідженні враховано, що ККД-нетто заміщеного джерела теплоти $\eta_{д.т.}^н = 0,8$.

На рис. 1 та 2 показані значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокompресійних ТН з електроприводом для теплових насосів малої та великої потужностей відповідно, залежно від теоретичних значень коефіцієнта перетворення. Дослідження проводили для випадків використання в ТН електроенергії від електростанцій різних типів, а також для усереднених значень ККД електростанцій в Україні. Залежності, показані на рис. 1 та 2, дозволяють визначити мінімальні теоретичні значення коефіцієнта перетворення електроприводних ТН, вище яких застосування певного виду ТН забезпечує економію умовного палива та є доцільним.

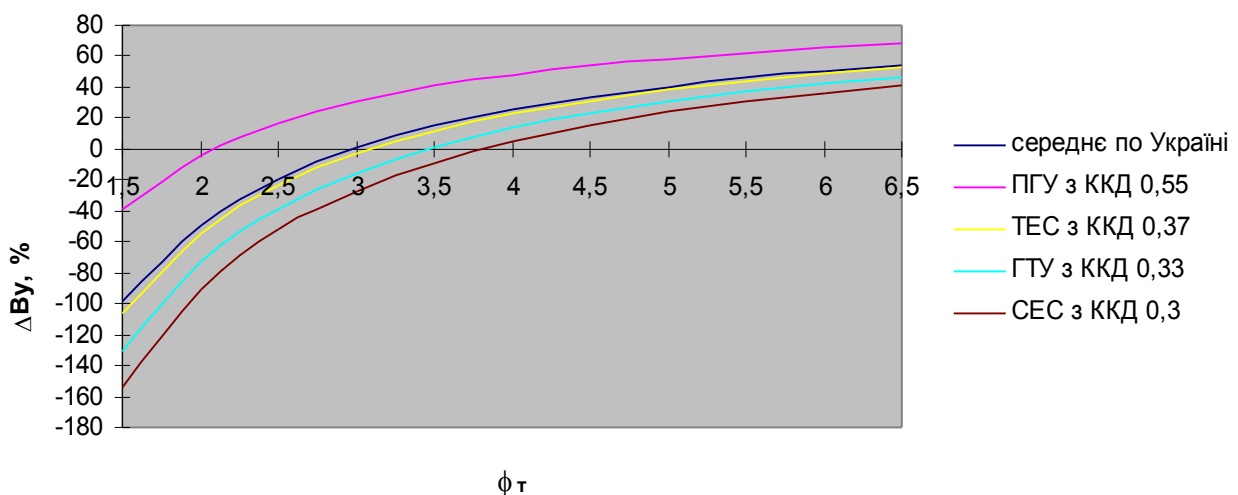


Рис. 1. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокompресійних ТН з електроприводом для теплових насосів малої потужності залежно від теоретичних значень коефіцієнта перетворення

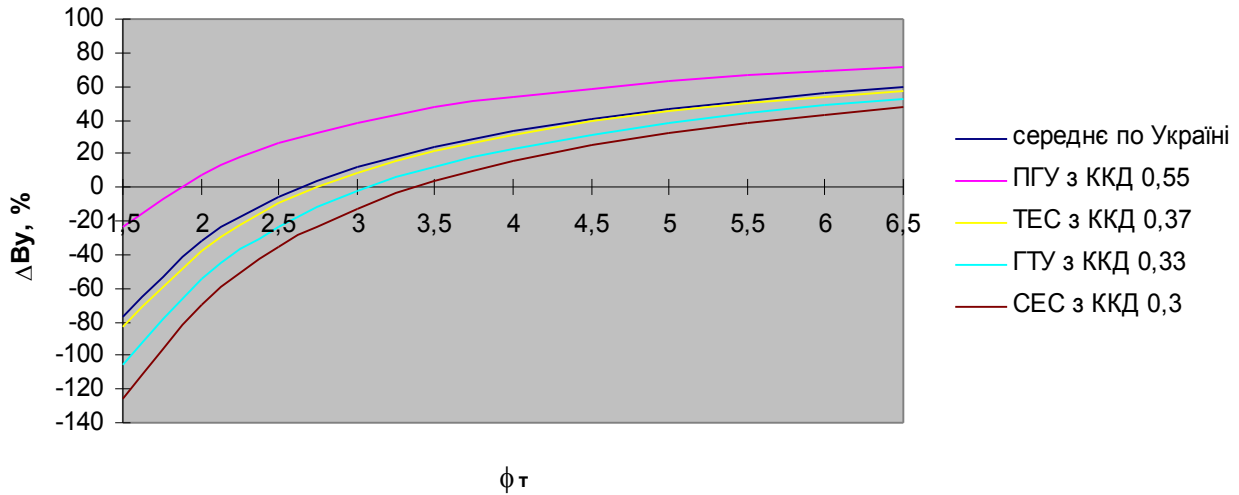


Рис. 2. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокompресійних ТН з електроприводом для теплових насосів великої потужності залежно від теоретичних значень коефіцієнта перетворення

На рис. 3 та 4 показані значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокompресійних ТН з електроприводом для теплових насосів малої та великої потужностей відповідно, залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення. Дослідження проводили для випадків використання в ТН електроенергії від електростанцій різних типів, а також для усереднених значень ККД електростанцій в Україні. Ці залежності дозволяють визначити мінімальні дійсні значення коефіцієнта перетворення електроприводних ТН, вище яких застосування певного виду ТН забезпечує економію умовного палива та є доцільним.

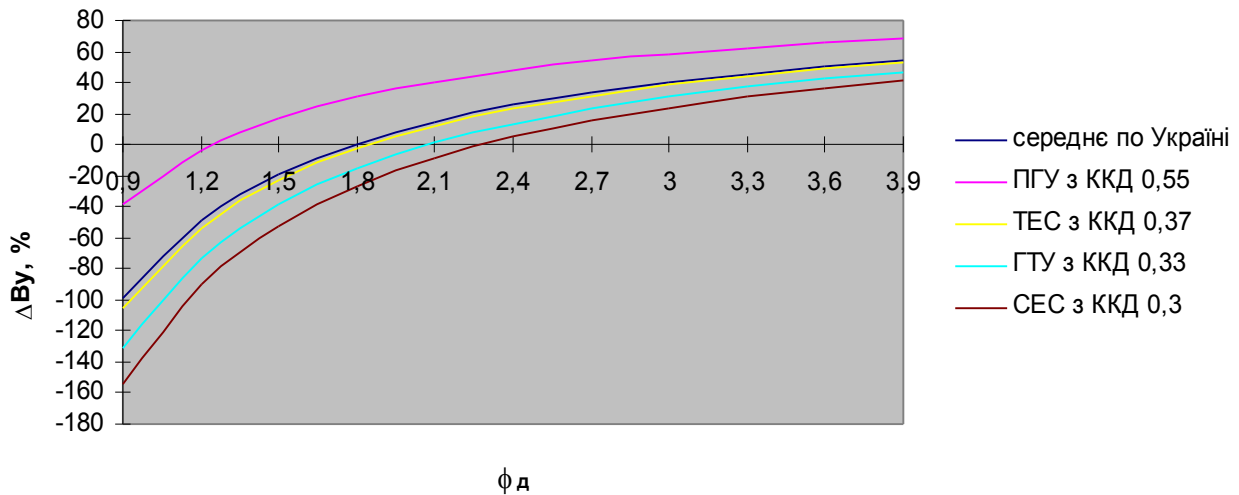


Рис. 3. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокompресійних ТН з електроприводом для теплових насосів малої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення

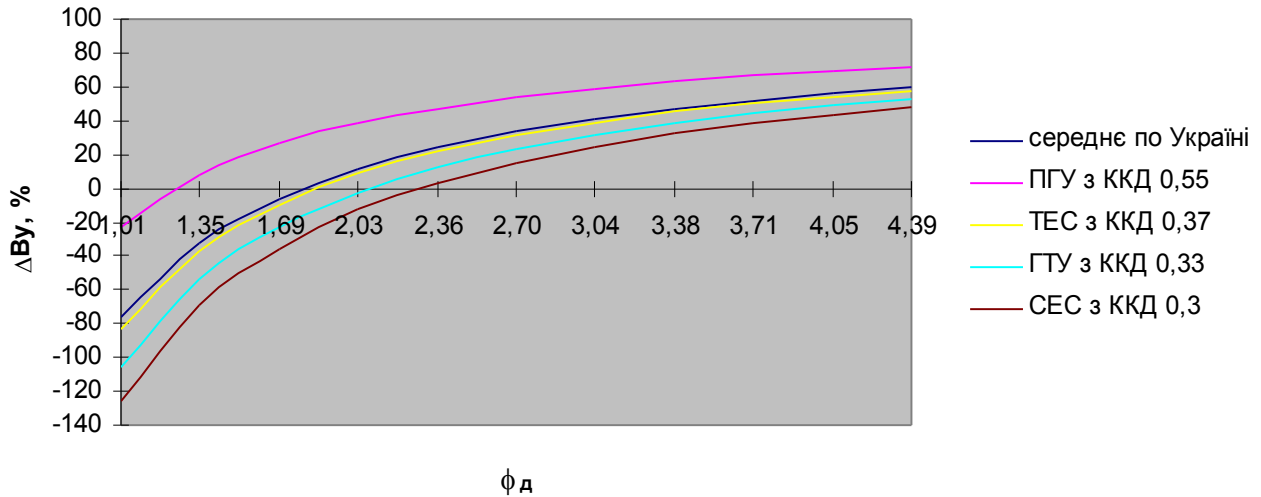


Рис. 4. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН з електроприводом для теплових насосів великої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення

Запропоновані на рис. 1 – 4 залежності визначають енергетичні переваги застосування парокомпресійних ТН з електроприводом і дозволяють оцінити економію умовного палива від застосування парокомпресійних ТН з електроприводом у разі різних режимів роботи ТН та використання електроенергії від електростанцій різних типів, а також для усереднених значень ККД електростанцій в Україні.

На рис. 5 показані значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН з когенераційним приводом для теплових насосів малої та великої потужності залежно від теоретичних значень коефіцієнта перетворення. Запропоновані на рис. 5 залежності дозволяють визначити мінімальні теоретичні значення коефіцієнта перетворення ТН, вище яких застосування певного виду когенераційних ТН забезпечує економію умовного палива та є доцільним.

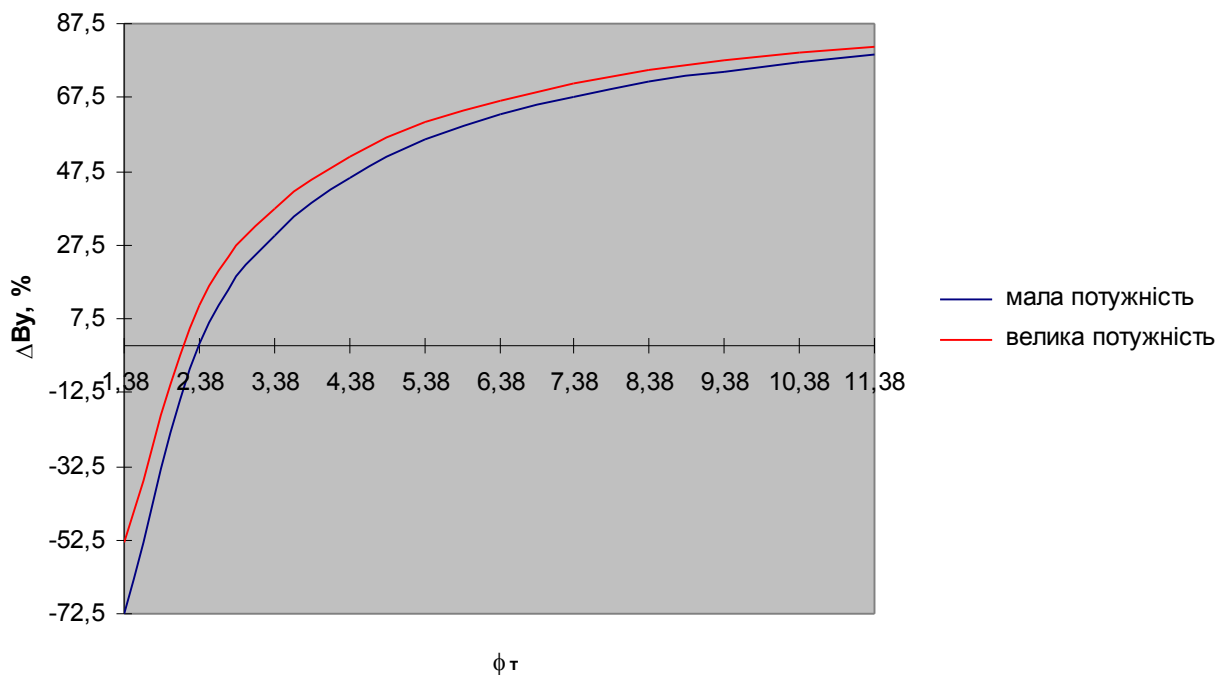


Рис. 5. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН з когенераційним приводом для теплових насосів малої та великої потужності залежно від теоретичних значень

коефіцієнта перетворення

На рис. 6 та 7 показані значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН із когенераційним приводом для теплових насосів малої та великої потужностей відповідно, залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення. Ці залежності дозволяють визначити мінімальні дійсні значення коефіцієнта перетворення ТН, вище яких застосування певного виду когенераційних ТН забезпечує економію умовного палива та є доцільним.

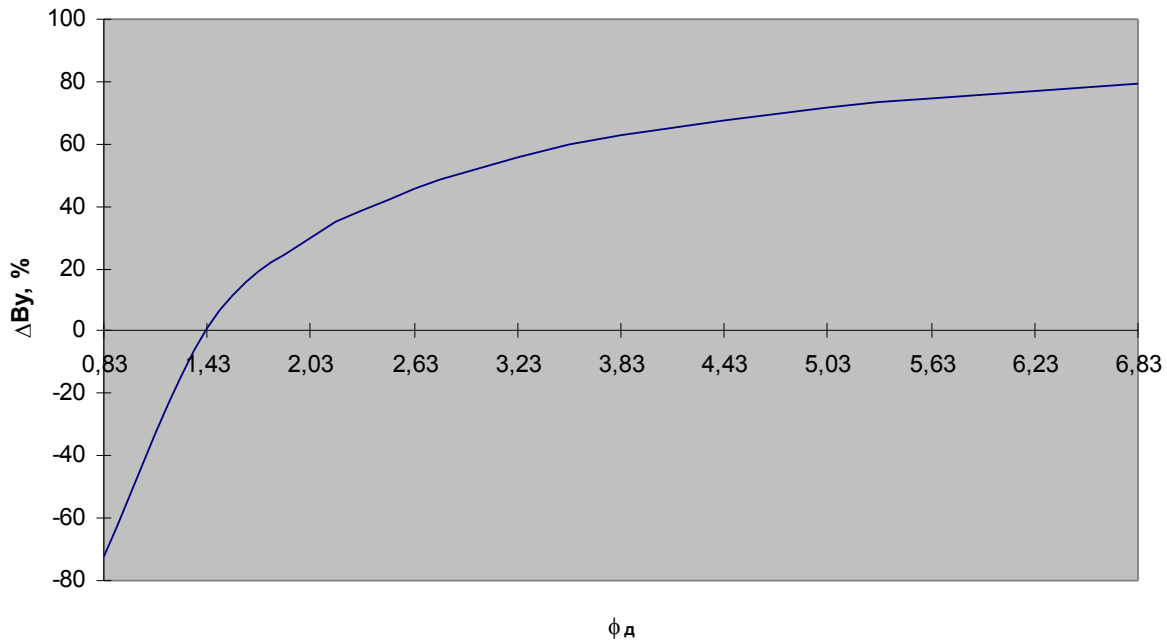


Рис. 6. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН із когенераційним приводом для теплових насосів малої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення

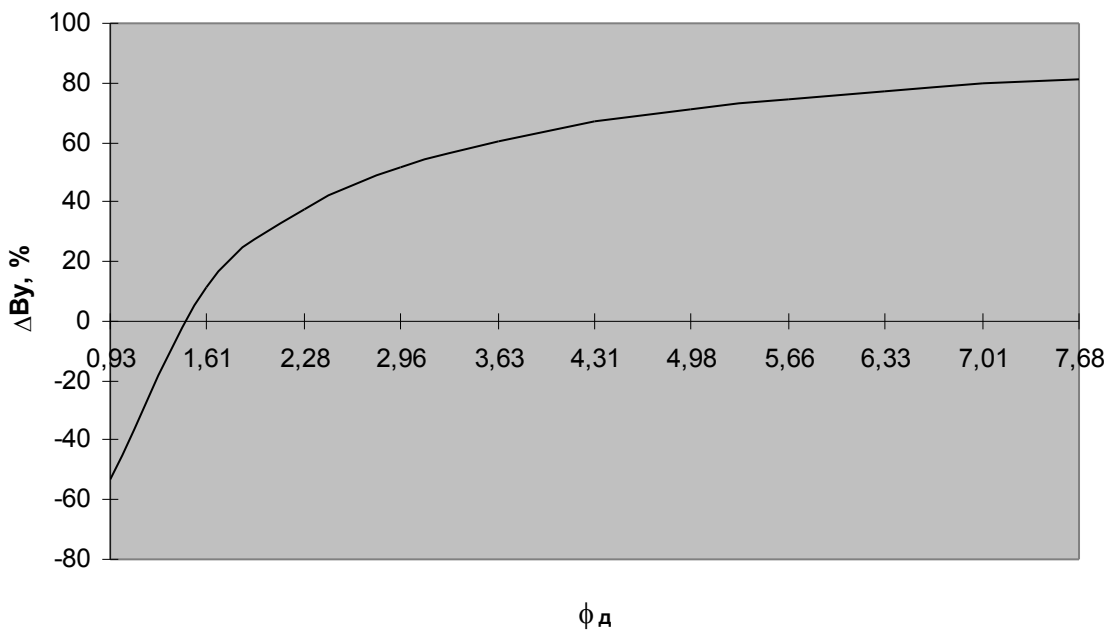


Рис. 7. Значення економії умовного палива (у відсотках) від застосування парокомпресійних ТН із когенераційним приводом для теплових насосів великої потужності залежно від дійсних значень коефіцієнта перетворення

Запропоновані на рис. 5 – 7 залежності визначають енергетичні переваги застосування парокompресійних ТН із когенераційним приводом та дозволяють оцінити економію умовного палива від застосування парокompресійних ТН із когенераційним приводом у разі різних режимів роботи ТН.

Запропоновані в дослідженні залежності (рис. 1 – 7) дозволяють визначити мінімальні теоретичні та дійсні значення коефіцієнта перетворення ТН, вище яких застосування певного виду ТН забезпечує економію умовного палива та є доцільним.

За результатами дослідження, визначено, що достатню енергетичну ефективність ТН з електричним приводом для різних джерел приводної енергії парокompресійних ТН та з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії забезпечують за $\varphi_d \geq 2,5$. Високу енергетичну ефективність ТН з електричним приводом для різних джерел приводної енергії парокompресійних ТН та з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії забезпечують за $\varphi_d \geq 3,5$. Ці значення коефіцієнтів перетворення добре узгоджуються зі статистичними даними з дослідження [4] щодо дійсних коефіцієнтів перетворення ТН, які випускають фірми LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, «Енергія», «Тритон-ЛТД».

Визначено, що високу енергетичну ефективність ТН із когенераційним приводом з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТН забезпечують за $\varphi_d \geq 2,0$, що добре узгоджується із даними з дослідження [7].

Представлені результати досліджень дозволяють оцінити економію умовного палива від застосування парокompресійних ТН з електричним і когенераційним приводами для різних режимів роботи ТН і здійснити вибір ефективних режимів роботи парокompресійних ТН з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних теплових насосів і врахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

Висновки

Проаналізовано енергетичну ефективність системи «Джерело приводної енергії ТН – ТН – споживач теплоти від ТН» на прикладі парокompресійних теплових насосів з електричним і когенераційним приводами. Перевагою такого підходу є врахування втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТН з метою визначення ефективних режимів роботи ТН з електричним та когенераційним приводами та оцінки обсягів економії енергоресурсів від упровадження парокompресійних ТН.

Запропоновані в дослідженні залежності (рис. 1 – 7) визначають енергетичні переваги застосування парокompресійних ТН і дозволяють визначити мінімальні теоретичні та дійсні значення коефіцієнта перетворення ТН, вище яких застосування певного виду ТН забезпечує економію умовного палива та є доцільним.

За результатами досліджень визначено, що достатню енергетичну ефективність ТН з електричним приводом для різних джерел приводної енергії парокompресійних ТН та з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії забезпечують за $\varphi_d \geq 2,5$. Високу енергетичну ефективність ТН з електричним приводом для різних джерел приводної енергії парокompресійних ТН та з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії забезпечують за $\varphi_d \geq 3,5$. Визначено, що високу енергетичну ефективність ТН із когенераційним приводом з урахуванням втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії до ТН забезпечують за $\varphi_d \geq 2,0$. Ці значення коефіцієнтів перетворення добре узгоджуються зі статистичними даними щодо дійсних коефіцієнтів перетворення ТН, які випускають фірми LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, «Енергія», «Тритон-ЛТД».

Представлені результати досліджень дозволяють оцінити економію умовного палива від Наукові праці ВНТУ, 2015, № 1

застосування парокompресійних ТН з електричним та когенераційним приводами для різних режимів роботи ТН і здійснити вибір ефективних режимів роботи парокompресійних ТН з урахуванням впливу джерел приводної енергії парокompресійних теплових насосів і втрат енергії під час генерування, постачання й перетворення електричної енергії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. Притула // 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. – № 4. – 2014. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3821/5562>.
7. Калнинь И. М. Техника низких температур на службе энергетики / И. М. Калнинь // Холодильное дело. – 1996. – № 1. – С. 26 – 29.
8. Ткаченко С. Й. Парокompресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2009. – 176 с.

Остапенко Ольга Павлівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики.

Лещенко Вадим Володимирович – студент інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Тіхоненко Роман Олегович – студент інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання. Вінницький національний технічний університет.

O. Ostapenko, Cand. Sc. (Eng.), Assis. Professor; V. Leshchenko, R. Tikhonenko

ENERGY ADVANTAGES OF APPLICATION OF STEAM COMPRESSOR HEAT PUMPS WITH ELECTRIC AND COGENERATION DRIVES

Energy advantages of steam compressor heat pumps (HP) with electric and cogeneration drives has been considered. The presented results of research allow to evaluate the economy of equivalent fuel due to application of steam compressor heat pumps (HP) with electric and cogeneration drives for various operation modes of HP and enable to select efficient operation modes of steam compressor HP taking into account the impact of the sources of drive energy of steam compressor HP and taking into consideration energy losses of the process of generation, supply and transformation of electric energy.

Key words: *energy advantages, steam compression heat pump, coefficient of performance, electric drive, cogeneration drive, economy of equivalent fuel.*

Introduction

In Ukraine, modern development of energy sector is characterized by considerable growth of energy resources cost and aggravating of the environment. The solution of problems, dealing with conservation of energy resources and protection of the environment are main directions of research in the sphere of consumption of fuel energy resources [1]. Share of natural gas consumption in the industrial complex of Ukraine still remains at high level. Greater part of energy problems of the country is solved at the expense of natural gas burning. In conditions of energy crisis the problem of efficient consumption of energy resources and introduction of modern energy saving technologies becomes very urgent [2]. Usage of steam compressor heat pumps with electric and cogeneration drives will promote the economy of natural gas and improvement of the environment as a result of decrease of thermal pollution and amount of harmful emissions of combustion products.

Problems, dealing with evaluation of energy efficiency of heat pumps in recent years are considered in numerous publications [1 – 6]. In [1] the author carried out the research aimed at improvement of efficiency and selection of rational parameters and operation modes of heat pumping plants for heating systems and heat supply by the consumption of equivalent fuel. In [2] thermodynamic and exergy analysis of the efficiency of steam compressor cycle of heat pumping plants of heat supply was performed. The authors in research [3] analyze thermodynamic efficiency of heat pumping plants of heat supply. In [4] new approach of heat pumps efficiency evaluation is suggested. However, in studies [1 – 4] energy losses for generation, transportation and conversion of electric energy from power plants of various types are not taken into account. The author [5] performed thermodynamic analysis of various types of HP. In [6] efficient real operation modes of HP with electric and cogeneration drives are determined, taking into account the impact of drive energy sources of steam compressor heat pumps and energy losses for generation, transportation and conversion of electric energy to HP.

In [1–6] the authors did not carry out the evaluation of the volume of energy resources economy as a result of introduction of steam compressor heat pumps with electric and cogeneration drives, taking into consideration energy losses for generation, transportation and conversion of electric energy.

Aim of research is determination of energy advantages of steam compressor HP application and evaluation of the volume of energy resources economy as a result of introduction of steam compressor HP with electric and cogeneration drives, taking into account the impact of drive energy sources

of steam compressor HP and taking into consideration energy losses for generation, transportation and conversion of electric energy; determination of the efficient operation modes of steam compressor HP with electric and cogeneration drives.

Main part

In steam compressor HP the increase of temperature level of low temperature heat occurs at mechanical compression of the refrigerant in the compressor. Heat pumps may have electric and cogeneration drive (from gas-piston engine). Cogeneration drive of heat pumps allows to avoid additional losses of electric energy in the process of transportation. Besides, usage of HP with cogeneration drive of the compressor from gas engines may be considered as one of important directions of energy and resources saving since it provides utilization of fuel gases heat after gas engine, that provides better energy efficiency.

Often, energy efficiency of energy conversion in heat pump is evaluated by the coefficient of performance of energy φ , that equals to the ratio of energy that reached the consumer, to the energy, used by cycle realization.

Theoretical value of the coefficient of performance is determined by the formula

$$\varphi_t = \frac{T_1}{T_1 - T_2}, \quad (1)$$

where T_1 and T_2 – temperatures of high temperature heat-transfer agent at the output and low temperature heat-transfer agent at the input of HP, K; correspondingly.

It should be noted, that coefficient of performance does not take into account all losses of energy, connected with generation of heat in HP. In real conditions, besides throttling, energy losses occur in pipe-lines and equipment of HP.

Real coefficient of performance of HP will be

$$\varphi_r = \varphi_t \cdot \eta_{hp}, \quad (2)$$

where η_{hp} – energy efficiency factor of HP, that takes into consideration all energy losses in heat pump. Value of energy efficiency factor of modern HP is within the range of 0,65–0,7 [4].

In home and foreign literature and in practice, the efficiency of HP usage is evaluated mainly according to real coefficient of performance. For efficient operation of HP with electric drive the value of $\varphi_r \geq 2,5 \dots 3,0$ is considered to be acceptable; high energy efficiency of HP is provided at $\varphi_r = 3,5 \dots 4,0$. These values of coefficients of performance are confirmed by statistic data concerning real coefficients of performance of HP, manufactured by LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, "ENERGY", "TRITON-LTD" [4].

High energy efficiency of HP with cogeneration drive is provided at $\varphi_r \geq 2,0$; it is stipulated by taking into consideration the additional heat power from utilization equipment of HP cogeneration drive [7].

In our research energy efficiency of the system "Source of drive energy HP – HP – consumer of the heat from HP" on the example of steam compressor heat pumps with electric and cogeneration drive is analyzed. The advantage of such an approach is taking into account losses of energy for generation, transportation and conversion of electric energy to HP in order to determine the efficient operation modes of HP with electric and cogeneration drive and evaluation of the volumes of energy resources economy as a result of introduction of steam compressor HP.

Electric energy in Ukraine is generation by thermal power plants (TPP), nuclear power plants (NPP) and hydropower plants (HPP). Knowing the values of efficiency factors of TPP, NPP and HPP and the shares of electric energy, generated by these stations, we can determine the average efficiency factor of electric energy generation in Ukraine.

Averaged value of the efficiency factor of electric power plants will be:

$$\eta_{EPP} = \frac{\alpha_{TPP} + \alpha_{NPP} + \alpha_{HPP}}{\frac{\alpha_{TPP}}{\eta_{TPP}} + \frac{\alpha_{NPP}}{\eta_{NPP}} + \frac{\alpha_{HPP}}{\eta_{HPP}}}, \quad (3)$$

where α_{TPP} , α_{NPP} , α_{HPP} – shares of electric energy, generated by corresponding electric power plants.

Taking into account that $\alpha_{TPP} = 0,463$; $\alpha_{NPP} = 0,47$ and $\alpha_{HPP} = 0,07$ from the formula (3) the averaged value of efficiency factor of power plants $\eta_{pp} = 0,383$ can be obtained [6].

If alternative types of electric power plants (on the base of steam-gas installations (SGI) and gas-turbine installations (GTI), solar power plants of thermodynamic cycle (SPP), wind energy plants (WEP)), are involved in energy balance of Ukraine, the averaged value of efficiency factor of power plants will be determined in the following way:

$$\eta_{EPP} = \frac{\sum \alpha_i}{\sum (\alpha_i / \eta_i)}, \quad (4)$$

where α_i – shares of electric energy, generated by corresponding electric power stations;

η_i – efficiency factor of the corresponding electric power station.

From electric power plants the electric energy across distributive grids arrives to the consumers. Efficiency factor of distributive electric grids operation is determined by the level of energy losses in the process of its transportation. In accordance with the annual report of NCER (regulatory organ) for 2010 the value of total technological losses of electric energy in Ukraine was 12,5% from the volume of electric energy, arrived to the grid. Hence, efficiency factor of distributive grids in Ukraine will be $\eta_{DG} = 0,875$ [6].

At the end of energy chain there is the consumer of electric energy – electric motor of HP. Efficiency factor of 55–100 kW electric motor, taking into account energy losses in motor control unit, will be $\eta_{ED} = 80–85\%$. Efficiency factor of large power electric motor will be $\eta_{ED} = 90–95\%$ [6].

Thus, having analyzed chain of generation, transportation and conversion of electric energy, we will obtain the value of general efficiency factor of generation, transportation and conversion of electric energy to HP with electric drive

$$\eta_{EP} = \eta_{EPP} \cdot \eta_{DG} \cdot \eta_{ED}. \quad (5)$$

For HP with cogeneration drive general efficiency factor of generation, transportation and conversion of electric energy will be determined by the formula: $\eta_{EP} = \eta_{EM} \cdot \eta_{ED}$, where η_{EM} – efficient factor of gas-piston engine.

For HP with cogeneration drive, theoretical value of coefficients of performance is determined, taking into account the power of utilization equipment of cogeneration drive $\varphi_t = \frac{Q_{hp} + \sum Q_{ut}}{N_{cp}}$,

where N_{cp} – theoretical power of HP compressor, $\sum Q_{ut}$ – power of utilization equipment of HP cogeneration drive.

Efficient integration of steam compressor HP with electric and cogeneration drives in industry and energy sector is substantiated by the need to provide the economy of equivalent fuel as a result of introduction.

Economy of equivalent fuel (in per cent) as a result of usage of steam compressor HP with electric and cogeneration drives is determined in the following way:

$$\Delta B_e = \left(1 - \frac{\eta_{s.h.}^n}{\varphi \cdot \eta_{EP}} \right) \cdot 100, \quad (6)$$

where $\eta_{s.h.}^n$ – netto-efficiency factor of substituted source of the heat, η_{EP} – general efficiency

factor of generation, transportation and conversion of electric energy.

Efficient introduction of steam compressor HP with electric and cogeneration drives in industry and energy sector will be achieved on condition:

$$\varphi_r > \frac{\eta_{s.h.}^n}{\eta_{EP}}, \quad (7)$$

where φ_r – real coefficient of performance of steam compressor HP from the formula (2).

Study of HP energy efficiency was performed, applying the method of mathematical modeling of HP operation, using the program in Excel. Energy efficiency of HP with electric drive and cogeneration drive of the compressor from gas-piston engine (GPE) was investigated. The schemes of the above-mentioned HP are given in [8].

The study contains the evaluation of equivalent fuel economy as a result of introduction of steam compressor HP of small (up to 1 MWt) and large powers with electric and cogeneration drive (from GPE). Study was performed for the cases of usage in electrically-driven HP electric energy from various types of electric power stations, and also for averaged values of efficiency factors of electric power stations in Ukraine. The study takes into consideration that netto-efficiency factor of substituted source of the heat is $\eta_{s.h.}^n = 0,8$.

In Figs. 1 and 2 values of equivalent fuel economy (in per cent) as a result of usage of steam compressor HP with electric drive for heat pumps of small and large capacity correspondingly, depending on theoretical values of the coefficient of performance, are shown. Studies were conducted for the cases of usage in HP the electric energy from electric power stations of various types of and also for averaged values of efficiency factor of electric power stations in Ukraine. Dependences, shown in Figs. 1 and 2, allow to determine minimal theoretical values of the coefficient of performance of electrically driven HP, above which application of certain type of HP provides equivalent fuel economy and is expedient.

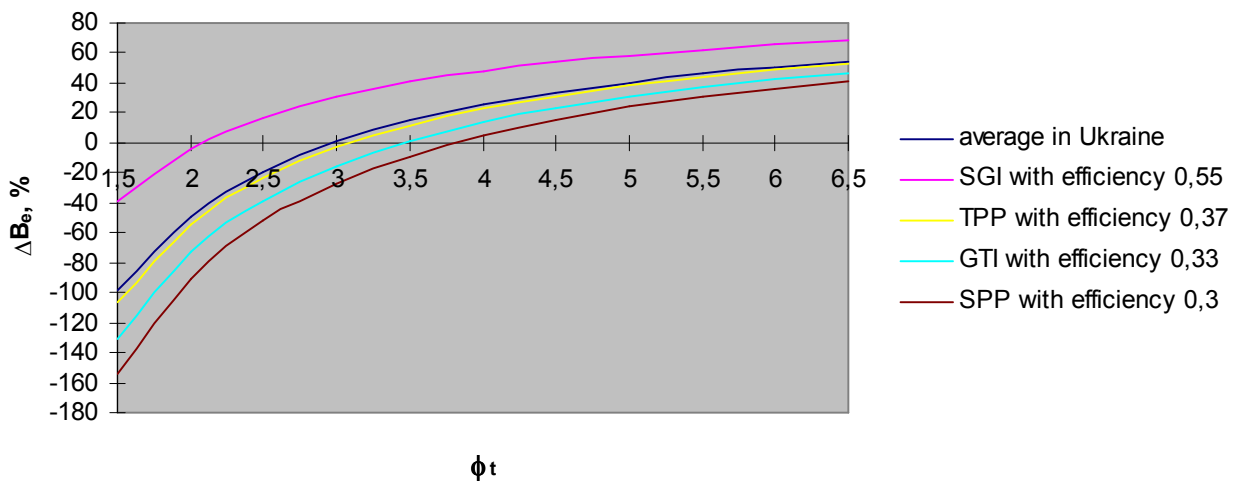


Fig. 1 – Values of equivalent fuel economy (in per cent) as a result of usage of steam compressor HP with electric drive for heat pumps of small capacity, depending on theoretical values of the coefficient of performance

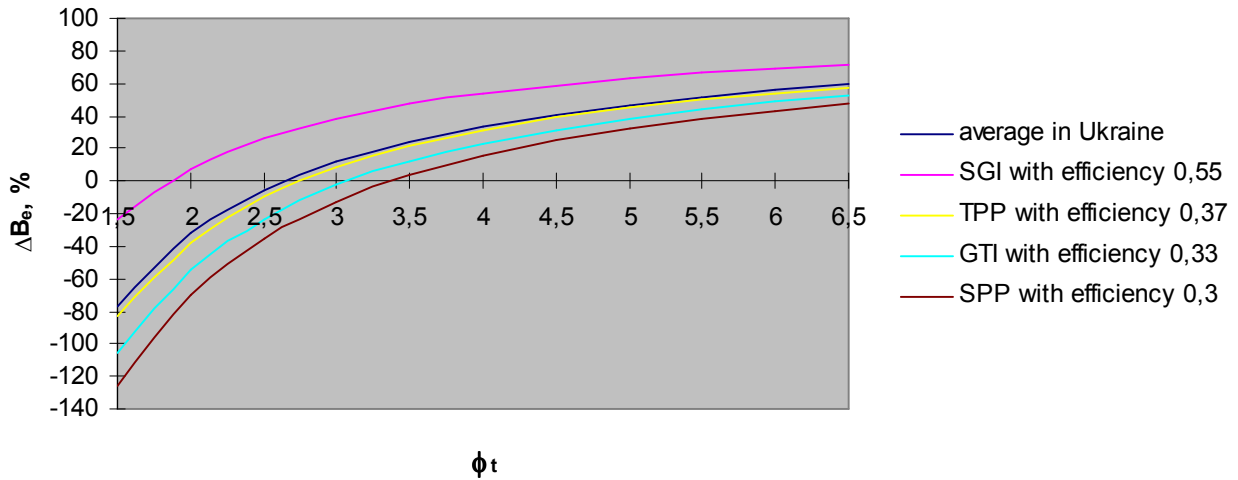


Fig. 2 – Values of equivalent fuel economy (in per cent) as a result of usage of steam compressor HP with electric drive for heat pumps of large capacity, depending on theoretical values of the coefficient of performance

Figs. 3 and 4 show the values of equivalent fuel economy (in per cent) as a result of usage of steam compressor HP with electric drive for heat pumps of small and large capacity, correspondingly, depending on real values of the coefficient of performance. Studies were carried out for the cases of usage in HP the electric energy from various types of electric power stations of and for averaged values of efficiency factor of electric power stations in Ukraine. These dependences allow to determine minimal real values of the coefficient of performance of electrically-driven HP, above which application of certain type of HP provides equivalent fuel economy and is expedient.

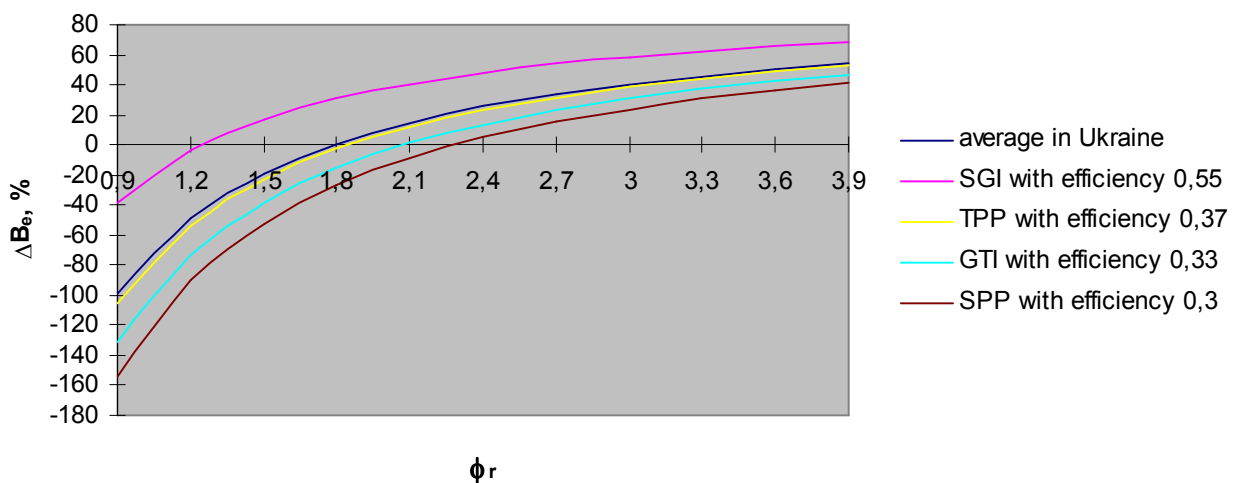


Fig. 3 – Values of equivalent fuel economy (in per cent) as a result of usage of steam compressor HP with electric drive for heat pumps of small capacity, depending on real values of the coefficient of performance

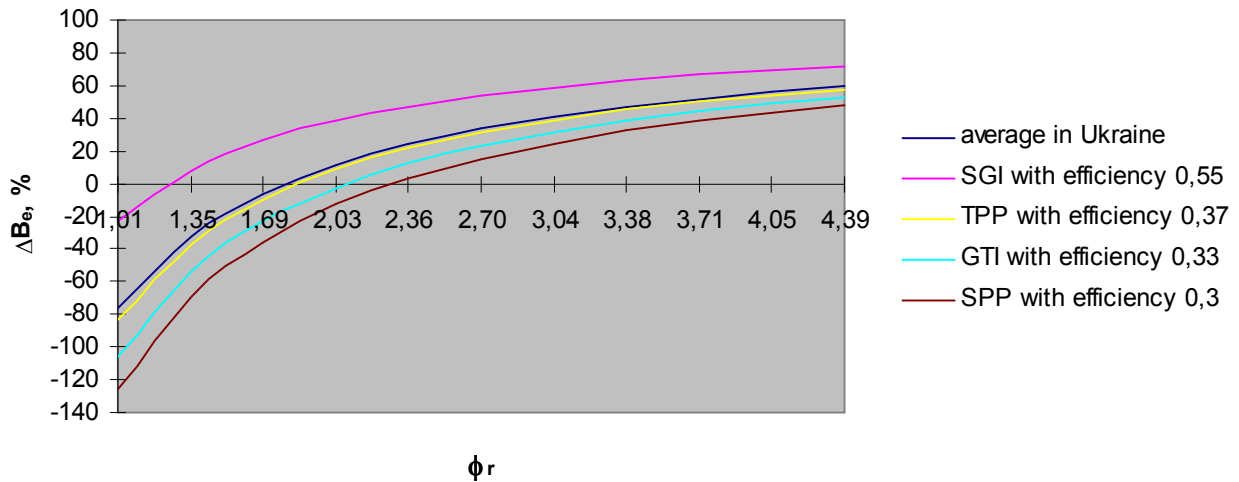


Fig. 4 – Values of equivalent fuel economy (in per cent) as a result of usage of steam compressor HP with electric drive for heat pumps of large capacity, depending on real values of the coefficient of performance

Dependences, suggested in Figs. 1-4, define energy advantages of electrically-driven steam compressor HP application and enable to evaluate equivalent fuel economy as a result of usage of electrically-driven steam compressor HP in case of HP various operation modes and usage of electric energy from different types of electric power stations and for averaged values of efficiency factor of electric power stations in Ukraine.

Fig. 5 shows the values of equivalent fuel economy (in per cent) as a result of usage of steam compressor HP with cogeneration drive for heat pumps of small and large capacity, depending on theoretical values of the coefficient of performance. Dependences, suggested in Fig. 5, allow to define minimal theoretical values of the coefficient of performance of HP, above which application of certain type of cogeneration HP provides equivalent fuel economy and is expedient.

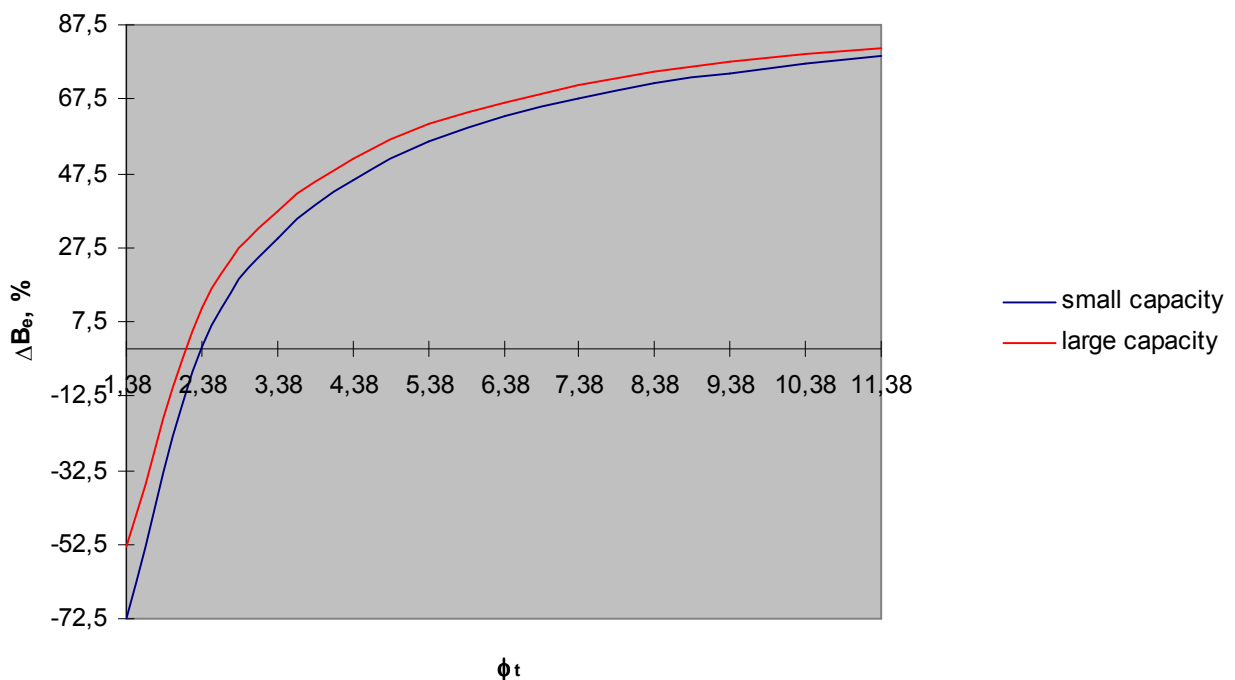


Fig. 5 – Values of equivalent fuel economy (in per cent) as a result of usage of steam compressor HP with cogeneration drive for heat pumps of small and large capacity, depending on theoretical values of the coefficient of performance

Figs. 6 and 7 show the values of equivalent fuel economy (in per cent) as a result of usage of steam compressor HP with cogeneration drive for heat pumps of small and large capacity correspondingly, depending on real values of the coefficient of performance. These dependences allow to define minimal real values of the coefficient of performance of HP, above which application of certain type of cogeneration HP provides equivalent fuel economy and is expedient.

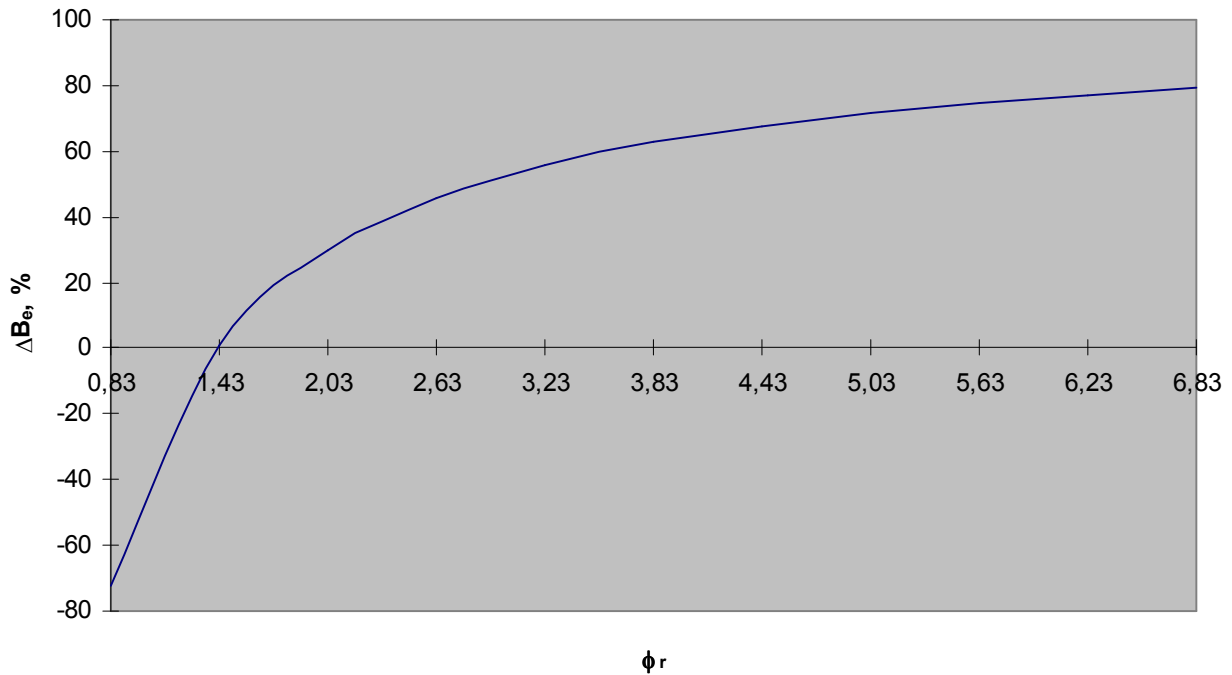


Fig. 6 – Values of equivalent fuel economy (in per cent) as a result of usage of steam compressor HP with cogeneration drive for heat pumps of small capacity, depending on real values of the coefficient of performance

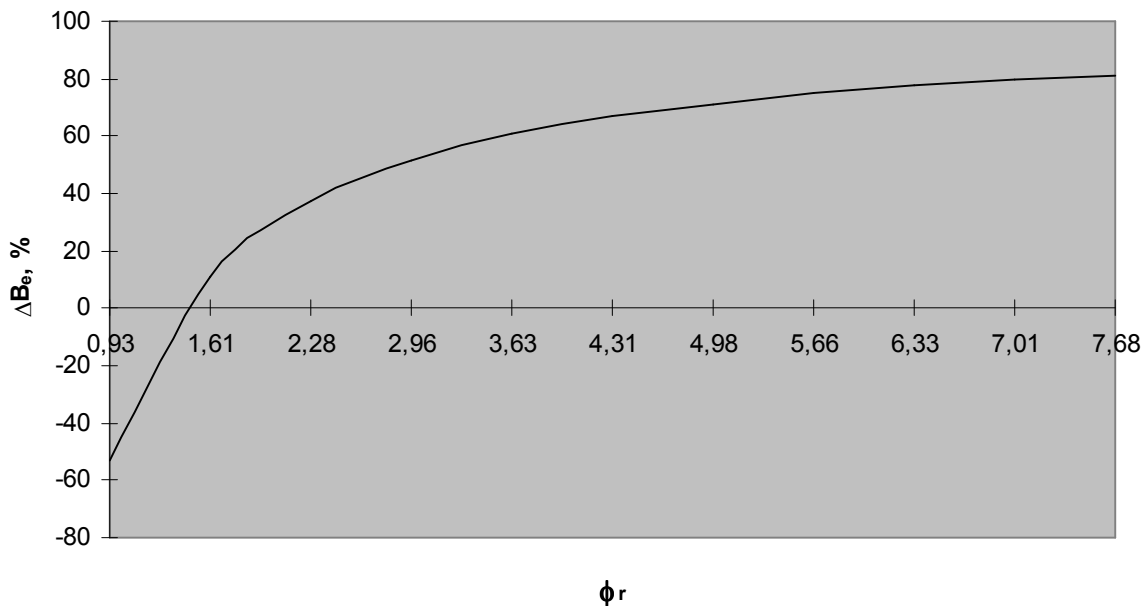


Fig. 7 – Values of equivalent fuel economy (in per cent) as a result of usage of steam compressor HP with cogeneration drive for heat pumps of large capacity, depending on real values of the coefficient of performance

Dependences, suggested in Figs. 5-7, define energy advantages of application of steam compressor HP with cogeneration drive and allow to evaluate equivalent fuel economy as a result of usage of steam compressor HP with cogeneration drive in case of different operation modes of HP.

Dependences, suggested in research (Fig. 1 – 7) allow to determine minimal theoretical and real values of the HP coefficient of performance, above which application of certain type of HP provides equivalent fuel economy and is expedient.

By the results of the research, it has been determined, that sufficient energy efficiency of HP with electric drive for various sources of drive energy of steam compressor HP and with the account of energy losses while generation, transportation and conversion of electric energy is provided if $\varphi_r \geq 2,5$. High energy efficiency of electrically-driven HP for various sources of drive energy of steam compressor HP and with the account of energy losses for generation, transportation and conversion of electric energy is provided, if $\varphi_r \geq 3,5$. These values of the HP coefficient of performance well agree with statistical data of the research [4] regarding the real coefficient of performance of HP, manufactured by companies LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, "ENERGY", "TRITON-LTD".

It has been determined, that high energy efficiency of HP with cogeneration drive, taking into account energy losses for generation, transportation and conversion of electric energy to HP is provided at $\varphi_r \geq 2,0$; that well agrees with the data of the research [7].

The presented results of research allow to evaluate equivalent fuel economy as a result of usage of steam compressor HP with electric and cogeneration drive for various operation modes of HP and allow to perform the choice of efficient operation modes of steam compressor HP with the account of the impact of drive energy sources of steam compressor heat pumps and energy losses for generation, transportation and conversion of electric energy.

Conclusions

Energy efficiency of the system "Source of drive energy HP – HP – consumer of the heat from HP" has been analyzed on the example of steam compressor heat pumps with electric and cogeneration drive. The advantage of such an approach is taking into consideration energy losses for generation, transportation and conversion of electric energy to HP in order to determine the efficient operation modes of HP with electric and cogeneration drives and evaluation of the volumes of energy resources economy as a result of introduction of steam compressor HP.

Dependences, suggested in research (Fig. 1-7) define energy advantages as a result of usage of steam compressor HP and allow to determine minimal theoretical and real values of the HP coefficient of performance, above which application of certain type of HP provides equivalent fuel economy and is expedient.

By the results of studies, it has been determined, that sufficient energy efficiency of HP with electric drive for various sources of drive energy of steam compressor HP and with the account of energy losses for generation, transportation and conversion of electric energy is provided at $\varphi_r \geq 2,5$. High energy efficiency of HP with electric drive for various sources of drive energy of steam compressor HP and with the account of energy losses for generation, transportation and conversion of electric energy is provided at $\varphi_r \geq 3,5$. It has been determined, that high energy efficiency of HP with cogeneration drive with the account energy losses for generation, transportation and conversion of electric energy to HP is provided at $\varphi_r \geq 2,0$. These values of the coefficient of performance well agree with statistical data regarding the real coefficient of performance of HP, manufactured by companies LG, Mitsubishi, MHPUL, MHPUE, FUJITSU, McQUAY, HPVU, "ENERGY", "TRITON-LTD".

The presented results of research allow to evaluate equivalent fuel economy as a result of usage

of steam compressor HP with electric and cogeneration drives for various operation modes of HP and allow to perform the choice of efficient operation modes of steam compressor HP, taking into account of the impact of drive energy sources of steam compressor heat pumps and energy losses for generation, transportation and conversion of electric energy.

REFERENCES

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. Притула // 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. Energy efficiency of steam compressor heat pumps with electric and cogeneration drive [Електронний ресурс] / О. Р. Ostapenko, V. V. Leshchenko, R. O. Tikhonenko // Scientific Works of Vinnytsia National Technical University. – № 4. – 2014. – Режим доступа до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3821/5564>.
7. Калнинь И. М. Техника низких температур на службе энергетики / И. М. Калнинь // Холодильное дело. – 1996. – № 1. – С. 26 – 29.
8. Ткаченко С. Й. Парокompресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2009. – 176 с.

Ostapenko Olga – Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor with the Department of Heat Power Engineering.

Leshchenko Vadym – Student of the Institute of Civil Engineering, Heat Power Engineering and Gas Supply.

Tikhonenko Roman – Student of the Institute of Civil Engineering, Heat Power Engineering and Gas Supply.

Vinnytsia National Technical University.