



Черкез Р.Г.

КАСКАДНАЯ ПРОНИЦАЕМАЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ БАТАРЕЯ ОХЛАЖДЕНИЯ

Черкез Р.Г.

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

• Представлена модель каскадной проницаемой батареи охлаждения потоков жидкостей и газов. Описаны методы расчета температурных полей и определения энергетических характеристик батареи охлаждения. Результаты расчетов для термоэлектрических материалов на основе Bi_2Te_3 показывают на наличие оптимальных значений скорости теплоносителя в каналах, плотностей электрического тока, при которых холодильный коэффициент приобретает максимальные значения. Использование 2–3 каскадов проницаемых термоэлементов позволяет повысить холодильный коэффициент в 1.2–1.7 раз при предельных перепадах температур и увеличить глубину охлаждения на 30–40 К.

Введение

Возможности расширения практического применения термоэлектрических охлаждающих устройств в первую очередь зависят от эффективности преобразования энергии при условии обеспечения необходимых температурных режимов. Основные методы повышения эффективности преобразования энергии были сформулированы еще А.Ф. Иоффе [1]. Они основываются на повышении параметра добротности термоэлектрических материалов путем легирования активными примесями материала основы для достижения максимальных значений $\alpha^2\sigma$ (σ – термоЭДС, α – электропроводность) и изовалентными примесями замещения для снижения теплопроводности. Эти методы применялись к некоторым материалам, что дало увеличение добротности и, соответственно, содействовало широкому практическому использованию термоэлектричества.

В последние десятилетия, несмотря на многочисленные исследования, дальнейшее увеличение параметра добротности термоэлектрических материалов незначительно. Возникает необходимость поиска новых путей повышения эффективности. Поэтому все больше внимания отводится исследованиям других направлений, в которых полезно используется не только околосконтактные термоэлектрические эффекты, а и весь объем термоэлектрического материала. К таким вариантам принадлежит использование проницаемых термоэлементов [2].

В проницаемых термоэлементах тепло подводится или отводится не только через поверхности горячих и холодных спаев, а и через внутренние поверхности ветвей за счет прокачки теплоносителя через каналы (поры) веток. Одним из первых на возможность повышения эффективности термоэлектрического преобразования энергии путем применения проницаемых термоэлементов указал в своих авторских свидетельствах И.В. Зорин [3, 4]. Последовательное исследование возможностей термоэлементов с проницаемыми ветками проведены в Украине [5–7]. В таких термоэлементах при прокачке теплоносителя через каналы (поры) материала возможно дополнительное его охлаждение вследствие действия эффекта Джоуля-Томсона, который возникает при дросселировании потоков газа [8]. Благодаря этому можно реализовать такие ситуации, при которых общее действие термоэлектрических эффектов и эффекта Джоуля-Томсона даст возможность повысить холодильный коэффициент.

Приведенные в работах [9] исследования проницаемых термоэлементов охлаждения для материалов на основе Bi_2Te_3 показали на возможность повысить холодильный коэффициент на

40 – 60 % по сравнению с традиционными термопарными элементами. Это открывает широкие возможности использования проницаемых термоэлементов для охлаждения потоков жидкостей и газов.

Однако минимально достигаемая температура охлаждения теплоносителя остается на том же уровне, что и у традиционных термоэлементов. Получение более низких температур охлаждения расширило бы возможности практического применения прямого безмашинного термоэлектрического способа охлаждения, который характеризуется простотой конструкции, высокой надежностью в работе, экологической чистотой, высокой точностью регулирования температурного режима и т.п.

Большую глубину охлаждения теплоносителя можно достичь использованием каскадных систем. Хотя идея использования каскадных систем известна давно [10], но вопрос исследования проницаемых каскадных систем в известных автору литературных источниках не изучался.

Поэтому, целью работы является определение энергетических характеристик каскадной проницаемой батареи охлаждения, а также исследование их зависимостей от конструктивных и теплофизических параметров.

Физическая модель, математическое описание и метод решения задачи

Схема каскадной системы охлаждения на основе проницаемых термоэлементов представлена на рис. 1. Она состоит из батареи проницаемых термоэлементов 1, содержащие ветки n - и p -типов проводимости из полупроводниковых термоэлектрических материалов, в которых имеются каналы 2 для прокачки теплоносителя 3, термоэлементы 1 электрически соединены параллельно коммутационными пластинами 4 таким образом, чтобы они образовывали группу (каскад). Каждый каскад обеспечивается системой отвода тепла 5 от теплых спаев проницаемых термоэлементов и системой циркуляции охлаждаемой теплоноситель 6. Совокупность таких каскадов образует термоэлектрическую батарею.

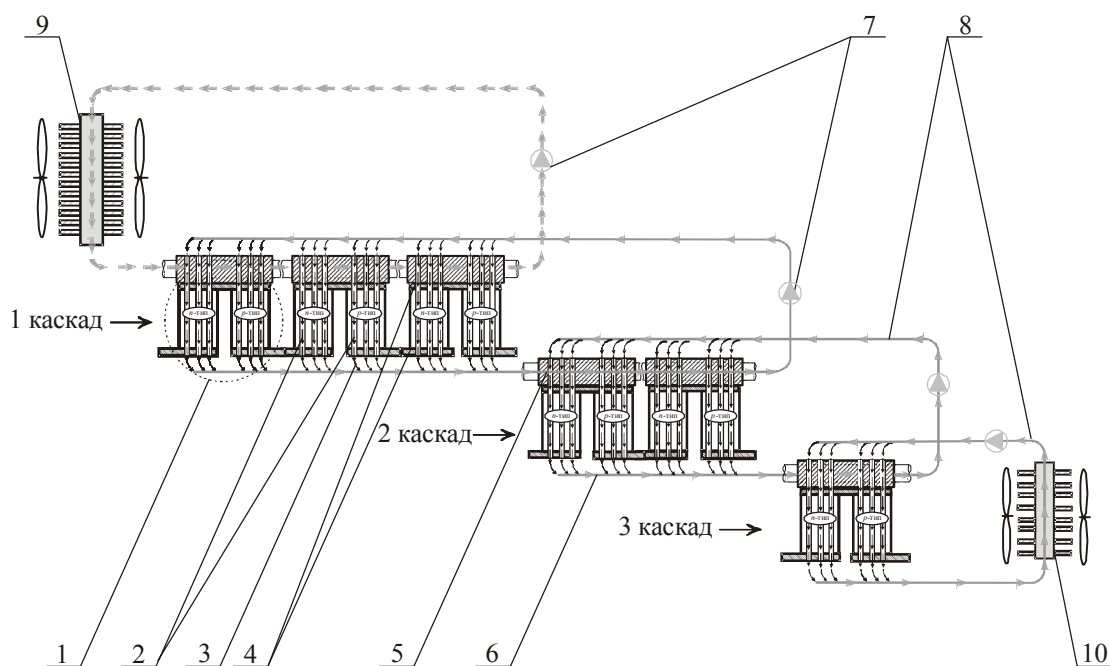


Рис. 1. Схема проницаемой каскадной батареи охлаждения.

Для сопредельных каскадов система циркуляции теплоносителя и система отвода тепла соединены между собой последовательно таким образом, чтобы охлажденный теплоноситель на одном каскаде прокачивался насосом 7 через систему отвода тепла другого каскада, образующие замкнутый контур для циркуляции теплоносителя 8. Система отвода тепла от более теплого каскада сопряжена с внешней теплообменной системой 9 для отвода тепла в окружающую среду. Система циркуляции теплоносителя наиболее холодного каскада сопряжена с внешней системой теплообмена 10 для охлаждения объекта (на рис. 1 не показана).

Прохождение электрического тока через каждый каскад термоэлектрической батареи соответствующего направления, вследствие действия эффекта Пельтье, приводит к охлаждению нижних частей проницаемых термоэлементов. Теплоноситель прокачивается по каналам сквозь ветки проницаемых термоэлементов в направлении к холодным частям и вследствие теплообмена с материалом ветки охлаждается. Охлажденный теплоноситель подается в систему отвода тепла второго каскада, охлаждая теплые спаи его термоэлементов. Это позволяет второму каскаду работать при более низкой температуре теплых спаев и, соответственно, охладить теплоноситель на более низкий уровень температур. Нарращиванием количества каскадов (на рис. 1 представлен вариант трехкаскадной батареи) можно охладить теплоноситель на все больший уровень температуры.

Количество тепла, которое отводится от горячих спаев k -го каскада, найдем по изменению энтальпии теплоносителя

$$Q_h^{(k)} = G_h^{(k)} \cdot c_p \cdot (t_h^{(k)out} - t_h^{(k)in}), \quad (1)$$

где $G_h^{(k)}$ – расход теплоносителя через теплообменник на горячей поверхности k -го каскада; c_p – теплоемкость теплоносителя; $t_h^{(k)in}$, $t_h^{(k)out}$ – температуры теплоносителя на входе и выходе k -го каскада соответственно.

Количество тепла, которое отбирается от теплоносителя в каналах k -го каскада батареи

$$Q_c^{(k)} = G_k \cdot c_p \cdot (t_k^h - t_k^c), \quad (2)$$

где G_k – расход теплоносителя через каскад; c_p – теплоемкость теплоносителя; t_k^h , t_k^c – температуры теплоносителя на входе и выходе первого каскада батареи.

Холодильный коэффициент определим соотношением:

$$\varepsilon = \frac{Q_c^{(N)}}{W} = \frac{Q_c^{(N)}}{\sum_{k=1}^N W^{(k)}}, \quad (3)$$

где $W^{(k)} = Q_h^{(k)} - Q_c^{(k)}$ – мощность, потребляемая k -ым каскадом.

Для определения теплофизических характеристик каскадной батареи рассмотрим ее физическую модель (рис. 2). Она состоит из последовательно-параллельно соединенных проницаемых термоэлементов 1, которые создаются из проницаемых веток n - и p -типов проводимости 2, соединенных коммутационными пластинами 4. Сквозь термоэлементы по каналам веток 2 прокачивается теплоноситель 3 для охлаждения. Теплоноситель охлаждается вследствие теплообмена с материалом веток, в котором устанавливается градиент температуры благодаря действию термоэлектрических эффектов Пельтье, Томсона при наличии электрического тока. Тепло от теплых спаев термоэлементов отводится теплообменником 6 вследствие прокачки теплоносителя, остальная поверхность 5 адиабатически изолирована.

$(q_h(T_h, T_c, j, \dots) = (q \cdot j)|_{x=0})$; $x = \frac{x}{l}$ – безразмерная координата; I – сила тока; S_K – площадь сечения всех каналов; S – сечение ветки вместе с каналами; Π_K – периметр канала; N_K – количество каналов в ветви; V – массовая скорость теплоносителя в каналах; α_T – коэффициент теплоотдачи в канале; $\alpha(T)$, $\kappa(T)$, $\rho(T)$ – коэффициенты термоЭДС, теплопроводности и удельного сопротивления материала являются функциями температуры T .

Система дифференциальных уравнений (4) и (5) дополняется предельными условиями

$$t_g|_{y=0} = t_g^{in}; \quad q_h(T_h, T_c, j, \dots) = (q \cdot j)|_{x=0} = \frac{1}{R_{ef}}(T_h - t_g); \quad t_K|_{x=0} = t_K^{in}, \quad (6)$$

где R_{ef} – эффективный коэффициент теплопередачи между теплыми спаями термоэлементов и теплоносителем в радиаторе; t_g^{in} – начальная температура теплоносителя радиатора; t_K^{in} – температура теплоносителя на входе в проницаемый термоэлемент.

На основе соотношений (4) – (6) можно провести тепловой расчет каждого каскада проницаемой каскадной батареи. Для расчетов всей каскадной батареи необходимо учесть взаимосвязь между каскадами, которая дается соотношениями

$$(Vc_p S_K)_k = (G_g c_p)_{k+1}, \quad (7)$$

$$(t_K|_{x=l})_k = (t_g^{in})_{k+1}, \quad (8)$$

где индекс $k = 1, \dots, N$; N – количество каскадов в батарее.

На основе полученных соотношений с использованием метода последовательных приближений, численных методов решения систем дифференциальных уравнений (4), (5) с граничными условиями (6), (7), (8) была разработана компьютерная программа для исследования энергетических характеристик каскадной проницаемой батареи.

Результаты компьютерных исследований энергетических характеристик каскадной проницаемой батареи

Результаты компьютерного моделирования каскадов проницаемых термоэлементов были проведены для материала на основе Bi_2Te_3 [11]. Данные температурных зависимостей параметров α , κ , σ этих материалов аппроксимированы методом наименьших квадратов с относительной погрешностью не больше 1% и использованы в расчетах. Температурные зависимости параметров α , κ , σ материала приведены на рис. 3.

Энергетические характеристики каскадной батареи определяются через параметры характеристик работы каждого каскада. Результаты исследований энергетических характеристик одного каскада приведены на рис. 4. Здесь представлены значения холодильного коэффициента ε и удельной холодопроизводительности Q_c в зависимости от массовой скорости теплоносителя V в каналах при оптимальной плотности электрического тока.

Данные приведены для случая, когда в качестве теплоносителя используется вода, температура теплоносителя на входе в каналы термоэлементов составляла 310 К, высота веток 1 см, диаметр каналов 0.12 см, площадь поперечного сечения веток вместе с каналами составляет 0.36 см^2 , величина контактного сопротивления в местах соединения веток термоэлементов

составляет $5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Зависимости энергетических характеристик приведены для разных температур холодных спаев термоэлементов – индекс 1 соответствует $T_c = 285 \text{ К}$, 2 – $T_c = 280 \text{ К}$, 3 – $T_c = 275 \text{ К}$, при этом полученная температура охлаждения воды соответствует значениям 286 К, 280.7 и 285.5 К соответственно.

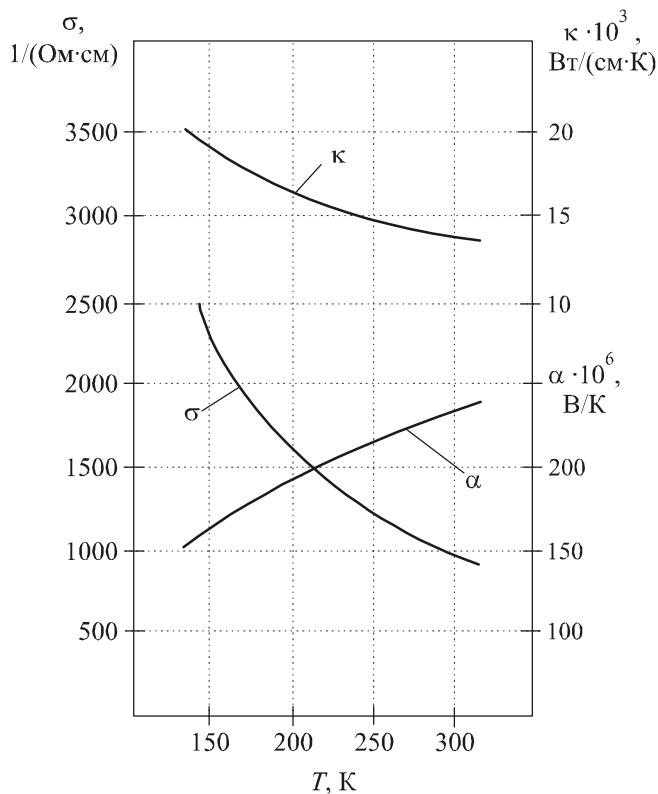


Рис. 3. Температурные зависимости параметров материала веток.

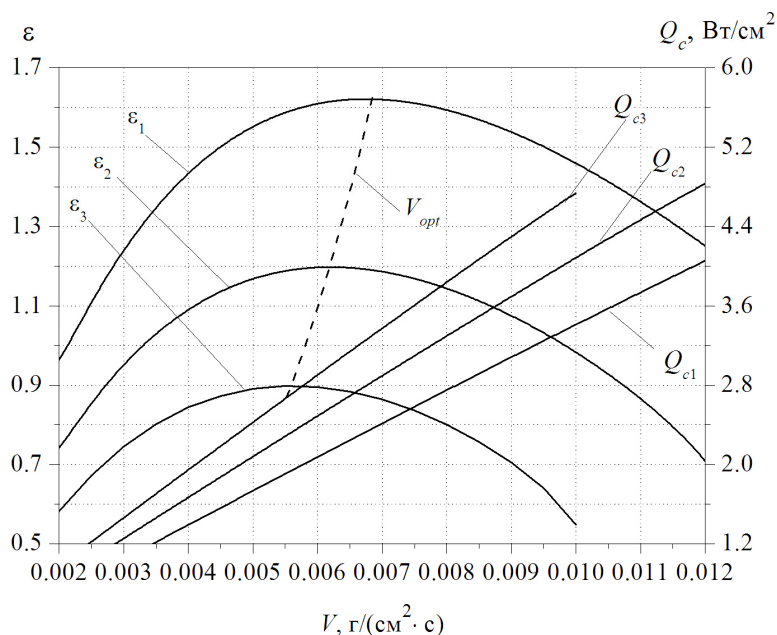


Рис. 4. Зависимости энергетических характеристик проницаемого каскада от массовой скорости теплоносителя в канале при оптимальной плотности электрического тока.
(индекс 1 соответствует $T_c = 285 \text{ К}$, 2 – $T_c = 280 \text{ К}$, 3 – $T_c = 275 \text{ К}$)

Из рис. 4 видно, что удельная холодопроизводительность монотонно возрастает с повышением скорости теплоносителя. Холодильный коэффициент проницаемого каскада имеет максимум по массовой скорости теплоносителя (оптимальное значение обозначено через V_{opt}), который зависит от температурных условий работы. Поэтому численным методом Ньютона решения экстремальных задач было обобщенно компьютерную программу расчетов проницаемой каскадной батареи охлаждения на случай поиска оптимальных значений скорости теплоносителя в канале.

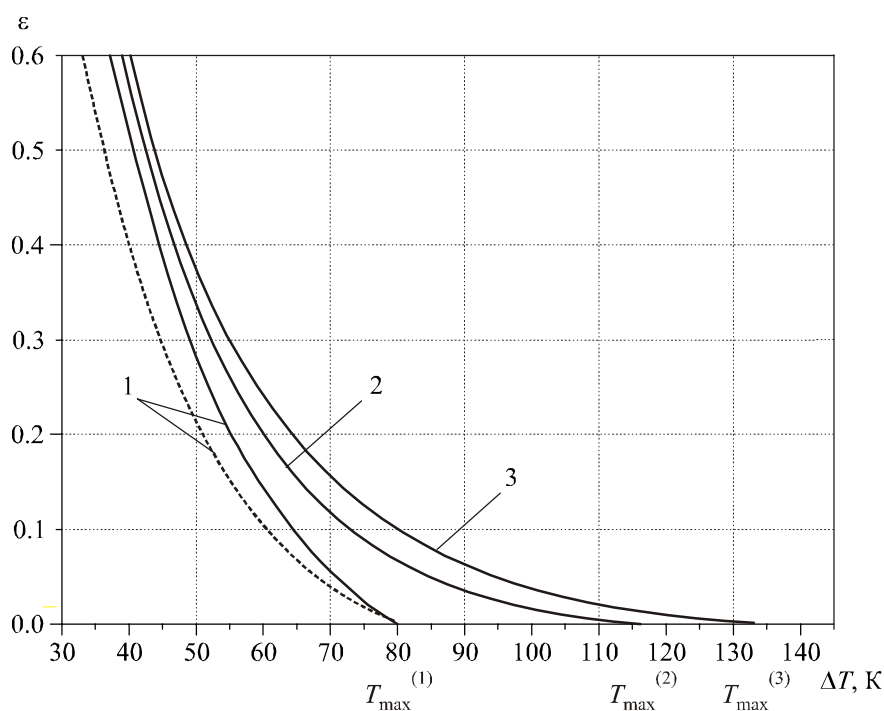


Рис. 5. Зависимость холодильного коэффициента от перепада температур и числа каскадов.

На рис. 5 представлены рассчитанные значения зависимости холодильного коэффициента одно- (зависимость 1), двух- (зависимость 2) и трех- (зависимость 3) каскадных проницаемых охладителей от перепада температур и числа каскадов. Штриховая линия соответствует значению холодильного коэффициента однокаскадной непроницаемой батареи, а сплошные – оптимизированной проницаемой каскадной батарее охлаждения. Видно, что использование каскадирования в проницаемых системах охлаждения дает возможность повысить холодильный коэффициент в 1.2 – 1.7 раз при граничных перепадах температур и увеличить глубину охлаждения жидкости на 30 – 40 К.

Выводы

1. Представлена модель каскадной проницаемой батареи охлаждения потоков жидкостей и газов. На основе системы дифференциальных уравнений описан метод расчета температурных полей и определения энергетических характеристик батареи охлаждения.
2. Исследована модель проницаемой каскадной батареи для охлаждения материалов на основе Bi_2Te_3 . Результаты расчетов указывают на наличие оптимальных значений скорости теплоносителя в каналах и плотности электрического тока при которых холодильный коэффициент приобретает максимальные значения.
3. Результаты расчетов 2–3 каскадных проницаемых батарей указывают на возможность

повышения холодильного коэффициента в 1.2 – 1.7 раз при граничных перепадах температур и увеличения глубины охлаждения на 30 – 40 К.

Автор выражает благодарность Л.И. Анатичуку за содействие при выполнении данной работы; И.В. Гуцулу за полезные обсуждения физической модели и Л.М. Вихор за консультации относительно особенностей использованных в работе численных методов.

Литература

1. Иоффе А.Ф. Полупроводники в современной физике / А.Ф. Иоффе. – М.: Из-во АН СССР. – 1954.
2. Котырло Г.К. Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов / Г.К. Котырло, Ю.Н. Лобунец // К.: Наук. думка, 1980. – 327 с.
3. А.с. 144883 СССР. Способ повышения КПД термоэлектрического генератора (холодильника) / И.В. Зорин (СССР). – Заявлено 24.06.1961.
4. А.с. 162578 СССР. Способ повышения КПД термоэлектрического генератора. / Зорин И.В. (СССР). – Заявлено 02.06.1962.
5. Anatyshuk L.I. Computer design of thermoelectric functionally graded materials / L.I. Anatyshuk, L.N. Vikhor // Proceedings of the Fourth International Symposium on FGM. – Tsukuba. – Japan. – Oct. 21 – 24, 1996.
6. Anatyshuk L.I. Computer Simulation of Functionally Graded Materials for Thermoelectricity / L.I. Anatyshuk, L.N. Vikhor, R.G. Cherkez // J. of Thermoelectricity. – 1997. – N3. – P. 43 – 61.
7. Котырло Г.К. Тепловые схемы термоэлектрических устройств / Г.К. Котырло, Г.М. Щеголев // К.: Наук. Думка. – 1973. – 215 с.
8. Анатичук Л.И. Проницаемый термоэлектрический элемент охлаждения с использованием эффекта Джоуля-Томсона / Л.И. Анатичук, Р.Г. Черкез // Термоэлектрика. – 2007. – №3. – С. 93 – 102.
9. Anatyshuk L.I., Cherkez R.G. Permeable planar cooling thermoelement / L.I. Anatyshuk, R.G. Cherkez // Journal of Thermoelectricity. – 2008. – № 3. – С. 5 – 12.
10. Вайнер А.Л. Термоэлектрические охладители / А.Л. Вайнер // М.: Радио и связь. – 1983. – 176 с.
11. Вайнер А.Л. Каскадные термоэлектрические источники холода / А.Л. Вайнер // М.: Сов. Радио. – 1976. – 136 с.

Поступила в редакцию 12.09.2011.