электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51036. ISSN 2307-0595

Моделирование параметров термоэлектрических охлаждающих устройств

 # 11, ноябрь 2014

Иванов М. Ф., Царев А. В., Чугунков В. В.

УДК: 629.7.08, 621.565

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
chv.home@mail.ru

Для обеспечения эффективной работы приборов и электронной аппаратуры в различных по назначению устройствах и системах наземных комплексов ракетно-космической техники во многих случаях требуется применение жидкостных систем охлаждения с малогабаритными и высоконадежными охлаждающими устройствами, обладающими бесшумным функционированием и отсутствием вибраций.

Перечисленным требованиям удовлетворяют термоэлектрические охлаждающие устройства (ТОУ), которые являются преобразователями тепловой и электрической энергии. Простота конструкции и отсутствие движущихся частей в этих преобразователях обеспечивают высокую надежность и отсутствие вибраций. Термоэлектрические модули, являющиеся основой охлаждающего устройства, достаточно миниатюрны и легки. При этом термоэлектрические модули выходят на рабочий режим в течение нескольких секунд и обладают возможностью плавного регулирования их холодопроизводительности путем изменения напряжения питания.

Применение термоэлектрических охлаждающих устройств ограничено снижением их эффективности при высоком температурном напоре между объектом охлаждения и средой, используемой для отвода теплоты. Однако, при небольшом температурном напоре их эффективность может быть сравнима с эффективностью парокомпрессионных холодильных машин, являющихся наиболее эффективными источниками холода.

Принципы построения устройств на основе термоэлектрических эффектов и методик для моделирования их параметров изложены в ряде работ [1-10], в большинстве из которых подробно описаны характеристики термоэлементов, но при этом не рассматриваются вопросы подвода теплоты к холодным спаям термоэлементов и охлаждения их горячих спаев. В связи с отмеченным обстоятельством поставлена задача создания методического аппарата и расчетных методик, позволяющих моделировать процессы теплообмена и преобразования энергии в ТОУ с использованием аналитических и численных методов.

Рассматриваются ТОУ с теплообменниками типа “жидкость-жидкость”, которые обеспечивают за счет потребления электрической энергии передачу теплоты с низкого

температурного уровня на более высокий: от охлаждаемого жидкого теплоносителя к нагреваемому жидкому теплоносителю. Конструктивно данные устройства состоят из термоэлектрических сборок (ТСБ), представляющих собой пару изготовленных из прямоугольного профиля теплообменников, между которыми размещены термоэлектрические модули (ТМ). В зависимости от требуемых параметров охлаждения, входящие в ТОУ сборки могут быть включены в каналы течения теплоносителей последовательно либо параллельно. Схемы ТСБ приведены на рис.1 и 2.

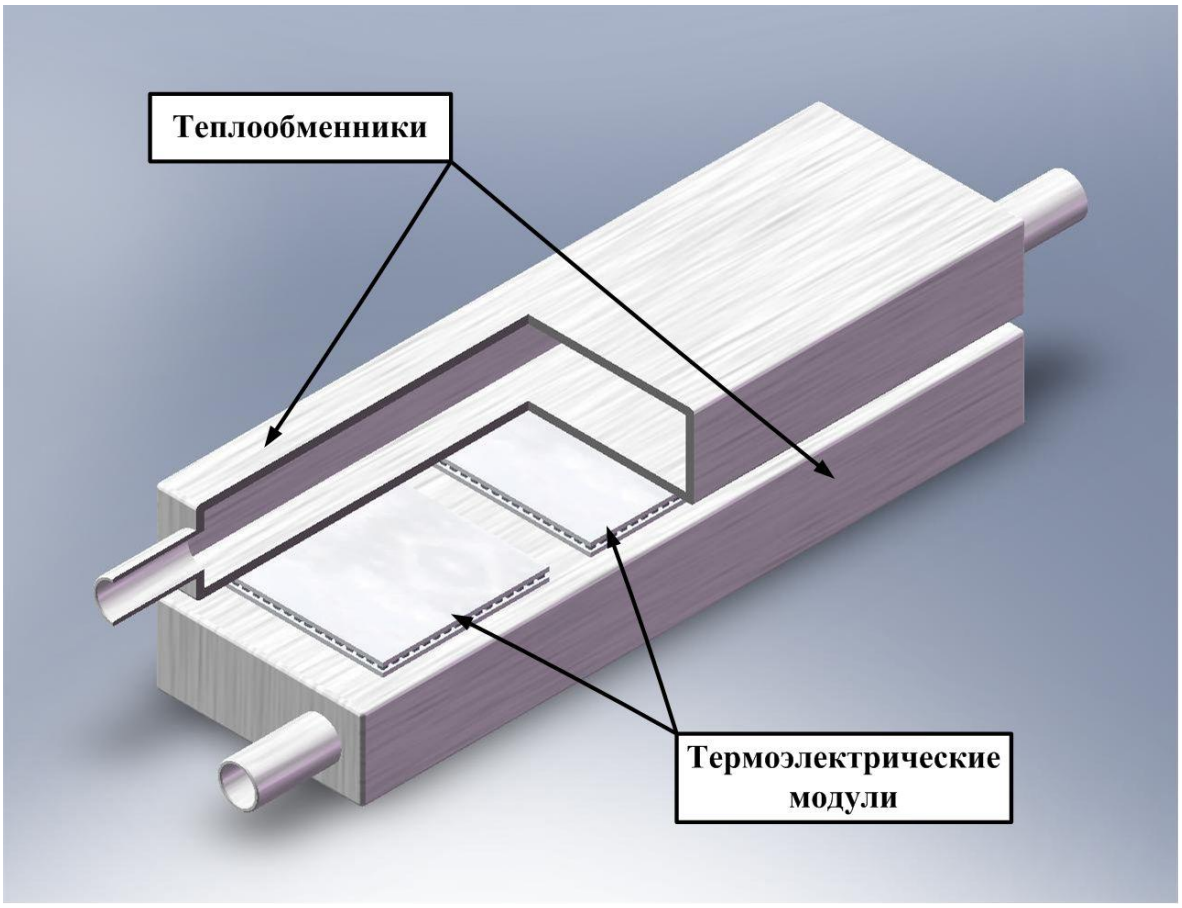

Рис. 1. Конструктивная схема термоэлектрической сборки с теплообменниками типа “жидкость-жидкость”

$W_{НАР}$, $W_{ВН}$, $H_{НАР}$, $H_{ВН}$ – геометрические размеры сечения теплообменников; b – толщина стенки теплообменников; *l* – высота ветвей термомодулей; h – толщина изоляторов термомодулей; $W_{ЭЛ}$ – ширина пятна контакта термомодуля с поверхностью теплообменников.

Особенностью разработанного подхода является использование комбинации аналитических и численных методов. На начальном этапе расчетного анализа определение характеристик ТОУ в заданных условиях функционирования осуществляется при помощи аналитических зависимостей, связывающих геометрические размеры теплообменников, параметры теплоносителей, а также параметры термоэлектрических модулей и источника

электропитания с холодопроизводительностью и холодильным коэффициентом термоэлектрических сборок.

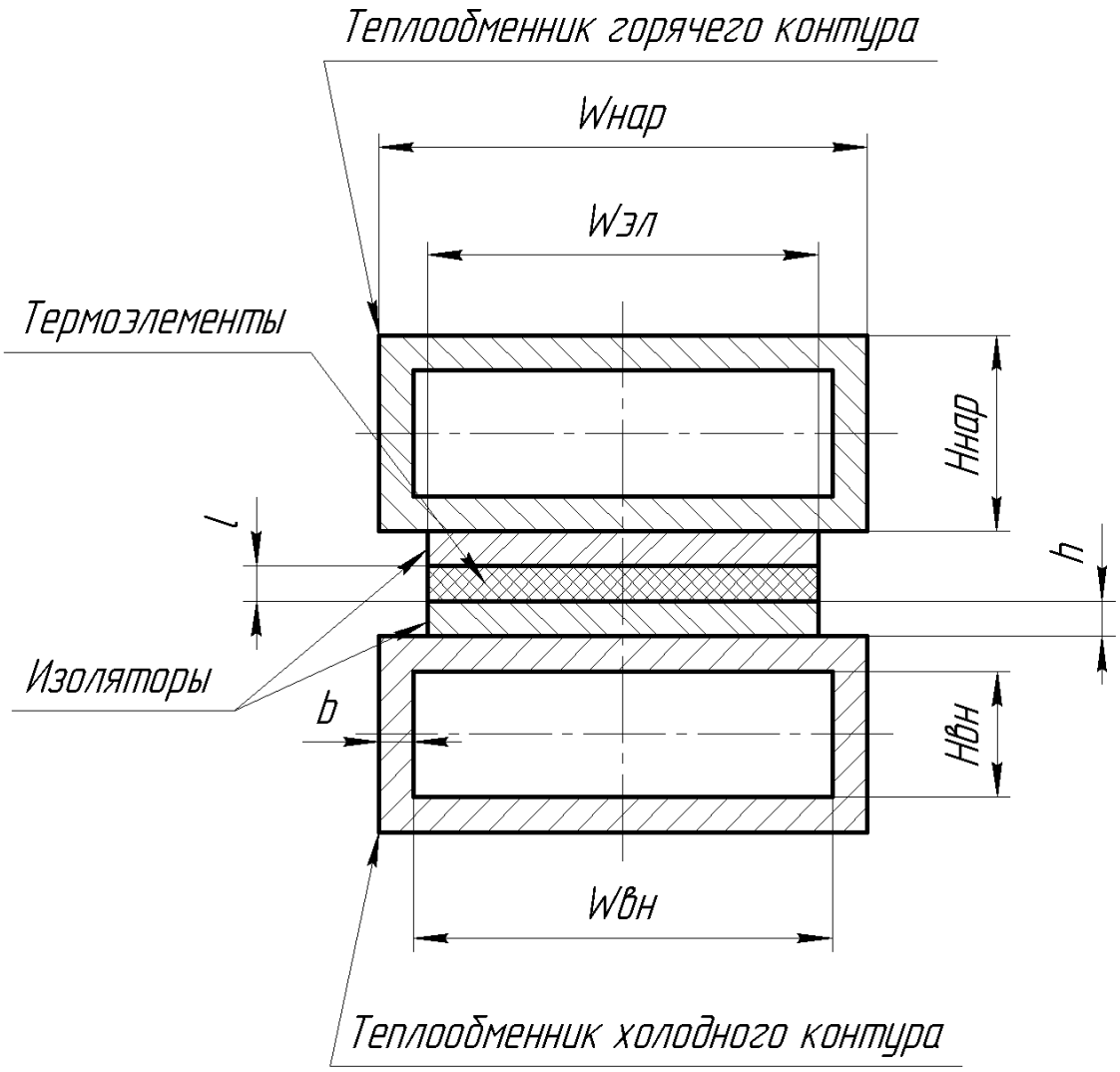

Рис. 2. Схема поперечного сечения термоэлектрической сборки

Методика расчета, позволяющая определять характеристики ТОУ, основана на аналитических моделях, что обусловлено необходимостью выполнения на ранних стадиях проектирования широкого круга оптимизационных расчетов, определяющих конструкцию разрабатываемого ТОУ. Данная методика может быть использована для предварительного анализа вариантов применения ТОУ для заданных условий функционирования.

Задача о вычислении распределения температур по сечению теплообменника ТОУ может быть сведена к задаче о распределении температур в эквивалентном ребре прямоугольного сечения, имеющей известное аналитическое решение [11]. Переход к эквивалентному ребру (рис. 3) обусловлен симметрией температурных полей по сечению теплообменника относительно вертикальной оси.

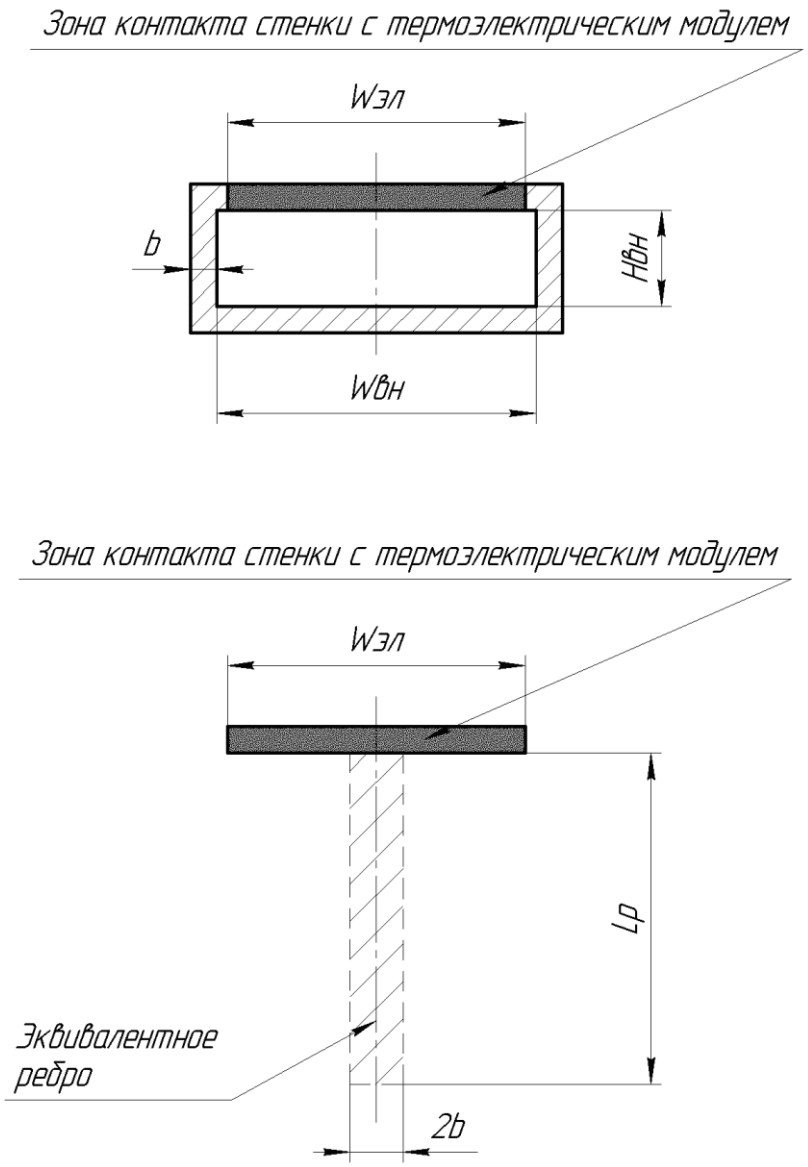

Рис.3. Схема приведения задачи по вычислению распределения температур по сечению теплообменника к расчетной схеме с эквивалентным ребром.

b – толщина стенки теплообменника; $W_{ЭЛ}$ – ширина зоны контакта стенки теплообменника с термомодулями; $W_{ВН}$ – ширина проходного сечения; $H_{ВН}$ – высота проходного сечения; L_P – длина эквивалентного ребра.

Толщина эквивалентного ребра равна удвоенной толщине стенки теплообменника:

$$w = 2b$$

Длина эквивалентного ребра равна:

$$Lp = Wвн – Wэл / 2 + Hвн$$

Площадь эквивалентного ребра:

$$Fp = 2\ Lp\ Lб\ ,$$

где: Lб – длинна теплообменника.

Площадь внутренней поверхности теплообменника:

$$F = 2\ Wвн\ Lб + 2\ Hвн\ Lб\ .$$

Для получения аналитического решения принят ряд допущений, основными из которых являются:

- пренебрежение теплообменом ТСБ с окружающей средой, что допустимо при нанесении тепловой изоляции на открытые поверхности ТСБ;

- пренебрежение контактным тепловым сопротивлением между поверхностью термомодулей и теплообменниками

- постоянство коэффициентов теплоотдачи к теплоносителям на внутренних поверхностях теплообменников;

- малость влияния торцевых стенок, зазоров между модулями и крепежа, стягивающего теплообменники, на теплообмен в ТСБ.

В предположении о том, что распределение температуры по толщине эквивалентного ребра равномерное, его температурное состояние описывается уравнением [11]:

$$\frac{t - t_{Ж}}{t_{ОСН} - t_{Ж}} = \frac{ch\left(m\,Lp\left(1 - \frac{x}{Lp}\right)\right)}{ch(m\,Lp)}$$

$$m = \sqrt{\frac{2\,\alpha}{\lambda\,w}};$$

где: $t_Ж$ – температура теплоносителя; $t_{ОСН}$ – температура основания ребра; t – температура в точке, расположенной на расстоянии x от основания ребра; α – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности материала ребра; w – толщина эквивалентного ребра.

Тепловой поток, отводимый теплообменником от теплоносителя, определяется уравнением

$$Q = \alpha\,(t_{ОСН} - t_Ж)\,\eta_O\,s\,,$$

где: s – площадь внутренней поверхности теплообменника;

$$\eta_O = 1 - \frac{Fp}{F}(1 - \eta_P); \qquad \eta_P = \frac{th\,(m\,Lp)}{m\,Lp}$$

Отводимый теплообменником тепловой поток полностью проходит через изоляторы термоэлектрических модулей:

$$Q = \lambda_К\,\frac{s_К}{h_К}\,\Delta T_К\,,$$

где: $\lambda_К$ – коэффициент теплопроводности керамики изоляторов ТМ; $s_К$ – площадь поверхности изоляторов; $h_К$ – толщина; $\Delta T_К$ – перепад температур на керамических изоляторах ТМ.

В соответствии с принятым допущением об изменения температуры по сечению стенки теплообменника в зоне контакта с ТМ:

$$\frac{\lambda_{\text{В}}}{\text{b}}\,\Delta T_{\text{В}} = \alpha\left(t_{\text{ОСН}} - t_{\text{Ж}}\right),$$

где: $\lambda_{\text{В}}$ – коэффициент теплопроводности материала теплообменников.

Математическая модель теплообмена термоэлектрической сборки может быть представлена в виде системы линейных уравнений:

$$\begin{cases}
\text{Q}_{\text{Х}} = \text{e}_{\text{СБ}}\,\text{I}\,\text{T}_{\text{Х}} - \frac{1}{2}\text{I}^2\text{R}_{\text{СБ}} - \frac{\text{e}_{\text{СБ}}{}^2(\text{T}_{\text{Г}} - \text{T}_{\text{Х}})}{\text{R}_{\text{СБ}}\,\text{z}} \\
\text{Q}_{\text{Г}} = \text{e}_{\text{СБ}}\,\text{I}\,\text{T}_{\text{Г}} + \frac{1}{2}\text{I}^2\,\text{R}_{\text{СБ}} - \frac{\text{e}_{\text{СБ}}{}^2(\text{T}_{\text{Г}} - \text{T}_{\text{Х}})}{\text{R}_{\text{СБ}}\,\text{z}} \\
\text{Q}_{\text{Х}} = \lambda_{\text{К}}\frac{\text{s}_{\text{К}}}{\text{h}_{\text{К}}}\left(\text{T}_{\text{ХК}} - \text{T}_{\text{Х}}\right) \\
\text{Q}_{\text{Г}} = \lambda_{\text{К}}\frac{\text{s}_{\text{К}}}{\text{h}_{\text{К}}}\left(\text{T}_{\text{Г}} - \text{T}_{\text{ГК}}\right) \\
\text{Q}_{\text{Х}} = \alpha_{\text{Х}}\,\text{s}_{\text{В}}\,\eta_{\text{Х}}\left(\text{T}_{\text{ХТ}} - \text{T}_{\text{ХО}}\right) \\
\text{Q}_{\text{Г}} = \alpha_{\text{Г}}\,\text{s}_{\text{В}}\,\eta_{\text{Г}}\left(\text{T}_{\text{ГО}} - \text{T}_{\text{ГТ}}\right) \\
\frac{\lambda_{\text{В}}}{\text{b}}\left(\text{T}_{\text{ХО}} - \text{T}_{\text{ХК}}\right) = \alpha_{\text{Х}}\left(\text{T}_{\text{ХТ}} - \text{T}_{\text{ХО}}\right) \\
\frac{\lambda_{\text{В}}}{\text{b}}\left(\text{T}_{\text{ГК}} - \text{T}_{\text{ГО}}\right) = \alpha_{\text{Г}}\left(\text{T}_{\text{ГО}} - \text{T}_{\text{ГТ}}\right)
\end{cases}$$

где: $\text{Q}_{\text{Х}}$ – холодопроизводительность сборки; $\text{Q}_{\text{Г}}$ – теплота, передаваемая в единицу времени теплоносителю горячего контура; $\text{e}_{\text{СБ}}$ – суммарный коэффициент термоэлектрической движущей силы (ТЭДС) сборки; $\text{R}_{\text{СБ}}$ – суммарное электрическое сопротивление сборки; I – ток, протекающий через сборку; z – добротность термоэлементов сборки; $\eta_{\text{Х}}$ и $\eta_{\text{Г}}$ – коэффициенты эффективности оребрения внутренней поверхности теплообменников холодного и горячего контуров.

$$\text{e}_{\text{СБ}} = 2\,\text{n}\,\text{m}\,\text{e}_{\text{ЭЛ}}, \qquad \text{R}_{\text{СБ}} = 2\,\text{n}\,\text{m}\,\rho_{\text{ЭЛ}}\,\text{h}_{\text{ЭЛ}} / \text{w}_{\text{ЭЛ}}{}^2,$$

где: n – количество пар ветвей в модулях; m – количество модулей в сборке; $\text{e}_{\text{ЭЛ}}$, $\text{h}_{\text{ЭЛ}}$, $\text{w}_{\text{ЭЛ}}$, $\rho_{\text{ЭЛ}}$ – коэффициент ТЭДС, высота, ширина и удельное электрическое сопротивление ветви модуля. Схема обозначений температур в ТСБ приведена на рис. 4.

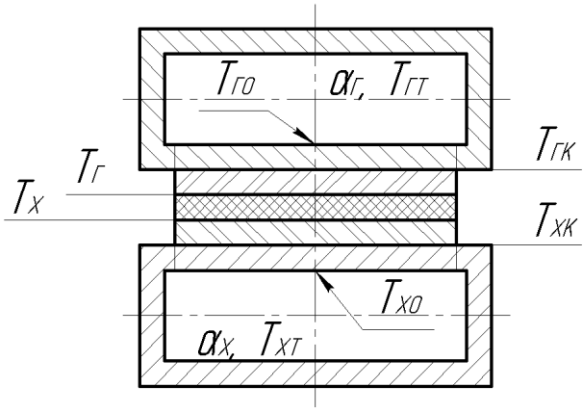

Рис. 4. Схема обозначений температур в термоэлектрической сборке.

T_{XT} и $T_{ГТ}$ - температура теплоносителя в холодном и горячем контурах; T_{XK} и $T_{ГК}$ - температуры керамических изоляторов термоэлементов; T_{XO} и $T_{ГО}$ - температуры внутренней поверхности стенки в зоне контакта с термоэлектрическим модулем; T_X и $T_Г$ - температуры холодного и горячего спаев.

Для проверки результатов вычислений по предложенной модели функционирования термоэлектрической сборки и определения распределении температур по сечению стенки теплообменника, было выполнено численное моделирование распределения температур в стенке теплообменника с использованием программного комплекса ANSYS. Расчеты проводились для условий эксплуатации, с использованием расчетной схемы, приведенной на рис. 5.

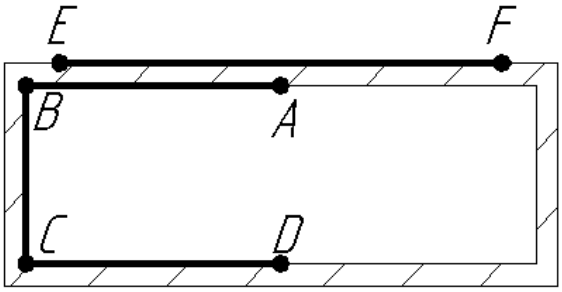

Рис. 5. Расчетная схема для определения температуры стенки теплообменника.

В расчетной схеме отрезок EF моделирует холодную сторону термоэлектрического модуля, на котором задавались граничные условия первого рода. На внутренней поверхности теплообменника задавались граничные условия третьего рода.

Расчеты были выполнены для теплообменников с размерами поперечного сечения 50x20x2мм в двух вариантах. Первый вариант предполагал, что теплообменники изготовлены из алюминиевого сплава АД31. Во втором варианте рассматривались теплообменники из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Сравнение результатов расчетов, приведенное на 6 и 7, показывает удовлетворительное согласование результатов расчетов по предложенной модели с результатами численного решения. При этом погрешность вычисления теплового потока составляет 3,8% для алюминиевого сплава АД31, и 3,5% для нержавеющей стали 12Х18Н10Т. На рис.8. и рис. 9. представлены полученные распределения температур по сечению стенки теплообменников.

Влияние теплопроводности материала, из которого изготовлены теплообменники, на эффективность охлаждающего устройства зависит от режима работы ТОУ, и его целесообразно рассматривать применительно к конкретным вариантам систем охлаждения.

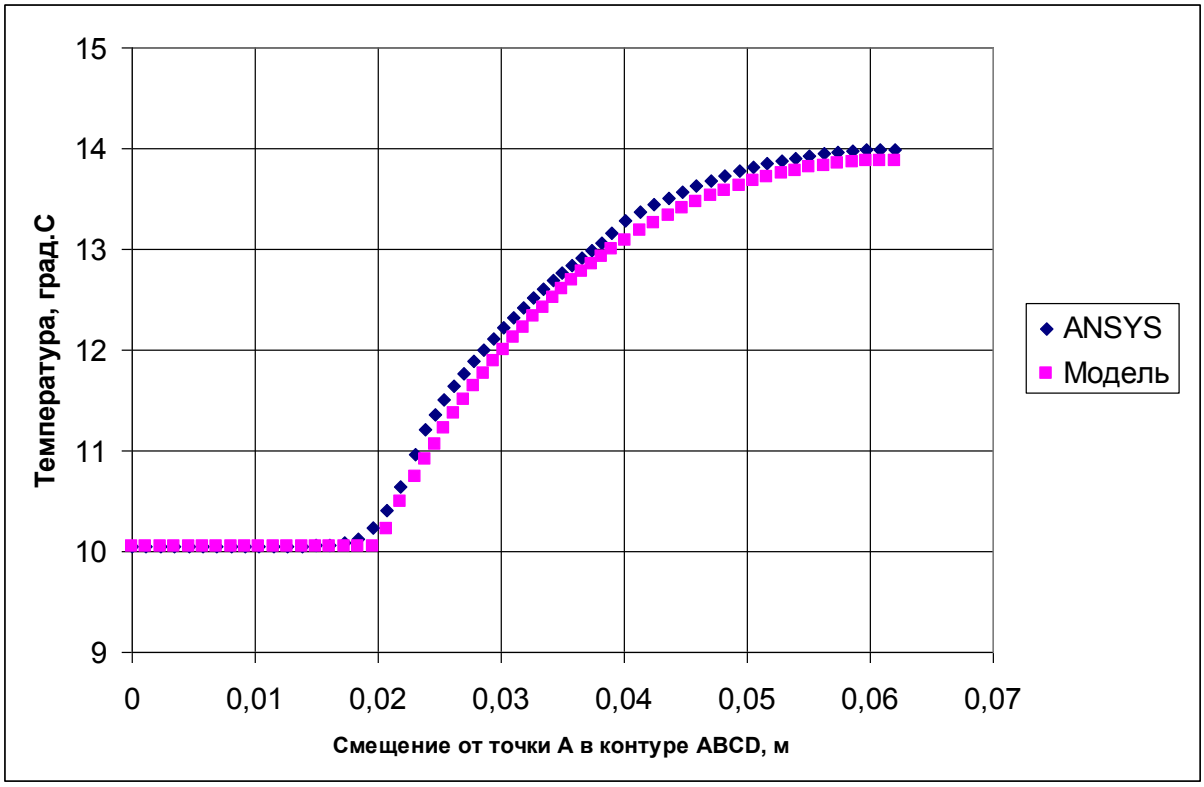

Рис. 6. Распределение температуры в стенке теплообменника, выполненного из алюминиевого сплава АД31.

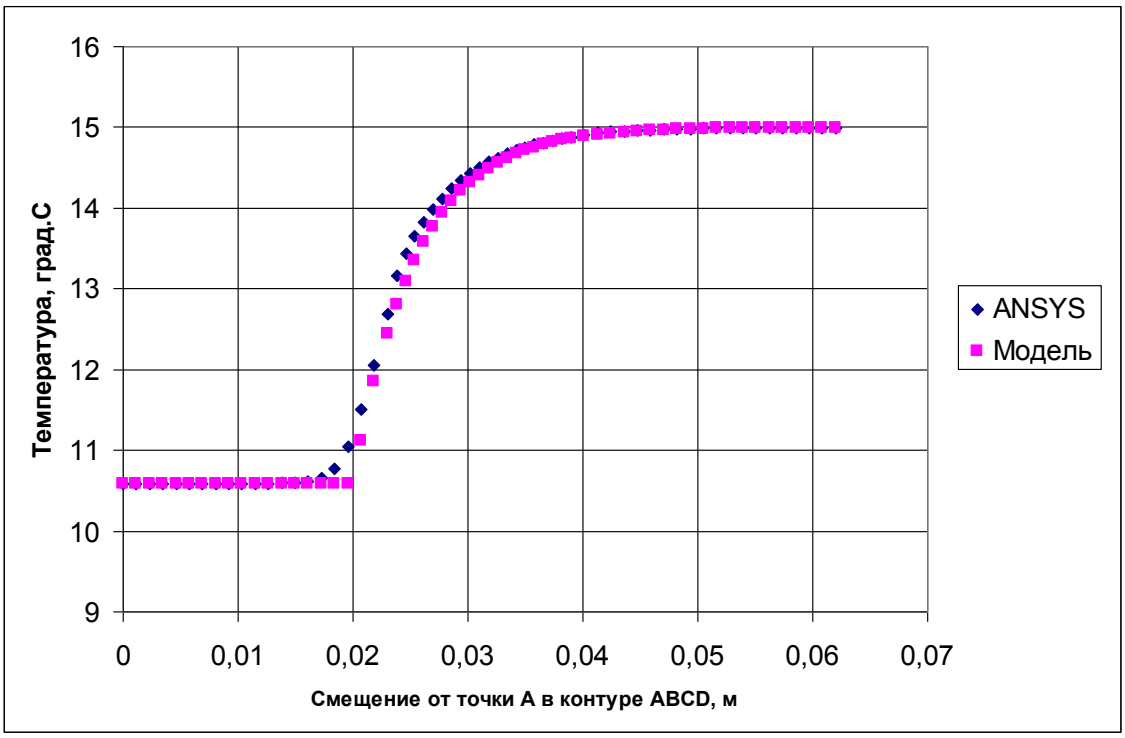

Рис. 7. Распределение температуры в стенке теплообменника, выполненного из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

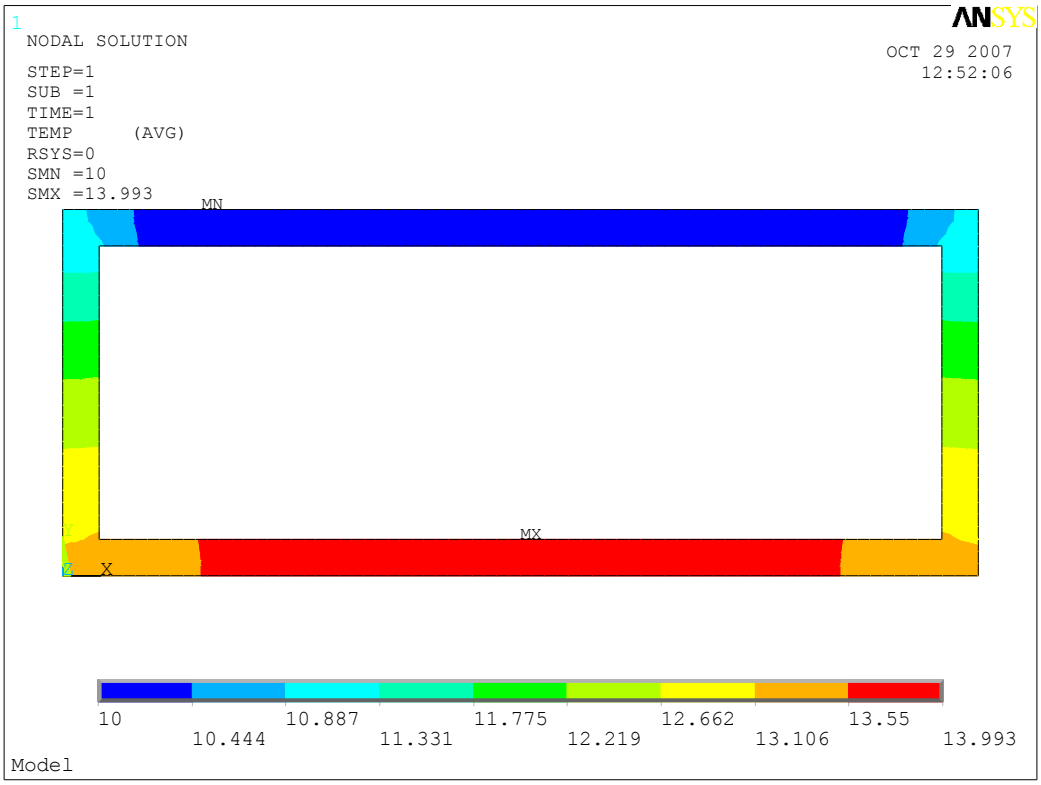

Рис. 8. Распределение температур по сечению теплообменника, выполненного из алюминиевого сплава АД31.

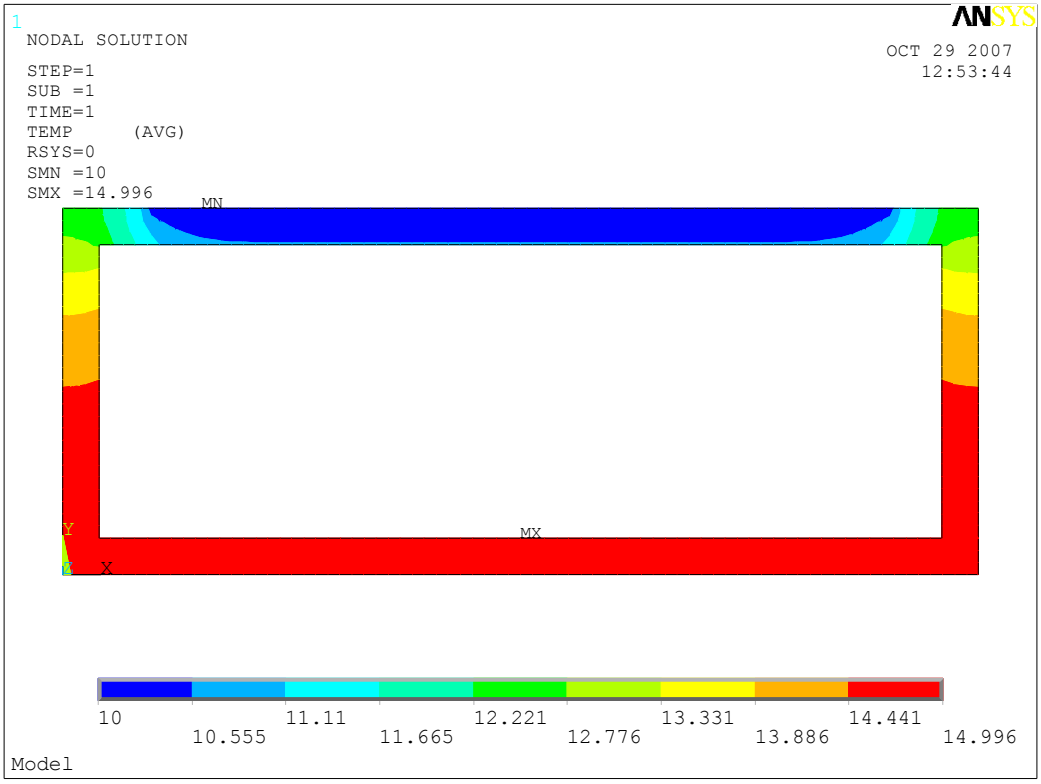

Рис. 9. Распределение температур по сечению теплообменника, выполненного из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Характеристики охлаждающего устройства, включающего в себя несколько термоэлектрических сборок, могут быть найдены путем последовательного решения систем уравнений для всех входящих в него ТСБ.

Одно из достоинств данной методики расчета это аналитическое представление расчетных зависимостей, благодаря чему возможно выполнение широкого круга оптимизационных вычислений [12-14].

Рассмотренные ТСБ имеют простую и технологичную конструкцию и могут быть изготовлены из стандартных металлических профилей без использования специализированного оборудования, что значительно упрощает построение систем охлаждения на их основе [12-14]. Хотя конструкция теплообменников не являются идеальными по эффективности теплоотдачи, данные ТСБ могут служить базой для разработки более совершенных систем, имеющих более высокие энергетические характеристики.

Список литературы

1. Булат Л.П. Термоэлектрическое охлаждение / Л.П. Булат – СПб.: СПбГУНиПТ, 2002. – 146 с.
2. Булат Л.П., Термоэлектрические охлаждающие устройства: Методические указания для студентов специальности 070200 “Техника и физика низких температур” / Л.П. Булат, Е.В. Бузин – СПб.: СПбГУНиПТ, 2001. – 41 с.

3. Баукин В.Е. Инженерная методика расчета стационарных режимов термоэлектрических систем охлаждения / В.Е. Баукин, А.В. Винокуров // Термоэлектрики и их применения. Доклады VII Межгосударственного семинара. – СПб.: ФТИ, 2000. – С. 267-272.
4. Анатычук Л.И. Термоэлемены и термоэлектрические устройства : Справочник / Л.И. Анатычук – Киев : “Наукова думка”, 1979. – 765 с.
5. Булат Л.П. Термоэлектрическое охлаждение: состояние и перспективы / Л.П. Булат // Холодильная техника. – 1999. – № 7. – С. 12–14.
6. Rowe D.M. Handbook of Thermoelectric / D.M. Rowe – London : CRC-Press, 1995. – 701 p.
7. Бурштейн А.И. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств / А.И. Бурштейн – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 135 с.
8. Вайнер А.Л. Каскадные термоэлектрические источники холода / А.Л. Вайнер – М.: Советское радио, 1976. – 136 с.
9. Гольцман Б.М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi2Te3 / Б.М. Гольцман, В.А. Кудинов – М.: Наука, 1972. – 307 с.
10. Каганов М.А. Термоэлектрические тепловые насосы (теоретические основы расчета) / М.А. Каганов, М.Р. Привин – Л.: Энергия, 1970. – 172 с.
11. Исаев С.И., Кожинов И.А. Теория тепломассообмена / С.И. Исаев, И.А. Кожинов – М.: Высшая школа, 1979. – 495 с.
12. Царев А.В., Чугунков В.В., Коваленко В.В. Моделирование систем преобразования тепловой энергии с целью определения их эффективности и особенностей функционирования // Актуальные проблемы российской космонавтики: Материалы XXXI академических чтений по космонавтике – М.: Комиссия РАН, 2007. – С. 295-296.
13. Царев А.В., Чугунков В.В. Исследование характеристик термоэлектрических устройств для систем термостатирования стартовых комплексов // Актуальные проблемы российской космонавтики: Материалы XXXII академических чтений по космонавтике – М.: Комиссия РАН, 2008. – С. 320-321.
14. Царев А.В., Чугунков В.В. Методики расчета и результаты испытаний термоэлектрических охлаждающих устройств для систем термостатирования стартовых комплексов / А.В. Царев, В.В. Чугунков // Актуальные проблемы российской космонавтики: Материалы XXXIII академических чтений по космонавтике – М.: Комиссия РАН, 2009. – С. 306-307.