

УДК 537



Филин С.О.

Филин С.О.

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, Табл. 3.

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

Введение

Главной и глобальной целью технического прогресса в начале XXI века бесспорно является повышение энергетической эффективности. Снижение энергопотребления термоэлектрических холодильников (далее используется сокращение – ТЭХ) не только находится в этом русле, но и является необходимым условием конкурентоспособности термоэлектрических изделий на мировом рынке, и, прежде всего, по отношению к компрессорным аналогам. Эта проблема остаётся нерешённой с самого начала эры термоэлектрического охлаждения и постоянно находится в фокусе внимания специалистов, особенно в контексте постоянного роста объёма камеры ТЭХ [1 – 4].

Надежды на существенное повышение эффективности термоэлектрических материалов, к сожалению, пока не оправдываются. Поэтому разработчикам (конструкторам) и изготовителям приходится искать другие пути совершенствования холодильников, не связанных непосредственно с термоэлектрическими материалами, базируясь при этом на серийно выпускаемых термоэлектрических охлаждаемых модулях.

Введенные директивами Евросоюза новые, более жёсткие требования к энергетическим показателям бытовых холодильников затронули и термоэлектрические холодильники. С 1 июля 2015 года на европейском рынке могут продаваться абсорбционные и термоэлектрические холодильники, имеющие класс **D** и выше. Перед этим большинство моделей ТЭХ ранее имело энергетический класс **E** (рис. 1). Некоторые производители, такие как *Атлант* или *МРМ*, вынуждены были отказаться от экспорта своих ТЭХ в Европу. Чтобы соответствовать этим новым требованиям, часть производителей ТЭХ пошла путём их оснащения электронной системой регулирования температуры в камере, которая снижает напряжение питания модуля(ей) пропорционально снижению температуры в камере, начиная с некоторого её

значения. Это привело к существенному удорожанию холодильников. Пример тому – холодильники немецко – итальянской фирмы *Indel – B* [5]. Кроме того, этот способ регулирования имеет ограниченное применение, имея в виду уровень окружающей температуры. Но самое главное, он практически не применим в транспортных ТЭХ, которые питаются непосредственно от бортовой сети постоянного тока 12V DC или 24V DC.

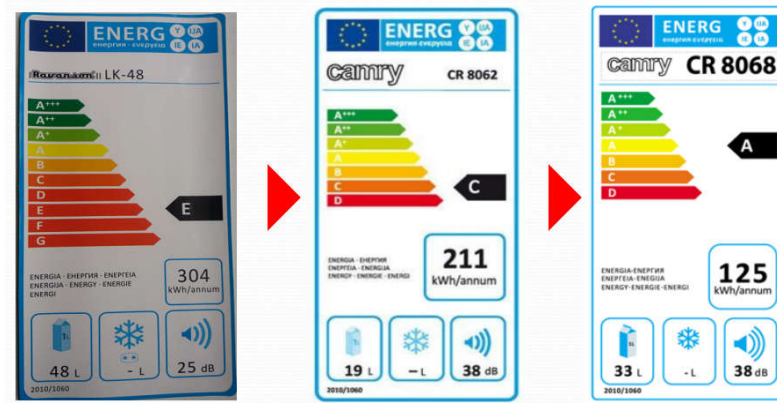


Рис. 1. Изменения энергетического класса ТЭХ в течение последних пяти лет.

Как было показано в работе [6], показатель суточного или годового энергопотребления не подходит для корректного сравнения различных ТЭХ. Одна из главных причин – отсутствие нормирования температуры в камере. Различные ТЭХ работают в одном из режимов (основной или энергосберегающий) в зависимости от окружающей температуры, степени загрузки холодильника и способа его эксплуатации. Автором был разработан и предложен к применению более универсальный показатель сравнения – удельная потребляемая мощность P_s . Физический смысл этого показателя следующий: какую электрическую мощность P необходимо подвести к холодильнику, чтобы удерживать в заданном объеме его камеры заданную разность температур ΔT . Показатель P_s применим при условии равенства теплоизоляционных свойств шкафа, а именно толщины и материала теплоизоляции. Его следует рассчитывать для каждого режима работы отдельно.

На практике это означает, что, например, при температуре окружающей среды 22°C преимущество может иметь первый холодильник, работающий в энергосберегающем режиме. Его характеристика на рис. 2 показана синим (тёмным) цветом.

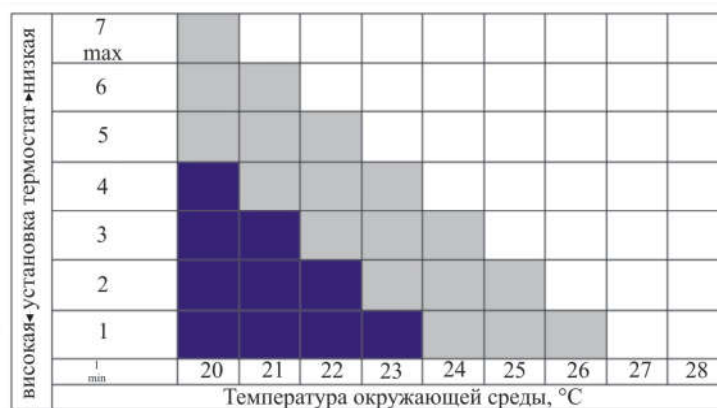


Рис. 2. Принцип сравнения ширины зоны энергосберегающего режима двух ТЭХ.

Но при температуре 25°C этот холодильник уже не переходит в этот режим работы. Следовательно, преимущество тогда может перейти ко второму холодильнику (серый цвет), который имеет более широкий диапазон внешних температур, при которых возможна работа в энергосберегающем режиме. Из этого следует очень важный вывод, что при оценке энергетической эффективности ТЭХ имеют значения не только абсолютные величины показателей P и P_s , но и температурный диапазон работы холодильника, в котором они могут быть достигнуты.

Технические характеристики современных ТЭХ

На рис. 3 представлена динамика изменения показателя удельной потребляемой мощности P_s ТЭХ на протяжении последних 35 лет: синим (более тёмным) цветом показаны холодильники и мини – бары объемом 40 – 60 литров, зелёным (более светлым) цветом – холодильные витрины объемом 70 – 110 литров. Холодильники второго поколения (условно отнесём их к периоду 1980 – 2000 гг.) характеризовались меньшей эффективностью термоэлектрических модулей, отсутствием регуляции температуры в камере, но бóльшей создаваемой разницей температур. Их показатель P_s составлял от 0.10 до 0.12. Следующее (третье) поколение ТЭХ, в которых уже использовались различные типы регуляции температуры в камере, достигли показателя $P_s = 0.04 – 0.06$. Данное снижение показателя P_s можно охарактеризовать как *искусственное*, так как относительное снижение потребляемой мощности превышает относительное снижение разницы температур ΔT . Нижние значения указанных диапазонов P_s достигаются в холодильниках – барах и холодильниках для вина, где температура в камере превышает 10 – 12°C. Новые авторские разработки, которые можно отнести к четвёртому поколению, имеют показатель P_s в границах 0.02 – 0.04, что почти в 2 раза ниже, чем у ТЭХ предыдущего поколения.

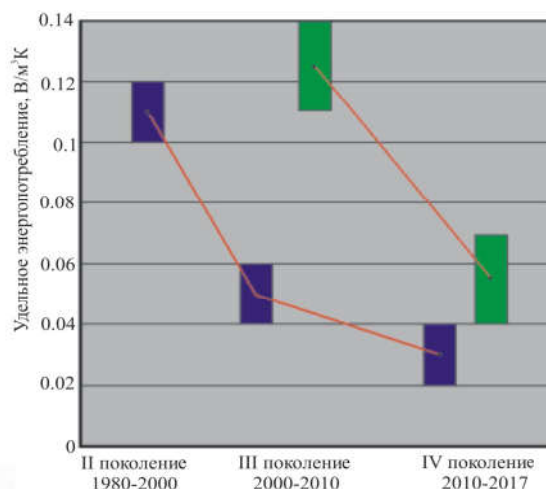


Рис. 3. Снижение показателя P_s термоэлектрических холодильников на протяжении последних 35 лет.

Подобная тенденция наблюдается в категории термоэлектрических холодильных витрин. Стеклопакеты этих изделий обладают большим коэффициентом теплопередачи, что, соответственно, отражается на показателе P_s . За исключением витрин для хранения вина при температуре 14 – 18°C, универсальные витрины имеют показатель P_s примерно в 2 раза худший, чем холодильники.

В табл. 1 представлен современный мировой уровень параметров бытовых ТЭХ. Для корректности сравнения выбраны холодильники с примерно равным объемом камеры – от 40 до 60 литров.

Таблица 1

Технические характеристики лучших по энергопотреблению мировых образцов ТЭХ

Технические характеристики	Изготовитель, модель						
	<i>OmniTec</i> (Испания)	<i>Electroline</i> (Канада)		<i>Indel B</i> (Италия – Германия)	<i>Grass Cavagna Group</i> (Польша – Китай)		<i>Space – Mate</i> (США)
	Advance plus 42	BC42A	BC50A	DT40 plus	Ravanson		Igloo
					LK – 40	LK – 48	
Полезный объем камеры [л]	42	42	50	40	40	48	56.6
Диапазон температур в камере [°C]	3...8	2...10	6.5...15	5...15	5...12	5...12	0...7
Напряжение питания переменного тока [В]	230	230	230	115/230	230	230	110/230
Установленная мощность [Вт]	72	75	50	60	70	70	90
Мощность, потребляемая в энергосберегающем режиме [Вт]	25	29	15	31	33	30	
Среднее суточное энергопотребление [кВтч /24ч]	0.6	0.7	0.36	0.75	0.8	0.8	1.08
Годовое энергопотребление [кВтч/год]	219	255.5	132	274	292	292	394.2
Удельная потребляемая мощность [Вт/(дм ³ ·К)]	0.035	0.038	0.022	0.052	0.052	0.043	0.044
Габаритные размеры:							
ширина	450	500	500	399	510	510	399
глубина	432	430	422	470	430	430	470
высота [мм]	530	480	515	553	430	480	553
Масса [кг]	нет данных	11.2	13.0	15.5	11.2	13.2	15.5

Из представленных на рынке моделей наилучшими параметрами обладает холодильник BC50A канадской фирмы Electroline. Лабораторные испытания данного холодильника, проведенные в 2018 году в Западнопоморском технологическом университете в Щецине показали, что этот холодильник не может быть использован в качестве базы сравнения по двум причинам. Во – первых, средняя толщина изоляции камеры этого холодильника составляет 40 мм, что на 5 мм больше, чем у аналогов. Один этот факт даёт преимущество по энергетическим характеристикам примерно на 30 %. Во – вторых, энергетические характеристики модели BC50A замерены при установке термостата на относительно высокую температуру в камере,

которой соответствует создаваемый перепад температур 10 – 12 К, что на 2 – 3 градуса меньше, чем у аналогов. Это добавляет очередные 15 – 20 % преимущества в энергопотреблении. Поэтому в качестве базы сравнения при сравнительных испытаниях новых и известных моделей ТЭХ был принят холодильник Ravanson LK – 48.

Объекты и результаты сравнительных испытаний

В Западнопоморском технологическом университете в Щецине были разработаны, изготовлены прототипы и испытаны образцы новых термоэлектрических холодильников 4 – го поколения ХТТ – 48 – 1 и ХТТ – 48 – 2. Модели созданы на базе шкафов термоэлектрических холодильников Ravanson LK – 48 и отличались типом термоэлектрических модулей. Оригинальный агрегат этого холодильника был демонтирован. На его место был установлен агрегат авторской разработки.

Среди целей поставленных перед началом работ были следующие:

1. Добиться повышения энергетической эффективности транспортных и бытовых ТЕХ на базе серийно выпускаемых термоэлектрических охлаждающих модулей и достижение лучших в мире (или, по крайней мере, сопоставимых с лучшими мировыми аналогами) энергетических показателей ТЭХ при использовании инновационных технических решений.

2. Разработать конструкции и технологии изготовления агрегатов для вышеупомянутых холодильников. Провести испытания опытных образцов, в том числе сравнительные испытания с базовым холодильником. Дополнительно следовало подтвердить эффективность использования манометрических термостатов в схемах питания и регулирования температуры ТЭХ [7].

Характерной и принципиально важной особенностью проведенных сравнительных испытаний этих холодильников был факт, что использовались идентичные холодильные шкафы с различными холодильными агрегатами (рис. 4). Это позволило исключить влияние теплоизоляционных свойств шкафа на энергетические показатели сравниваемых вариантов.



Рис. 4. Сравнимые объекты во время параллельных испытаний:
слева – холодильник Ravanson LK – 48, справа – холодильник ХТТ – 48 – 1.

Холодильники ХТТ – 48 предназначены для использования на транспортных средствах при питании от бортовой сети 12V DC, а базовый холодильник Ravanson LK – 48 питается от сети переменного тока 230V. Поэтому в ходе испытаний был определён электрический КПД η блока питания холодильника Ravanson и его зависимость от выходного напряжения U_{dc}

(рис. 5), что позволило с достаточной точностью пересчитать потребляемую мощность холодильника с сети 230V AC на сеть 12V DC.

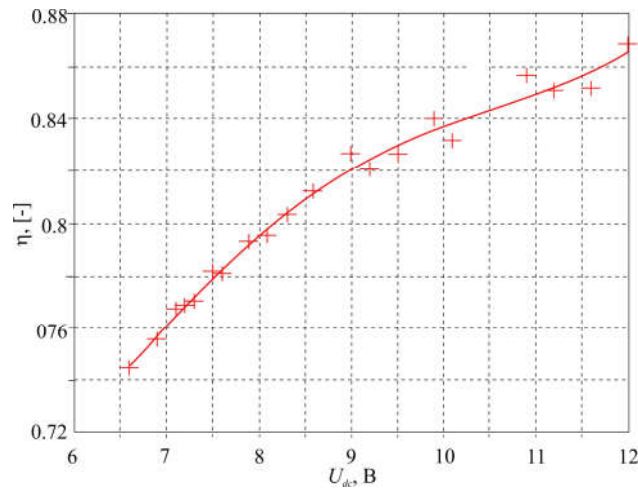


Рис. 5. Зависимость электрического КПД η блока питания холодильника Ravanson LK – 48 от выходного напряжения U_{dc} .

Результаты сравнительных испытаний холодильников представлены на рис. 6, 7 и в табл. 2, 3.

Испытания проводились при различных окружающих температурах $T_{окр}$. Ниже представлены результаты для температур 22°C и 25°C. При обеих температурах холодильники ХТТ – 48 в энергосберегающем режиме работы продемонстрировали рекордно низкую потребляемую мощность – менее 20 Вт.

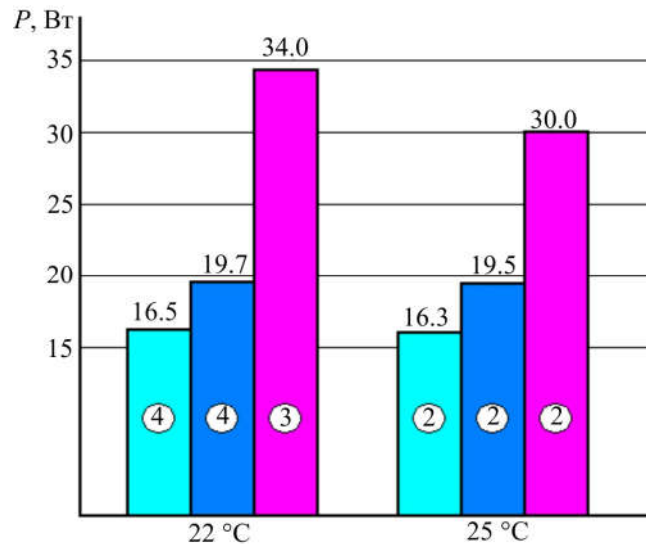


Рис. 6. Средняя потребляемая мощность холодильников в энергосберегающем режиме при двух окружающих температурах $T_{окр}$: ■ – ХТТ – 48 – 1, ■ – ХТТ – 48 – 2, ■ – Ravanson LK – 48; внутри столбцов диаграммы показана установка термостата в диапазоне от 1 до 7.

Таблица 2

Сравнение выбранных технических характеристик холодильников при установках термостата, как на рис. 6

Технические параметры	$T_{окр}, ^\circ\text{C}$	ХТТ – 48 – 1	ХТТ – 48 – 2	Ravanson LK - 48
Время от включения до перехода в энергосберегающий режим, мин	22	68.5	60.0	132 (68 + 64)**
	25	56.0	41.5	160 (68 + 92)**
Создаваемая разница температур $T_{окр} - T_{кам}$, К	22	16.8	15.3	12.6
	25	13.3	14.3	13.6
Показатель удельной потребляемой мощности, Вт/дм ³ ·К	22	0.0205	0.0268	0.0562*
	25	0.0255	0.0284	0.0460*
Рассчитанное суточное энергопотребление, Вт·ч	22	443.4		849.0*
	25	430.1		760.6*
Измеренное суточное энергопотребление, Вт·ч	25	435.8		762.1

* – величины, пересчитанные на питание холодильника от сети постоянного тока 12V DC;

** – в скобках дано время пускового режима плюс время переходного процесса при плавном снижении напряжения питания модуля.

Принимая потребляемую мощность от сети переменного тока холодильника Ravanson за 100 %, нетрудно заметить, что потребляемая мощность холодильника ХТТ – 48 – 1 в тех же условиях эксплуатации составляет 54.3 %, т.е. почти в 2 раза меньше. При температуре 22°C преимущество холодильников ХТТ – 48 ещё больше.

Потребляемая мощность P_{a2} холодильника Ravanson LK – 48 измерялась в цепи питания термоэлектрического модуля. Поскольку напряжение питания внешнего вентилятора синхронизировано с питанием термоэлектрического модуля, а внешний вентилятор в энергосберегающем режиме оставался при неизменном питании 12 V DC, общая потребляемая мощность при учёте потребления вентиляторов рассчитывалась по формуле (1):

$$P_{a2} = P_m + P_{wв} + P_{wз} \left(\frac{U_x}{U_n} \right)^2, \quad (1)$$

где P_m – измеренная мощность, потребляемая модулем; $P_{wв}$ – номинальная потребляемая мощность внутреннего вентилятора; $P_{wз}$ – номинальная потребляемая мощность внешнего вентилятора; U_x – напряжение питания вентилятора в энергосберегающем режиме; U_n – номинальное напряжение питания вентилятора 12 В.

На потребляемую мощность P_{a2} влияет собственное электропотребление блока, пропорциональное регулированию температуры, который, как и в бытовом варианте, необходимо использовать в транспортном варианте холодильника Ravanson и который существенно отличается от использованного в модели Ravanson LK – 48. Поэтому, согласно оценке специалистов по схемам питания и преобразователям, величина напряжения должна быть увеличена как минимум на 15 %. Тем не менее, представленные в табл. 2 данные не учитывают это увеличение, что создаёт определённый «запас уверенности» в преимуществе нового варианта.

Расчёт представленного в табл. 2 суточного энергопотребления E холодильников был произведен по следующей методике:

– для холодильника ХТТ – 48:

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

– для холодильника Ravanson LK – 48:

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

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

где:

P_1 – средняя потребляемая мощность холодильника в пусковом режиме,

P_2 – средняя потребляемая мощность холодильника Ravanson в переходном режиме,

P_{2p} – потребляемая мощность холодильника Ravanson в начале переходного режима,

P_{2k} – потребляемая мощность холодильника Ravanson в конце переходного режима,

P_3 – средняя потребляемая мощность холодильника в энергосберегающем режиме,

τ_1 – время работы холодильника в течение суток в стартовом режиме,

τ_2 – время работы холодильника в течение суток в переходном режиме,

τ_3 – время работы холодильника в течение суток в энергосберегающем режиме.

Все величины мощности измеряются в ваттах, время – в секундах.

Незначительные различия в рассчитанных и измеренных величинах E_1 и E_2 объясняются наличием короткого (в границах одной минуты) периода сразу после включения холодильника, когда потребляемая мощность относительно высока из-за медленного нарастания разницы температур между сторонами термоэлектрического модуля. Второй причиной расхождения в рассчитанных и измеренных величинах E_1 и E_2 является упрощённое усреднение величины P_2 в часовом интервале τ_2 в формуле (4). Несмотря на это, корреляцию рассчитанных и измеренных величин E можно оценить как хорошую.

Таблица 3

Сравнение выбранных технических характеристик холодильников
при окружающей температуре $T_{окр} = 25^\circ\text{C}$

Технические параметры	Режим работы	ХТТ – 48 – 1	Ravanson LK – 48
Средняя температура горячего радиатора T_2 , °C	пусковой	34.0	43.3
	энергосберег.	30.7	39.0
Перегрев горячего радиатора $T_2 - T_{окр}$, К	пусковой	9.0	18.3
	энергосберег.	5.7	14.0
Средняя температура холодного радиатора T_x , °C	пусковой*	3.1	2.9
	энергосберег.	8.5	3.5

Продолжение таблицы 3

Переохлаждение холодного радиатора $T_{кам} - T_x$, К	пусковой*	2.9	7.8
	энергосберег.	3.2	7.6
Поверхность теплообмена горячего радиатора, м ²		0.257	0.159
Поверхность теплообмена холодного радиатора, м ²		0.092	0.053
Масса холодильника, кг		10.64	10.56

* – постоянная работа агрегата без регулирования температуры.

В табл. 3 показаны другие преимущества холодильника ХТТ – 48. Эти показатели демонстрируют рациональную организацию теплообмена на обеих сторонах термоэлектрических модулей как в рабочем, так в энергосберегающем режимах. Несмотря на увеличение поверхностей теплообмена горячего и холодного радиаторов, масса холодильника практически не изменилась.

Как показано на рис. 7, холодильник ХТТ – 48 показал существенно более широкий температурный диапазон работы в энергосберегающем режиме по сравнению со своим аналогом. Например, при стандартной установке термостата в положении 4 разница составляет 2 градуса.

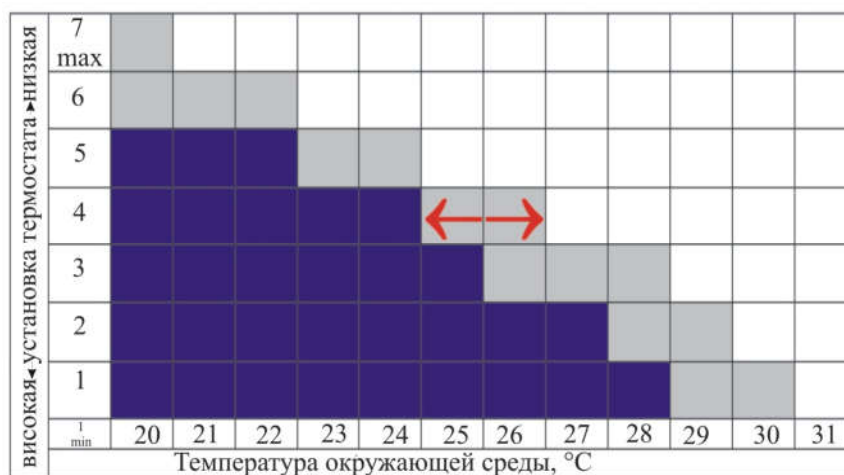


Рис. 7. Сравнение ширины зоны энергосберегающего режима испытанных холодильников: тёмный цвет – Ravanson LK – 48, серый цвет – ХТТ – 48 – 1.

Выводы

Обобщая результаты данной работы и предыдущих исследовательских и опытно – конструкторских работ, выполненных под руководством автора в Западнопоморском технологическом университете в Щецине, можно констатировать, что поставленные цели были реализованы. Для выбранных категорий изделий достигнуто повышение энергетической эффективности транспортных и бытовых ТЭХ на базе стандартных серийно выпускаемых термоэлектрических охлаждающих модулей. Достигнуты лучшие в мире показатели удельной потребляемой мощности.

Разработаны, реализованы, описаны и обоснованы подходы и конкретные технические решения, обеспечивающие конкурентоспособность ТЭХ с объёмом камеры от 30 до 100 литров как в сравнении с компрессорными аналогами, так и с лучшими мировыми образцами ТЭХ.

Преимущества разработанных холодильников над аналогами достигнуты за счёт:

1. Оптимизации конструкции холодильного агрегата, в том числе выбора соответствующего количества термоэлектрических модулей, типа и количества вентиляторов, типа радиаторов и их поверхности и др.
2. Выбора наилучшего способа регулирования температуры в камере – двухуровневая регуляция при использовании манометрического термостата, которая, в частности, для транспортных ТЭХ, обеспечивается переключением схемы питания модулей с параллельной на последовательную.
3. Стабилизации работы ТЭХ в энергосберегающем режиме на неограниченное время.
4. Синхронизации переключения режимов работы вентиляторов с режимом работы модулей.

Литература

1. Вайнер А.Л. Минимизация энергопотребления термоэлектрохолодильника 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. Ясиньска Б., Филин С. Экономичные транспортные термоэлектрические холодильники с двухуровневым температурным контролем: опыт создания и результатов испытаний. Журнал термоэлектричества. 2015, п. 3, р. 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.

Поступила в редакцию 17.01.2018

S. O. Filin

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, Tabl. 3.

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