

07

Термоэлектрический охладитель малых газовых потоков

© О.Н. Урюпин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: o.uryupin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 12 декабря 2025 г.

В окончательной редакции 19 февраля 2026 г.

Принято к публикации 10 марта 2026 г.

Рассчитан секционированный термоэлектрический охладитель, понижающий температуру газа до ~ 240 К. В соответствии с результатами расчета изготовлен и протестирован макет термоэлектрического охладителя, эффективно решающего поставленную задачу.

Ключевые слова: термоэлектрик, секционированный охладитель, холодопроизводительность, поток газа.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.11.62866.20600

В настоящее время актуальной задачей в области прямого преобразования энергии является расширение области применения термоэлектрических преобразователей [1]. Одной из областей применения термоэлектрических охладителей является изменение температуры газовых потоков и кондиционирование воздуха [2,3]. В то же время такие системы могут представлять интерес для охлаждения малых потоков газа или термостатирования малых объектов без жесткого крепления к ним термоэлектрических модулей. Использование обычного термоэлектрического модуля в таких устройствах неэффективно, так как при больших перепадах температуры, обеспечивающих значительное охлаждение газа, холодопроизводительность модуля мала [4,5]. В настоящей работе предложено использовать для этих целей секционированный охладитель, состоящий из нескольких модулей, имеющих разделенные тепловые потоки. Газ последовательно контактирует с холодными спаями этих модулей и постепенно охлаждается. При этом первые модули работают при малых перепадах температуры и поэтому обладают высокой холодопроизводительностью.

Описанный далее расчет цепочки термоэлектрических модулей выполнен в рамках простой модели, не учитывающей зависимость кинетических коэффициентов от температуры. Каждый из таких модулей рассчитывается независимо от других, но тепловой поток на его холодные спай будет зависеть от изменения температуры газа предыдущим модулем.

Расчет таких модулей основан на уравнении, описывающем баланс энергии на холодных спаях термоэлемента [4,5]:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\rho_n}{S_n} + \frac{\rho_p}{S_p} \right) LI^2 + \frac{1}{L} (\kappa_n S_n + \kappa_p S_p) (T_h - T_c) + \frac{Q_0}{N} - (\alpha_p - \alpha_n) T_c I = 0, \quad (1)$$

где ρ , α , κ — удельное электросопротивление, коэффициенты термоэдс и теплопроводности термоэлектрического материала соответственно, S и L — площадь

и высота ветви термопары (индексы n и p помечают параметры, относящиеся к n - и p -ветвям термопары), I — электрический ток, N — число термопар в модуле, T_c и T_h — температуры холодного и горячего спаев соответственно. Холодопроизводительность термоэлемента $Q_0 = C_0(T_0 - T_c)$ равна количеству тепла, выделяемого на холодных спаях в секунду при охлаждении потока газа, C_0 — теплоемкость потока газа, T_0 — его начальная температура. Предполагается, что на выходе температура газа равна температуре холодных спаев термоэлементов.

Вводя переменные v и μ , определяемые соотношениями

$$v^2 = \frac{I^2 L^2 S_n \rho_p + S_p \rho_n}{S_n S_p \kappa_n S_n + \kappa_p S_p}, \quad (2)$$

$$\mu^2 = (\kappa_n S_n + \kappa_p S_p) \left(\frac{\rho_n}{S_n} + \frac{\rho_p}{S_p} \right), \quad (3)$$

приведем уравнение (1) к виду

$$\sqrt{z} v T_c - \frac{1}{2} v^2 - (T_h - T_c) - C(T_0 - T_c) \frac{v}{\mu} = 0, \quad (4)$$

где $z = \left(\frac{\alpha_p - \alpha_n}{\mu} \right)^2$, $C = \frac{C_0}{IN}$.

Из уравнения (4) легко находится температура холодного спая

$$T_c = \frac{v^2/2 + T_h + CvT_0/\mu}{1 + \sqrt{z}v + Cv/\mu}. \quad (5)$$

При заданном токе I , высоте термоэлемента L и известных кинетических коэффициентах используемых термоэлектрических материалов температура холодного спая зависит от площади сечения какой-либо ветви, например S_p , и отношения сечений ветвей S_p/S_n . Хорошо известно [4], что величина оптимального отношения S_p/S_n определяется выражением

$$\frac{S_p}{S_n} = \sqrt{\frac{\kappa_n \rho_p}{\kappa_p \rho_n}}. \quad (6)$$

Подставляя это отношение в (2) и (3), получим

$$\mu = \sqrt{\kappa_n \rho_n} + \sqrt{\kappa_p \rho_p}, \quad (7a)$$

$$v = \frac{IL}{S_p} \sqrt{\frac{\rho_p}{\kappa_p}}. \quad (7b)$$

Оптимальное значение площади сечения p -ветви S_p находится минимизацией выражения (5) по параметру v , который в соответствии с определением (7b) обратно пропорционален S_p . Оптимальное значение v связано с другими параметрами модуля соотношением

$$v = \frac{-1 + \sqrt{1 - 2(\tilde{C} + \sqrt{z})(\tilde{C}T_0 - (\tilde{C} + \sqrt{z})T_h)}}{\tilde{C} + \sqrt{z}}, \quad (8)$$

где $\tilde{C} = C/\mu$. Подстановка этого выражения в (7b) позволяет определить оптимальное значение сечения p -ветви S_p .

Та же процедура расчета может быть применена к следующему модулю в рассматриваемом охладителе, но для тепловой нагрузки Q_0 начальную температуру газа T_0 следует заменить на температуру T_c предыдущего модуля. Кинетические коэффициенты халькогенидов висмута и сурьмы p - и n -типа проводимости можно с достаточной степенью точности считать равными, так как они близки по величине, а их температурные зависимости в расчете не учитываются.

Алгоритм численной оптимизации охладителя был следующим. Измеренные температурные зависимости $\alpha(T)$, $\rho(T)$ и $\kappa(T)$ аппроксимировались полиномами. Задавались некоторые начальные значения перепадов температуры на модулях и по их средним значениям определялись кинетические коэффициенты. Затем вычислялись оптимальные значения отношений S_p/L и температур холодных спаев всех модулей охладителя при заданном токе. По вычисленным температурам спаев определялись новые значения кинетических коэффициентов. Эта итерационная процедура сходилась достаточно быстро. Расчет показал, что результат не сильно зависит от величины отношения площадей ветвей термоэлементов, поэтому в разработанном охладителе p - и n -ветви имели одинаковые сечения.

До расчета термоэлектрических охладителей на образцах p - и n -материалов проводились измерения удельного сопротивления (рис. 1, *a*) на переменном токе, позволяющем избавиться от неизотермичности образца, вызванной эффектом Пельтье, осуществлялись измерения теплопроводности (рис. 1, *c*) абсолютным стационарным методом в высоком вакууме ($p < 10^{-4}$ mm Hg) и измерялся коэффициент термоэдс (рис. 1, *b*). Погрешность измерения удельного сопротивления составила 4%, коэффициента термоэдс — 5%, коэффициента теплопроводности — 8%.

По описанной выше методике была рассчитана цепочка термоэлектрических модулей, составляющих охладитель, где каждый модуль состоит из одной терморпары.

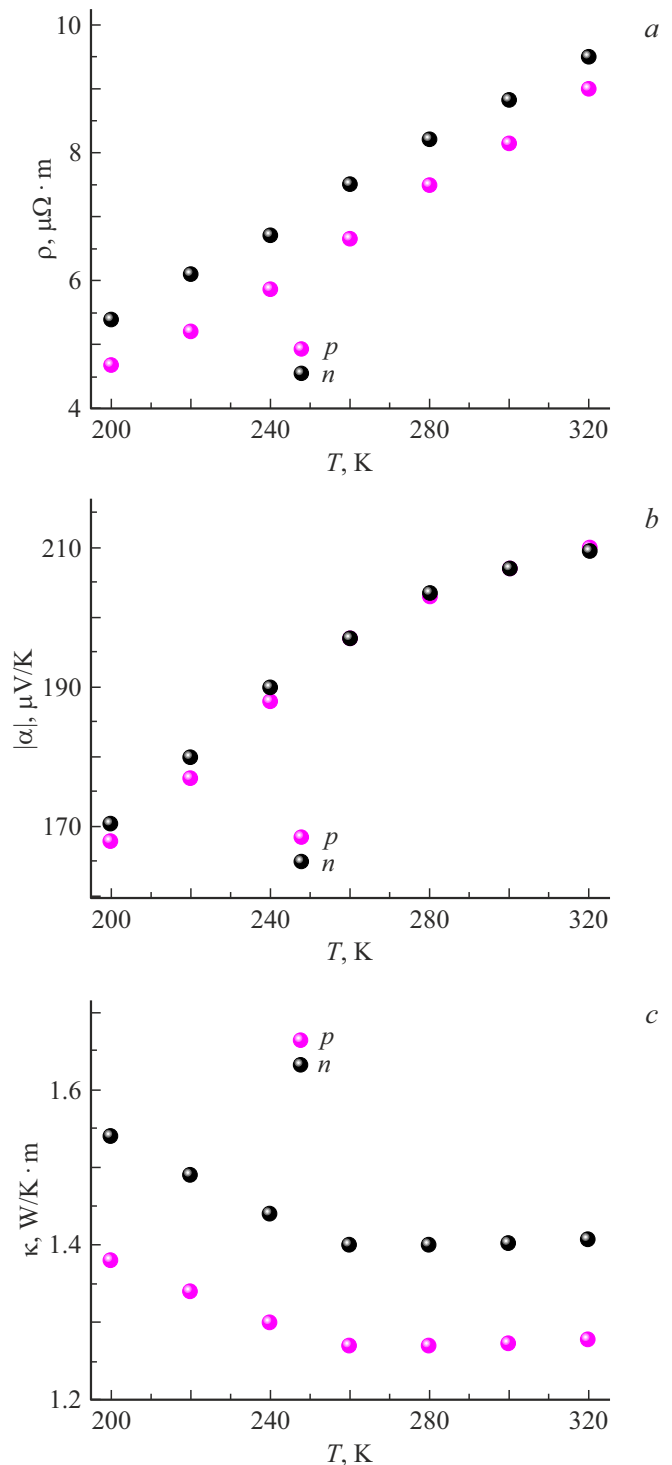


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления (*a*), термоэдс (*b*) и теплопроводности (*c*) термоэлектриков p - и n -типа. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

В расчетах не учитывались контактные сопротивления, потери на теплопереходах, теплопритоки и характер теплообмена газового потока в змеевике, припаянном к холодным спаев термоэлементов. Поэтому реальное

Параметры термоэлектрического охладителя при начальной температуре газа $T_0 = 300$ К, температуре горячих спаев $T_h = 305$ К, теплоемкости охлаждаемого газового потока 0.085 W/K, высоте ветвей термоэлемента $L = 1.8$ mm, рабочем токе $I = 10$ А

Номер термоэлемента	ΔT , К	S , mm ²	P , W
1	10.1	9.61	1.37
2	18.4	7.61	2.73
3	25.4	6.60	4.08
4	31.3	5.97	5.42
5	36.4	5.54	6.76
6	40.8	5.23	8.09
7	44.6	4.99	9.41
8	47.9	4.80	10.73
9	50.7	4.65	12.04
10	53.3	4.53	13.35
11	55.5	4.43	14.66
12	57.4	4.34	15.97
13	59.1	4.27	17.27
14	60.7	4.21	18.57
15	62.0	4.15	19.87
16	63.2	4.11	21.16
17	64.2	4.07	22.46
18	65.1	4.04	23.75
19	65.9	4.01	25.05
20	66.7	3.98	26.34
21	67.3	3.96	27.63
22	67.9	3.94	28.92
23	68.4	3.92	30.21
24	68.8	3.91	31.50
25	69.2	3.89	32.79

Примечание. ΔT — перепад температуры на термоэлементе, S — площадь сечения термоэлемента, P — суммарная выделяемая на горячих спаев мощность.

охлаждение газа будет несколько меньше расчетного. Результаты расчета оптимального охладителя газового потока с теплоемкостью 0.085 W/K (4 l/min) приведены в таблице.

Из расчетов видно, что начиная с 23-го термоэлемента прирост ΔT становится меньше 0.5 К. Поэтому целесообразно ограничиться двадцатью тремя термопарами в модуле. Площадь сечения ветвей у начальных термоэлементов существенно уменьшается с увеличением номера. Последние термоэлементы работают в режиме, близком к режиму ΔT_{\max} , и приближают T_c к минимально возможной, их сечение почти не меняется.

Описанный охладитель, собранный из термоэлементов с разными площадями сечений ветвей, обеспечивает максимальное охлаждение газового потока, но его трудно изготовить. Поэтому в секционированном охладителе использовались термоэлементы с сечением ветвей, приблизительно равным сечению последних двух третей термопар.

Ветви термоэлементов изготовлены из халькогенидов висмута и сурьмы. Монокристаллы этих термоэлектри-

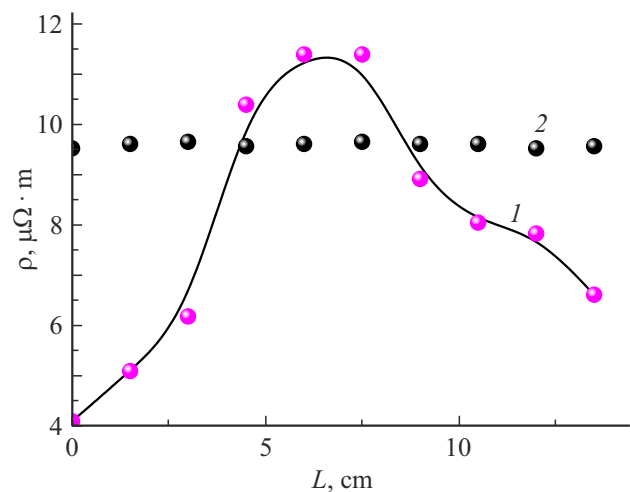


Рис. 2. Распределение удельного электросопротивления вдоль кристаллического (1) и экструдированного (2) образцов.

ков обладают большей термоэлектрической эффективностью, чем прессованные материалы [6]. Однако обнаружилась сильная неоднородность термоэлектрических свойств имевшихся образцов (рис. 2). Поэтому для изготовления охладителя использовалось экструдированное вещество, обладающее большей однородностью свойств.

Созданный термоэлектрический охладитель представляет собой неразборную конструкцию из 23 термоэлементов. Высота ветвей равна 1.8 mm, площадь поперечного сечения каждой ветви 4 mm². Рабочая (охлаждаемая) поверхность теплоперехода разделена на семь секций (рис. 3). На термоэлементы 90 -градусным припоем напаян единый трубчатый змеевик, а проходящий газ вначале охлаждается секциями, содержащими четыре термоэлемента. Электропитание охладителя осуществляется постоянным током 10 А.

Результаты тестирования охладителя представлены на рис. 4, где показаны перепады температур на холодных спаев секций, измеренные микротермопарами ТМК с погрешностью менее 2.5% . На том же рисунке



Рис. 3. Внешний вид охладителя с залуженной охлаждаемой поверхностью.

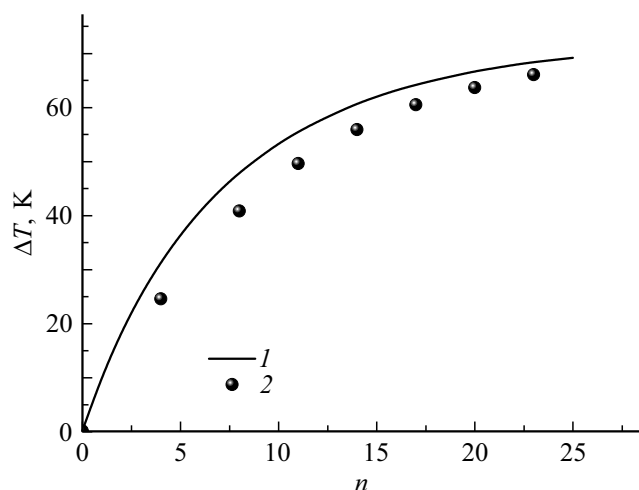


Рис. 4. Распределение перепадов температуры на термоэлементах, составляющих охладитель (n — номер термоэлемента в охладителе). 1 — расчетная зависимость для оптимального модуля, 2 — экспериментальная зависимость для созданного модуля.

для сравнения приведена соответствующая теоретическая кривая. Наблюдаемые отклонения экспериментальных результатов от расчетных вполне ожидаемы. Это объясняется приближенностью расчетов, в которых не учитывались температурные зависимости кинетических коэффициентов, контактные сопротивления, потери на теплопереходах и теплопритоки.

Таким образом, в настоящей работе показано, что использование секционированных термоэлектрических охладителей для охлаждения малых газовых потоков повышает эффективность их охлаждения.

Благодарности

Автор выражает благодарность Ю.В. Иванову за помощь в проведении теоретических расчетов.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W.-Y. Chen, X.-L. Shi, J. Zou, Z.-G. Chen, *Small Meth.*, **6**, 2101235 (2022). DOI: 10.1002/smt.202101235
- [2] M. Sasidharan, M.F.M. Sabri, S.F.W.M. Hatta, S. Ibrahim, *Int. J. Green Energy*, **21**, 283 (2023). DOI: 10.1080/15435075.2023.2195924
- [3] A.T. Baheta, K.K. Looi, A.N. Oumer, K. Habib, *Int. J. Air-Cond. Refrig.*, **27**, 1920002 (2019). DOI: 10.1142/S2010132519300027
- [4] А.Ф. Иоффе, Л.С. Стельбанс, Е.К. Иорданишвили, Т.С. Ставицкая, *Термоэлектрическое охлаждение* (Изд-во АН СССР, М., 1956).

- [5] А.И. Бурштейн, *Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств* (Физматгиз, М., 1962).
- [6] S. Miura, Y. Sato, K. Fukuda, K. Nishimura, K. Ikeda, *Mater. Sci. Eng. A*, **277**, 244 (2000). DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00539-0