

В. А. ВОЛОЩУК**ПОГЛИБЛЕНИЙ ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛОАСОСНОЇ УСТАНОВКИ З ПРОМІЖНИМ ТЕПЛООБМІННИКОМ УТИЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГІЇ СТІЧНИХ ВОД**

В роботі наведені результати поглибленого ексергетичного аналізу теплоасосної установки, у складі якої використовується теплообмінник проміжного контуру для утилізації енергії стічних вод. Система призначена для теплозабезпечення будинку з урахуванням сезонних коливань потреб енергії та температури низькопотенційного джерела. Показано, що у прийнятих умовах найбільшу частку деструкції ексергії у дросельному вентилі та компресорі можна позбутися за рахунок зменшення необоротностей в інших елементах системи. Деструкція ексергії, яку можна уникнути у конденсаторі, випарнику та теплообміннику проміжного контуру, обумовлена, в основному, необоротностями у цих же компонентах.

Ключові слова: поглиблений ексергетичний аналіз, теплоасосна установка на стічних водах, теплозабезпечення будинку.

В. А. ВОЛОЩУК**УГЛУБЛЁННЫЙ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОАСОСНОЙ УСТАНОВКИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ТЕПЛООБМЕННИКОМ УТИЛИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ СТОЧНЫХ ВОД**

В работе представлены результаты углубленного эксергетического анализа теплоасосной установки, в составе которой используется теплообменник промежуточного контура для утилизации энергии сточных вод. Система предназначена для теплообеспечения здания с учетом сезонных колебаний потребностей энергии и температуры низкопотенциального источника. Показано, что в принятых условиях наибольшую часть деструкции эксергии в дросельном вентиле и компрессоре можно снизить за счет уменьшения необратимости в других элементах системы. Деструкция эксергии, которую можно снизить в конденсаторе, испарителе и теплообменнике промежуточного контура, обусловлена, в основном, необратимости в этих же компонентах.

Ключевые слова: углубленный эксергетический анализ, теплоасосная установка на сточных водах, теплообеспечение здания.

V. VOLOSHCHUK**ADVANCED EXERGETIC ANALYSIS OF A HEAT PUMP WITH WASTEWATER HEAT EXCHANGER**

In contrast to conventional exergy-based methods, advanced exergetic analyses can evaluate exergy destructions due to interactions among components of the energy-conversion system and the real potential for improving system components. Application of the advanced exergetic analysis to a wastewater source heat pump with wastewater heat exchanger providing space heating in variable operation modes is proposed in the work. In order to determine thermodynamic parameters of the refrigeration vapor compression cycle a special simulation model was used. The so-called thermodynamic-cycle-based approach was applied to split the exergy destruction within each component of a heat pump into unavoidable, avoidable, endogenous and exogenous parts. It is shown that in the investigated system only about 53 % of the total seasonal destruction in the heat pump can be avoided. About 48 % of this avoidable thermodynamic inefficiency is caused by interactions among components. It is shown that in the investigated conditions, the biggest part of exergy destruction in the throttling valve and compressor can be avoided by reducing irreversibilities in the remaining components of the system. Exergy destruction, which can be avoided in the condenser, evaporator and the wastewater heat exchanger, is mainly caused by irreversibilities within these components.

Keywords: advanced exergetic analysis, wastewater source heat pump, space heating.

Вступ

При обґрунтуванні параметрів та режимів роботи теплоенергетичних систем методи ексергетичного аналізу, що базуються на поєднанні Першого та Другого законів термодинаміки, характеризуються ширшими можливостями у порівнянні із методами енергетичного або ентальпійного аналізу, які в своїй основі використовують тільки Перший закон термодинаміки. На відміну від енергетичного аналізу ексергетичний метод оцінювання дозволяє визначити місцезнаходження, значення та джерела термодинамічних втрат в системі.

Новим етапом методології ексергетичного оцінювання є поглиблений ексергетичний аналіз, який розроблений представниками німецької школи прикладної термодинаміки [1–3]. Даний аналіз важливий з точки зору розширення можливостей ексергетичного підходу для прикладного викорис-

тання.

Теплоасосні установки (ТНУ) є одними із найбільш перспективними технологіями в теперішній час для цілого ряду сфер. Особливе місце належить теплоасосним системам, що використовують низькопотенційну енергію стічних вод. Завдяки відносно вищим температурам низькопотенційного джерела такі системи характеризуються вищою енергетичною ефективністю. З іншої сторони дані ТНУ є технологічно складнішими і дорогими.

Огляд літературних джерел показав, що методологія поглибленого ексергетичного аналізу реалізована, в основному, на прикладі холодильних машин або ТНУ промислового призначення, де розглядається тільки один режим роботи – номінальний [1–5]. На основі детального аналізу існуючих робіт автори [6] приходять до висновку, що зовсім мало досліджень з ексергетичного оці-

нювання присвячено ТНУ на стічних водах. В роботі [7] наведені дані із поглибленого ексергетичного аналізу ТНУ на стічних водах в складі системи теплозабезпечення будинку, але без урахування її термодинамічної взаємодії із теплообмінником, що призначений для передачі енергії стічних вод теплоносію проміжного контуру. Крім того, у випадку роботи ТНУ у складі системи теплозабезпечення будинку має місце мінливість його режимів роботи, що визначається впливом погоднокліматичного чинника як всередині опалювального сезону, так і у багаторічному перерізі.

Мета роботи

Метою роботи є реалізація поглибленого ексергетичного аналізу ТНУ з проміжним теплообмінником для утилізації енергії стічних вод при теплозабезпеченні будинку із урахуванням сезонної мінливості режимів роботи.

Викладення основного матеріалу

В кожному елементі енергоперетворювальної системи можна позбутися тільки частини термодинамічних втрат. Через технологічні обмеження, пов'язаних, наприклад, із існуючими матеріалами, технологіями і/або вартістю матеріалів і виробничих процесів, максимальне значення ексергетичної ефективності k -го компонента не може бути збільшено при будь-яких інвестиціях. Частина деструкції ексергії, яка незалежно від досконалості компонента завжди буде мати місце, називається неминучою, або та, якої позбутися неможливо (англ. – unavoidable – UN). Інша частина деструкції ексергії – та, якої позбутися можливо (англ. – avoidable – AV) [1–3]

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{AV} + \dot{E}_{D,k}^{UN} \quad (1)$$

Отже, при удосконаленні теплоенергетичної системи, зусилля повинні бути направлені саме на ту частину деструкції ексергії, якої можна позбутися.

Доведено, що деструкція ексергії в окремому елементі системи залежить від необоротностей як безпосередньо у самому елементі так і в інших елементах, що входять у систему [1–3]. В результаті була розроблена теорія розділення деструкції ексергії на внутрішню залежну (англ. – endogenous – EN) та зовнішню залежну (англ. – exogenous – EX) [1–3]

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{EN} + \dot{E}_{D,k}^{EX} \quad (2)$$

На основі отриманих значень внутрішньої та зовнішньої залежних частин деструкції ексергії можна розробити стратегію удосконалення системи [1–3]:

– при $\dot{E}_{D,k}^{EN} > \dot{E}_{D,k}^{EX}$, необхідно зробити акцент на удосконалення даного компонента;

– при $\dot{E}_{D,k}^{EN} < \dot{E}_{D,k}^{EX}$, даний компонент може бути удосконалений «автоматично» за рахунок удосконалення інших компонентів системи або структурних змін системи;

– при $\dot{E}_{D,k}^{EN} = \dot{E}_{D,k}^{EX}$ варто перейти до аналізу інших елементів системи, так як удосконалення одного з інших елементів обов'язково вплине на значення деструкції ексергії в даному елементі, тобто призведе до перших двох випадків аналізу.

В результаті такого поділу деструкції ексергії з'явився так званий поглиблений ексергетичний аналіз [1–3]. Об'єднання цих чотирьох складових деструкції ексергії елемента системи забезпечило її поділ на такі частини: внутрішню залежну і ту, якої неможна позбутися $\dot{E}_{D,k}^{UN,EN}$ – не може бути усунута через існуючі технологічні обмеження даного елемента системи; зовнішню залежну і ту, якої неможна позбутися $\dot{E}_{D,k}^{EX}$ – не може бути усунута через існуючі технологічні обмеження інших елементів системи та даного структурного рішення; внутрішню залежну і ту, якої можна позбутися $\dot{E}_{D,k}^{AV,EN}$ – може бути усунута за рахунок удосконалення даного елемента системи; зовнішню залежну і ту, якої можна позбутися $\dot{E}_{D,k}^{AV,EX}$ – може бути усунута за рахунок удосконалення інших елементів системи та/або структурного рішення системи.

В даних дослідженнях в якості низькотемпературного джерела енергії використовуються стічні води з температурою, що змінюється в діапазоні 13...17 °С. У проектному режимі охолодження теплоносія проміжного контуру у випарнику прийнято рівним 3 К, у теплообміннику проміжного контуру нагрів цього теплоносія також становить 3 К. Мінімальний температурний напір як у випарнику так і у конденсаторі рівний 5 К. Температурний напір у теплообміннику проміжного контуру становить у проектному режимі 7 К.

Для дослідження режимів роботи системи теплозабезпечення при зміні теплового навантаження (непроектний режим роботи) використаний квазістаціонарний підхід побудови математичних моделей у відповідності до [7] з урахуванням добового коливання параметрів впливу. Математичне моделювання базується на реалізації алгоритму розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, що включають в себе: рівняння теплових балансів та теплопередачі як для окремих частин так і загалом для поверхонь нагріву; балансові рівняння масових витрат; рівняння, що описують окремі процеси у системі; рівняння з визначення гідравлічних опорів при русі робочих тіл та теплоносіїв; формуляції або функції з визначення теплофізичних властивостей робочих тіл.

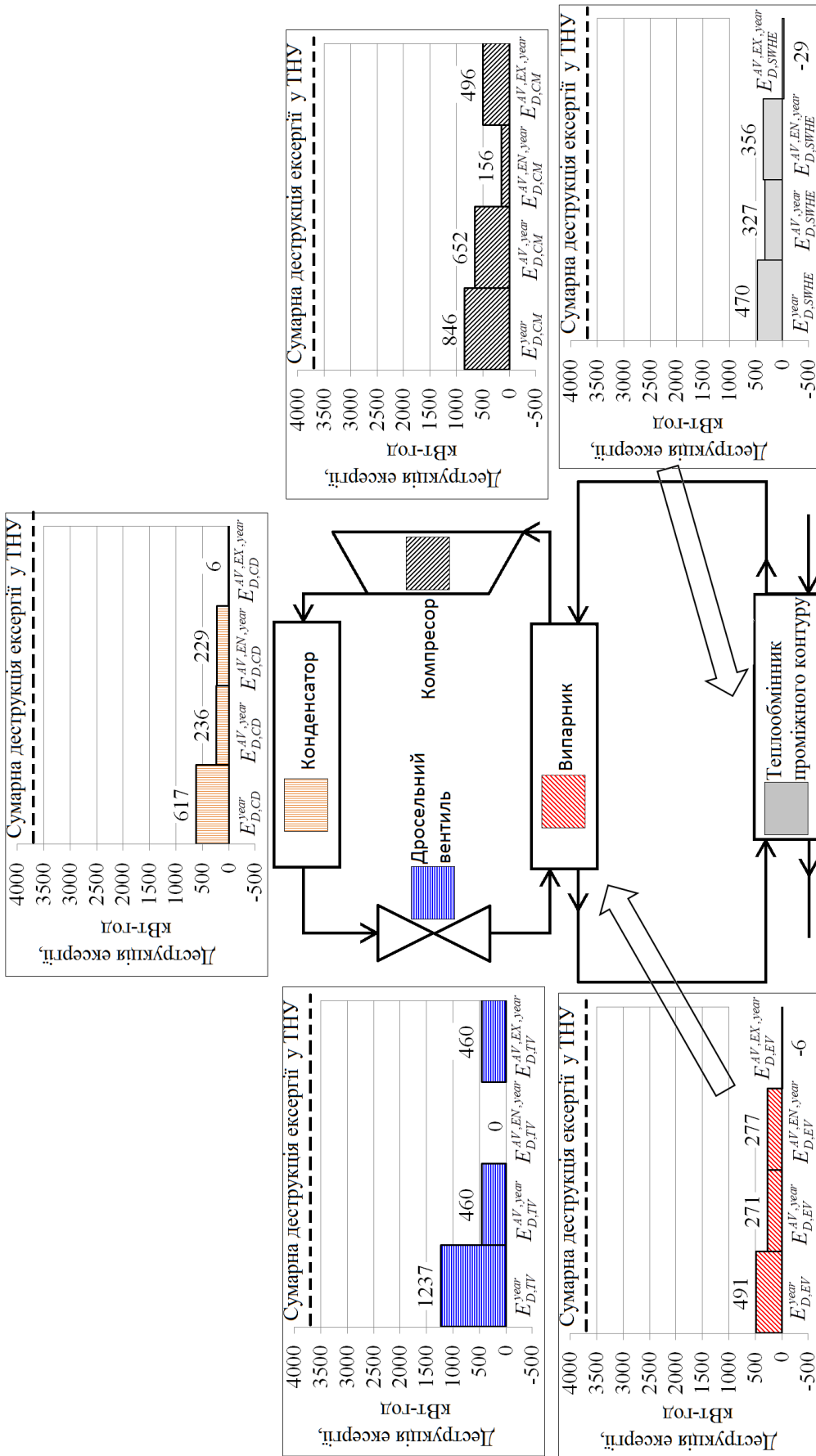


Рис. 1 – Сумарні за опалювальний період значення деструкції ексергії в елементах ТНУ

Для реалізації поглибленого ексергетичного аналізу теплового насоса використаний так званий термодинамічний метод, який базується на побудові гібридних термодинамічних циклів [1–3]. При цьому, для проектного режиму, при визначенні деструкції ексергії, яку неможливо позбутися через технологічні обмеження, прийнятий мінімальний температурний напір у випарнику та конденсаторі рівним 1 К, у проміжному теплообміннику 2 К, а ізоентропний ККД компресора – 94 %.

На даному етапі досліджень вплив гідравлічних опорів в елементах ТНУ на деструкцію ексергії окремо не вивчався.

На рис. 1 наведені результати проведених досліджень. Штриховою лінією, для візуального порівняння, показана сумарна за опалювальний сезон деструкція ексергії у ТНУ. Також для кожного елемента ТНУ (компресора, конденсатора, дросельного вентиля, випарника та проміжного теплообмінника з утилізації енергії стічних вод) наведені сезонні значення: всієї деструкції ексергії $E_{D,k}^{year}$, частини деструкції, що можна позбутися $E_{D,k}^{AV,year}$; внутрішньозалежної і тієї, що можна позбутися $E_{D,k}^{AV,EN,year}$; зовнішньозалежної і тієї, що можна позбутися $E_{D,k}^{AV,EX,year}$. Представлення саме такої інформації обумовлене тим, що дані про значення деструкції, якої можна позбутися та причини її виникнення є важливими з практичної точки зору.

Обговорення результатів

Із рис. 1 бачимо, що сумарна за опалювальний сезон деструкція ексергії в ТНУ, що досліджується, становить 3660 кВт·год.

Найбільші сумарні за опалювальний період значення деструкції ексергії характерні для дросельного вентиля та компресора. Сумарні за опалювальний період значення деструкції ексергії становлять відповідно:

– у дросельному вентилі – $E_{D,TV}^{year} = 1237$ кВт·год;

– у компресорі – $E_{D,CM}^{year} = 846$ кВт·год;

– у конденсаторі – $E_{D,CD}^{year} = 617$ кВт·год;

– у випарнику – $E_{D,EV}^{year} = 491$ кВт·год;

– у теплообміннику проміжного контуру – $E_{D,SWHE}^{year} = 470$ кВт·год.

Дана інформація потребує подальшого аналізу та деталізації. Адже, наприклад, хоча дросельний вентиль є тим місцем, де зосереджена найбільша деструкція ексергії, потрібно ще з'ясувати її причини та можливості її зниження. У компресорі також зосереджена значна частка деструкції ексергії. Але джерелом її можуть бути необоротні процеси як безпосередньо у цьому елементі так і в інших (випарник, конденсатор, проміжний теплообмінник). Причому важливо визначити частку

тієї деструкції ексергії, якої можна позбутися. Таку інформацію можна отримати на основі поглибленого ексергетичного аналізу.

Як видно із рис. 1 найбільша частка сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії, що можна позбутися, припадає на компресор і становить $E_{D,CM}^{AV,year} = 652$ кВт·год або 18 % від загальної кількості сумарної за опалювальний період деструкції ексергії у ТНУ. Найменша частка деструкції ексергії, що можна позбутися, припадає на конденсатор і рівна $E_{D,CD}^{AV,year} = 236$ кВт·год або всього 6 % від загальної кількості сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії у даній ТНУ. У дросельному вентилі, випарнику та проміжному теплообміннику дані частини деструкції ексергії відповідно становлять $E_{D,TV}^{AV,year} = 460$ кВт·год,

$E_{D,EV}^{AV,year} = 271$ кВт·год та $E_{D,SWHE}^{AV,year} = 327$ кВт·год або відповідно 13 %, 7 % та 9 % від загальної кількості сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії у ТНУ.

Найбільша частка внутрішньозалежної деструкції ексергії, яку можна уникнути, належить проміжному теплообміннику і становить $E_{D,SWHE}^{AV,EN,year} = 356$ кВт·год або майже 10 % від загальної кількості сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії у ТНУ. Трохи менше цієї частини деструкції ексергії належить випарнику – $E_{D,EV}^{AV,EN,year} = 277$ кВт·год або 8 % від загальної кількості сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії ТНУ. Дана частина деструкції у редуційному вентилі відсутня, що узгоджується із методологією визначення цієї деструкції. У конденсаторі та компресорі маємо відповідно $E_{D,CD}^{AV,EN,year} = 229$ кВт·год та $E_{D,CM}^{AV,EN,year} = 156$ кВт·год внутрішньозалежної деструкції ексергії, що можна позбутися. А це становить відповідно 6% та 4 % від загальної кількості сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії у ТНУ.

Найбільша частина зовнішньозалежної деструкції ексергії, що можна позбутися, належить компресору і становить $E_{D,CM}^{AV,EX,year} = 496$ кВт·год або 14 % від загальної кількості сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії у ТНУ. Трохи менше даної частини деструкції ексергії належить дросельному вентилю ($E_{D,TV}^{AV,EX,year} = 460$ кВт·год). У

конденсаторі маємо $E_{D,CD}^{AV,EX,year} = 6$ кВт·год або менше 1 % від загальної кількості сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії у ТНУ. Особлива ситуація із зовнішньозалежною частиною та тією, що можна позбутися деструкцією ексергії у випарнику та проміжному теплообміннику. Сумарні за опалювальний період значення цієї частини деструкції ексергії є від'ємними і становлять відповідно -6 кВт·год та -29 кВт·год. Це означає, що

для зменшення даної частини деструкції ексергії у цих елементах необхідно збільшити деструкцію ексергії в інших компонентах ТНУ. Подібний результат з отримання від'ємного значення частини деструкції ексергії отриманий також в роботах [2, 3, 7].

Для більш детального дослідження взаємного впливу компонентів системи на створення зовнішньо залежної деструкції ексергії в окремому компоненті ТНУ передбачений додатковий етап поглибленого ексергетичного аналізу, результати якого планується представити у наступних роботах.

Висновки

1. В роботі наведені результати поглибленого ексергетичного аналізу ТНУ з проміжним теплообмінником утилізації енергії стічних вод, призначеного для теплозабезпечення будівлі протягом опалювального періоду із урахуванням сезонних коливань потреб енергії та температури низькопотенційного джерела.

2. Показана перевага поглибленого ексергетичного аналізу у порівнянні із традиційним, де складно кількісно оцінити можливості підвищення ексергетичної ефективності установки.

3. Показано, що у прийнятих умовах найбільшу частку сезонної деструкції ексергії у дросельному вентилі та компресорі можна позбутися за рахунок зменшення необоротностей в інших елементах системи. Сезонні деструкції ексергії, яких можна уникнути у конденсаторі, випарнику та теплообміннику проміжного контуру, обумовлені, в основному, необоротностями у цих же компонентах.

Подяки

Ця робота була підтримана проектом «Комплекс ресурсозберігаючих технологій з очищення стічних вод та використання тепла стічних вод цивільних та військових об'єктів» (номер державної реєстрації НДР 0116U007384).

Список літератури

1. Tsatsaronis G., Morosuk T. Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems. *The 4th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering (CPOTE-2016). Program and Proceedings, Gliwice – Katowice, Silesia, Poland, September, 14-16, 2016*. Gliwice – Katowice, Silesia, 2016. pp. 75–89.
2. Morosuk T., Tsatsaronis G. New approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. *Energy*. 2008. Vol. 33. pp. 890–907.

3. Morosuk T., Tsatsaronis G. Advanced exergetic evaluation of refrigeration machines using different working fluids. *Energy*. 2009. Vol. 34. P. 2248–2258.
4. Erbay Z., Hepbasli A. Application of conventional and advanced exergy analyses to evaluate the performance of a ground-source heat pump (GSHP) dryer used in food drying. *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 78. P. 499–507.
5. Харлампиди Д. Х., Тарасова В. А. Структурный термодинамический анализ пароконденсаторной холодильной машины. *Технические газы*. 2012. № 5. С. 57–66.
6. Hepbasli A., Biyik E., Ekren O., Gunerhan H., Araz M. A key review of wastewater source heatpump (WWSHP) systems. *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 88. P. 700–722.
7. Волощук В. А. Поглиблений ексергетичний аналіз теплового насоса як елемента системи теплозабезпечення будинку з урахуванням сезонних коливань режимів роботи. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 10(1232). С. 59–65. Бібліогр.: 7 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.08.
8. Herbas T. B., Berlinck E. C., Uriu C. A. T., Marques R. P., Parise J. A. R. Steady-state simulation of vapor-compression heat pump. *International Journal of Energy Research*. 1993. Vol. 17. P. 801–816.

References (transliterated)

1. Tsatsaronis, G. and Morosuk, T. (2016), "Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems", *The 4th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering (CPOTE-2016), Gliwice – Katowice, Silesia, Poland, September, 14-16, 2016*, Gliwice – Katowice, Silesia, pp. 75-89.
2. Morosuk, T. (2008), "New approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines", *Energy*, Vol. 33, pp. 890–907.
3. Morosuk, T. and Tsatsaronis, G. (2009), "Advanced exergetic evaluation of refrigeration machines using different working fluids", *Energy*, Vol. 34, pp. 2248–58.
4. Erbay, Z. and Hepbasli, A. (2014), "Application of conventional and advanced exergy analyses to evaluate the performance of a ground-source heat pump (GSHP) dryer used in food drying", *Energy Conversion and Management*, Vol. 78, pp. 499–507.
5. Kharlampidi, D.Kh. and Tarasova, V.A. (2012), "Strukturniy termodinamicheskij analiz parokondensatornoj holodil'noj mashiny [Structural thermodynamic analysis of vapor compression refrigeration machine]", *Tekhnicheskiye gazy*, no. 5. pp. 57–66.
6. Hepbasli, A., Biyik E., Ekren O., Gunerhan H. and Araz M. (2014), "A key review of wastewater source heatpump (WWSHP) systems", *Energy Conversion and Management*, Vol. 88, pp. 700–722.
7. Voloshchuk, V. (2017), "Advanced exergetic analysis of a heat pump providing space heating taking into account seasonal variations of operation modes", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10, pp. 59–65, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.08.
8. Herbas, T.B., Berlinck, E.C., Uriu, C.T.A., Marques, P.P. and Parise, J.A.R. (1993), "Steady-state simulation of vapor-compression heat pump", *International Journal of Energy Research*, Vol. 17, pp. 801–16.

Надійшла (received) 08.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Волощук Володимир Анатолійович (Волощук Владимир Анатольевич, Volodymyr Voloshchuk) – кандидат технічних наук, доцент, кафедра гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин, Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне; e-mail: Volodya-28@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0687-8968>.