

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

**ХОМ'ЯК МИХАЙЛО ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 621.577

**ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ ПОМП В СИСТЕМАХ  
ІНДИВІДУАЛЬНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дипломної роботи на здобуття вищої освіти  
освітнього ступеня магістр

Тернопіль – 2018

**Дипломною роботою магістра є рукопис**

Робота виконана в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України

**Керівник роботи:** кандидат технічних наук  
**Івасечко Роман Романович,**  
асистент кафедри енергозбереження та енергетичного менеджменту  
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

**Рецензент:** доктор технічних наук, професор  
**Андрійчук Володимир Андрійович,**  
професор кафедри світлотехніки та електротехніки  
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

**Захист відбудеться "25" лютого 2018 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні** екзаменаційної комісії № 38 з атестації здобувачів вищої освіти освітнього ступеня магістр 141 - електроенергетика, електротехніка та електромеханіка при Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя МОН України за адресою: 46000, м. Тернопіль, вул. Микулинецька, 46, аудиторія 404.

З авторефератом дипломної роботи магістра можна ознайомитись в інституційному репозиторії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (ELARTU) за адресою: <http://elartu.tntu.edu.ua/>.

*Секретар*  
*екзаменаційної комісії № 38*

Коцюрко Р.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми роботи.** В умовах зростаючого дефіциту та росту цін на паливно-енергетичні ресурси, посилення вимог до забезпечення екологічної чистоти технологічних процесів і охорони довкілля, зростання потреб споживача в тепловій енергії для покращення побутових і соціальних умов життя проблема енергозбереження для економіки України в цілому й для її житлово-комунального сектору зокрема стає дуже актуальною. Одним із найбільш ефективних видів сучасної техніки нетрадиційної енергетики є теплові помпи (ТП) завдяки їх можливості використовувати поновлювану та нетрадиційну енергію. Однак наведені в літературі системні дослідження з використання тепломпових систем (ТПС) теплопостачання є недостатніми, і в них відсутні аналітичні залежності або ж методики, які давали б змогу визначити параметри енергетичної ефективності роботи ТПС у різних умовах їх практичного застосування. Тому питання умов ефективного використання тепломпової технології у системах теплопостачання є актуальним і відкритим.

**Мета й задачі дослідження.** Метою дипломної роботи є визначення ефективності застосування тепломпових систем теплопостачання будівель з використанням поновлюваних джерел низькопотенційної енергії. Для досягнення вказаної мети в роботі вирішувались наступні задачі:

1. Аналіз сучасного стану застосування тепломпових систем теплопостачання з використанням поновлюваних джерел енергії, їх доробок та удосконалень.

2. Проведення дослідження впливу зовнішніх умов і параметрів роботи ТП на термодинамічну ефективність тепломпових систем теплопостачання.

3. Розробка практичних рекомендацій щодо забезпечення максимальної ефективності роботи тепломпових схем теплозабезпечення будівель з використанням різних поновлюваних джерел енергії.

**Об'єкт дослідження** – системи теплопостачання будівель (опалення, гарячого водопостачання) з використанням як джерела теплоти парокомпресійної теплової помпи.

**Предмет дослідження** – термодинамічна ефективність застосування теплової помпи у системах теплопостачання будівель з використанням різних джерел енергії.

**Методи дослідження.** Для вирішення сформульованих вище задач використовувалися теоретичні та числові методи дослідження. Поставлені задачі вирішувались на основі:

а) аналітичного дослідження способів доробки та удосконалення тепломпових систем теплопостачання з використанням поновлюваних джерел енергії;

б) розрахунку даних щодо ефективності застосування ТП у системах теплопостачання;

в) графічного відображення отриманих даних в програмному середовищі Mathcad для визначення оптимальних режимів роботи установки залежно від різних чинників;

г) розрахунку річної економічної вигоди при експлуатації установки та терміну окупності в порівнянні з традиційними опалювальними пристроями.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у визначенні оптимальних режимів роботи ТПС за допомогою розроблених методів термодинамічного аналізу:

1. Розроблено структурні схеми видів та принципів модернізації систем ТП для систематизації літературно-патентної інформації;

2. Встановлено залежність оптимального ступеня охолодження теплоносія нижнього джерела енергії у випарнику ТП від параметрів ТПС і температури навколишнього середовища;

3. Розроблено розрахункову методику термодинамічного аналізу роботи ТПС тепlopостачання;

4. Отримано розрахункові дані щодо ефективності застосування ТП у системах тепlopостачання.

**Практичне значення отриманих результатів.** Ґрунтуючись на результатах розрахунків, графічних залежностей, теоретичних узагальнень вирішено задачі, які мають важливе народногосподарське значення:

1. Отримано розрахункові дані щодо оптимального ступеня охолодження нижніх джерел енергії у випарнику ТП, які можуть бути використані при проектуванні різних ТПС тепlopостачання.

2. Сформульовано практичні рекомендації щодо умов забезпечення максимальної ефективності роботи тепlopомпових схем тепlopостачання будівель із використанням різних поновлюваних джерел енергії.

3. Отримано розрахункові дані річної економічної ефективності від використання ТПУ та терміну окупності в порівнянні із традиційними джерелами тепла.

**Апробація.** Окремі результати роботи доповідались на VI Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», Тернопіль, ТНТУ, 16–17 листоп. 2017 р.

**Структура роботи.** Дипломна робота магістра складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 6-ти розділів, висновків, переліку посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – арк. формату А4, графічна частина – слайдів презентації PowerPoint.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі проведено об'єктивну оцінку сучасного стану питання індивідуальних тепlopостачальних систем, запропоновані шляхи підвищення їх ефективності шляхом застосування теплових pomp в якості джерела тепла, обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету досліджень,

наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про публікації, апробацію та впровадження результатів роботи.

**Перший розділ** «Літературний огляд» носить оглядово-аналітичний характер і висвітлює основні тенденції по досліджуваних проблемних питаннях підвищення енергоефективності та екологічності систем теплопостачання шляхом впровадження теплової помпи.

Теплова помпа у порівнянні з традиційними джерелами тепла в системах опалення будинку, де коефіцієнт перетворення витраченої потужності у корисну досягає 1, може забезпечувати теплову потужність до 6 разів вищу за витрачену потужність для приводу компресора за рахунок іншого принципу дії.

На основі огляду зарубіжних та вітчизняних літературних джерел наведений аналіз застосування ТПС теплопостачання з використанням поновлюваних джерел енергії, обґрунтовано актуальність роботи, виконано постановку задач на дипломну роботу.

У наявній літературі є лише окремі дослідження ефективності теплопомпових систем теплопостачання з використанням поновлюваних низькопотенційної енергії без узагальнення одержаних результатів та поширення їх на решту систем. Не визначено чіткий вплив зовнішніх умов на термодинамічну ефективність теплопомпових систем теплопостачання. Таким чином, виконаний у роботі аналіз доступних досліджень у сфері застосування ТП у системах теплопостачання показав наявність відкритих питань, що стосуються ефективного використання ТПС теплозабезпечення будівель, методик оцінки показників їх роботи, що дало змогу сформулювати мету і задачі дослідження.

**Другий розділ** «Термодинамічний аналіз схем опалення з використанням різних джерел енергії» роботи присвячено термодинамічному аналізу теплопомпових схем опалення з використанням таких джерел енергії, як атмосферне повітря, вода, ґрунт.

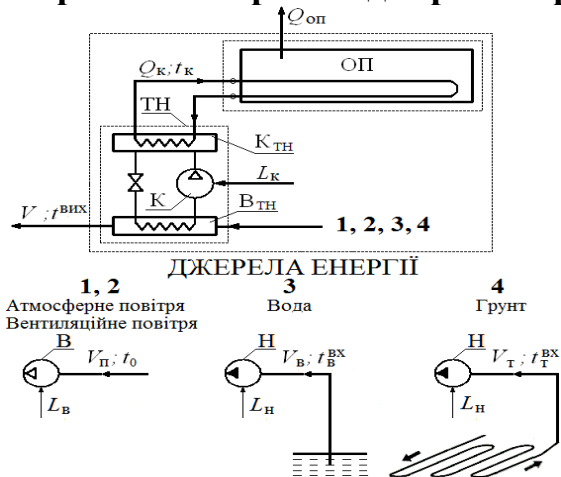


Рис. 1. Принципова схема ТПС опалення: ОП – опалюване приміщення, ТН – тепловий насос,  $K_{\text{ТН}}$  – конденсатор ТН,  $B_{\text{ТН}}$  – випарник ТН, К – компресор, В – вентилятор, Н – насос

аналізу теплопомпових схем опалення з використанням таких джерел енергії, як атмосферне повітря, вода, ґрунт.

Аналіз принципової теплопомпової схеми опалення (рис. 1) показав, що при заданій тепловій потужності ТП і температурі теплоносія в системі опалення, які визначаються самим об'єктом теплопостачання, температура теплоносія на виході з випарника ТП є неоднозначною, оскільки кількість теплоти, відібраної від нижнього джерела енергії, залежить як від різниці температур на вході та виході з випарника ТП, так і від витрати теплоносія. У зв'язку з тим, що затрати енергії на привід компресора ТП і на нагнітач при зміні температури теплоносія на виході з ви-

парника ТП змінюються в протилежних напрямках, необхідно визначити оптимальний ступінь охолодження теплоносія нижнього джерела енергії у випарнику ТП, якому відповідають мінімальні сумарні затрати енергії на теплопомпову систему опалення в цілому.

Розроблено методику визначення оптимального ступеня охолодження теплоносія нижнього джерела енергії у випарнику ТП у низькотемпературних системах опалення з використанням різних джерел енергії. Як показник термодинамічної ефективності вибрано величину сумарних питомих затрат зовнішньої енергії на ТПС опалення, яка являє собою відношення затраченої зовнішньої енергії на одиницю отриманої теплоти для задоволення потреб опалення

$$l_{\text{оп}} = \frac{L_{\text{к}} + L_{\text{т}}^{\text{зб.р}}}{Q_{\text{к}}}, \quad (1)$$

де  $L_{\text{к}}$ ,  $L_{\text{т}}^{\text{зб.р}}$  – затрати енергії на компресор ТП та збудник руху теплоносія відповідно, кВт;  $Q_{\text{к}}$  – тепловий потік, відведений від конденсатора ТП, кВт.

З урахуванням рівнянь для:

- затрат енергії на компресор ТН 
$$L_{\text{к}} = Q_{\text{вип}} / (\varphi - 1), \quad (2)$$

- теплового потоку у випарнику ТП 
$$Q_{\text{вип}} = V_{\text{т}} \rho_{\text{т}} c_p (t_{\text{т}}^{\text{вх}} - t_{\text{т}}^{\text{вих}}), \quad (3)$$

де  $V_{\text{т}}$  – об'ємна витрата теплоносія нижнього джерела енергії, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_{\text{т}}$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – ізобарна теплоємність теплоносія, кДж/(кг·°С);  $t_{\text{т}}^{\text{вх}}$ ,  $t_{\text{т}}^{\text{вих}}$  – температура теплоносія на вході та виході з випарника ТП відповідно, °С;

- затрат енергії на збудник руху теплоносія 
$$L_{\text{т}}^{\text{зб.р}} = \frac{V_{\text{т}} \Delta p}{\eta_{\text{т}}^{\text{зб.р}} \eta_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

де  $\Delta p$  – аеродинамічні чи гідравлічні втрати тиску у випарнику теплової помпи залежно від вибраного нижнього джерела енергії, кПа,  $\eta_{\text{т}}^{\text{зб.р}}$  і  $\eta_{\text{пр}}$  – ККД збудника руху теплоносія нижнього джерела енергії і його приводу відповідно;

- теплового потоку, відведеного від  
конденсатора ТП

$$Q_k = Q_{\text{вип}} \square L_k, \quad (5)$$

та після деяких математичних перетворень отримано співвідношення для визначення сумарних питомих затрат зовнішньої енергії на ТПС опалення, яке має вигляд

$$l_{\text{оп}} = \frac{1}{\varphi} \left[ 1 + \frac{\Delta p(\varphi - 1)}{\rho_T c_p (t_T^{\text{вх}} - t_T^{\text{вих}}) \eta_T^{\text{зб.р}} \eta_{\text{пр}}} \right] = \frac{1}{\varphi} \left[ 1 + \frac{A(\varphi - 1)}{(t_T^{\text{вх}} - t_T^{\text{вих}}) \eta_T^{\text{зб.р}} \eta_{\text{пр}}} \right], \quad (6)$$

де  $A = \Delta p / \rho_T c_p$ , °С – співвідношення заданих величин;  $\varphi$  – дійсний коефіцієнт трансформації ТП, який визначається за співвідношенням

$$\varphi = \eta_{\text{ТН}} \left[ 1 - \frac{273 + t_T^{\text{вих}} - \Delta t_{\text{вип}}}{273 + t_k + \Delta t_k} \right]^{-1}. \quad (7)$$

У свою чергу температура теплоносія, що подається з конденсатора ТП у систему опалення, обчислюється за виразом

$$t_k = t_{\text{н}} + (t_{\text{т}}^{\text{р}} - t_{\text{н}}) \left[ (t_{\text{н}} - t_0) / (t_{\text{н}} - t_0^{\text{р}}) \right]^{\frac{1}{(1+n)}}, \quad (8)$$

де  $t_{\text{т}}^{\text{р}}$  – розрахункова температура теплоносія в системі опалення за розрахункової температури навколишнього середовища  $t_0^{\text{р}}$ ;  $n$  – коефіцієнт, який характеризує обрану систему опалення (для низькотемпературних систем опалення  $n = 0$ ).

На рис. 2 наведені результати числових розрахунків за рівнянням (6) за умов використання теплоти атмосферного повітря як нижнього джерела енергії та за розрахункової температури гріючого теплоносія 40 °С, які показують, що існують оптимальні значення температур повітря на виході з випарника ТП і відповідні їм мінімальні питомі затрати зовнішньої енергії на ТПС опалення.

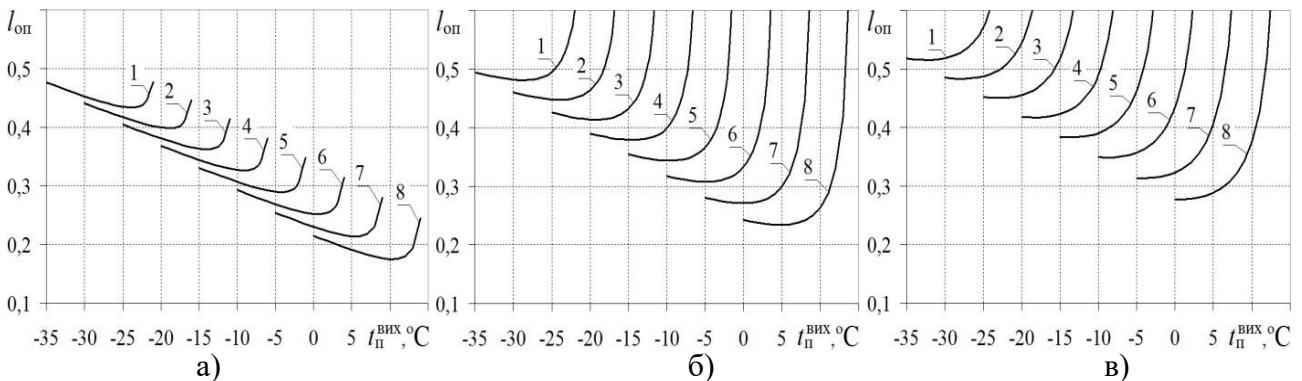


Рис. 2. Залежності питомих затрат зовнішньої енергії на ТПС опалення від температури повітря на виході з випарника ТН: а), б), в) – співвідношення заданих величин  $A = 0,1; 0,5; 1,0$ ; 1–8 – температура навколишнього середовища  $t_0 = -20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15$  °С

Подібні залежності, побудовані для випадків використання води та ґрунту як нижнього джерела енергії, які показали аналогічні результати.

Проведений аналіз показав, що оптимальний ступінь охолодження теплоносія у випарнику ТП зростає зі збільшенням співвідношення заданих величин  $A$  і практично не залежить від температури навколишнього середовища, розрахункової температури гріючого теплоносія на опалення в діапазоні  $30 \dots 50$  °С і температури теплоносія на вході до випарника ТП.

В спеціальній частині описано спосіб використання можливостей програмного пакету Mathcad для вирішення задач побудови графічних залежностей за виведеними раніше формулами для подальшого аналізу оптимальних режимів роботи теплопомпової установки в залежності від змінних параметрів.

Побудовано графік залежності оптимального ступеня охолодження повітря у випарнику ТП від співвідношення заданих величин  $A$  за різних значень температури навколишнього середовища. Рівняння функції  $\Delta t_m^{opt}(A)$

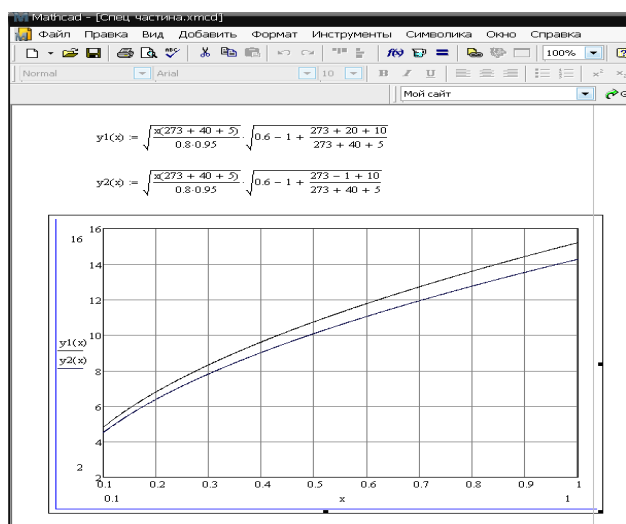
$$\Delta t_T^{opt} = \sqrt{\frac{A(273 + t_k + \Delta t_k)}{\eta_T^{\text{зб.п}} \eta_{\text{пр}}}} \left[ \eta_{\text{ТН}} - 1 + \frac{273 + t_T^{\text{вх}} - \Delta t_{\text{вип}}}{273 + t_k + \Delta t_k} \right]. \quad (9)$$

де  $A = \Delta p / \rho_T c_p$ , °С – співвідношення заданих величин; після підстановки відомих даних буде мати вигляд

$$\Delta t_T^{opt}(A) = \sqrt{\frac{A(273+40+5)}{0.8 \times 0.95}} \times \left( 0.6 - 1 + \frac{273+t_0-10}{273+40+5} \right). \quad (3.2)$$

Температуру навколишнього середовища приймемо

$t_0 = -20$  °С і  $+15$  °С для першого і другого графіків відповідно.



Із наведеної ілюстрації (рис. 2) видно, що оптимальний ступінь використання повітря у випарнику теплової помпи істотно залежить від співвідношення заданих величин  $A$ , яке характеризує собою величину втрат тиску повітряного потоку у випарнику ТП, і дуже слабо залежить від температури навколишнього середовища в діапазоні температур  $t_0$  від  $-20$  °С до  $+15$  °С.

Рис. 2. Побудова графіку залежності оптимального ступеня охолодження теплоносія  $\Delta t_T^{opt}$  у випарнику теплової



помпи від заданих величин  $A$  теплової  
 помпи при  $t_0 = -20\text{ }^\circ\text{C}; +15\text{ }^\circ\text{C}$

**В частині «Обґрунтування економічної ефективності»** розглянуто питання заміни традиційних джерел тепла на ТП в системах тепlopостачання і проведено розрахунки техніко-економічної ефективності запропонованих рішень.

Для порівняння було обрано такі типи опалювальних пристроїв: газовий котел, електрокотел, твердопаливний дров'яний(пелетний) котел, тепла помпа. Після проведення економічних розрахунків річних затрат енергією та її джерела, найбільш економічним традиційним джерелом тепла виявився твердопаливний котел з показником 11674 грн/рік. Той же показник у теплової помпи склав 3742 грн/рік. Тому мінімальна річна вигода від використання ТПУ становить 7932 грн. Розрахований термін окупності тепlopомпової системи становить 21 рік за умов сталих цін на енергоносії та електроенергію.

**В частині «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»** проведено оцінку тепlopомпової установки щодо умов електробезпеки та розглянуто питання техніки безпеки при проведенні вимірювань і випробувань досліджуваної установки. Також описано методику дослідження стійкості об'єктів енергетики до впливу чинників надзвичайних ситуацій.

**В частині «Екологія»** розглянуто питання забруднення довкілля, що виникає внаслідок спалювання органічного палива в традиційних джерелах тепла, а також запропоновано альтернативні джерела тепла для зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Теплова помпа дозволяє повністю скоротити прямі викиди шкідливих речовин під час роботи установки, залишивши лише умовно викинуті речовини при виробленні енергії. Проте альтернативні шляхи вироблення електроенергії дозволять зробити використання ТПУ повністю екологічно чистим та незалежним від підведених мереж.

**У загальних висновках щодо дипломної роботи** описано проведені теоретичні дослідження та їх методи, проаналізовано отримані результати; приведені можливості практичного застосування даних результатів при проектуванні систем тепlopостачання будинків.

## **ВИСНОВКИ**

У дипломній роботі визначено оптимальні умови практичного застосування ТП, вплив зміни зовнішніх і внутрішніх параметрів на показники ефективності роботи ТПС тепलोзабезпечення та сформульовано рекомендації щодо забезпечення мінімальних питомих затрат зовнішньої енергії на ТПС тепlopостачання будівель.

1. Виконано термодинамічний аналіз ТПС, який дозволив чітко визначити параметри системи тепlopостачання на основі відомих даних навколишнього середовища та потрібної теплової потужності.

2. При використанні теплоти поновлюваних та нетрадиційних джерел енергії в ТПС тепlopостачання існує оптимальна глибина використання теплоти нижніх джерел енергії у випарнику ТП, якому відповідають мінімальні сумарні затрати енергії на ТПС у цілому.

3. Обґрунтовано екологічний ефекту від впровадження теплової помпи, який дозволяє зберегти довкілля, відмовившись від спалювання традиційного палива.

4. Розрахунки економічної ефективності показали, що впровадження теплової помпи дозволяє щорічно зберігати від 7932 грн, а термін окупності становитиме до 21 року.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ**

1. Хом'як М.В. Оцінка енергоефективності теплових pomp в системах індивідуального опалення / М.В. Хом'як // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 16–17 листоп. 2017.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ТНТУ, 2017. – С. 128-129.

## АНОТАЦІЯ

**Хом'як М.В. Оцінка енергоефективності теплових pomp в системах індивідуального опалення. – Рукопис.**

Дипломна робота магістра за спеціальністю 8.05070108 – енергетичний менеджмент. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2018.

Дипломна робота присвячена розробці теоретичних методик розрахунку, необхідних для аналізу термодинамічної ефективності застосування теплових pomp у системах низькотемпературного водяного опалення та гарячого водопостачання з використанням різних поновлюваних та нетрадиційних джерел енергії.

Встановлено залежності для визначення оптимальної глибини використання низькотемпературних джерел енергії у випарнику теплової помпи за умов затрати енергії як на підвищення потенціалу цієї теплоти, так і на переміщення теплоносія в нижньому контурі теплової помпи.

Проаналізовано вплив зміни зовнішніх умов і параметрів роботи теплової помпи на термодинамічну ефективність тепlopompових схем теплопостачання.

**Ключові слова:** тепlopompова система, системи теплопостачання, термодинамічна ефективність, поновлювані та нетрадиційні джерела енергії.

## ANNOTATION

**M.V. Khomyak. Energy efficiency estimation of thermal pumps in individual heat supply systems. – Manuscript.**

Diploma paper for a Master's Degree, speciality 8.05070108 – energy conservation and energy management. – Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2018.

A diploma paper is devoted to the development of calculation methods needed to analyze the thermodynamic efficiency of heat pump installations in low-temperature water heating and hot-water supply systems using different renewed and nonconventional power sources.

Analytical dependence for defying the best depth of usage the low-temperature energy sources in the heat supply system on conditions of power consumption for the heat potential rise as well as for displacement of heat-transfer agent in the low circuit of the thermal pump was determined.

The influence of changes in ambient and working conditions of a thermal pump on thermodynamic efficiency of thermal pump heat supply schemes was analyzed.

**Keywords:** thermal pump system, heat supply systems, thermodynamic efficiency, renewed and nonconventional power sources.