



Черкез Р.Г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЭЛЕМЕНТА С РАЗВИТЫМ БОКОВЫМ ТЕПЛООБМЕНОМ

Черкез Р.Г.

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

-
- Изложены результаты исследований термоэлемента с развитым боковым теплообменом, который работает в режиме генерации электрической энергии. На основе физической модели создана трехмерная компьютерная модель генераторного термоэлемента с развитым боковым теплообменом и исследовано влияние конструктивных и теплофизических параметров на его энергетические характеристики. Показаны возможности повышения КПД на 20 – 30% и удельной электрической мощности на 40 – 50% сравнительно с традиционными термоэлементами.

Введение

Самое широкое применение имеют термоэлектрические генераторы [1, 2], которые используют тепло сгорания органического топлива и выполненные на основе классической модели термоэлемента, с которой компонуется модуль (рис. 1). Такая тепловая схема обуславливает недостаточную эффективность преобразования энергии. Это обусловлено тем, что от термогенератора отводятся газы, температура которых близка к температуре горячих спаев термобатарей и, соответственно, почти половина энергии горячих газов не используется. Поэтому, выполненные по такой классической схеме, термоэлектрические генераторы имеют довольно низкий КПД.

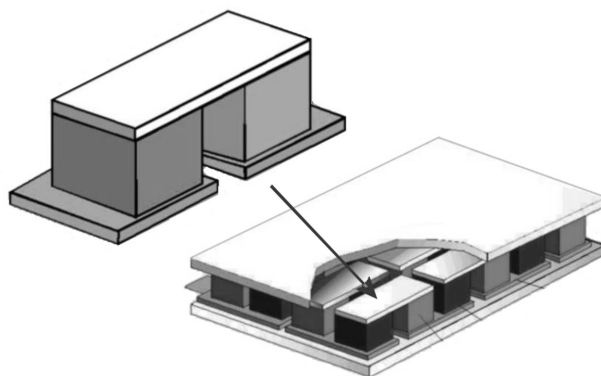


Рис. 1. Схема классического термоэлемента.

Перспективное направление повышения эффективности термоэлектрического преобразования энергии – использование боковых поверхностей веток для отбора низкопотенциальной тепловой энергии от теплоносителя [3]. Это дает возможность вследствие наличия теплообмена теплоносителя с «холодными» частями веток отдать больше тепловой энергии материалу и преобразовать ее в электрическую энергию. Компьютерные расчеты таких моделей термоэлементов в одномерном приближении [4] подтвердили возможность улучшения КПД на 30%.

Однако исследование таких термоэлементов в трехмерном случае с учетом температурных зависимостей параметров материала не было проведено.

Цель предлагаемой работы – создание и исследование 3-d компьютерной модели генераторного термоэлемента с развитым боковым теплообменом и определение влияния конструктивных и теплофизических факторов на его энергетические характеристики.

Физическая модель термоэлемента с развитым боковым теплообменом и ее математическое описание; метод решения задачи

На рис. 2. показана физическая модель генераторного термоэлемента, который содержит ветки n - и p -типов проводимости, свойства материала которых изменяются с координатами вследствие зависимости термоэлектрических свойств материала от температуры $T(x)$. Температура теплоносителя, который подводится к горячей стороне и на боковую поверхность веток термоэлемента T_h .

Холодная сторона термостатирована при температуре T_c . Особенностью этого термоэлемента по сравнению с классическим аналогом, является дополнительный подвод тепла на боковую поверхность веток термоэлемента, что дает возможность использовать больше тепла от теплоносителя. С помощью использования этого метода увеличивается площадь теплообмена теплоносителя с термоэлементом, большее количество тепла успевает передаться термоэлементу: повышается эффективность преобразования энергии. Поскольку уровень коэффициента добротности, несмотря на создание материалов с заведомо заданными свойствами, в течение последних лет не возрастает, исследуются новые способы повышения эффективности термоэлектрического преобразования энергии, одним из которых является создание новых тепловых схем термогенераторов.

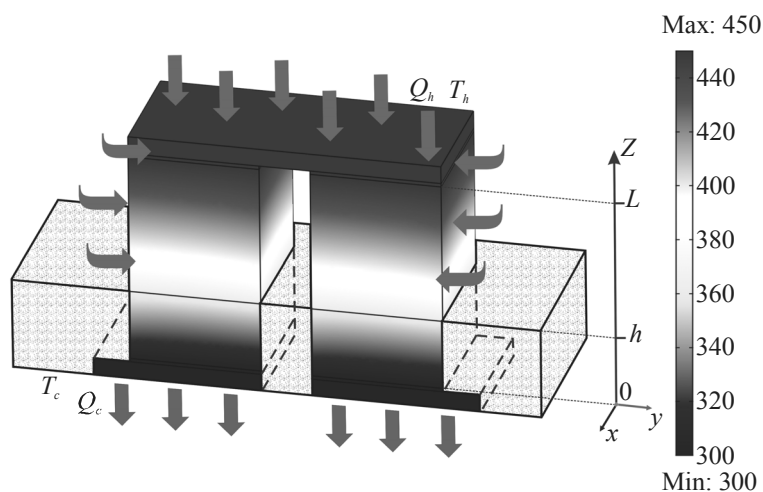


Рис. 2. Схема генераторного термоэлемента с развитым боковым теплообменом.

Распределение температур в материале веток T можно найти из решения дифференциального уравнения теплопроводности с учетом температурных зависимостей параметров материала

$$\nabla \kappa \nabla T + \frac{\vec{i}^2}{\sigma} - \tau \vec{i} \nabla T = 0, \quad (1)$$

где τ – коэффициент Томсона; κ – коэффициент теплопроводности; σ – коэффициент электропроводности; \vec{i} – вектор плотности электрического тока.

Особенностью модели является наличие интенсивного теплообмена с боковой поверхностью ветки S_b , что описывается законом Ньютона-Рихмана:

$$q|_{S_b} = \alpha_T (T_h - T); \quad (2)$$

$q|_{S_b}$ – тепловой поток, который поступает на боковую поверхность ветки; T_h – температура газа; α_T – коэффициент теплоотдачи.

Для изолированной части ветки термоэлемента справедливо такое соотношение:

$$q|_{S_{is}} = 0. \quad (3)$$

Основная задача исследования – нахождение оптимальных распределений температур, тепловых потоков и энергетических характеристик термоэлемента с развитым боковым теплообменом, при которых достигается максимальный КПД для заданных температур холодных спаев T_c , теплоносителя T_h .

Задача достижения максимума КПД

$$\eta = \frac{W}{Q_H}, \quad (4)$$

где $W = Q_H - Q_c$ электрическая мощность генерированная термоэлементом, Q_H – тепло, которое поступает в термоэлемент, Q_c – отводимое тепло.

Поступающее в термоэлемент тепло будет суммой теплот, поступающих на горячий спай $Q|_h^k$ и на боковую поверхность ветки $Q|_h^\sigma$:

$$Q_H = Q|_h^k + Q|_h^\sigma, \quad (5)$$

где

$$Q|_h^k = \int_{S_k} \vec{q} d\vec{S}_k, \quad (6)$$

$$Q|_h^\sigma = \int_{S_\sigma} \vec{q}|_{S_\sigma} d\vec{S}, \quad (7)$$

q – плотность потока тепла, которая определяется выражением

$$\vec{q} = \alpha \vec{i} T - k \nabla T. \quad (8)$$

Количество тепла, которое отводится термоэлементом, определяется по формуле

$$Q_c = \int_{S_c} \vec{q} d\vec{S}_c. \quad (9)$$

3-d компьютерная модель термоэлемента в пакете Comsol Multiphysics

Программа COMSOL Multiphysics основана на системе дифференциальных уравнений в частных производных. Есть три математических способа задания таких систем:

- коэффициентная форма, предназначенная для линейных и близких к линейным моделям;
- генеральная форма для нелинейных моделей;
- слабая форма (Weak form) для моделей с PDE (уравнениями в частных производных) на границах, ребрах или для моделей, которые используют условия со смешанными

производными по времени [5].

Для расчетов моделей термоэлектрических элементов целесообразно использовать „слабую форму” в виде PDE на границах, поскольку они дают возможность задать необходимые условия на поверхностях термоэлемента. Используя вышеуказанную форму, создана модель обычного (классического) термоэлемента, в котором теплообмен происходит на его торцевых поверхностях. Для начала была построена геометрия термоэлемента, который включает в себя ветки термоэлемента, коммутационные пластины, а также переходные пласты для приближения свойств компьютерной модели к реальной. После разбития модели методом конечных элементов [6] термоэлемент приобретет вид, показанного на рис. 3, каждая из частей модели разбивается независимо от соседних составляющих, поэтому наименьшие элементы получились на тонких переходных слоях термоэлемента. Характеристики разбития приведены в табл. 1.

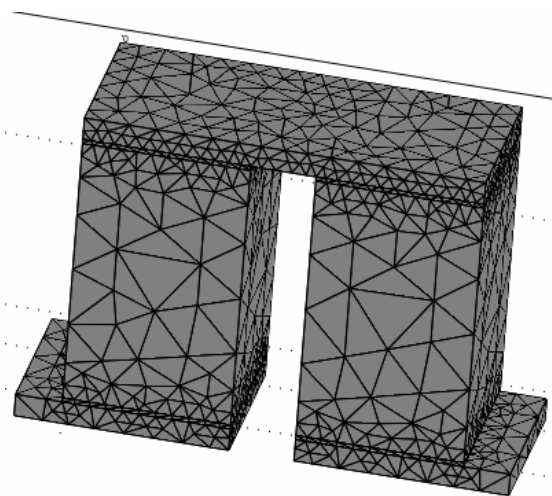


Рис. 3. Вид классического термоэлемента после разбития.

Таблица 1

Характеристики разбития модели классического термоэлемента

Количество степеней свободы	45140
Количество узловых точек	3192
Количество элементов	14936
Количество граней	600
Количество поверхностей	48
Минимальное качество элементов	0.233

Классическая модель создана для проверки соответствия компьютерной модели моделям реальных исследованных термоэлементов и сопоставления их параметров при одинаковых условиях эксплуатации. Следующий этап – задание коэффициентов матрицы, которые определяют изотропность или анизотропность свойств смоделированного объекта. Для данного случая они показаны в табл. 2, значение данных коэффициентов получены эмпирически.

Для задания граничных условий на поверхностях термоэлемента используются граничные условия двух видов:

– граничные условия Дирихле (граничные условия первого рода) – граничные условия

обычного дифференциального уравнения или дифференциального уравнения в частных производных, в котором на границе определяется значение неизвестной функции. В случае уравнения в частных производных граничные условия задаются на определенном контуре или поверхности, а потому могут быть функцией, определенной на этом контуре или поверхности;

– граничные условия Неймана (граничные условия второго рода) – граничные условия обычного дифференциального уравнения или дифференциальных уравнений в частных производных, которые определяют на границе области как производную от искомой функции.

Таблица 2

Коэффициенты диффузии и их значение

Название	Значение
c11	$\kappa + \sigma \cdot \alpha \cdot u + \sigma \cdot \alpha \cdot \alpha \cdot T$
c12	$\sigma \cdot u + \sigma \cdot \alpha \cdot T$
c21	$\sigma \cdot \alpha$
c22	σ

Как для обычного термоэлемента, так и для термоэлемента с развитым боковым теплообменом на холодной стороне использовались граничные условия Дирихле для температуры и потенциала, а горячая сторона задана условиями Неймана (зависимость от температуры теплоносителя и коэффициента теплоотдачи).

Для описания свойств материалов, использованных в модели, для каждого элемента модели записываются значения кинетических коэффициентов α , σ , κ – коэффициенты термоЭДС, электро- и теплопроводности, которые являются функциями температуры T и заданы полиномами, приведенными в табл. 3, где 2-ой столбец соответствует свойствам коммутации, 3-ий – свойствам теплоперехода; в табл. 4 и 5 записаны свойства веток n - и p -типов проводимости для материала на основе Bi_2Te_3 (рис. 4).

Таблица 3

Свойства коммутации и теплоперехода

α	0	0
σ	60000000	500000
κ	400	4000

Таблица 4

Свойства ветки n -типа проводимости

α_n	$1.03 \cdot 10^{-6} \cdot (-184.14286 + 2.14929 \cdot T - 0.00383 \cdot T^2 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot T^3)$
σ_n	$100 \cdot (4528.57143 - 13.78929 \cdot T + 0.01293 \cdot T^2)$
κ_n	$0.1 \cdot (127.20238 - 0.73409 \cdot T + 0.00151 \cdot T^2 - 8.88889 \cdot 10^{-7} \cdot T^3)$

Таблица 5

Свойства ветки p -типа проводимости

α_p	$1.03 \cdot 10^{-6} \cdot (369.71429 - 2.18595 \cdot T + 0.00729 \cdot T^2 - 7.3333 \cdot 10^{-6} \cdot T^3)$
σ_p	$100 \cdot (7856.90476 - 34.8127 \cdot T + 0.05638 \cdot T^2 - 3.11111 \cdot 10^{-5} \cdot T^3)$
κ_p	$0.1 \cdot (70.80476 - 0.31257 \cdot T + 0.000449524 \cdot T^2)$

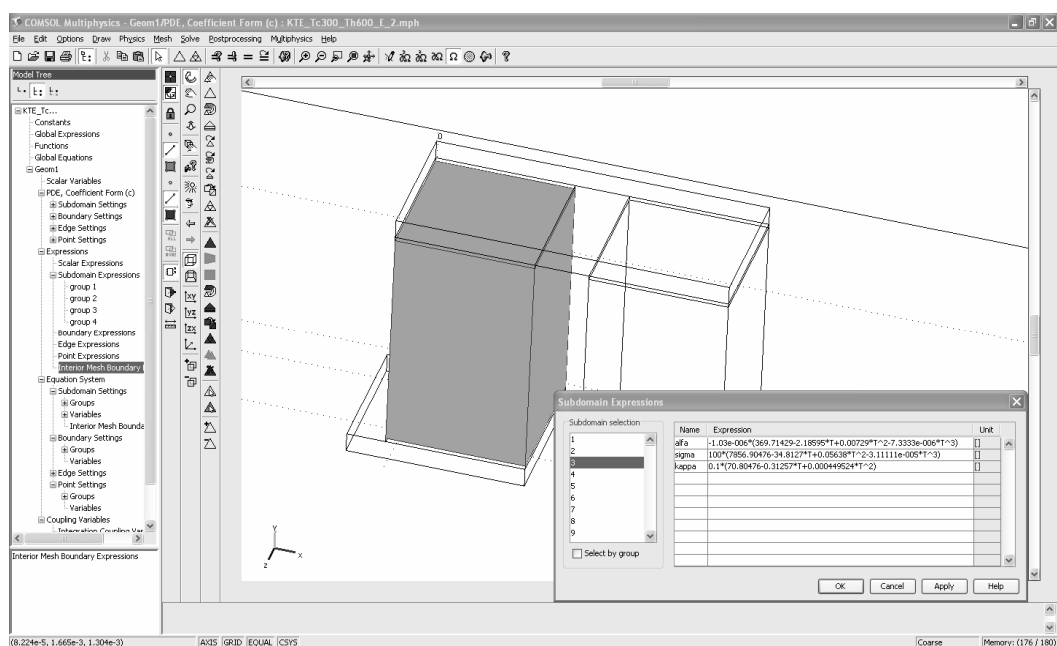


Рис. 4. Пример задания свойств объектов в графическом интерфейсе COMSOL Multiphysics.

Расчеты энергетических параметров нуждаются во введении дополнительных уравнений для определения тока и тепловых потоков, которые подаются и отводятся от термоэлемента (табл. 6). Следующими расчетами интегрированием по поверхности находим значение тока, который проходит через термоэлемент, также входных и исходных тепловых потоков, необходимых для определения энергетических характеристик термоэлемента, в частности, коэффициента полезного действия (КПД) и электрической мощности.

Таблица 6

Использованные формулы

Переменная	Значение
I_x	$-\sigma \cdot u_x - \sigma \cdot \alpha \cdot T_x$
I_y	$-\sigma \cdot u_y - \sigma \cdot \alpha \cdot T_y$
I_z	$-\sigma \cdot u_z - \sigma \cdot \alpha \cdot T_z$
I_n	$n_x \cdot I_x + n_y \cdot I_y + n_z \cdot I_z$
Q_x	$-k \cdot T_x - \alpha \cdot T \cdot \sigma \cdot (u_x + \alpha \cdot T_x)$
Q_y	$-k \cdot T_y - \alpha \cdot T \cdot \sigma \cdot (u_y + \alpha \cdot T_y)$
Q_z	$-k \cdot T_z - \alpha \cdot T \cdot \sigma \cdot (u_z + \alpha \cdot T_z)$
Q_n	$n_x \cdot Q_x + n_y \cdot Q_y + n_z \cdot Q_z$

Методом конечных элементов в среде пакета прикладных компьютерных программ Comsol Multiphysics осуществлено моделирование термоэлемента для материалов на основе Bi_2Te_3 с максимальным значением термоэлектрической добротности на уровне $2.8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ при комнатной температуре. Учтено наличие контактного и коммутационного сопротивлений, зависимости кинетических коэффициентов материалов от температуры. Исследовано влияние условий теплообмена, конструктивных параметров термоэлемента и изоляции боковой поверхности на энергетические характеристики.

Компьютерное исследование энергетических характеристик термоэлементов на основе материала Bi_2Te_3

Для расчетов использованы зависимости параметров материалов $\alpha(T)$, $\sigma(T)$, $\kappa(T)$, полученные путем аппроксимации методом наименьших квадратов, приведенные на рис. 5. Для ветки n -типа проводимости максимум термоЭДС проявляется для температуры близкой 400 К, электропроводность имеет выраженный минимум при 500 К, теплопроводность с ростом температуры возрастает. Для ветки p -типа наблюдается аналогичная ситуация.

Расчеты термоэлементов осуществлялись по таким алгоритмам:

- разбиение термоэлемента методом конечных элементов;
- задание граничных условий на поверхностях термоэлемента (температура, потенциал);
- определение ЭДС, генерируемой термоэлементом;
- возвращение к граничным условиям, задание электрического сопротивления;
- повторный расчеты модели, определение распределения температуры;
- интегрирование поверхностей по току и тепловым потокам, обнаружение их значений, расчеты электрической мощности, которую генерирует термоэлемент;
- расчеты КПД термоэлемента с использованием величин, полученных в предыдущих пунктах.

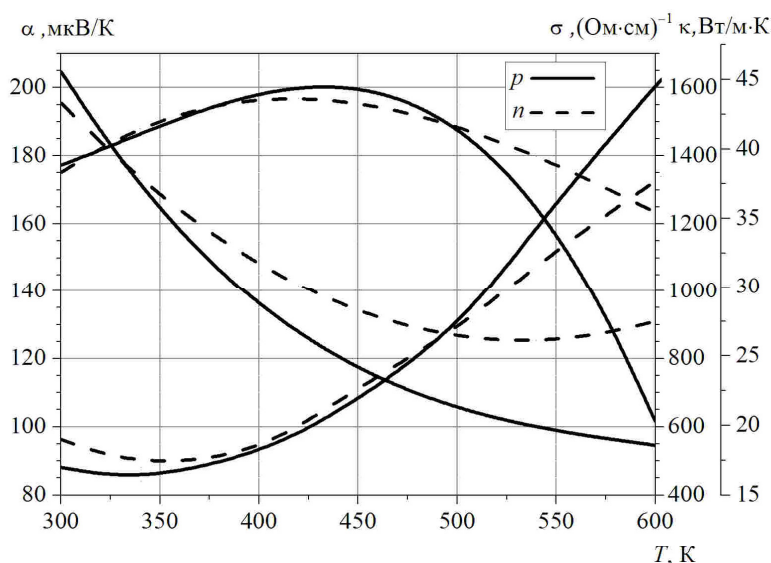


Рис. 5. Зависимость термоЭДС, электро- и теплопроводности от температуры.

На рис. 6 представлен график зависимости КПД и мощности классического термоэлемента от тока, проходящего через него, для разных температур горячей стороны. Как видно из графика, максимумы КПД и электрической мощности немного смещены один относительно другого во всех трех случаях. КПД возрастает при меньших температурах, однако его максимум не достигает значений, которые получаются при высших температурах. Максимум КПД достигается при температуре горячего спая термоэлемента около 500 К и составляет 6.15% при токе 1.8 А. Относительно электрической мощности, во всех показанных случаях наблюдается равномерное изменение значений, максимум мощности при температуре 650 К составляет 0.14 Вт при токе 2.53 А.

Сравнение полученных результатов с результатами экспериментальных исследований классических термоэлементов показало приближенные значения с различием в 10 – 15%.

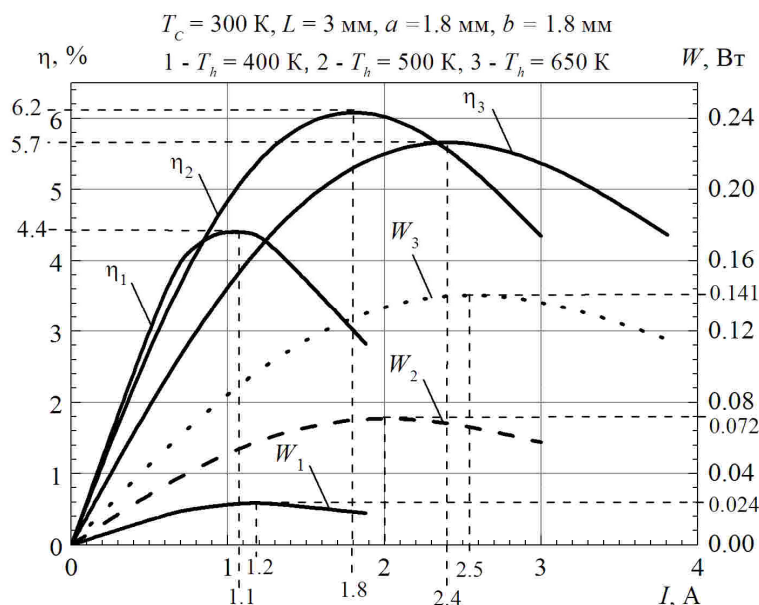
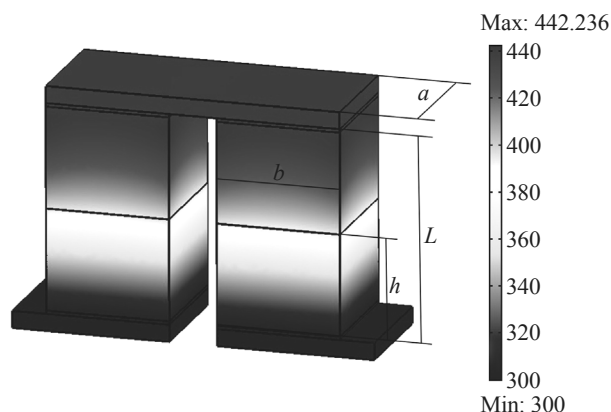


Рис. 6. Результаты расчетов классического термоэлемента.

Для термоэлемента с развитым боковым теплообменом методика расчетов и использованные уравнения аналогичны, как и для случая классического термоэлемента. Основным отличием моделей является использование боковой поверхности ветки для дополнительного отбора тепла от теплоносителя как один из путей повышения эффективности термоэлектрического преобразования энергии.

Особенностью компьютерной модели термоэлемента с развитым боковым теплообменом является деление веток термоэлемента на части, для одной из частей поверхность будет полностью теплоизолированной (как в случае обычного термоэлемента), к поверхности другой части подводится тепло по тому же закону, что и к горячему спаю. Общий тепловой поток, который в дальнейшем будет использоваться для расчетов энергетических характеристик, теперь является суммой составляющих: теплового потока на горячий спай термоэлемента и теплового потока на боковую поверхность ветки.

Проведя расчеты термоэлемента, к примеру, для температуры холодного спаю $T_c = 300 \text{ K}$, температуры источника тепла $T_h = 900 \text{ K}$, $L = 3 \text{ мм}$, $a = 1.8 \text{ мм}$, $b = 1.8 \text{ мм}$, $\alpha_T = 0.010 \text{ Вт/см}^2\cdot\text{K}$ для конвекции на горячую сторону термоэлемента и $\alpha_T = 0.005 \text{ Вт/см}^2\cdot\text{K}$ для конвекции на боковую поверхность веток с высотой изоляции $L/2$, получим распределение температур, изображенное на рис. 7.

Рис. 7. Распределение температур T в термоэлементе с развитым боковым теплообменом.

Как видим из рисунков, за счет поступления дополнительного тепла на боковую поверхность веток термоэлемента, изотермические поверхности немного изгибаются в сторону увеличения температуры (рис. 8), изотермические поверхности в части ветки, которая находится в изолированной области – несущественно меняют свою форму. Полученное графическое распределение изотерм соответствует тепловым процессам в термоэлементе, который указывает на корректность решения задачи.

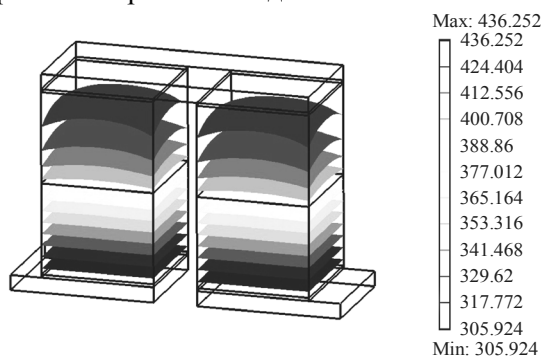


Рис. 8. Изотермические поверхности в термоэлементе с развитым боковым теплообменом.

Результаты расчетов трехмерной компьютерной модели термоэлемента с развитым боковым теплообменом

Результаты расчетов 3-d модели, построенной в пакете Comsol Multiphysics, показано на рис. 9, где приведены зависимости КПД и мощности от высоты изоляции боковой поверхности ветки для температуры теплоносителя 700 К. Отношение уровней КПД термоэлемента с развитым боковым теплообменом для высоты изоляции ветки $\frac{1}{2}L$ и классического термоэлемента (на рисунке нижняя штрихованная горизонталь) составляет около 36%. Электрическая мощность на 77% превосходит значение классического термоэлемента. Правая вертикальная шкала на рисунке указывает на температуру горячего спаев термоэлемента, которая в свою очередь является наивысшей в его объеме. Разность в температурах горячих спаев термоэлементов составляет около 60 К в пользу термоэлемента с развитым боковым теплообменом, который свидетельствует о лучшем отборе тепла от теплоносителя, а следовательно, лучшую эффективность прибора.

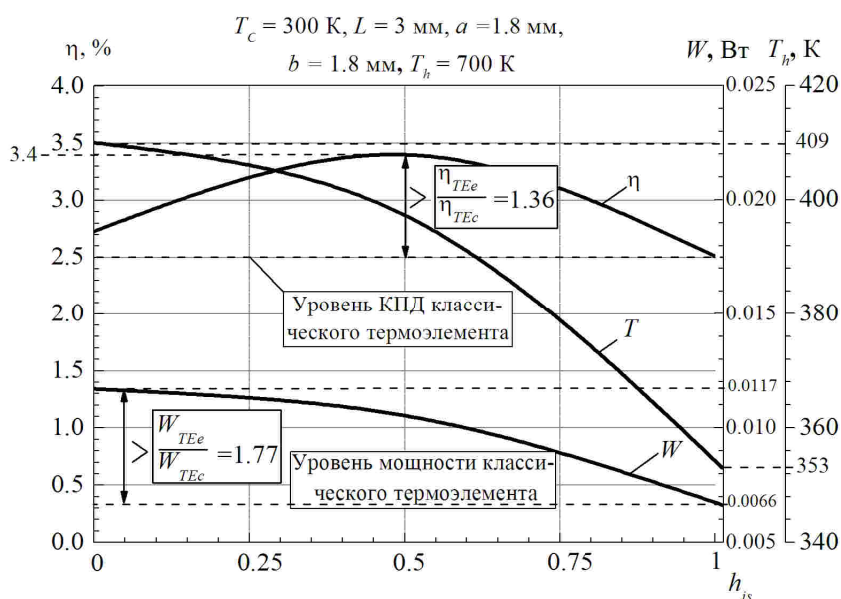


Рис. 9. Результат расчетов термоэлемента с развитым боковым теплообменом для температуры теплоносителя $T_h = 700$ К.

На рис. 10 представлены расчеты термоэлемента с боковым теплообменом, как и в предыдущем случае, но при температуре теплоносителя 900 К выигрыш в КПД составляет около 28%, мощности более чем в 1.56 раза. Для этого термоэлемента при температуре теплоносителя близкой к 900 К целесообразно использовать изоляцию веток на уровне не меньше 0.05 высоты ветки, поскольку при меньшей высоте изоляции энергетические характеристики данного типа термоэлементов хуже, чем у классических аналогов.

Результаты расчетов энергетических характеристик для температуры газа на входе 1100 К (температура выхлопных газов бензинового двигателя) представлены на рис. 11. Наблюдается улучшение КПД на 22%, мощность приблизительно на 42% выше, чем у классического аналога, температура горячей стороны выше на 100 К. Термоэлемент эффективный с использованием изоляции не менее 0.15 высоты ветки.

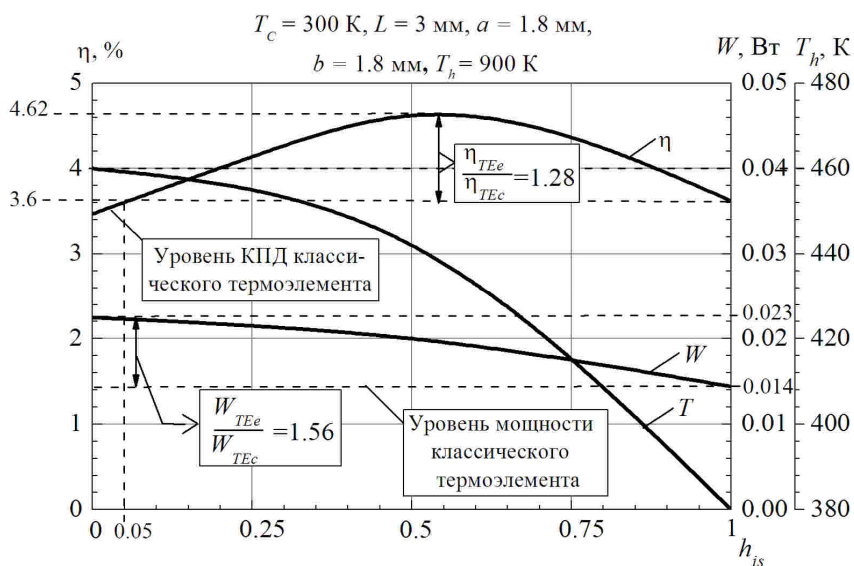


Рис. 10. Результат расчетов термоэлемента с развитым боковым теплообменом для температуры теплоносителя $T_h = 900 \text{ К}$.

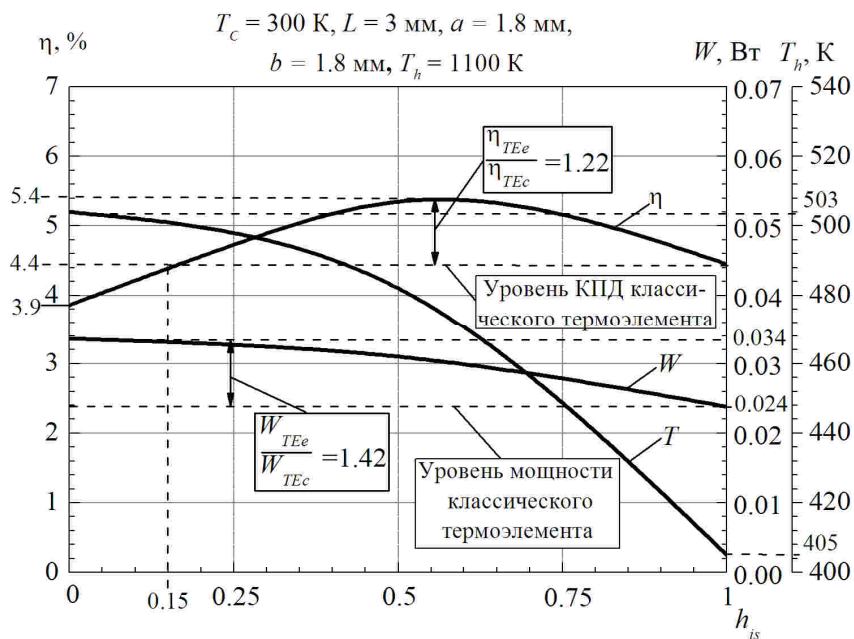


Рис. 11. Результат расчетов термоэлемента с развитым боковым теплообменом для температуры теплоносителя $T_h = 1100 \text{ К}$.

Выводы

1. Создана и исследована 3-d модель термоэлемента с развитым боковым теплообменом в режиме генерации электрической энергии.
2. Для материалов на основе Bi_2Te_3 исследовано влияние высоты веток, величины изоляции веток и значения электрического тока на энергетические характеристики термоэлемента – КПД и генерируемую электрическую мощность.
3. В случае использования материалов на основе Bi_2Te_3 и работе термоэлемента при начальной температуре теплоносителя 900 К с термостатированными холодными спаями при температуре 300 К сравнение по термодинамической эффективности преобразования энергии с традиционными термоэлементами показало возможность повышения КПД на 20 – 30% и генерируемой мощности на 40 – 50%.

Автор выражает благодарность Л.И. Анатычуку за полезные обсуждения физической модели и содействие выполнению этой работы.

Литература

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Л.И. Анатычук – К.: Наук. думка, 1979. – 768 с.
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. Способ повышения КПД термоэлектрического генератора (холодильника). АС СССР №144883, Зорин И. В., Заявлено 22.06.1961. Опубликовано 18.10.1968
4. Черкез Р.Г. Термоэлементы с внутренним и боковым теплообменом / Р.Г. Черкез // Термоэлектричество. – 2003. – №1. – С. 71 – 79.
5. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL / FEMLAB: Методическое пособие / Г.В. Бирюлин – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 78 с.
6. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
7. Анатычук Л.И. Проницаемый термоэлемент в режиме генерации электрической энергии / Л.И. Анатычук, Р.Г. Черкез // Термоэлектричество. – 2003. – №2. – С. 36 – 47.
8. Anatychuk L.I., Vikhor L.N. Generator modules of segmented thermoelements // Energy Conversion and Management. – 2009. – V. 50. – 9. – P. 2366 – 2372.
9. Calliat T., Fleurial J.-P., Snyder G.J., Zoltan A., Zoltan D., Borshchevsky A. Development of high efficiency thermoelectric unicouple for power generation applications // Proc. of the XVIIIth International Conf. on Thermoelectrics. - Baltimore (USA). – 1999. – P. 473 – 476.
10. Анатычук Л.И. Секционные термоэлектрические генераторы на органическом топливе / Л.И. Анатычук, О.Я. Лусте, В.Я. Михайловский // Термоэлектричество. – 2005. – №4. – С. 21 – 26.

Поступила в редакцию 20.08.2012.