

РОЗДІЛ 2**ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 620.91(477)+797.34(477)

Д.В. Выборнов, С.И. МонахДонбаська національна академія будівництва і архітектури,
вул. Державіна, 2, Макіївка, 86123, Україна**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК**

У даній статті пропонуються залежності, що описують ефективність роботи ТНУ, отримані експериментальним шляхом в результаті планування експерименту, оскільки ефекти взаємодії факторів у досліджуваному об'єкті пренебрежимо малі, було застосовано ¼ репліку повного факторного експерименту.

Ключові слова: теплонасосна установка - хладагент - рівняння регресії - ексергетичний коефіцієнт корисної дії - коефіцієнт перетворення теплоти - ефективність.

Д.В. Выборнов, С.И. МонахДонбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ул. Державина, 2, Макеевка, 86123, Украина**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК**

В данной статье предлагаются зависимости, описывающие эффективность работы теплонасосных установок, полученные экспериментальным путем в результате планирования эксперимента, поскольку эффекты взаимодействия факторов в исследуемом объекте пренебрежимо малы, была применена ¼ реплика полного факторного эксперимента.

Ключевые слова: теплонасосная установка – хладагент – уравнение регрессии – эксергетический коэффициент полезного действия – коэффициент преобразования теплоты – эффективность.



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

I. ВВЕДЕНИЕ

Для решения основных вопросов жизнеобеспечения все более активно используются технологии, позволяющие утилизировать теплоту низкопотенциальных источников, применять когенерационные и тригенерационные технологии, использовать энергию солнечного излучения и силу ветра [1-3].

В случае эксплуатации теплонасосных установок (ТНУ) для утилизации теплоты шахтной воды или других промышленных стоков становится важным уметь прогнозировать и анализировать эффективность работы как отдельных узлов, так и всей ТНУ в целом. В контексте сложившейся ситуации вокруг природных топливно-энергетических ресурсов оптимизационные вопросы, касающиеся установок, использующих вторичные энергоресурсы, становятся наиболее актуальными.

II. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поскольку объектом исследования являются термодинамические процессы в ТНУ, использующих теплоту низкопотенциальных стоков, то в качестве средства получения экспериментальных данных была выбрана геотермальная ТНУ – Thermia Diplomat Optimum G3 установленной тепловой мощностью 17,2 кВт.

Тепловой насос (ТН) установлен в частном доме, расположенном в Донецкой области. Расчетная мощность автономной системы теплоснабжения коттеджа была рассчитана из условий соответствия вновь построенного здания требованиям [4] касательно соблюдения теплового режима в помещении и нормативных показателей сопротивления теплопередаче. Система горячего водоснабжения была рассчитана по требованиям [5] исходя из количества точек водоразбора горячей воды.

Сопротивления теплопередаче для наружных стен, кровли и заполнения оконных и дверных проемов приняты соответствующими минимальными сопротивлениями теплопередачи для I климатической зоны [4]. Сопротивление теплопередаче пола первого этажа было определено расчетным путем. Суммарные теплотери составили 11875 Вт.

Тепловой поток за период максимального водопотребления на нужды горячего водоснабжения, составляет для данного коттеджа 8060 Вт. Сюда входит обеспечение двух одновременно работающих точек водоразбора и теплотери через трубопроводы системы ГВС в здании. Следовательно, общая тепловая нагрузка здания при расчетных отопительных климатических условиях составляет 19935 Вт. В качестве пикового и резервного источника теплоты предусмотрен электродкотел ЭОУ-3/21 тепловой мощностью до 21 кВт.

Источником теплоты для ТН в данном случае служит геотермальный коллектор, состоящий из ПВХ труб уложенных горизонтальным образом на прилегающем участке. В качестве низкопотенциального теплоносителя использовалась вода дистиллированная. В качестве хладагента (ХА) использовался изобутан (R 600a), закачка которого осуществлялась с привлечением квалифицированного персонала. В качестве высокопотенциального теплоносителя была использована вода системы отопления и ГВС, рассчитанные на указанные выше мощности. Принципиальная схема бивалентного теплоснабжения коттеджа приведена на рисунке 1. На рисунке 1 приняты следующие обозначения: 1 – испаритель; 2 – конденсатор; 3 – дроссель; 4 – компрессор; 5 – границы ТНУ; 6 – пиковый (резервный) теплогенератор (электродкотел); 7 – подключение к низкопотенциальному источнику теплоты; 8 – потребители теплоты (система отопления и ГВС); 9 – циркуляционные насосы системы отопления и ГВС; 10 – вентиль наполнения (подпитки) контура высокопотенциального теплоносителя; 11, 12 – отключающая и регулировочная арматура.

Низкопотенциальный теплоноситель, в роли которого выступает вода с горизонтального коллектора, поступает по линиям 7 в испаритель 1. Нагретый за счет подвода теплоты ХА, сжимается в компрессоре 4 и поступает в конденсатор 2, где, отдав теплоту высокопотенциальному теплоносителю, сжимается в дросселе 3. Высокопотенциальный теплоноситель, запитанный через линию 10, после нагрева в конденсаторе поступает на нужды системы теплоснабжения. Качество догрева при необходимости регулируется при помощи пикового догревателя 6.

Для проведения эксперимента в схему теплоснабжения коттеджа были внесены некоторые изменения (рисунок 2). На линии подачи низкопотенциального теплоносителя в испаритель был смонтирован электродогреватель 13, позволяющий искусственно регулировать температуру на входе в испаритель. В характерных точках, а

именно на входе и выходе теплоносителей из ТНУ были установлены штуцеры, позволяющие измерять температуру с помощью термометров «Росма».

III. ПЛАНИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

При исследовании работы ТНУ, использующей в качестве первичного низкопотенциального теплоносителя шахтную воду (или промышленные стоки), было выделено ряд факторов, которые в разной степени влияют на эксергетический КПД установки, η , на коэффициент преобразования теплоты, μ , и на экономическую эффективность, γ , внедрения установки. Это такие факторы как

- температура низкопотенциального теплоносителя;
 - расход низкопотенциального теплоносителя;
 - необходимая температура в контуре высокопотенциального теплоносителя (системы теплоснабжения);
 - расход высокопотенциального теплоносителя;
 - вид применяемого ХА;
 - вид и марка ТНУ;
 - наличие дополнительных переохлаждающих и перегревающих поверхностей в контуре ХА;
 - тип применяемого компрессора;
 - вид цикла, осуществляемого ТНУ;
 - потери давления в контуре ХА;
 - наличие в низкопотенциальном теплоносителе коррозионно активных химических соединений, а также взвесей, загрязняющих поверхность теплообмена;
 - частота регенераций поверхностей теплообмена и вид очистки;
 - рН низкопотенциального теплоносителя;
 - температура окружающей среды помещения, в которой находится ТНУ и качество теплоизоляции основных теплообменных узлов и т.д.
- Из множества этих факторов для получения зависимости для η в первом приближении были выбраны температуры в конденсаторе и испарителе, обусловленные температурами высокопотенциального и низкопотенциального теплоносителей при осуществлении обычного цикла ТНУ без включения дополнительных теплообменных поверхностей на ХА – R600a. Следующими определяющими факторами были выбраны: температура высокопотенциального теплоносителя на входе, температура окружающей среды (поскольку их годичные колебания наиболее ощутимы при определении эксергетического КПД) и потери давления в контуре ХА (поскольку существенное падение давления ХА в процессе осуществления цикла может привести к его смещению в h -lg p – координатах).

При расчетах сознательно не учитывались ни химический состав шахтной воды, ни степень за-

грязнения взвешьями, ни частота необходимых регенераций, хотя эти факторы также являются одними из определяющих при проектировании реальной установки. Однако, поскольку при работе установки в нормальном режиме мы имеем дело с чистыми теплообменными поверхностями, было принято решение учитывать агрессивность и загрязненность низкопотенциального теплоносителя с помощью введения дополнительных коэффициентов, что может стать материалом дальнейших исследований в этой области.

При получении зависимости эксергетического КПД от обозначенных выше параметров как до эксплуатации установки, так и в процессе ремонта или реконструкции существующих установок, можно будет оценить, насколько полно эксергия низкопотенциального теплоносителя и электропривода компрессора передается высокопотенциальному теплоносителю. Это предоставит возможность давать термодинамическую оценку оборудованию или искать наиболее приемлемые решения для различных конкретных случаев.

Перед разработкой плана эксперимента были определены уровни варьирования факторов, влияющих на η_s , выявленных на основе априорной информации, таким образом, выходными параметрами являются эксергетический КПД, коэффициент преобразования теплоты и эффективность, а входные параметры управляемы и в ходе исследования изменялись от нижней до верхней границы варьирования, уровни варьирования приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов

Фактор	Нижний уровень фактора	Верхний уровень фактора
Температура в испарителе, °С	10	25
Температура в конденсаторе, °С	40	65
Потери давления в контуре ХА, Па	10	60
Температура высокопотенциального теплоносителя на входе в ТНУ, °С	5	15
Температура окружающей среды, °С	8	25

Вышеперечисленные факторы (температура в испарителе, конденсаторе, температура высокопотенциального теплоносителя на входе в ТНУ, температура окружающей среды, а также потери давления в контуре ХА) можно охарактеризовать как количественные, которые в свою очередь задаются численными значениями, определяющими возможные области изменения рассматриваемого параметра.

При получении зависимости эксергетического КПД от обозначенных выше параметров как до

эксплуатации установки, так и в процессе ремонта или реконструкции существующих установок, можно будет оценить, насколько полно эксергия низкопотенциального теплоносителя и электропривода компрессора передается высокопотенциальному теплоносителю. Это предоставит возможность давать термодинамическую оценку оборудованию или искать наиболее приемлемые решения для различных конкретных случаев. Перед разработкой плана эксперимента были определены уровни варьирования факторов, влияющих на η_s , выявленных на основе априорной информации.

При построении математической модели необходимо осуществить переход от действительного (натурального) значения факторов к кодированному (стандартизированному), по формуле [6]:

$$x_i = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta x_j} \quad (1)$$

где x_i – нормированное значение фактора; x_j – натуральное значение фактора; x_{j0} – основной уровень фактора; Δx_j – интервал варьирования фактора.

Будем предполагать, что эффекты взаимодействия факторов в исследуемом объекте маловероятны и пренебрежимо малы, поэтому можно воспользоваться $1/4$ репликой полного факторного эксперимента (ПФЭ) [7], то есть дробным факторным экспериментом (ДФЭ) типа 2^{5-2} . Поскольку прямая оценка разрешающей способности дробной реплики затруднена, поэтому дробные реплики зададим с помощью генерирующих соотношений, и план дробного факторного эксперимента типа 2^{5-2} , может быть представлен $1/4$ репликой, которая задается одним из следующих генерирующих соотношений $x_4 = x_1 x_2$; $x_5 = x_1 x_2 x_3$. Была составлена матрица планирования эксперимента с тремя параллельными опытами, а также по результатам трех параллельных опытов было найдено среднее арифметическое значение параметра оптимизации.

Поскольку критическое значение распределения Кохрена больше расчетного, то гипотеза об однородности дисперсий принимается, таким образом, нет необходимости проводить эксперимент повторно.

Имитационную модель будем искать в виде полинома первого порядка вида [6].

$$Y(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{\substack{i,j,u=1 \\ i \neq j \neq u}}^k b_{iju} x_i x_j x_u + \dots \quad (2)$$

где b_0 – свободный член; b_i – коэффициент при линейных членах, отражающий влияние i -го фактора на функцию отклика; b_{ij} – коэффициенты парного взаимодействия факторов; b_{iju} – эффекты тройного взаимодействия факторов; k – число входных параметров.

После этого была проведена оценка значимости коэффициентов регрессии, оценена дисперсия коэффициентов уравнения регрессии, найдено значение доверительных интервалов. Проверка по распределению Стьюдента и критерию Фишера говорит об адекватности полученного уравнения регрессии. Гипотеза о воспроизводимости опытов

проверяется при помощи критерия Кохрена, расчетное значение которого вычисляется по формуле

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} \quad (3)$$

где S_j^2 - оценка дисперсии для каждой j - й точки факторного пространства, определяемой по формуле

$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_j - \bar{y}_{j,cp})^2 \quad (4)$$

тут m - количество параллельных опытов, y_j - значение выходного параметра в j - й строке, $\bar{y}_{j,cp}$ - среднее значение параметра j - й строке.

В результате расчетов для всех трех случаев расчетное значение критерия Кохрена меньше критического, что говорит о том, что гипотеза об однородности дисперсий принимается, факторы и интервалы варьирования выбраны корректно, а точность измерительных приборов достаточна.

При переходе от стандартизированного масштаба к натуральному, получим окончательный вид модели, характеризующей зависимость эксергетического КПД, формулы (5-6).

При построении модели для коэффициента преобразования теплоты было установлено, что

при помощи планирования первого порядка, к которому мы прибегли при построении математической модели для функции эксергетического КПД, не удастся получить адекватное математическое описание коэффициента преобразования теплоты. Следовательно, возникает необходимость в переходе к центральному композиционному планированию (ЦКП), что влечет за собой проведение дополнительных опытов в «звездных точках» и опыт в центре плана, ядром которого будет полный факторный эксперимент. Результат представлен в виде формул (7-8).

Аналогичным образом окончательное уравнение регрессии для эффективности ТНУ, использующей теплоту шахтной воды, можно записать в виде формул (9-10). Полученные уравнения могут быть упрощены для практического применения в сфере проектирования ТНУ, использующих теплоту как шахтных вод, так и промышленных стоков.

Также в ходе эксперимента была подтверждена известная зависимость [8], чем более превышение температуры низкопотенциального источника над температурой окружающей среды, тем большую величину имеет эксергетический КПД.

$$\hat{y}_{\text{мод}, \eta_s}(x_1, x_2, x_3) = 0,322489 + 0,06458 \frac{x_1 - 17,5}{7,5} - 0,03443 \frac{x_3 - 35}{25} + 0,053308 \frac{x_1 - 17,5}{7,5} \cdot \frac{x_2 - 52,5}{12,5} - 0,14726 \frac{x_1 - 17,5}{7,5} \cdot \frac{x_2 - 52,5}{12,5} \cdot \frac{x_3 - 35}{25} \quad (5)$$

$$y_{\eta_s} = 2,7628 - 0,1367 \cdot t_u - 0,04843 \cdot t_k - 0,05910 \cdot \Delta p + 2,7677 \cdot 10^{-3} \cdot t_u \cdot t_k - 6,2831 \cdot 10^{-5} \cdot t_u \cdot t_k \cdot \Delta p + 3,2986 \cdot 10^{-3} \cdot t_u \cdot \Delta p + 1,0995 \cdot 10^{-3} \cdot t_k \cdot \Delta p \quad (6)$$

$$\hat{y}_{\text{мод}, \eta_m}(x_1, x_2, x_3) = 10,8289 + 3,1802 \frac{x_1 - 17,5}{7,5} - 4,1262 \frac{x_2 - 52,5}{12,5} - 1,025 \frac{x_3 - 35}{25} + 1,000141 \left(\left(\frac{x_2 - 52,5}{12,5} \right)^2 - 0,73 \right) - 2,1495 \frac{x_1 - 17,5}{7,5} \cdot \frac{x_2 - 52,5}{12,5} \quad (7)$$

$$y_{\eta_m} = 18,0189 - 1,6287 \cdot t_u - 0,6009 \cdot t_k - 0,041 \cdot \Delta p - 0,02293 \cdot t_u \cdot t_k + 6,4006 \cdot 10^{-3} \cdot t_k^2 \quad (8)$$

$$\hat{y}_{\text{мод}, \eta_{\text{эф}}}(x_1, x_2, x_3) = 12,1616 - 0,3618 \frac{x_1 - 17,5}{7,5} - 0,1308 \frac{x_3 - 35}{25} - 0,1968 \left(\left(\frac{x_1 - 17,5}{7,5} \right)^2 - 0,73 \right) - 0,2329 \left(\left(\frac{x_2 - 52,5}{12,5} \right)^2 - 0,73 \right) - 0,2370 \left(\left(\frac{x_3 - 35}{25} \right)^2 - 0,73 \right) \quad (9)$$

$$y_{\eta_{\text{эф}}} = 8,0304 + 0,0742 \cdot t_u + 0,1565 \cdot t_k + 0,0213 \cdot \Delta p - 3,4987 \cdot 10^{-3} \cdot t_u^2 - 1,4906 \cdot 10^{-3} \cdot t_k^2 - 3,792 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta p^2 \quad (10)$$

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенного выше материала можно сделать следующий вывод: получены зависимости таких важных факторов ТНУ, как эксергетический КПД, коэффициент преобразования теплоты и эффективность от основных определяющих факторов работы ТНУ (температуры в испарителе, конденсаторе и потерь давления). Полученные математические зависимости, описывающие работу установки, проверены на реальной действующей модели установки; полученные в результате опытов данные говорят об адекватности математической модели.

1. Для уменьшения эксергетических потерь в ТНУ необходимо стремиться к более высокой

температуре в испарителе и минимальным потерям давления ХА при циркуляции по контуру ТНУ, что достигается при помощи теплоизоляции подающих трубопроводов шахтной (или другой технической) воды, правильного выбора оборудования ТНУ с обоснованным диапазоном компрессора по давлению.

2. Для увеличения коэффициента преобразования теплоты необходимо развивать площади теплообмена в испарителе и конденсаторе, а также использовать дополнительные поверхности теплообмена.

3. Для повышения эффективности ТНУ также необходимо обоснованно выбирать основное оборудование ТНУ, в частности, компрессор, а также использовать первичный теплоноситель с максимально высокой температурой.

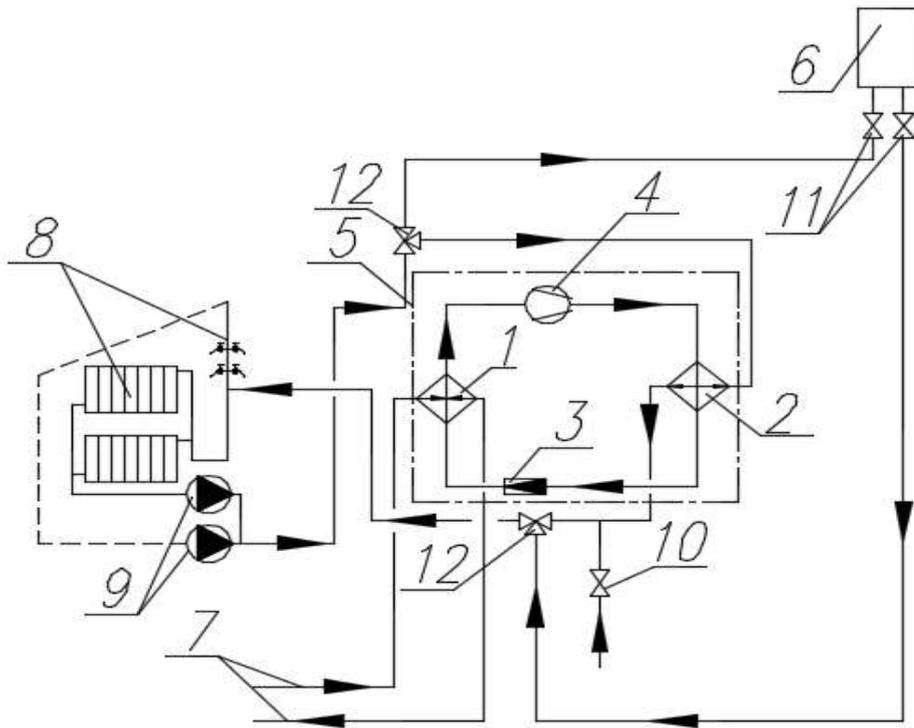


Рисунок 1 – Принципіальна схема експериментальної установки

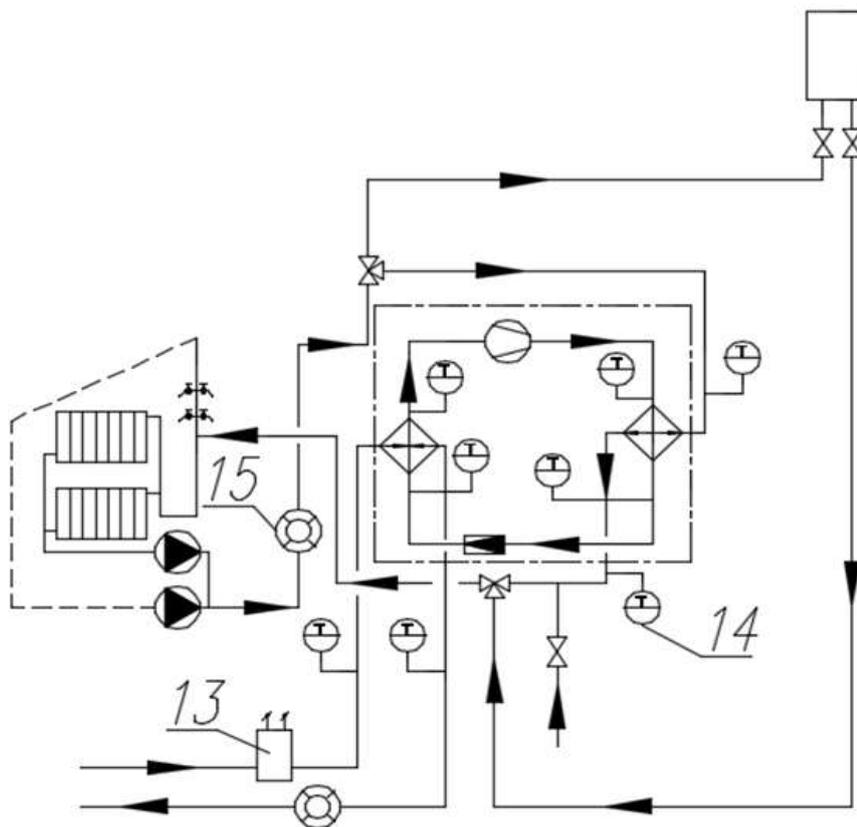


Рисунок 2 – Зміни в принципіальній схемі теплоснабження від ТНУ

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дорошенко А.В., Милованов В.И., Силч С.С.** Разработка газо-жидкостных солнечных коллекторов для альтернативных холодильных систем // Холодильна техніка та технологія . – 2003. – № 1 (141). – С. 17-23.
2. **Дорошенко А.В., Орлов В.А.** Солнечные когенерационные системы энерго-, тепло-, хладо-снабжения // Холодильна техніка та технологія . – 2013. – № 3 (143). – С. 41-48.
3. **Куликова Н.В., Редько А.А.** Термодинамическая модель теплоутилизатора на тепловых трубах // Холодильна техніка та технологія . – 2014. – № 2 (148). – С. 51-54.
4. **ДБН В.2.6-31:2006.** Теплова ізоляція будівель. Введ. 2006-09-09. – К.: Министерство строитель-

- ства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Украины. – 2006. – 77 с.
5. **ДБН - В.2.5-67:2013.** Опалення, вентиляція та кондиціонування. Введ. 2014- 01- 01. – К.: Минрегион Украины. – 2013. – 141 с.
6. **Лавров В.В.** Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / В.В. Спириин, Н.А. Лавров, Екатеринбург, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.
7. **Сидняев Н.И.** Введение в теорию планирования эксперимента : учеб. пособие / Н.И. Сидняев, Н.Т. Вилисова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 463 с.: ил. [ISBN 978-5-7038-3365-0]
8. **Ильин Р.А.** Некоторые особенности обратных термодинамических циклов тепловых насосов // Вестник АГТУ . – 2006. – № 6 (35). – С. 120-125.

D. Vybornov, S. Monakh

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture
ул. Державина, 2, Макеевка, 86123, Украина

THE RESULTS OF EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY OF HEAT PUMP SYSTEM OPERATION EFFICIENCY

The dependencies outlined the heat pump system operation efficiency obtained experimentally by experimental design are presented in the paper. Because the factors interaction effects in the tested object were negligible, the 1/4 full factorial experiment replica was applied.

Keywords: heat pump installation – refrigerant – the regression equation – exergic efficiency – the conversion coefficient of heat – efficiency.

REFERENCES

1. **Doroshenko A.V., Mylovanov V.I., Silich S.S.** Development of gas-liquid solar collectors for alternative cooling systems // Refrigeration engineering and technology. – 2003. – № 1 (141). – P. 17-23.
2. **Doroshenko A.V., Orlov V.A.** Solar cogeneration system power, heat, cooling systems // Refrigeration engineering and technology. – 2013. – № 3 (143). – P. 41-48.
3. **Kulikova N.V., Redko A.A.** Thermodynamical model heat exchanger to heat pipes // Refrigeration engineering and technology. – 2014. – № 2 (148). – P. 51-54.
4. **DBN V.2.6-31: 2006.** Thermal isolation of buildings. Permission. 2006-09-09. – K. : Mini Ministry of

- Construction, Architecture and House Communal Services of Ukraine. – 2006 – 77 p.
5. **DBN - V.2.5-67 2013.** Heat, ventilation and conditioning. Permission. 2014-01-01 – K. : Ministry of Regional Development of Ukraine. – 2013 – 141 p.
6. **Lavrov V.** Methods of planning and processing results of engineering experiment / V. Spirin, N.A. Lavrov, Yekaterinburg, GOU VPO Urals State Technical University, 2004. – 257 p.
7. **Sidnyaev N.** Introduction to Planing eksperiment: Proc. Manual / N.I. Sidnyaev, N.T. Vilisova. – Moscow: Publishing House of the MSTU. Bauman, 2011 – 463 p. [ISBN 978-5-7038-3365-0]
8. **Ilyin R.** Some features of the inverse-thermodynamic cycle heat pumps // Herald ASTU. – 2006. – № 6 (35). – P. 120-125.

Отримана в редакції 09.09.2014, прийнята до друку 17.11.2014