

УДК 537



Філін С.О.

Філін С.О. доктор техн. наук

Західнопоморський технологічний університет у Щецині
алея Піастів 17, Щецин, 70-310, Польща;
e-mail: Sergiy.Filin@zut.edu.pl

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУЧАСНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ХОЛОДИЛЬНИКІВ

У статті проаналізовано технічні характеристики й у першу чергу енергетичні сучасних термоелектричних холодильників (ТЕХ), а також способи підвищення їх енергетичної ефективності. Представлено результати порівняльних випробувань нових, розроблених автором, моделей ТЕХ та показано їх переваги над світовими аналогами. Бібл. 7, Рис. 7.

Ключові слова: термоелектричний холодильник, транспортний холодильник, енергозбереження, регулювання температури.

Вступ

Головною й глобальною метою технічного прогресу на початку ХХІ століття безперечно є підвищення енергетичної ефективності. Зниження енергоспоживання термоелектричних холодильників (далі використовується скорочення – ТЕХ) не лише перебуває в цьому руслі, але і є необхідною умовою конкурентоспроможності термоелектричних виробів на світовому ринку, і, насамперед, відносно компресорних аналогів. Ця проблема залишається невирішеною з самого початку ери термоелектричного охолодження й весь час перебуває у фокусі уваги фахівців, особливо в контексті зростання об'єму камери ТЕХ [1 – 4].

Надії на істотне підвищення ефективності термоелектричних матеріалів, на жаль, поки не виправдовуються. Тому розроблювачам (конструкторам) і виготовлювачам доводиться шукати інші шляхи вдосконалення холодильників, не пов'язані безпосередньо з термоелектричними матеріалами, базуючись при цьому на охолоджуваних модулях, що виробляються серійно

Раніше більшість моделей ТЕХ мали енергетичний клас **E** (рис.1). Деякі виробники, такі як *Атлант* або *МРМ*, змушені були відмовитися від експорту своїх ТЕХ до Європи. Щоб відповідати цим новим вимогам, частина виробників ТЕХ пішла шляхом їх оснащення електронною системою регулювання температури в камері існуючих ТЕХ.

Уведені директивами Євросоюзу нові, більш жорсткі, вимоги до енергетичних показників побутових холодильників торкнулися й термоелектричних холодильників. З 1 липня 2015 року на європейському ринку можуть продаватися абсорбційні й термоелектричні холодильники, що мають клас **D** і вище, що знижує напругу живлення модуля (ів) пропорційно до зниження температури в камері, починаючи з деякого її значення. Це привело до істотного подорожчання холодильників. Приклад тому – холодильники німецько-італійської фірми *Indel-B* [5]. Окрім того, цей спосіб регулювання має обмежене застосування, маючи на увазі рівень

навколишньої температури. Але найголовніше, він практично не застосовний у транспортних ТЕХ, які живляться безпосередньо від бортової мережі постійного струму 12В DC або 24В DC.

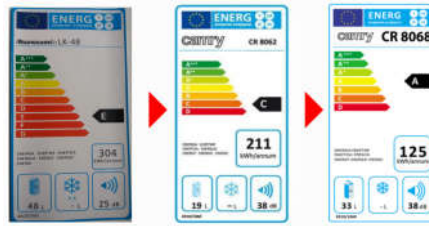


Рис.1. Зміни енергетичного класу ТЕХ протягом останніх п'яти років

Як було показано в роботі [6], показник добового або річного енергоспоживання не підходить для коректного порівняння різних ТЕХ. Одна з головних причин – відсутність нормування температури в камері. Різні ТЕХ працюють в одному з режимів (основний або енергозберігаючий) залежно від навколишньої температури, ступеня завантаження холодильника й способу його експлуатації. Автором був розроблений і запропонований до застосування більш універсальний показник порівняння – питома споживана потужність P_s . Фізичний зміст цього показника наступний: яку електричну потужність P необхідно підвести до холодильника, щоб утримувати в заданому об'ємі його камери задану різницю температур ΔT . Показник P_s застосуємо за умови однаковості теплоізоляційних властивостей шафи, а саме товщини й матеріалу теплоізоляції. Його слід розраховувати для кожного режиму роботи окремо.

На практиці це означає, що, наприклад, за температури навколишнього середовища 22 °С перевагу може мати перший холодильник, що працює в енергозберігаючому режимі. Його характеристику на рис. 2 показано синім (темним) кольором. Але за температури 25 °С цей холодильник уже не переходить у цей режим роботи. Отже, перевага тоді може перейти до другого холодильника (сірий колір), який має більш широкий діапазон зовнішніх температур, при яких можлива робота в енергозберігаючому режимі. Із цього випливає дуже важливий висновок про те, що при оцінці енергетичної ефективності ТЕХ мають значення не лише абсолютні величини показників P і P_s , але й температурний діапазон роботи холодильника, у якому вони можуть бути досягнуті.

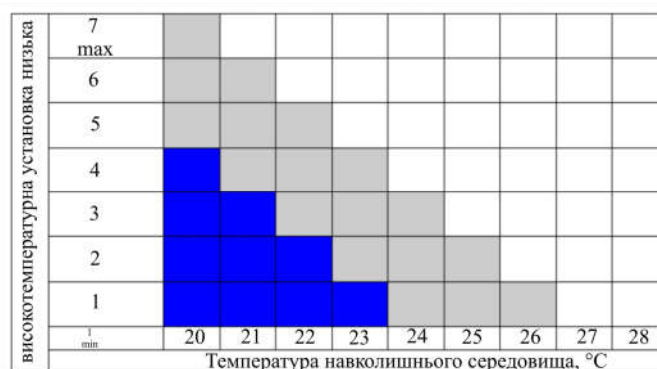


Рис. 2. Принцип порівняння ширини зони енергозберігаючого режиму двох ТЕХ

Технічні характеристики сучасних ТЕХ

На рис.3 представлено динаміку зміни показника питомої споживаної потужності P_s ТЕХ протягом останніх 35 років: синім (більш темним) кольором показані холодильники й міні-бари об'ємом 40-60 літрів, зеленим (більш світлим) кольором – холодильні вітрини об'ємом 70 – 110 літрів. Холодильники другого покоління (умовно віднесемо їх до періоду 1980-2000 рр.)

характеризувалися меншою ефективністю термоелектричних модулів, відсутністю регулювання температури в камері, але більшою створюваною різницею температур. Їхній показник P_s становив від 0.10 до 0.12. ТЕХ наступного (третього) покоління, у яких уже використовувалися різні типи регулювання температури в камері, досягли показника $P_s = 0.04-0.06$. Дане зниження показника P_s , можна охарактеризувати як штучне, тому що відносне зниження споживаної потужності перевищує відносне зниження різниці температур ΔT . Нижні значення зазначених діапазонів P_s досягаються в холодильниках-барах і холодильниках для вина, де температура в камері перевищує 10 – 12 °С. Нові авторські розробки, які можна віднести до четвертого покоління, мають показник P_s у межах 0.02-0.04, що майже в 2 рази нижче, ніж у ТЕХ попереднього покоління.

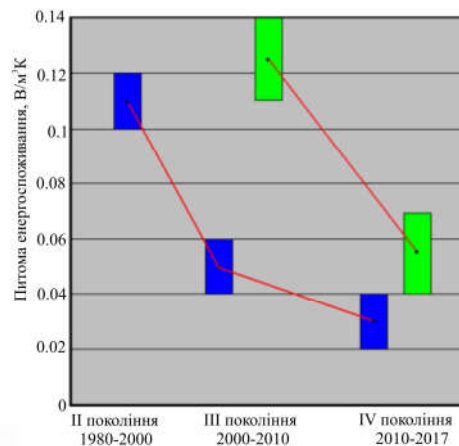


Рис. 3. Зниження показника P_s термоелектричних холодильників протягом останніх 35 років

Подібна тенденція спостерігається в категорії термоелектричних холодильних вітрин. Сякні двері цих виробів мають більший коефіцієнт теплопередачі, що, відповідно, відбивається на показнику P_s . За винятком вітрин для зберігання вина за температури 14 – 18 °С, універсальні вітрини мають показник P_s приблизно в 2 рази гірший, ніж холодильники.

У табл. 1 представлений сучасний світовий рівень параметрів побутових ТЕХ. Для коректності порівняння обрано холодильники із приблизно однаковим об'ємом камери – від 40 до 60 літрів.

Таблиця 1

Технічні характеристики кращих за енергоспоживанням світових зразків ТЕХ

Технічні характеристики	Виготовлювач, модель						
	<i>Omnitec</i> (Іспанія)	<i>Electroline</i> (Канада)		<i>Indel B</i> (Італія- Німеччина)	<i>Grass Cavagna Group</i> (Польща-Китай)		<i>Space-Mate</i> (США)
	Advance plus 42	BC42A	BC50A	DT40 plus	Ravanson		Igloo
					LK-40	LK-48	
Корисний об'єм камери [л]	42	42	50	40	40	48	56,6
Діапазон температур у камері [°C]	3...8	2...10	6.5...15	5...15	5...12	5...12	0...7
Напруга живлення змінного струму [В]	230	230	230	115/230	230	230	110/230

Продовження таблиці 1

Встановлена потужність [Вт]	72	75	50	60	70	70	90
Потужність споживана в енергозберігаючому режимі [Вт]	25	29	15	31	33	30	
Середнє добове енергоспоживання [кВт·год /24год]	0.6	0.7	0.36	0.75	0.8	0.8	1.08
Річне енергоспоживання [кВт·год/рік]	219	255.5	132	274	292	292	394.2
Питома споживана потужність [Вт/(дм ³ К)]	0.035	0.038	0.022	0.052	0.052	0.043	0.044
Габаритні розміри							
ширина	450	500	500	399	510	510	399
глибина	432	430	422	470	430	430	470
висота [мм]	530	480	515	553	430	480	553
Маса [кг]	немає даних	11.2	13.0	15.5	11.2	13.2	15.5

З представлених на ринку моделей найкращі параметри має холодильник ВР50А канадської фірми Electroline. Лабораторні випробування даного холодильника, проведені в 2018 році у Західнопоморському технологічному університеті в Щецині показали, що цей холодильник не може бути використаний у якості бази порівняння із двох причин. По-перше, середня товщина ізоляції камери цього холодильника становить 40 мм, що на 5 мм більше, чим у аналогів. Один цей факт дає перевагу за енергетичними характеристиками приблизно на 30%. По-друге, енергетичні характеристики моделі ВР50А виміряні при встановленні термостата на відносно високу температуру в камері, якій відповідає створюваний перепад температур 10–12 К, що на 2–3 градуси менше, ніж у аналогів. Це додає ще 15–20 % переваги в енергоспоживанні. Тому в якості бази порівняння при порівняльних випробуваннях нових і відомих моделей ТЕХ був прийнятий холодильник Ravanson LK-48.

Об'єкти й результати порівняльних випробувань

У Західнопоморському технологічному університеті в Щецині було розроблено та виготовлено прототипи й випробувано зразки нових термоелектричних холодильників 4-го покоління ХТТ-48-1 і ХТТ-48-2. Моделі створено на базі шаф термоелектричних холодильників Ravanson LK-48 і вони відрізнялись типом термоелектричних модулів. Оригінальний агрегат цього холодильника був демонтований. На його місце був установлений агрегат авторської розробки.

Поміж цілей поставлених перед початком робіт були наступні:

1. Домогтися підвищення енергетичної ефективності транспортних і побутових ТЕХ на базі термоелектричних охолоджувальних модулів, що серійно випускаються, і досягнення кращих у світі (або, принаймні, порівнянних із кращими світовими аналогами) енергетичних показників ТЕХ при використанні інноваційних технічних рішень.

2. Розробити конструкції й технології виготовлення агрегатів для вищезгаданих холодильників. Провести випробування дослідних зразків, у тому числі порівняльні випробування з базовим

холодильником. Додатково виникла необхідність підтвердження ефективності використання манометричних термостатів у схемах живлення й регулювання температури ТЕХ [7].

Характерною й принципово важливою особливістю проведених порівняльних випробувань цих холодильників був той факт, що використовувалися ідентичні холодильні шафи з різними холодильними агрегатами (рис. 4). Це дозволило виключити вплив теплоізоляційних властивостей шафи на енергетичні показники порівнюваних варіантів.



Рис. 4. Порівнювані об'єкти під час паралельних випробувань:
ліворуч – холодильник Ravanson LK-48, праворуч – холодильник ХТТ-48-1

Холодильники ХТТ-48 призначені для використання на транспортних засобах при живленні від бортової мережі 12 В DC, а базовий холодильник Ravanson LK-48 живиться від мережі змінного струму 230 В. Тому в ході випробувань був визначений електричний ККД η блоку живлення холодильника Ravanson і його залежність від вихідної напруги U_{dc} (рис. 5), що дозволило з достатньою точністю перерахувати споживану потужність холодильника з мережі 230 В AC на мережу 12 В DC.

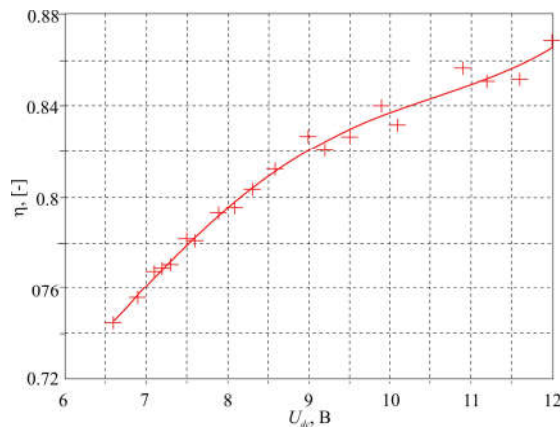


Рис. 5. Залежність електричного к.п.буд. η блоку живлення холодильника Ravanson LK-48 від вихідної напруги U_{dc}

Результати порівняльних випробувань холодильників представлено на рисунках 6, 7 і в табл. 2, 3.

Випробування проводилися за різних температурах навколишнього середовища $T_{окр}$. Нижче представлені результати для температур 22 °С і 25 °С. За обох температур холодильники ХТТ-48 в енергозберігаючому режимі роботи продемонстрували рекордно низьку споживану потужність – менше від 20 Вт.

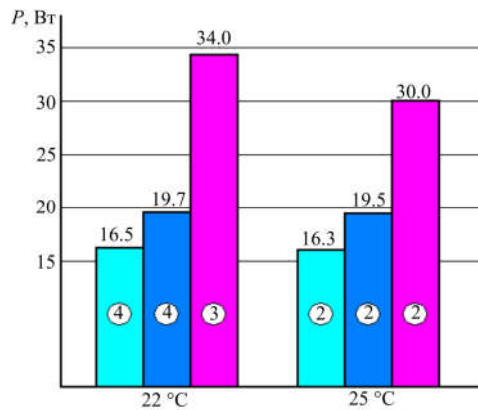


Рис. 6. Середня споживана потужність холодильників в енергозберігаючому режимі за двох навколишніх температур $T_{окр}$:

■ - XTT-48-1, ■ - XTT-48-2, ■ - Ravanson LK-48;
усередині стовпців діаграми показана установка термостата в діапазоні від 1 до 7

Таблиця 2

Порівняння обраних технічних характеристик холодильників при установках термостата, як на рис. 6

Технічні параметри	$T_{окр}$, °C	XTT-48-1	XTT-48-2	Ravanson LK-48
Час від включення до переходу в енергозберігаючий режим, хв	22	68.5	60.0	132 (68 + 64)**
	25	56.0	41.5	160 (68 + 92)**
Створювана різниця температур $T_{окр} - T_{кам}$, К	22	16.8	15.3	12.6
	25	13.3	14.3	13.6
Показник питомої споживаної потужності, Вт/дм ³ К	22	0.0205	0.0268	0.0562*
	25	0.0255	0.0284	0.0460*
Розраховане добове енергоспоживання, Вт·год	22	443.4		849.0*
	25	430.1		760.6*
Вимірне добове енергоспоживання, Вт·год	25	435.8		762.1

* – величини перераховані на живлення холодильника від мережі постійного струму 12 В DC.

** – у дужках даний час пускового режиму плюс час перехідного процесу при плавному зниженні напруги живлення модуля.

Приймаючи споживану потужність від мережі змінного струму холодильника Ravanson за 100 %, неважко помітити, що споживана потужність холодильника XTT-48-1 у тих же умовах експлуатації становить 54.3 %, тобто майже в 2 рази менше. За температури 22 °C перевага холодильників XTT-48 ще більше.

Споживана потужність Pa_2 холодильника Ravanson LK-48 вимірялася в колі живлення термоелектричного модуля. Оскільки напруга живлення зовнішнього вентилятора синхронізоване з живленням термоелектричного модуля, а зовнішній вентилятор в енергозберігаючому режимі залишався при незмінному живленні 12 В DC, загальна споживана потужність при врахуванні споживання вентиляторів розраховувалася по формулі (1):

$$P_{a2} = P_m + P_{ww} + P_{wz} (U_x / U_n)^2, \quad (1)$$

де: P_m – обмірювана потужність споживана модулем, P_{wv} – номінальна споживана потужність внутрішнього вентилятора, P_{vz} – номінальна споживана потужність зовнішнього вентилятора, U_x – напруга живлення вентилятора в енергозберігаючому режимі, U_n – номінальна напруга живлення вентилятора –12 В.

На споживану потужність P_{a2} впливає власне електроспоживання блоку пропорційного регулювання температури, який, як і в побутовому варіанті, необхідно використовувати в транспортному варіанті холодильника Ravanson і який суттєво відрізняється від використаного в моделі Ravanson LK-48. Тому, у відповідності з оцінкою фахівців зі схем живлення й перетворювачів, величина напруги повинна бути збільшена як мінімум на 15 %. Проте, представлені в таблиці 2 дані не враховують це збільшення, що створює певний «запас упевненості» у перевазі нового варіанту.

Розрахунки представленого в табл. 2 добового енергоспоживання E холодильників було зроблено за наступними формулами:

- для холодильника ХТТ-48:

$$E_1 = P_1 \cdot \tau_1 + P_3 \cdot \tau_3 / 24 \cdot 3600, \quad (2)$$

- для холодильника Ravanson LK-48:

$$E_2 = P_1 \cdot \tau_1 + P_2 \cdot \tau_2 + P_3 \cdot \tau_3 / 24 \cdot 3600, \quad (3)$$

$$P_2 = 1/2 \cdot \sqrt{2} (P_{2p} + P_{2k}), \quad (4)$$

де:

P_1 – середня споживана потужність холодильника в пусковому режимі,

P_2 – середня споживана потужність холодильника Ravanson у перехідному режимі,

P_{2p} – споживана потужність холодильника Ravanson на початку перехідного режиму,

P_{2k} – споживана потужність холодильника Ravanson наприкінці перехідного режиму,

P_3 – середня споживана потужність холодильника в енергозберігаючому режимі,

τ_1 – час роботи холодильника протягом доби в стартовому режимі,

τ_2 – час роботи холодильника протягом доби в перехідному режимі,

τ_3 – час роботи холодильника протягом доби в енергозберігаючому режимі.

Усі величини потужності вимірюються у ватах, час – у секундах.

Незначні відмінності в розрахованих і обмірюваних величинах E_1 і E_2 пояснюються наявністю короткого (у границях однієї хвилини) періоду відразу після включення холодильника, коли споживана потужність відносно висока через повільне наростання різниці температур між сторонами термоелектричного модуля. Другою причиною розбіжності в розрахованих і виміряних величинах E_1 і E_2 є спрощене усереднення величини P_2 у годинному інтервалі τ_2 у формулі (4). Незважаючи на це, кореляцію розрахованих та виміряних величин E можна оцінити як високу.

Таблиця 3

*Порівняння обраних технічних характеристик холодильників
при навколишній температурі $T_{окр} = 25 \text{ C}$*

Технічні параметри	Режим роботи	ХТТ-48-1	Ravanson LK-48
Середня температура гарячого радіатора $T_s, \text{ }^\circ\text{C}$	пусковий	34.0	43.3
	енергозберігаючий	30.7	39.0
Перегрів гарячого радіатора $T_s - T_{окр}, \text{ K}$	пусковий	9.0	18.3
	Енергозберігаючий	5.7	14.0

Продовження таблиці 3

Середня температура холодного радіатора $T_x, ^\circ\text{C}$	пусковий*	3.1	2.9
	Енергозберігаючий	8.5	3.5
Переохолодження холодного радіатора $T_{\text{кам}} - T_x, \text{K}$	пусковий*	2.9	7.8
	Енергозберігаючий	3.2	7.6
Поверхня теплообміну гарячого радіатора, m^2		0.257	0.159
Поверхня теплообміну холодного радіатора, m^2		0.092	0.053
Маса холодильника, кг		10.64	10.56

* – безперервна робота агрегату без регулювання температури.

У табл. 3 показані інші переваги холодильника ХТТ-48. Ці показники демонструють раціональну організацію теплообміну на обох сторонах термоелектричних модулів як у робочому, так в енергозберігаючому режимі. Незважаючи на збільшення поверхонь теплообміну гарячого й холодного радіатора, маса холодильника практично не змінилася.

Як показано на рис. 7, холодильник ХТТ-48 показав суттєво ширший температурний діапазон роботи в енергозберігаючому режимі в порівнянні зі своїм аналогом. Наприклад, при стандартній установці термостата в положенні 4 різниця становила 2 градуси.

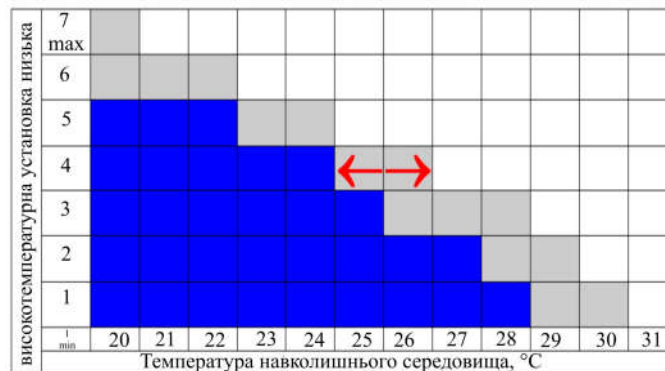


Рис. 7. Порівняння ширини зони енергозберігаючого режиму випробуваних холодильників: темний колір – Ravanson LK-48, сірий колір – ХТТ-48-1

Висновки

Узагальнюючи результати даної роботи й попередніх дослідницьких і дослідно-конструкторських робіт, виконаних під керівництвом автора у Західнопоморському технологічному університеті в Щецині, можна констатувати, що поставлені завдання було виконано. Для обраних категорій виробів досягнуте підвищення енергетичної ефективності транспортних і побутових ТЕХ на базі стандартних термоелектричних охолоджувальних модулів, що серійно випускаються. Досягнуті **кращі у світі** показники питомої споживаної потужності.

Розроблено, реалізовано, описано й обґрунтовано підходи й конкретні технічні рішення, що забезпечують конкурентоспроможність ТЕХ з об'ємом камери від 30 до 100 літрів як у порівнянні з компресорними аналогами, так і із кращими світовими зразками ТЕХ.

Переваги розроблених холодильників над аналогами досягнуті за рахунок:

1. Оптимізації конструкції холодильного агрегату, у тому числі вибору відповідної кількості термоелектричних модулів, типу й кількості вентиляторів, типу радіаторів і їх поверхні та ін.
2. Вибору найкращого способу регулювання температури в камері – дворівневе регулювання при використанні манометричного термостата, яке, зокрема для транспортних ТЕХ забезпечується перемиканням схеми живлення модулів з паралельної на послідовну.
3. Стабілізації роботи ТЕХ в енергозберігаючому режимі на необмежений час.
4. Синхронізації перемикання режимів роботи вентиляторів з режимом роботи модулів.

Література

1. Вайнер А.Л. Минимизация энергопотребления термоэлектрорефрижератора при позиционном регулировании / А.Л. Вайнер, В.Ф. Мойсеев // Термоэлектричество. – 2002. – №2. – С. 68 – 71.
2. S.Filin, B.Jasińska, B.Zakrzewski, M.Chmielowski.: Patent RP nr 224189. Sposób redukcji zużycia energii przez chłodziarkę termoelektryczną i chłodziarka termoelektryczna. Publ. 06.12.2016.
3. Jasińska B., Filin S. Economical transport thermoelectric refrigerators with two-level temperature control: the experience of creation and test results. Journal of Thermoelectricity. 2015, n. 3, p. 38-44.
4. Chłodnictwo i klimatyzacja. Podręcznik. Pod. red. B. Zakrzewskiego. Astroprint, Odessa, 2015.
5. Filin S., Jasińska B.: Efektywność energetyczna transportowych chłodziarek termoelektrycznych. Energetycznie efektywne rozwiązania urządzeń chłodniczych, klimatyzacyjnych i pomp ciepła. XLV Dni Chłodnictwa. Poznań. 13-14 11.2013, s. 63-74.
6. Филин С.О. Экспериментальное исследование стационарных термоэлектрических холодильников. / С.О. Філін, А. Овсицкий, Б. Закшевський // Астропринт, Одесса, 2011.
7. Filin S., Zakrzewski B.: Zastosowanie dwupołożeniowego regulatora temperatury typu manometrycznego w chłodziarkach termoelektrycznych. Chłodnictwo, nr 1-2, 2010, s. 30-34.

Надійшла до редакції 17.01.2018

Філін С.О. доктор техн. наук

Западнопоморский технологический университет в Щецине
аллея Пиастов 17, Щецин, 70-310, Польша
e-mail: Sergiy.Filin@zut.edu.pl

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ

В статье проанализированы технические характеристики и в первую очередь энергетические современных термоэлектрических холодильников (ТЭХ), а также способы повышения их энергетической эффективности. Представлены результаты сравнительных испытаний новых, разработанных автором моделей ТЭХ и показаны их преимущества над мировыми аналогами. Библ. 7, Рис. 7.

Ключевые слова: термоэлектрический холодильник, транспортный холодильник, энергосбережение, регулирование температуры.

S.O. Filin *Doctor of Tech. science*

West Pomeranian University of Technology, Szczecin
17, al. Piastow, Szczecin, 70-310, Poland
e-mail: Sergiy.Filin@zut.edu.pl

COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY CHARACTERISTICS OF MODERN THERMOELECTRIC REFRIGERATORS

This article analyzes technical, primarily energy characteristics of modern thermoelectric refrigerators (TER), as well as the ways to increase their energy efficiency. The results of comparative tests of new TER models developed by the author are presented and their advantages over the world analogues are shown. Bibl. 7, Fig. 7.

Key words: thermoelectric refrigerator, transport refrigerator, energy saving, temperature control.

References

1. Vainer A.L., Moiseev V.F. (2002). Power consumption minimizing of the thermoelectric cooler at position control. *J. Thermoelectricity*, 2, 68-71.
2. Patent RP № 224189. S.Filin, B. Jasińska, B. Zakrzewski, M. Chmielowski. Sposób redukcji zużycia energii przez chłodziarkę termoelektryczną i chłodziarka termoelektryczna. Publ. 06.12.2016.
3. Jasińska B., Filin S. (2015). Economical transport thermoelectric refrigerators with two-level temperature control: the experience of creation and test results. *J. Thermoelectricity*, 3, 38-44.
4. B. Zakrzewski (Ed.) (2015). Chłodnictwo i klimatyzacja. Podręcznik. Odessa: Astroprint.
5. Filin S., Jasińska B. (2013). Efektywność energetyczna transportowych chłodziarek termoelektrycznych. Energetycznie efektywne rozwiązania urządzeń chłodniczych, klimatyzacyjnych i pomp ciepła. *XLV Dni Chłodnictwa*. (Poznań, 13-14 11.2013). (s. 63-74).
6. Filin S.O., A.Owsicki, B.Zakrzewski. (2011). Experimental investigation of stationary thermoelectric coolers. Odessa: Astroprint [in Russian].
7. Filin S., Zakrzewski B. (2010). Zastosowanie dwupołożeniowego regulatora temperatury typu manometrycznego w chłodziarkach termoelektrycznych. *Chłodnictwo*, 1-2, 2010, 30-34.

Submitted 17.01.2018