

К. ф.-м. н. Р. Г. ЧЕРКЕЗ

Украина, Черновицкий национальный университет
имени Юрия Федьковича
E-mail: radionch@mail.ru

Дата поступления в редакцию
26.01 2009 г.

Оппонент д. т. н. А. Л. ВАЙНЕР
(НИИ «Шторм», г. Одесса)

СИСТЕМА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ ПРОНИЦАЕМЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

Компьютерные исследования предлагаемой системы показали возможность повышения холодильного коэффициента в 1,6—1,7 раз и холодопроизводительности на 40% по сравнению с традиционными термоэлектрическими системами.

Термоэлектрические системы охлаждения характеризуются безвредностью для окружающей среды (отсутствием фреона), простотой конструкции, бесшумностью, высокой надежностью, возможностью произвольной ориентации в пространстве, позволяют плавно и точно регулировать холодопроизводительность и температурный режим, что делает их перспективными для обеспечения тепловых режимов кондиционирования воздуха. Однако, несмотря на такие привлекательные характеристики, они не нашли широкого применения при решении задач термостабилизации воздуха из-за меньших значений холодильного коэффициента по сравнению с компрессионными устройствами.

Принципиально важные шаги в повышении эффективности термоэлектрических преобразователей энергии были сделаны школой А. Ф. Иоффе, когда впервые было показано, что эффективность термоэлектрического преобразования энергии определяется добротностью материала $Z = \alpha^2 \sigma / k$ (α — термо-эдс, σ — электропроводность, k — теплопроводность), и было предложено использовать в термоэлектричестве полупроводники [1]. Это позволило определить основные методы повышения эффективности: легирование материала активными примесями для достижения максимальных значений $\alpha^2 \sigma$ и легирование материала изовалентными примесями замещения для снижения теплопроводности. Эти методы были применены к ряду материалов, что дало существенное возрастание добротности Z и способствовало широкому применению термоэлектрических преобразователей энергии для решения задач обеспечения необходимых тепловых режимов.

Однако в последнее десятилетие, несмотря на многочисленные исследования, не удалось добиться значительного роста добротности материалов, поэтому возникла необходимость поиска новых путей повышения эффективности термоэлектрических систем.

Перспективными в этом отношении являются проницаемые термоэлектрические системы, у которых

теплообмен происходит не только через поверхности спаев, но и через объем веток. Одним из первых на возможность повышения эффективности термоэлектрического преобразования энергии путем применения проницаемых термоэлементов указал в своем авторском свидетельстве И. В. Зорин [2]. В последнее время интенсивные исследования в этом направлении ведутся и за рубежом (Японии, США и др.).

В таких термоэлементах привлекательным с точки зрения кондиционирования является возникновение эффекта Джоуля–Томсона при дросселировании воздуха через проницаемый материал [3]. Использование этого эффекта совместно с термоэлектрическими может повысить термодинамическую эффективность термоэлектрического кондиционирования и улучшить качество обеспечения тепловых режимов работы объекта термостатирования.

На рис. 1 приведена схема термостатирующего блока термоэлектрического кондиционера на основе проницаемых термоэлементов [4]. Поток воздуха 1 для термостатирования подается вентилятором 2 по патрубку 4 через фильтр очистки 10 и горячий теплообменник 5 на блок проницаемых термоэлементов 3.

Пропускание электрического тока соответствующей полярности через термоэлемент приводит к охлаждению его нижних граней. Воздух, проходя по каналам термоэлементов в направлении холодных спаев, отдает тепло материалу веток, охлаждается и выходит через патрубок 11. Тепло с «горячих» граней термоэлементов отводится в теплообменнике 5 при помощи теплоносителя, который циркулирует по патрубку 6. Патрубок 8 и заслонка 7 с вентилятором 9 служат для забора воздуха из окружающей среды, который отводит тепло от теплоносителя.

Основным элементом блока является батарея из проницаемых термоэлементов 3, характеристики которой определяют энергетическую эффективность устройства.

Проницаемый термоэлемент состоит из ветвей n - и p -типов проводимости, свойства материала которых зависят от температуры.

Изменение температуры воздуха dt вследствие эффекта Джоуля–Томсона описывается соотношением

$$dt = \alpha_i dp, \quad (1)$$

где α_i — коэффициент Джоуля–Томсона;
 dp — изменение давления.

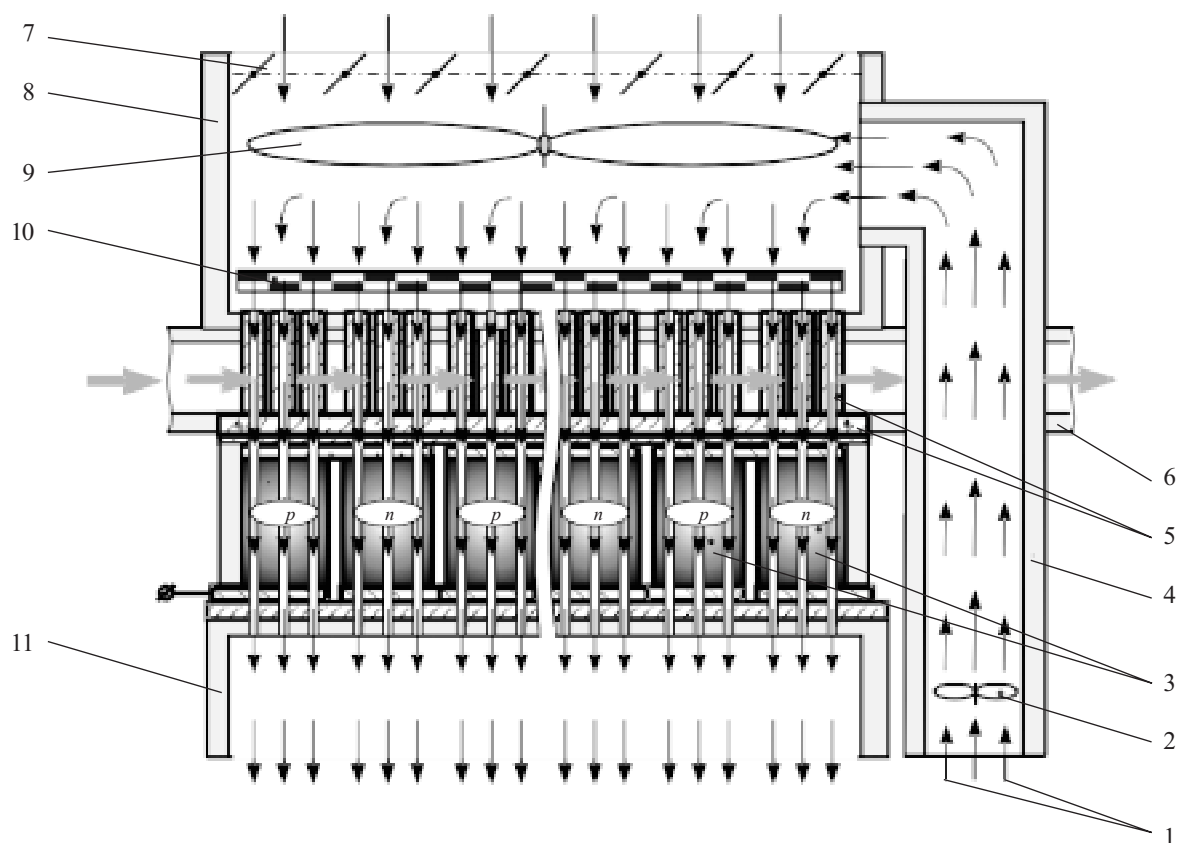


Рис. 1. Термостатирующий блок термоэлектрического кондиционера

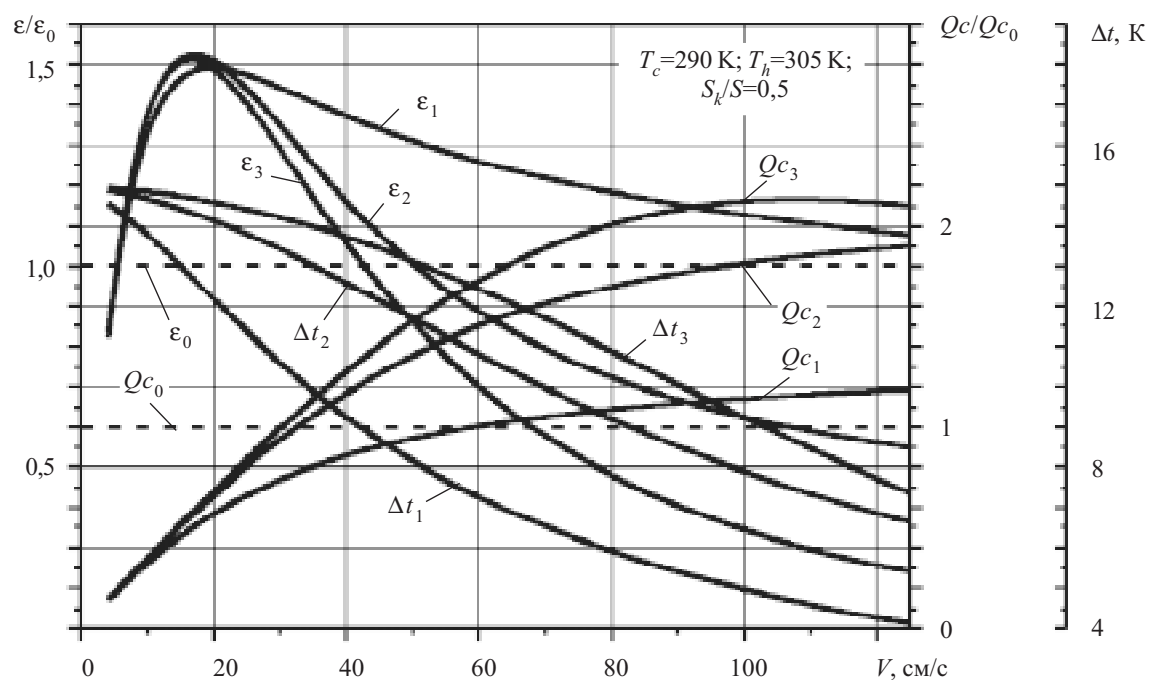


Рис. 2. Зависимость холодильного коэффициента ϵ , холодопроизводительности Q_c и разность температур охлаждаемого воздуха на входе и выходе Δt от скорости воздуха в каналах проницаемых термоэлементов с различным эффективным диаметром каналов:
индекс 1 — 0,1; 2 — 0,05; 3 — 0,033 см (ϵ_0, Q_0 — параметры традиционных термоэлементов)

Стационарное распределение температуры в термоэлектрическом материале веток $T(x)$ и в воздухе $t(x)$ можно найти из решения системы дифференциальных уравнений [5], которая должна быть записана для ветвей n - и p -типов проводимости, с учетом эффекта Джоуля–Томсона:

$$\begin{cases} \frac{dq}{dx} = \frac{\alpha^2 j}{k} T + \frac{\alpha j}{k} q + j\rho - \frac{\alpha_{\tau} P_{\kappa} N_{\kappa} l^2}{(S - S_{\kappa}) j} (T - t); \\ n, p \left\{ \begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= -\frac{\alpha j}{k} T - \frac{j}{k} q; \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{\alpha_{\tau} P_{\kappa} N_{\kappa} l}{V c_p S_{\kappa}} (T - t) - \alpha_i l \frac{dp}{dx}, \end{aligned} \right. \\ q &= \frac{1}{j} \left(\alpha(T, \xi(x)) jT - k(T, \xi(x)) \frac{dT}{dx} \right), \end{cases} \quad (2)$$

где q — удельный тепловой поток;
 x — безразмерная координата;
 $j = il$;
 l — высота ветвей термоэлемента;
 i — плотность электрического тока;
 ρ — удельное электрическое сопротивление;
 P_{κ} — периметр канала;
 S — площадь сечения ветви с каналами;
 S_{κ} — суммарная площадь сечения всех каналов;
 α_{τ} — коэффициент теплоотдачи;
 N_{κ} — число каналов;
 $V = v\rho_g$;
 v — скорость воздуха в каналах;
 ρ_g — плотность воздуха;
 c_p — теплоемкость теплоносителя.

Изменение давления воздуха вдоль направления его движения определим на основе соотношения Дарси–Вейсбаха

$$\frac{dp}{dx} = \xi_d \frac{\pi V^2}{2 P_{\kappa} \rho_g}, \quad (3)$$

где ξ_d — коэффициент трения.

Задача поиска максимальной энергетической эффективности сводится к поиску максимума холодильного коэффициента

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c + W_{pr}} \quad (4)$$

при дифференциальных ограничениях (2), (3) и граничных условиях для ветвей n - и p -типов проводимости:

$$T_{n,p}(0) = T_h, \quad T_{n,p}(l) = T_c, \quad t_{n,p}(0) = T_a, \quad (5)$$

где $Q_c = Q_n(1) + Q_p(1) + Q_L$;
 $Q_h = Q_n(0) + Q_p(0)$;
 $Q_L = \sum_{n,p} V c_p S_{\kappa} (t(0) - t(1))$;
 Q_h, Q_c — тепловые потоки, которыми термоэлемент обменивается с внешними источниками тепла;
 $Q(1), Q(0)$ — тепловые потоки на холодных и на теплых спаев ветвей термоэлемента, соответственно;
 Q_L — тепло, отводимое от воздуха;
 $t(0), t(1)$ — температура воздуха на входе и на выходе из ветвей термоэлемента, соответственно;
 W_{pr} — мощность, затрачиваемая на прокачку воздуха;

T_h, T_c — значения температуры теплых и холодных спаев термоэлемента, соответственно;
 T_a — температура воздуха на входе в термоэлемент.

Для решения задачи использована математическая теория оптимального управления. На основе системы дифференциальных уравнений (2) с учетом связей (5), необходимых условий оптимальности, вытекающих из принципа максимума Понтрягина [6] и численных методов, была создана компьютерная программа по определению оптимальных параметров, при которых холодильный коэффициент будет максимальным.

Приведем результаты компьютерных исследований проницаемого термоэлемента с ветвями из материалов на основе Bi_2Te_3 , параметры которого зависят от температуры [7].

Зависимости характеристик проницаемого термоэлемента от скорости воздуха в каналах в условиях оптимальной плотности тока питания показаны на рис. 2. Видно, что холодильный коэффициент максимален в области $V=20$ см/с, выше которой он уменьшается и далее становится меньше, чем у традиционных непроницаемых термоэлементов (ε_0). Несколько иначе ведет себя холодопроизводительность — при малых скоростях воздуха (до 30 см/с) она ниже, чем у традиционных термоэлементов (Q_{c0}), а при больших скоростях — выше. Так, например, для эффективного диаметра каналов 0,05 см при скорости воздуха 50 см/с значения холодильного коэффициента систем с проницаемыми и традиционными термоэлементами одинаковы, а холодопроизводительность первых на 40% больше, чем вторых.

Также расчеты показали, что рациональное использование термоэлектрических эффектов в сочетании с эффектом Джоуля–Томсона дает возможность повысить холодильный коэффициент систем с проницаемыми термоэлементами на 60—70% по сравнению с непроницаемыми. В данных системах, в условиях невысокого перепада давления воздуха на термоэлементе, вклад эффекта Джоуля–Томсона составляет 6—10%. Для его увеличения можно повысить перепад давления за счет использования, например, пористых проницаемых термоэлектрических материалов.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования проницаемых термоэлементов для создания систем кондиционирования воздуха и эффективного обеспечения тепловых режимов объекта термостатирования на основе.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы. — М.: Из-во АН СССР, 1960.
2. А. с. СССР 144883. Способ повышения к.п.д. термоэлектрического генератора (холодильника) / Зорин И. В. — Опубл. 18.10.1968. (Заявл. 24.06.1961).
3. Пат. 21944 Украины. Термоэлемент / Л. И. Ананичук, Р. Г. Черкез. — 10.04.2007.
4. Пат. 30827 Украины. Термостатующий блок кондиционера / Р. Г. Черкез. — 11.03.2008.
5. Ананичук Л. И., Вихор Л. М., Черкез Р. Г. Оптимальне керування неоднорідністю напівпровідникового матеріалу для проникних термоелементів охолодження // Термоелектрика. — 2000. — № 3. — С. 46—57.
6. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. — М.: Наука, 1976.
7. Вайнер А. Л. Термоэлектрические охладители. — М.: Радио и связь, 1983.