

Черкез Р.Г., Феняк П.П., Демьянюк Д.Д.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

---

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОГО ТЕРМОЭЛЕМЕНТА ОХЛАЖДЕНИЯ

---

*В работе представлены результаты компьютерных исследований 3D модели проницаемого термоэлемента охлаждения потоков жидкостей и газа. Приведена физическая модель и конструкция проницаемого термоэлемента, представлено ее математическое описание. Создан метод расчета термоэлемента на основе пакета прикладных компьютерных программ Comsol Multiphysics. Рассчитаны зависимости энергетических характеристик термоэлемента из материалов на основе Bi-Te-Se-Sb от скорости прокачки теплоносителя и напряжения тока питания. Определены оптимальные значения скорости теплоносителя на входе в термоэлемент, при которых значения холодопроизводительности и холодильного коэффициента максимальны. Сравнение энергетических характеристик охлаждения жидкости и воздуха показало лучшие их значения при охлаждении воды на 30 – 50 %.*

**Ключевые слова:** проницаемый термоэлемент, моделирование, термодинамические характеристики, полупроводники, холодопроизводительность, холодильный коэффициент.

*The results of computer research on a 3D model of permeable thermoelement for cooling liquid and gas flows are presented. The physical model and design of permeable thermoelement is described, its mathematical description is given. A method for thermoelement calculation based on the Comsol Multiphysics package of applied computer programs has been created. The energy characteristics of thermoelement of Bi-Te-Se-Sb based materials have been calculated as a function of heat carrier pumping rate and supply voltage. The optimal values of hear carrier rate at thermoelement inlet whereby the values of cooling capacity and coefficient of performance will be maximum have been determined. Comparison of the energy characteristics of liquid and air cooling has shown their 30 to 50 % better values on water cooling.*

**Key words:** permeable thermoelement, simulation, thermodynamic characteristics, semiconductors, cooling capacity, coefficient of performance.

### Введение

Наиболее широкое применение термоэлектрических преобразователей энергии основано на использовании термпарного элемента [1, 2], эффективность преобразования энергии которого определяется параметром добротности использованных материалов  $Z$ . Поэтому поиск материалов с максимальным значением параметра добротности становится основной задачей термоэлектрического материаловедения. Однако, несмотря на интенсивные исследования в этом направлении, существенного роста добротности за последние 20 – 30 лет не наблюдается [3, 4]. Максимальные значения безразмерного параметра добротности термоэлектрических материалов промышленного производства остаются на уровне 1 – 1.2. Поэтому для улучшения эффективности необходимо использование новых, нетрадиционных подходов, которые состоят

в применении нетрадиционных физических моделей термоэлементов, являющихся основной составляющей термоэлектрического преобразователя энергии.

Одним из них является использование термоэлементов с развитой внутренней поверхностью теплообмена – проницаемых термоэлементов. В таких термоэлементах теплообмен с источником и стоком тепла происходит не только на спаях, а и в объеме ветви. Уже первые теоретические [5] и экспериментальные [6] исследования охлаждения потоков газов показали их перспективность, возможность улучшения эффективности преобразования энергии в 1.3 – 1.4 раза.

Однако такие исследования были проведены для одномерной модели, которая недостаточно точно описывает сопряженные процессы теплопереноса в системе твердое тело-теплоноситель. Поэтому необходимо создание и исследование более реальной 3D модели проницаемого термоэлемента, что является целью данной работы.

### Физическая модель и ее математическое описание

Физическая модель проницаемого термоэлемента, у которого теплообмен между источником и стоком тепла происходит не только через коммутационные пластины, но и в объеме ветви, приведена на рис. 1. Она включает ветви  $n$ - и  $p$ -типа проводимости 1, изготовленные из материалов на основе  $Bi-Te-Se-Sb$ , которые вместе с отверстиями в коммутационных пластинах 3 образуют систему каналов для прокачки теплоносителя – воды. Модель учитывает наличие переходного слоя 2, обусловленного соединением коммутационных пластин с ветвями термоэлемента, который имеет свойства припоя. Материал ветвей является однородным и изотропным с известными температурными зависимостями: электропроводности  $\sigma(T)$ , коэффициента термоЭДС  $\alpha(T)$ , теплопроводности  $\kappa(T)$ . В термоэлектрической среде учтены объемные эффекты Томсона, Джоуля-Ленца и приконтактного эффекта Пельтье. Температура теплоносителя на входе в термоэлемент принималась равной температуре горячих спаев.

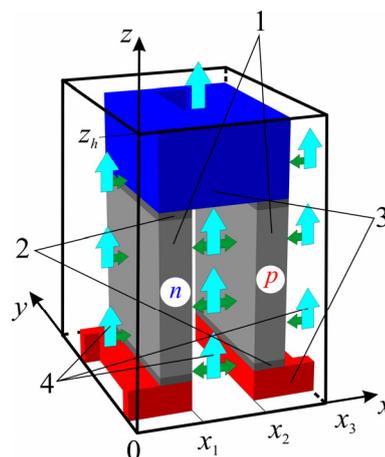


Рис. 1. Физическая модель проницаемого термоэлемента: 1 – ветви  $n$ - и  $p$ -типа проводимости; 2 – переходный слой, обладающий свойствами припоя; 3 – коммутационные пластины; 4 – теплоноситель.

Теплообмен на боковой поверхности ветвей 1, коммутационных пластин 3 и переходного слоя 2, находящихся в тепловом контакте с теплоносителем 4, описывается законом Ньютона-Рихмана:

$$q_0 = \alpha_T(t - T), \quad (1)$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент теплообмена,  $T$  – температура термоэлемента,  $t$  – температура теплоносителя.

Система уравнений, описывающая распределение температуры и потенциала в термоэлектрической среде, описывается фундаментальными законами сохранения энергии и носителей тока [7]:

$$\vec{\nabla} \vec{W} = 0, \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \vec{i} = 0, \quad (3)$$

где  $\vec{W} = \vec{q} + U\vec{i}$  – плотность потока энергии.

Используя обобщенные законы Фурье и Ома для термоэлектрической среды

$$\vec{q} = -\kappa \vec{\nabla} T + \alpha \vec{i} T, \quad (4)$$

$$\vec{i} = -\sigma (\vec{\nabla} U + \alpha \vec{\nabla} T), \quad (5)$$

где  $U$  – потенциал,  $\kappa$  – коэффициент теплопроводности,  $\alpha$  – коэффициент термоЭДС,  $\sigma$  – электропроводность, можно получить систему дифференциальных уравнений для нахождения распределений температур и потенциалов:

$$\left. \begin{aligned} \vec{\nabla} \kappa \vec{\nabla} T + \frac{i^2}{\sigma} - T \vec{i} \vec{\nabla} \alpha &= 0, \\ \vec{\nabla} (-\sigma (\vec{\nabla} U + \alpha \vec{\nabla} T)) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для описания движения теплоносителя в канале используется система уравнений Невье-Стокса и уравнение непрерывности, а для распределения температуры – уравнение теплопроводности.

Уравнение Невье-Стокса и уравнение непрерывности можно записать в виде [8]:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{d\vec{\mathfrak{G}}}{dt} &= \rho \vec{F} - \vec{\nabla} P + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{\mathfrak{G}} + \frac{1}{3} \mu \vec{\nabla} (\text{div} \vec{\mathfrak{G}}), \\ \text{div} \rho \vec{\mathfrak{G}} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Левая часть первого уравнения (7) представляет собой силу инерции. Первое слагаемое в правой части данного уравнения описывает массовую (объемную) силу, второе – поверхностные силы давления (нормальных напряжений), а последние два слагаемых – касательные составляющие поверхностных сил (сил внутреннего трения).

Теплообмен в жидкости описывается уравнением теплопроводности [9]:

$$\rho C_p \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} + (\vec{\mathfrak{G}} \vec{\nabla}) t \right) = -(\vec{\nabla} \vec{q}) + \sum_{i,j} \Lambda_{ij} S_{ij} - \frac{t}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{\mathfrak{G}} \vec{\nabla}) P \right) + Q, \quad (8)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $C_p$  – теплоемкость жидкости,  $t$  – температура жидкости,  $\vec{\mathfrak{G}}$  – вектор скорости жидкости,  $\vec{q}$  – вектор плотности потока тепла,  $P$  – давление,  $\Lambda_{ij}$  – тензор вязкого напряжения,  $\vec{S}_{ij}$  – тензор скорости деформации;  $Q$  – внутренние источники тепла.

Наибольший практический интерес представляет задача расчета энергетических характеристик термоэлемента в стационарном режиме работы. В этом случае производные по времени в (7) и (8) зануляются. В приближении малого влияния массовых сил несущественного нагрева жидкости за счет внутреннего трения, ее сжатием, а также нагревом жидкости за счет внутренних источников тепла пренебрегаем ввиду их малого вклада по сравнению с термоэлектрическими тепловыми эффектами. В таком приближении, система уравнений Невье-Стокса, непрерывности и теплопроводности запишется в виде:

$$\left. \begin{aligned} -\vec{\nabla} P + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{\mathfrak{G}} + \frac{1}{3} \mu \vec{\nabla} (\text{div} \vec{\mathfrak{G}}) &= 0, \\ \text{div} \rho \vec{\mathfrak{G}} &= 0, \\ \rho C_p (\vec{\mathfrak{G}} \vec{\nabla}) t + \vec{\nabla} q &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Граничные условия для данной задачи (рис. 1), имеют вид:

– для термоэлектрической среды

$$T|_{z=0} = 300 \text{ К}, U|_{z=0} = 0, U|_{x=x_3} = U_0, q|_{S_b} = \alpha_T(t-T), U|_{S_b} = 0, \quad (10)$$

– для теплоносителя

$$\vartheta|_{z=0} = \vartheta_0, P|_{z=z_h} = 0, \vartheta|_{S_b} = 0, t|_{z=0} = 300 \text{ К}, q|_{S_b} = \alpha_T(T-t), \quad (11)$$

где  $\vartheta_0$  – начальная скорость теплоносителя,  $U_0$  – заданное значение потенциала,  $S_b$  – боковая поверхность термоэлемента.

### Реализация поставленной задачи в пакете прикладных компьютерных программ Comsol Multiphysics

Для проведения расчета был выбран пакет прикладных компьютерных программ Comsol Multiphysics [10]. Общий вид записи уравнения в частных производных в коэффициентной форме следующий:

$$e_a \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla}(-c\vec{\nabla}\vec{u} - \alpha\vec{u} + \gamma) + \beta\vec{\nabla}u + a\vec{u} = f. \quad (12)$$

Данное уравнение, использованное для термоэлектрической среды, приведено к виду  $\vec{\nabla}(-c\vec{\nabla}\vec{u}) = 0$ . Для этого  $e_a, d_a, \alpha, \gamma, \beta, a$  зануляются, а величину  $c$  записывают в виде матрицы:

$$c = \begin{pmatrix} \kappa + \alpha^2\sigma T + \sigma U\alpha & \alpha T\sigma + \sigma U \\ \alpha\sigma & \sigma \end{pmatrix}, \quad (13)$$

причем вектор  $\vec{u}$  имеет тоже вид матрицы:

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} T \\ U \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Для описания движения и теплообмена жидкости используется модуль Comsol Multiphysics-Non-Isothermal Flow [11]. Модуль включает систему уравнений Невье-Стокса, уравнение непрерывности и уравнение теплопередачи жидкости в стационарном режиме.

Значение электрического тока рассчитывалось через интеграл по площади сечения  $S_V$ :

$$I = \iint_{S_V} I_n dS_V, \quad (15)$$

где  $I_n = n_x I_x + n_y I_y + n_z I_z$  – вектор плотности электрического тока. Значения  $I_x, I_y, I_z$ , определялись соотношениями:

$$I_x = -\sigma \frac{\partial U}{\partial x} - \sigma\alpha \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (16)$$

$$I_y = -\sigma \frac{\partial U}{\partial y} - \sigma\alpha \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (17)$$

$$I_z = -\sigma \frac{\partial U}{\partial z} - \sigma\alpha \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (18)$$

Расход теплоносителя  $G$  определялся интегрированием скорости  $v$  по площади сечения канала на выходе жидкости  $S_{V1}$ :

$$G = \iint_{S_{V1}} \vartheta dS_{V1}. \quad (19)$$

Электрическая мощность термоэлемента  $W = I \cdot U$ , холодопроизводительность определялась через расход теплоносителя как  $Q_c = GC_p \Delta t$ , холодильный коэффициент  $\varepsilon = Q_c/W$ .

## Результаты компьютерных исследований энергетических характеристик жидкостного и воздушного проницаемых термоэлементов из материалов на основе *Bi-Te-Se-Sb*

Расчет проводился для материалов на основе *Bi-Te-Se-Sb*. Функциональные зависимости параметров материала – коэффициента термоЭДС  $\alpha$ , теплопроводности  $k$  и электропроводности  $\sigma$  от температуры – получены методом наименьших квадратов из экспериментальных данных.

Моделирование проницаемого термоэлемента осуществлялось для следующей базовой конструкции (рис. 2): высота  $h = 10$  мм, длина  $b = 10$  мм, ширина  $a = 2$  мм. Размеры нижней коммутации – высота  $j = 2$  мм, длина  $b = 10$  мм, ширина  $k = 4$  мм; верхней – высота  $d = 5$  мм, длина  $c = 10$  мм, ширина  $f = 8$  мм. Материал коммутации – медь. Коммутационные пластины имеют прорезы для прокачки теплоносителя, размеры которых – длина  $n = 8$  мм, ширина  $m = 2$  мм, расположены по центру пластины. Эти прорезы в коммутации вместе с ветвями образуют систему каналов для прокачки теплоносителя. Конструкция учитывает наличие переходного слоя припоя толщиной  $l = 0.5$  мм.

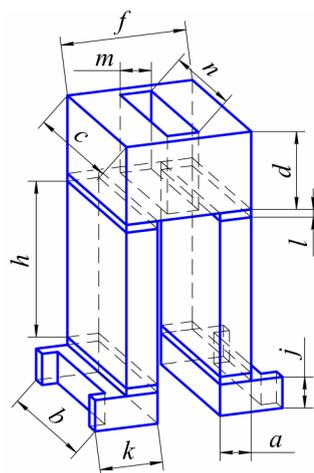


Рис. 2. Конструкция проницаемого термоэлемента.

Скорость теплоносителя на входе в термоэлемент принималась равной 0.1 мм/с, 0.5 мм/с, 1 мм/с, 2 мм/с, 3 мм/с, 4 мм/с и 5 мм/с. При каждом значении скорости напряжение питания принимало значения: 0.02 В, 0.04 В, 0.06 В, 0.08 В, 0.10 В, 0.12 В, 0.14 В, 0.16 В и 0.18 В. Коэффициент теплообмена между водой и термоэлементом ( $\alpha_T$ ), в законе Ньютона-Рихмана, принимался равным  $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Для указанных параметров определялись характеристики термоэлемента – значения электрического тока  $I$ , А; расхода  $G$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ; температуры жидкости на выходе  $t$ , °С; температуры холодных спаев термоэлемента  $T$ , °С; перепад температуры жидкости  $\Delta t$ , °С и термоэлемента  $\Delta T$ , °С; мощности  $W$ , Вт; холодопроизводительности  $Q_c$ , Вт; холодильного коэффициента  $\epsilon$ .

По результатам компьютерного расчета получены энергетические характеристики: холодопроизводительность, холодильный коэффициент (рис. 3 а) и перепад температуры воды и термоэлемента (рис. 3 б) в зависимости от напряжения на термоэлементе и различной скорости подачи воды.

Видно, что максимальное значение холодопроизводительности приходится на скорость  $v = 1$  мм/с и составляет  $Q_c = 0.68$  Вт при напряжении  $u = 0.07$  В, а преобразование энергии при максимальной холодопроизводительности происходит с термодинамической эффективностью  $\epsilon = 0.91$ . Перепад температуры термоэлемента составляет  $\Delta T = 6.3$  °С при напряжении  $u = 0.12$  В, а перепад температуры жидкости  $\Delta t = 2.25$  °С.

Для уточнения величины оптимальной скорости построена зависимость максимальной холодопроизводительности при оптимальном напряжении от скорости (рис. 4). На этом же рисунке приведена зависимость перепада температуры жидкости, которая получается при данных условиях.

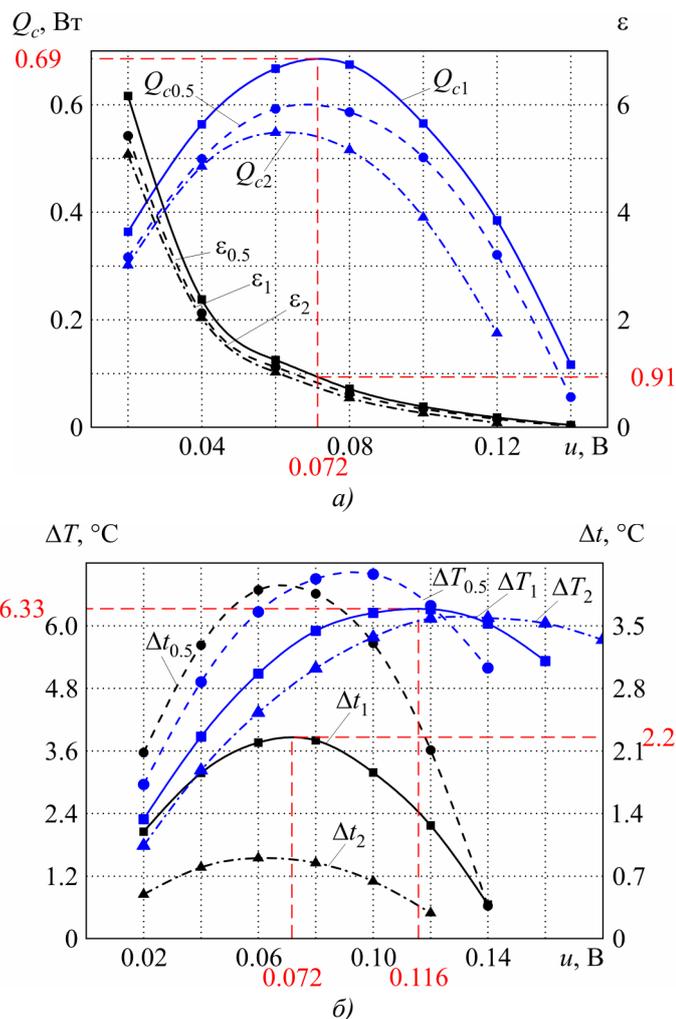


Рис. 3. Зависимости холодопроизводительности, холодильного коэффициента (а) и перепада температуры жидкости и термоэлемента (б) от напряжения для различной скорости:  $Q_{c0.5}$ ,  $Q_{c1}$ ,  $Q_{c2}$  – холодопроизводительности при скорости жидкости 0.5 мм/с, 1 мм/с, 2 мм/с соответственно;  $\varepsilon_{0.5}$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – холодильные коэффициенты при скорости жидкости 0.5 мм/с, 1 мм/с, 2 мм/с соответственно;  $\Delta T_{0.5}$ ,  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  – перепады температуры термоэлемента,  $\Delta t_{0.5}$ ,  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  – перепады температуры жидкости при скорости 0.5 мм/с, 1 мм/с, 2 мм/с.

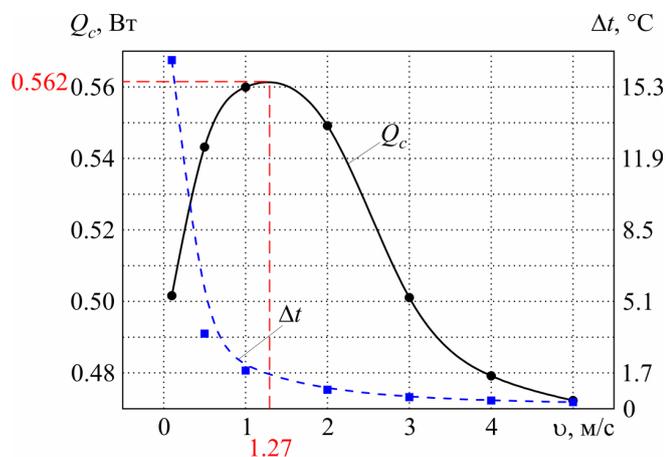


Рис. 4. Зависимости максимальной холодопроизводительности и перепада температур жидкости от скорости.

Видно, что максимальное значение холодопроизводительности достигается при скорости  $v = 1.27$  мм/с. Перепад температуры жидкости возрастает с уменьшением скорости, чем обеспечивается большая глубина охлаждения воды. Для большей глубины охлаждения необходима меньшая скорость подачи воды, однако холодопроизводительность при этом уменьшается. Видно, что существует рациональная область значений скорости подачи воды определяемая режимом работы термоэлемента.

Распределение поля температур в термоэлементе и жидкости при напряжении на термоэлементе  $u = 0.06$  В и оптимальной скорости воды на входе в канал  $v = 1.27$  мм/с приведено на рис. 5а. Распределение поля скоростей при этих условиях представлено на рис. 5 б.

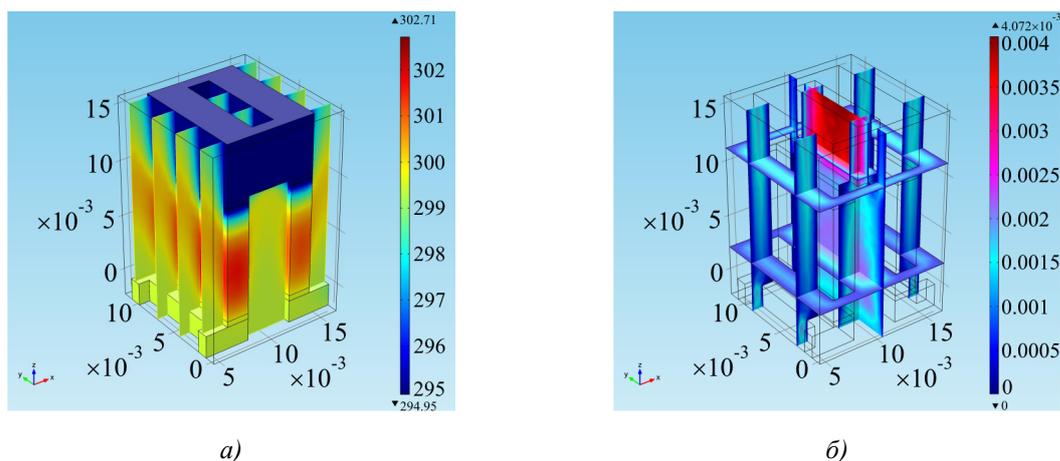


Рис. 5. Распределения температур в термоэлементе и жидкости (а) и распределение поля скоростей в жидкости (б).

На рис. 5 а видно, что средняя часть ветвей перегревается за счет тепловыделений Джоуля-Ленца и поступлению тепла от жидкости. Однако в области коммутации влияние тепла Пельтье является большим, что обеспечивает охлаждение воды. Из рис. 5 б видно, что максимум скорости достигается там, где сечение канала наименьшее.

На рис. 6 приведены зависимости энергетических характеристик жидкостного проницаемого термоэлемента при оптимальной скорости жидкости на входе в канал от напряжения на термоэлементе.

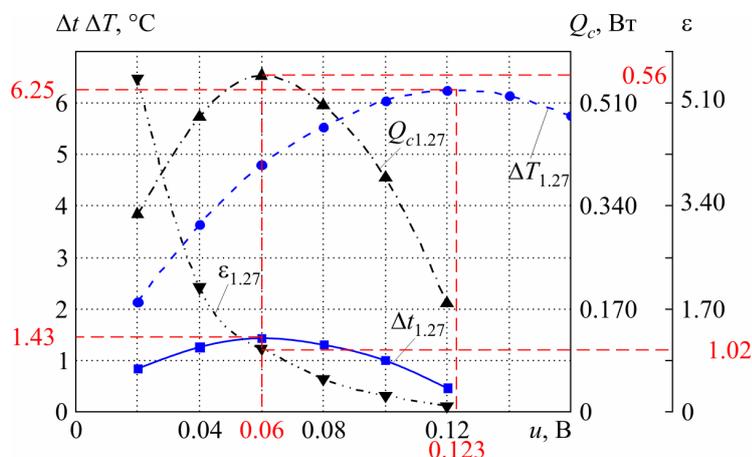


Рис. 6. Зависимости максимальной холодопроизводительности  $Q_c$ , холодильного коэффициента  $\epsilon$ , перепада температуры жидкости  $\Delta t$ , термоэлемента  $\Delta T$  от напряжения для оптимальной скорости.

Из рисунка видно, что максимальное значение холодопроизводительности  $Q_c = 0.56$  Вт достигается при напряжении  $u = 0.06$  В, а преобразование энергии в режиме максимальной холодопроизводительности происходит с термодинамической эффективностью  $\varepsilon = 1.023$ .

Максимальное значение перепада температуры термоэлемента равно  $\Delta T = 6.25$  °С при напряжении  $u = 0.12$  В, а жидкости –  $\Delta t = 1.43$  °С при напряжении  $u = 0.06$  В.

Была разработана аналогичная компьютерная модель для воздушного термоэлемента в режиме охлаждения. Особенностью данной модели проницаемого воздушного термоэлемента является то, что свойства теплоносителя заменяют на теплофизические свойства газа – воздуха. Коэффициент теплообмена на границе сред вода-воздух в законе Ньютона-Рихмана находится на уровне  $100$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Скорость воздуха на входе в канал принималась равной  $v = 0.4$  м/с. Как показывают экспериментальные исследования, приведенные в работе [6], данная скорость является оптимальной для указанной геометрии ветвей термоэлемента.

Распределение поля температур в термоэлементе и воздухе при скорости воздуха на входе в канал  $v = 0.4$  м/с и напряжения на термоэлементе  $u = 0.08$  В приведено на рис. 7 а; распределение поля скоростей в воздухе при этих условиях приведено на рис. 7 б.

Из рис. 7 а видно, что перегрев ветви за счет влияния эффекта Джоуля-Ленца и теплового потока из воздуха значительно меньше, чем у жидкостного проницаемого термоэлемента. Таким образом, можно сделать вывод о влиянии теплофизических свойств теплоносителя-жидкости или газа на поле температур. Наличие тепла Пельтье, поглощаемого в приконтактной области, преобладает над нагревом и обеспечивает охлаждение. Из рис. 7 б видно, что максимального значения скорость достигает там, где сечение канала наименьшее, что аналогично распределению поля скорости для воды.

На рис. 8 приведены зависимости энергетических параметров воздушного термоэлемента от напряжения, для скорости воздуха на входе в канал  $v = 0.4$  м/с.

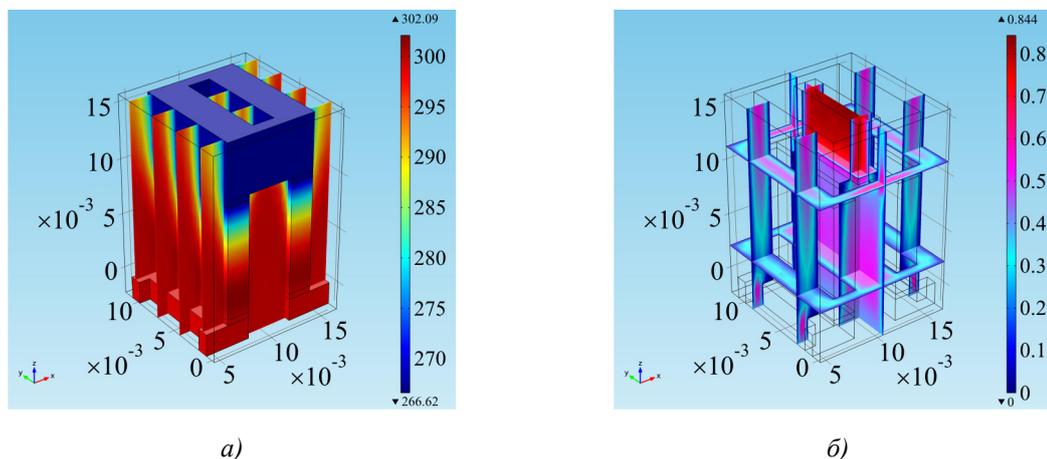


Рис. 7. Распределение поля температур в термоэлементе и воздухе (а) и распределение поля скоростей в воздухе (б).

Из рис. 8 видно, что максимальное значение холодопроизводительности воздушного проницаемого термоэлемента  $Q_c = 0.42$  Вт достигается при напряжении  $u = 0.086$  В, а преобразование энергии при максимальной холодопроизводительности происходит с эффективностью  $\varepsilon = 0.41$ . Максимальное значение перепада температуры воздушного проницаемого термоэлемента равно  $\Delta T = 35.7$  °С при напряжении  $u = 0.11$  В, а жидкости –  $\Delta t = 11.44$  °С при напряжении  $u = 0.086$  В.

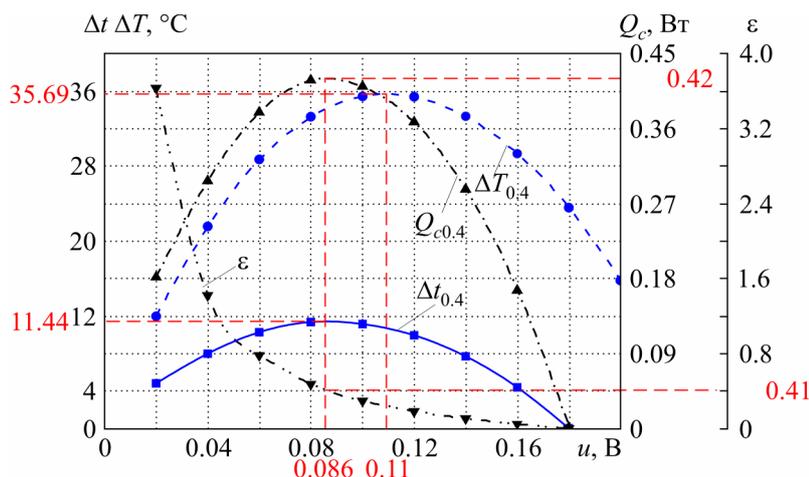


Рис. 8. Зависимость максимальной холодопроизводительности  $Q_c$ , холодильного коэффициента  $\varepsilon$ , перепада температуры воздуха  $\Delta T$ , термоэлемента  $\Delta T$  для оптимальной скорости от напряжения.

На основе полученных результатов расчета проницаемого термоэлемента охлаждения потоков жидкостей и газов в трехмерном случае при оптимальных условиях построены сравнительные зависимости холодопроизводительности и холодильного коэффициента, которые приведены на рис. 9.

Из приведенных зависимостей видно, что максимальное значение холодопроизводительности жидкостного проницаемого термоэлемента  $Q_{cB} = 0.56$  Вт достигается при меньшем значении напряжения на термоэлементе  $u = 0.06$  В, чем воздушного –  $Q_{cП} = 0.42$  Вт при напряжении  $u = 0.086$  В. При этом холодопроизводительность жидкостного термоэлемента превышает воздушный в 1.3 раза. Холодильный коэффициент жидкостного термоэлемента при напряжении  $u = 0.02$  В превышает воздушный в 1.5 раз, а при напряжении  $u = 0.06$  В – в 1.3 раза.

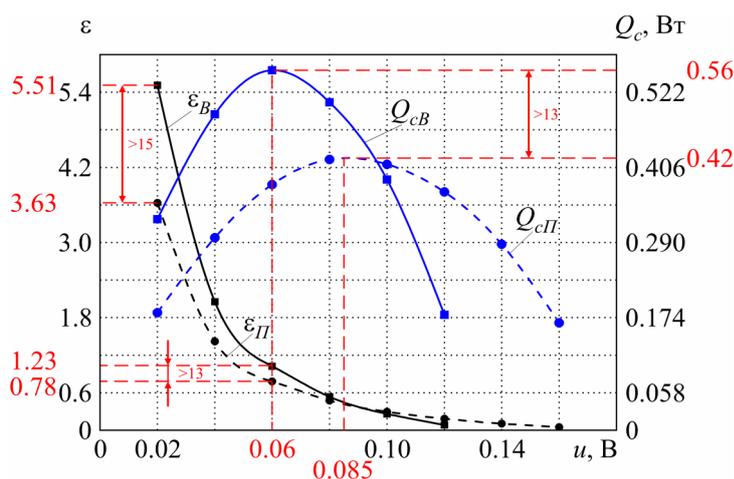


Рис. 9. Сравнительная зависимость холодопроизводительности  $Q_c$ , холодильного коэффициента  $\varepsilon$  для жидкости (индекс В) и воздуха (индекс П) от напряжения на термоэлементе при оптимальных условиях.

Таким образом, существуют оптимальные области значений напряжений, где энергетические возможности проницаемого термоэлемента для охлаждения воды преобладают над энергетическими возможностями для охлаждения воздуха. Поэтому необходимо

проведение многопараметрической оптимизации конструкционных и теплофизических параметров проницаемого термоэлемента, которая даст возможность определить максимальные термодинамические характеристики.

## Выводы

1. Разработана 3D модель проницаемого термоэлемента для охлаждения потоков жидкостей и газов в пакете прикладных компьютерных программ Comsol Multiphysics.
2. Определены распределения температур в материале ветвей термоэлемента и теплоносителя, потенциалов в термоэлементе, скоростей жидкости и энергетические характеристики проницаемого термоэлемента из материалов на основе *Bi-Te-Se-Sb*.
3. Исследовано влияние скорости прокачки теплоносителя и напряжения тока питания термоэлемента на перепад температур и характеристики преобразования энергии. Определены оптимальные значения скорости подачи воды на входе в каналы и разность потенциалов на термоэлементе, при которых реализуется максимальная холодопроизводительность при охлаждении жидкости и воздуха.
4. Сравнение результатов исследований показало наличие такого диапазона напряжений на термоэлементе, при которых жидкостный проницаемый термоэлемент превосходит воздушный в 1.3 – 1.5 раз.

## Литература

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: [справочник] / Л.И. Анатычук. – Киев: Наукова думка, 1979. – 768 с.
2. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Физика термоэлектричества: [том I] / Л.И. Анатычук. – Черновцы. – 2008. – 388 с.
3. G.J. Snyder, E.S. Toberer, Complex thermoelectric materials, *Nature materials* 7, 105 – 114 (2008).
4. Анатычук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества / Л.И. Анатычук // Термоэлектричество. – 2007. – № 2. – С. 7 – 20.
5. Анатычук Л.И. Оптимальное управление неоднородностью полупроводникового материала для проницаемых термоэлементов охлаждения / Л.И. Анатычук, Л.Н. Вихор, Р.Г. Черкез // Термоэлектричество. – 2000. – № 3 – С. 47 – 59.
6. Анатычук Л.И. Исследование энергетических характеристик проницаемого плоскостного термоэлемента / Л.И. Анатычук, Р.Г. Черкез, Д.Д. Демьянюк, Н.Р. Бухараева // Термоэлектричество. – 2012. – № 2. – С. 92 – 96.
7. Анатычук Л.И. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов / Л.И. Анатычук, В.А. Семенюк. – Черновцы: Прут, 1992. – 264 с.
8. Каденко И.М. Основы теплогидравлики ядерных энергетических установок / И.М. Каденко, О.М. Харитонов, Р.В. Ермоленко – К.: ВПЦ «Киевский университет», 2010. – 320 с.
9. Охрименко Д.И. Применение пакета COMSOL Multiphysics 3.4 для решения задач гидродинамики и теплообмена в химической технологии: [курс. роб.] / Д.И. Охрименко. – Д., 2009. – 64 с.
10. Бирюлин Г.В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL/FEMLAB: [методическое пособие] / Г.В. Бирюлин – С.-П.: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 78 с.
11. <http://www.comsol.com>.

Поступила в редакцию 09.10.2013.