



Прибыла А.В.

Прибыла А.В.

Институт термоэлектричества, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНДИЦИОНЕР ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА С РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ МОДУЛЯМИ

В работе приводятся результаты расчетов конструкции термоэлектрического кондиционера с равномерно распределенными модулями. Разработаны физическая, математическая и компьютерная модели кондиционера. Определена его эффективность для разных значений термического сопротивления и условий его эксплуатации.

Ключевые слова: термоэлектрический модуль, компьютерное моделирование, кондиционирование одежды.

The results of computations of a thermoelectric (TE) conditioner with the uniformly distributed modules design are presented in this paper. The physical, mathematical and computer models of the TE conditioner were developed. Its efficiency for different thermal resistance values and conditions for its exploitation were determined.

Key words: thermoelectric module, computer simulation, clothing TE conditioning.

Введение

Общая характеристика проблемы. Пребывание человека в разных температурных условиях окружающей среды часто сопровождается перегревом или переохлаждением, что отрицательно влияет на его физиологическое состояние [1]. Это, в первую очередь, касается людей, которые вынуждены находиться в таких условиях на протяжении продолжительного времени, выполняя свои профессиональные обязанности. В частности, к такой группе людей нужно отнести военных, рабочих в горячих цехах, спортсменов и т.п.

Решение проблемы обеспечения комфортных условий функционирования человека в разных условиях возможно путем создания специальных кондиционеров для одежды. В работе [2] приведена их детальная классификация и выделены наиболее перспективные для реализации физические модели таких кондиционеров. Особый интерес вызывают кондиционеры для одежды, которые используют термоэлектрическое охлаждение и нагрев [3]. Это связано с их преимуществами – возможностью обеспечения как охлаждения, так и нагрева, надежностью в работе, экологичностью (отсутствуют вредные хладагенты), высокой эффективностью и низкими массогабаритами [4, 5].

Наиболее простой и наглядной моделью термоэлектрического кондиционера для человека является модель с равномерно распределенными по поверхности одежды термоэлектрическими модулями. Однако поскольку размеры модулей значительно меньше поверхности теплообмена, то в таких кондиционерах нужно использовать теплоподводы и рассеиватели тепла. Такой кондиционер предложен в работе [4] (рис. 1). Из рис. 1а видно, что кондиционер содержит 22 термоэлектрических модуля, а из схемы изображенной на рис. 1б

понятно, что в нем использованы теплоподводы и теплоотводящие пластины. К сожалению, в работах [4, 6] не приводятся энергетические характеристики такого кондиционера. Поэтому, для определения эффективности такой модели были проведены ее компьютерные исследования, что является предметом данной работы.

Итак, целью данной работы является проверка возможностей применения термоэлектрического кондиционера для одежды с равномерно распределенными модулями путем компьютерного моделирования его конструкции.

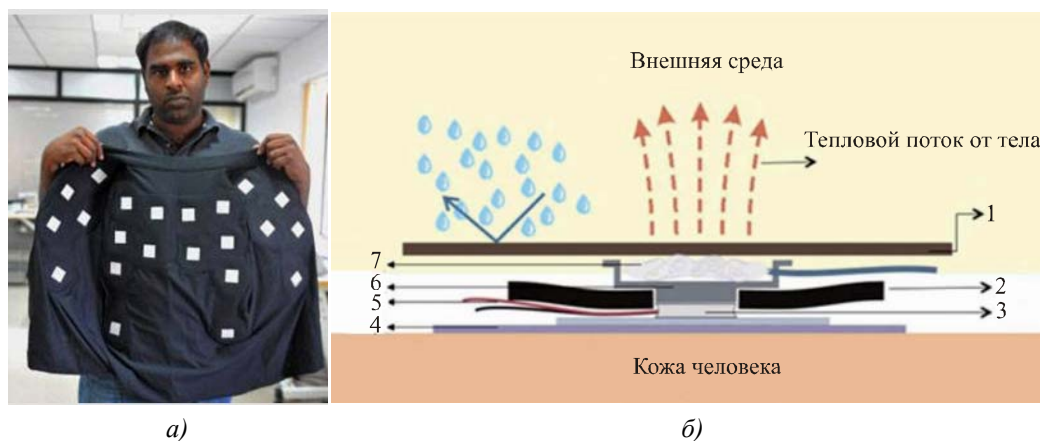


Рис. 1. Внешний вид а) и физическая модель б) термоэлектрического кондиционера для одежды компании Dhama Innovations [6]: 1 – теплоотводящая ткань; 2 – изоляция; 3 – термоэлектрические модули; 4 – теплопроводная ткань; 5 – провода; 6 – тепловые концентраторы; 7 – теплопроводный материал.

Физическая модель термоэлектрического кондиционера для одежды

Для проведения расчетов индивидуального кондиционера для бронежилета была использована физическая модель, представленная на рис. 2.

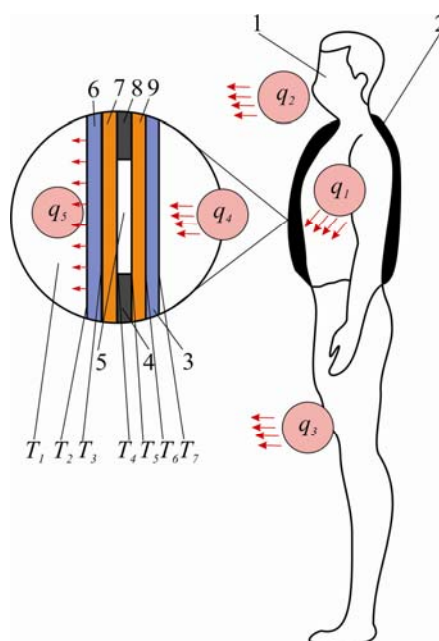


Рис. 2. Физическая модель термоэлектрического кондиционера для одежды с равномерно распределенными модулями: 1 – тело человека; 2 – жилет с кондиционером; 3 – ткань, проводящая тепловой поток от тела человека и теплового коллектора 9; 4, 8 – теплоизоляционные прослойки; 5 – термоэлектрический модуль; 6 – ткань, через которую тепловой поток отводится в окружающую среду; 7 – теплопроводная пластина.

Она построена на основе модели, изображенной на рис. 1б в виде тела человека 1, которое выделяет тепловой поток q_1 . В зависимости от состояния, в котором находится организм (покой, физические нагрузки разной интенсивности и т.п.), он вырабатывает тепловой поток от 100 до 800 Вт [7]. Этот поток отводится в окружающую среду с помощью механизмов терморегуляции (теплопроводность, конвекция, излучение и испарение воды (с поверхности кожи и слизистых оболочек)) через дыхание (q_2), тепловую изоляцию (одежда) (q_4) и незащищенные участки организма (q_3). В зависимости от условий окружающей среды и теплового сопротивления одежды процентный вклад каждого из этих механизмов теплообмена разный (рис. 3) [8].

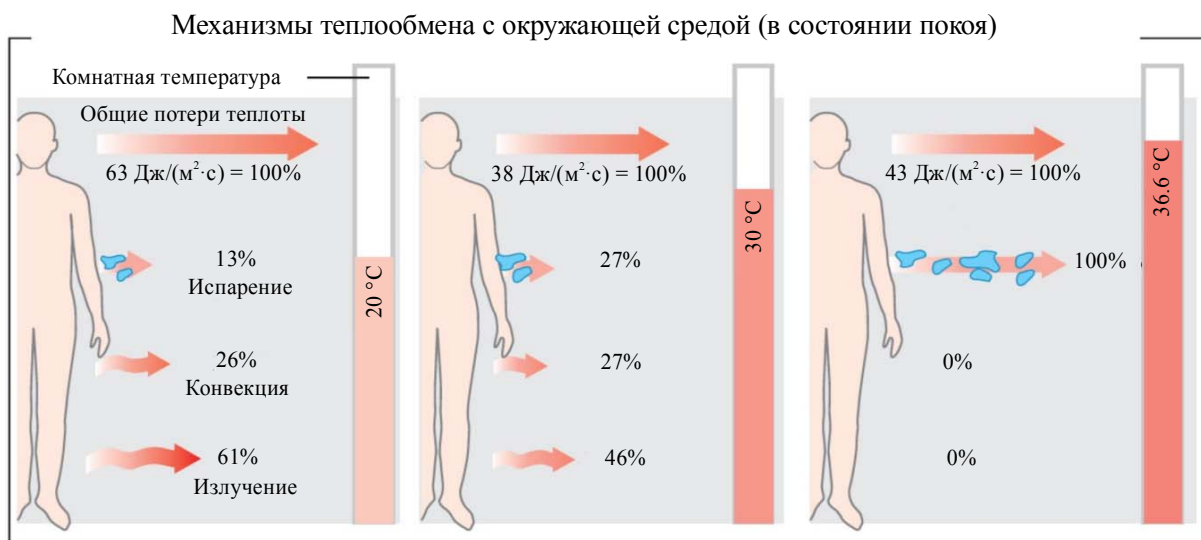


Рис. 3. Типичная зависимость соотношения механизмов теплообмена человека от температуры окружающей среды [7].

На тело одет жилет с кондиционером 2 и нижняя одежда 3, через которую тепловой поток q_4 передается к теплособирающему коллектору 9, а от него к термоэлектрическим модулям 5. Поверхность коллектора, которая не закрыта термоэлектрическими модулями, теплоизолирована 4, 8. Тепловой поток от термоэлектрических модулей q_5 отводится в окружающую среду через металлическую теплопроводную пластину 7 и ткань 6. Понятно, что тепловое сопротивление материалов жилета влияет на энергетические свойства термоэлектрического кондиционера и тепловые условия в нем. Поэтому важной задачей являются расчеты энергетических свойств термоэлектрического кондиционера в зависимости от теплового сопротивления материала жилета и условий окружающей среды.

Математическая и компьютерная модели термоэлектрического кондиционера для бронежилета

Система уравнений для расчетов энергетических характеристик термоэлектрического кондиционера в зависимости от параметров элементов физической модели определяется из уравнений теплового баланса:

$$\begin{cases} Q_c = \chi_1(T_7 - T_6), \\ Q_c = \chi_2(T_6 - T_5), \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q_h = \chi_3(T_3 - T_4), \\ Q_h = \chi_4(T_2 - T_3), \\ Q_h = hS(T_1 - T_2), \end{cases} \quad (2)$$

$$Q_h = Q_c + W_{TE}. \quad (3)$$

Здесь χ_1 – тепловое сопротивление материала жилета 6, χ_2 – тепловое сопротивление пластины 7, χ_3 – тепловое сопротивление материала 9, χ_4 – тепловое сопротивление ткани 3, Q_c – холодопроизводительность кондиционера, Q_h – его теплопроизводительность, W_{TE} – электрическая мощность питания термоэлектрических модулей 5, h – коэффициент теплоотдачи, S – площадь, с которой происходит теплоотдача.

С учетом (1) – (3), выражение для холодильного коэффициента термоэлектрического кондиционера следующее:

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W_{TE}} = \frac{\alpha I(T_c + Q_c N_1) - 0.5 I^2 R - \lambda(T_h - T_c - (Q_h N_2 + Q_c N_1))}{W_{TE}}, \quad (4)$$

где $N_1 = \frac{(\chi_1 + \chi_2)}{\chi_1 \chi_2}$, $N_2 = \frac{(\chi_3 + \chi_4 + hS)}{\chi_3 \chi_4 hS}$, I – сила тока, R – электрическое сопротивление, α – коэффициент термоЭДС термоэлемента, λ – коэффициент теплопроводности термоэлемента.

Отопительный коэффициент в таком случае будет иметь вид:

$$\mu = \frac{Q_h}{W_{TE}} = \frac{\alpha I(T_h + Q_h N_2) + 0.5 I^2 R - \lambda(T_h - T_c - (Q_h N_2 + Q_c N_1))}{W_{TE}}. \quad (5)$$

Для расчетов в работе использованы компьютерные методы объектно-ориентированного моделирования и численные методы для поиска значений целевых функций – холодильного и отопительного коэффициентов термоэлектрического кондиционера. Это функции нелинейные, которые зависят от совокупности параметров, что в свою очередь выражены неявно, с помощью множества эмпирических равенств. Поэтому нет возможности использования методов поиска экстремума первого и второго порядков (из-за невозможности определения производных). Для реализации поиска оптимального значения холодильного коэффициента был применен безградиентный метод нулевого порядка – модифицированный метод Хука-Дживса [9].

На каждой итерации главного цикла программы решается система нелинейных уравнений (1 – 3) и определяется холодопроизводительность. В программе рассчитываются коэффициенты аппроксимирующих полиномов, с помощью которых определяются эмпирические соотношения между физическими параметрами задачи оптимизации. Детально методика моделирования описана в [10].

Результаты моделирования

Итак, входными параметрами модели являются: тепловая мощность, которую необходимо отвести от организма человека через термоэлектрические модули и которая является функцией от температуры окружающей среды (рис. 3) и физиологического состояния организма (использовано значение тепловыделений человека $Q = 100$ Вт, что соответствует

спокойному состоянию человека); температура окружающей среды $T_1 = 20, 30, 36.6, 40$ °С; площадь внешней поверхности жилета, от которого происходит теплообмен $S = 0.5$ м²; параметры термоэлектрических преобразователей на основе *Bi-Te* [11] – 20×20 мм с размерами кристаллов $2.0 \times 2.0 \times 1.5$ мм; количество термоэлектрических модулей – 50 шт.

В результате моделирования рассчитана зависимость электрической мощности, необходимой для обеспечения постоянной температуры тела человека ($T = 36.6$ °С), от температуры окружающей среды и теплового сопротивления материалов жилета (рис. 4).

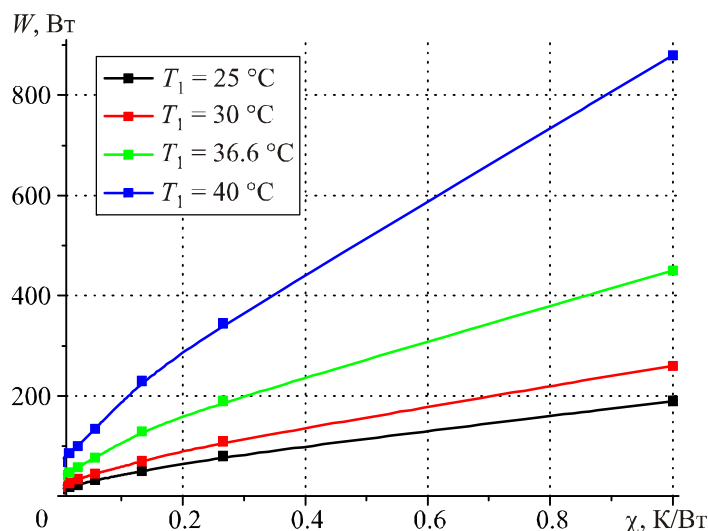


Рис. 4. Зависимость электрической мощности термоэлектрических модулей от теплового сопротивления материалов жилета и для разных температур окружающей среды.

Из представленных на рис. 4 результатов видно, что мощность, необходимая для обеспечения постоянной температуры тела человека ($T = 36.6$ °С), сильно зависит от теплового сопротивления материала одежды. Так, например, для питания кондиционера с тепловым сопротивлением материалов жилета на уровне $\chi = 0.4$ К/Вт, что соответствует использованию тканей на основе хлопка (коэффициент теплопроводности $\kappa \approx 0.05$ Вт/м·К), и при температуре окружающей среды $T_1 = 36.6$ °С, что соответствует нормальной температуре поверхности тела человека, необходима мощность $W = 250$ Вт. Уменьшение теплового сопротивления жилета в 5 раз, что соответствует использованию тканей с повышенной теплопроводностью (≈ 0.01 Вт/м·К) [12], ведет к повышению его эффективности в 2.5 раза и уменьшению мощности термоэлектрических модулей до $W = 100$ Вт.

Однако из проведенных исследований видно, что использованная модель термоэлектрического кондиционера для человека с равномерно распределенными модулями является недостаточно эффективной и нуждается в дальнейшем усовершенствовании, в частности, путем интенсификации теплообмена принудительным обдувом воздушными вентиляторами и т.п.

Кроме того, для уменьшения энергетических затрат при использовании индивидуальных кондиционеров для человека важным остается поиск и разработка новых материалов с повышенной теплопроводностью.

Выводы

1. Подтверждена возможность создания термоэлектрического кондиционера для человека на основе модели с равномерно распределенными модулями, однако ее использование является

- недостаточно эффективным и нуждается в дальнейшем усовершенствовании.
2. Рассчитана зависимость электрической мощности, которая необходима для обеспечения постоянной температуры тела человека ($T = 36.6 \text{ }^\circ\text{C}$), от температуры окружающей среды и теплового сопротивления материалов жилета.
 3. Определено, что для питания кондиционера для человека с тепловым сопротивлением материалов жилета на уровне $\chi = 0.4 \text{ К/Вт}$, что соответствует использованию тканей на основе хлопка, и при температуре окружающей среды $T_1 = 36.6 \text{ }^\circ\text{C}$ необходима электрическая мощность $W = 250 \text{ Вт}$.
 4. Уменьшение теплового сопротивления материалов жилета в 5 раз, что соответствует использованию тканей с повышенной теплопроводностью ($\approx 0.01 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) [11], ведет к возрастанию его эффективности в 2.5 раза.

Литература

1. Белов С.В., Ильницкая А.В., Козьяков А.Ф. и [др.] Безопасность жизнедеятельности. Учебник для вузов под общ. ред. С.В. Белова. М.: Высш. шк., 1999 с.
2. Прибыла А.В. Физические модели индивидуальных кондиционеров для человека (часть первая)// *Термоэлектричество*. 2016. № 1. С. 18 – 44.
3. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. Сравнительный анализ термоэлектрических и компрессионных тепловых насосов для индивидуальных кондиционеров. *Термоэлектричество*. 2016. № 2. С. 35 – 44.
4. Pat. US 2010/0107657 A1. Apparel with heating and cooling capabilities / Kranthi K. Vistakula. Pub. Date: May. 6, 2010.
5. Pat. US 2002/0156509 A1. Thermal control suit / John A. Baker. Pub. Date: Oct. 24, 2002.
6. <http://dhamainnovations.com/>.
7. Витте Н.К. Тепловой обмен человека и его гигиеническое значение. К.: Госмедиздат, 1956. 148 с.
8. Desporoulos A., Silbernagl S. Color Atlas of Physiology. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1986. 356 p.
9. Вержбицкий В.М. Численные методы (линейная алгебра и нелинейные уравнения). Учеб. пособие для вузов. М.: «Издательский дом «ОНИКС 21 век», 2005. – 432 с.
10. Анатычук Л.И., Кузь Р.В., Прибыла А.В. О влиянии системы теплообмена на эффективность термоэлектрического кондиционера. *Термоэлектричество*. 2013. №1. С. 76 – 83.
11. <http://www.ite.inst.cv.ua>.
12. Назарова М.В., Бойко С.Ю. Исследование теплозащитных свойств неразрезной двухполотной основоворсовой ткани. *Современные проблемы науки и образования*. 2009. № 5. С. 113 – 117.

Поступила в редакцию 05.09.2016.